

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II

L. inw.

4915

HER FÜR DEN REALISTISCHEN
N HÖHEREN SCHULEN
ON A. HÖFLER UND F. POSKE
BAND IV

DIDAKTIK
DES
PHYSIKALISCHEN UNTERRICHTS

VON
FRIEDRICH POSKE



VERLAG VON B. G. TEUBNER IN LEIPZIG UND BERLIN

DIDAKTISCHE HANDBÜCHER

FÜR DEN REALISTISCHEN UNTERRICHT AN HÖHEREN SCHULEN

Herausgegeben von

DR. A. HÖFLER

DR. F. POSKE

o. ö. Professor an der Universität Wien Professor am Askanischen Gymnasium zu Berlin
gr. 8. In Leinwand geb.

Für den realistischen Unterricht an den höheren Schulen hat bisher keine feste Tradition für den Sprachunterricht bestanden, aber doch sind die prinzipiellen Fragen heute so weit geklärt, daß es möglich sein wird, konkrete Beispiele der Stoffgestaltung zu geben, die als Grundlage weiteren Fortschreitens dienen können. Die „Didaktischen Handbücher“ sollen demnach den praktischen Bedürfnissen des Lehrers entgegenkommen, der durchdrungen ist von der Größe der Aufgaben, die durch einen allseitigen Sachunterricht und nur durch ihn zu lösen sind, der sich aber auch der Schwierigkeiten bewußt ist, die mit diesen Aufgaben verknüpft sind. Zugleich sollen die „Didaktischen Handbücher“ der Zerspaltung entgegenwirken, die bei der wachsenden Zahl realistischer Unterrichtsfächer zu fürchten ist, und vielmehr die Einheit dieser Fächer durch möglichst zahlreiche und innige Verknüpfungen zwischen ihnen herzustellen suchen.

Bisher erschienen:

I. Band. Didaktik des mathematischen Unterrichts von A. Höfler. Mit 2 Tafeln und 147 Fig. [XVIII u. 509 S.] 1910. Geb. n. M. 12.—

Dieser erste Band der Sammlung didaktischer Handbücher für den realistischen Unterricht will Impulse geben, um die von Klein verlangte „zeitgemäße Umgestaltung des mathematischen Unterrichts“ in die Wirklichkeit umzusetzen. Vorbildlich sind die von Gutzmer auf der Meraner Naturforscherversammlung 1905 erstatteten Vorschläge. Im zweiten, ausführlichsten Teile werden Lehrproben, Lehrgänge, Lehrpläne als konkrete Beispiele einer neuen Unterrichtspraxis vorgeführt. Im ersten Teile werden die Wege und Ziele eines solchen mathematischen Unterrichts skizziert; im dritten folgen Blicke in die Grenzgebiete der didaktischen Psychologie, Erkenntnis- und Bildungslehre.

II. Band. Didaktik der Himmelskunde und der astronomischen

Geographie von A. Höfler. Mit Beiträgen von W. Förster, Berlin; K. Haas, Wien; M. Koppe, Berlin; S. Oppenheim, Wien; A. Schülke, Tilsit. Mit 2 Taf. u. 80 Fig. [XII u. 414 S.] 1913. Geb. M. 12.—

Allgemein wird die Schwierigkeit und zugleich der Mißerfolg des herkömmlichen Unterrichts der „mathematischen Geographie“ beklagt. Diese hatte von ganz unreifen Schülern der untersten Klassen eine Kenntnis der „wirklichen“ Bewegungen der Erde nach dem kopernikanischen Systeme verlangt und aus ihnen die fälschlich als „scheinbar“ bezeichneten, in Wahrheit aber allein der sinnlichen Anschauung zugänglichen Bewegungen der Sonne am Tageshimmel, sowie die Beleuchtungs- und Erwärmungsverhältnisse der ganzen Erdoberfläche deduzieren zu müssen geglaubt, ehe mit den Schülern noch irgendwelche Erscheinungen beobachtet und ihre Gesetze induziert sind. In scharfem Gegensatz zu solchen didaktischen Verkehrtheiten schließt sich der Verfasser des vorliegenden Bandes den schon nicht mehr wenigen besonnenen Didaktikern an, die auch für diese Elemente der Geographie die allgemein anerkannten didaktischen Methoden des sonstigen naturwissenschaftlichen Unterrichts gefordert haben.

IV. Band. Didaktik des physikalischen Unterrichts von F. Poske. Mit 33 Fig. [X u. 428 S.] 1915. Geb. M. 12.—

Vorliegender Band bringt in seinem allgemeinen Teil Darlegungen über die Methode der physikalischen Forschung und baut auf dieser die Methode des physikalischen Unterrichts auf; im Anschluß daran werden einzelne didaktische Fragen, so besonders die der physikalischen Schülerübungen, behandelt. Im speziellen Teil wird der gesamte Unterrichtsstoff einer eingehenden Besprechung und Sichtung unterzogen, wobei der Gesichtspunkt der „Problemphysik“ als maßgebend festgehalten ist. Den Schluß bilden Auseinandersetzungen über die Organisation des physikal. Unterrichts und seine Eingliederung in den gesamten Unterrichtsplan.

VII. Band. Didaktik des botanischen Unterrichts. Didaktische Handbücher für den realist. Unterricht an höh. Schulen, hrsg. von A. Höfler u. F. Poske. Von B. Landsberg, weil. Prof. am Kgl. Wilhelms-Gymnas. zu Königsberg i. Pr. Mit 19 Fig. [XIII u. 303 S.] 1910. Geb. M. 8.—

Die Ausdehnung des biologischen Unterrichtes auf die Oberklassen machte eine Umgestaltung des gesamten Unterrichtes notwendig, insofern als manche Stoffe jetzt nach der Oberstufe übernommen, andere auf der Mittelstufe mit größerer Betonung als früher abgehandelt werden können. So ist eine erneute didaktische Durcharbeitung des ganzen botanischen Lehrstoffes geboten, insbesondere auch mit Rücksicht darauf, wie praktische Übungen und Demonstrationsunterricht zusammen zu arbeiten und den Anteil der Biologie an der allgemein mensch-

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299011

VERLAG VON B. G. TEUBNER IN LEIPZIG UND BERLIN

lichen Bildung in vollem Maße zu verwirklichen. Hierzu gehört ferner, daß die philosophischen Elemente des Faches, d. h. die Grundbegriffe und Methoden, die für eine philosophische Propädeutik auf naturwissenschaftlicher Grundlage verwendbar sind, sorgsam herausgearbeitet werden. Auch in dieser Richtung will die vorliegende Didaktik die Wege bahnen helfen.

In Vorbereitung befinden sich:

- III. Band. **Physische Geographie.**
V. „ **Chemie** von O. Ohmann in Pankow.
VI. „ **Mineralogie und Geologie** von R. Watzel in Prag.
VIII. „ **Zoologie und menschliche Somatologie** von C. Matzdorff in Pankow.
IX. „ **Philosophische Propädeutik** von A. Höfler in Wien.
X. „ **Das Verhältnis der realistischen Unterrichtsfächer zu den sogenannten humanistischen** von A. Höfler in Wien.

Ausführlicher Prospekt umsonst und postfrei vom Verlag

Monatshefte für den naturwissenschaftlichen Unterricht aller Schulstufen.

Herausgegeben von B. Schmid in Zwickau i. S. VIII. Jahrgang. 1915.
Jährlich 12 Hefte zu je 48 Druckseiten. gr. 8. Preis halbjährlich M. 7.—

Zeitschrift für mathem. u. naturwissenschaftl. Unterricht aller Schulstufen.

Begründet 1869 von J. C. V. Hoffmann. Herausg. von H. Schotten in Halle a. S. und W. Lietzmann in Jena. 46. Jahrg. 1915. Erscheint jährlich in 12 Heften von insgesamt 40 Bogen. gr. 8. Preis jährl. M. 12.—

Die Kultur der Gegenwart, ihre Entwicklung und ihre Ziele. Herausg. von P. Hinneberg. In 4 Teilen: die geisteswissenschaftlichen, die naturwissenschaftlichen und die technischen Kulturgebiete. Lex.-8. Geh. u. geb.

Teil III. Abt. III. Band I: **Physik.** Red. von E. Warburg. Unter Mitarbeit von E. Wiechert, F. Auerbach, E. Warburg, L. Holborn, F. Henning, H. Rubens, W. Jäger, E. Dorn, A. Einstein, W. Wien, F. Richarz, E. Lecher, H. A. Lorentz, P. Zeeman, R. Gans, E. Gumlich, M. Wien, F. Braun, H. Starke, W. Kaufmann, E. Gehrcke, O. Reichenheim, J. Elster, H. Geitel, E. v. Schweidler, St. Meyer, O. Lummer, O. Wiener, F. Exner, F. Hasenöhrl, M. Planck, W. Voigt. Mit 106 Abb. [X, 762 S.] 1915. Geh. n. M. 22.—, geb. n. M. 24.—

Alt, H., Schülerübungen zur Einführung in die Physik. Ein praktisches Hilfsbuch für den Lehrer. Mit 53 Fig. [VIII u. 106 S.] gr. 8. 1910. Geh. n. M. 2.20, geb. n. M. 2.60.

Auerbach, F., Physik in graph. Darstellungen. 1373 Fig. auf 213 Taf. mit erläut. Text. [X, 213 u. 28 S.] 4. 1912. Geh. n. M. 9.—, geb. n. M. 10.—

Fischer, K. T., der naturwissenschaftliche Unterricht in England, insbesondere in Physik und Chemie. Mit einer Übersicht der englischen Unterrichtsliteratur zur Physik und Chemie und 18 Fig. und 3 Tafeln. [VIII u. 94 S.] gr. 8. 1901. Geh. n. M. 3.60.

— **neuere Versuche zur Mechanik der festen und flüssigen Körper, ein Beitrag zur Methodik des physikalischen Unterrichts.** Mit 55 Fig. [V u. 68 S.] gr. 8. 1902. Geh. n. M. 2.—

Gutzmer, A., die Tätigkeit des Deutschen Ausschusses für den mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht in den Jahren 1908–1913. Heft 1–18. [VIII u. 482 S.] gr. 8. 1914. Geh. n. M. 11.—, geb. n. M. 12.—. Auch einzeln käuflich.

Kerschensteiner, G., Wesen und Wert des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Neue Untersuchungen einer alten Frage. [XII u. 141 S.] gr. 8. 1914. Geh. n. M. 3.—, geb. n. M. 3.60.

Norrenberg, J., Geschichte des naturwissenschaftlichen Unterrichts an den höheren Schulen Deutschlands. [V u. 76 S.] Lex.-8. 1904. Geh. n. M. 1.80.

VERLAG VON B. G. TEUBNER IN LEIPZIG UND BERLIN

Volkman, P., Fragen des physikalischen Schulunterrichts. [XVI u. 65 S.] gr. 8. 1913. Geh. n. M. 2.—

Bremer, F., Leitfaden der Physik. Mit besonderer Berücksichtigung von Aufgaben und Laboratoriumsübungen. In 2 Teilen.

I. Teil. Für die mittleren Klassen der höheren Lehranstalten. Mit 210 Fig. [IV u. 122 S.] gr. 8. 1914. Geb. n. M. 1.50.

II. Teil. Für die oberen Klassen der Oberrealschulen u. Realgymnasien. 2. Auflage. Mit 424 Figuren. [VIII u. 304 S.] gr. 8. 1913. Geb. n. M. 3.20.

Auflösungen n. M. 1.20 sind nicht durch den Buchhandel zu beziehen, sondern werden nur unmittelbar von der Verlagsbuchhandlung gegen Voreinsendung des Betrages an beglaubigte Lehrer geliefert.

Grimsehl, E., Lehrbuch der Physik. Zum Gebrauche beim Unterricht, bei akademischen Vorlesungen u. zum Selbststudium. 3. Aufl. In 2 Bdn.

I. Band. Mechanik, Akustik und Optik. Mit 1065 Fig. und 2 farbigen Tafeln. [XII u. 966 S.] gr. 8. 1914. Geh. n. M. 11.—, geb. n. M. 12.—

II. Band. (Erscheint Juni 1915.)

— physikalische Tabellen zum Gebrauch beim Unterricht und beim physikalischen Praktikum. Sonderabdruck aus dem Lehrbuch der Physik. [20 S.] gr. 8. 1910. Geh. n. M. —.30.

— Lehrbuch der Physik für Realschulen. Mit 438 Figuren und 1 farbigen Tafel. 2. Aufl. [V u. 298 S.] gr. 8. 1913. Geb. n. M. 2.60.

— Lehrbuch der Physik für die oberen Klassen der Realanstalten. [In Vorbereitung.]

— ausgewählte physikalische Schülerübungen. Mit Figuren. [III u. 42 S.] gr. 8. 1906. Steif geh. n. M. —.80.

— Lehrbuch der Physik für höhere Mädchenschulen. Unter Mitarbeit von H. Redlich. 3. Auflage. Mit 427 Fig. [VIII u. 277 S.] gr. 8. 1914. Geb. n. M. 2.60.

— Ausgabe in getrennten Jahreskursen. 3. Auflage. Mit Figuren. gr. 8. 1914.

Heft 1. Lehrstoff der Klasse III. [IV u. 56 S.] Kart. n. M. —.80.

Heft 2. Lehrstoff der Klasse II. [III u. S. 57—152.] Kart. n. M. 1.—

Heft 3. Lesestoff der Klasse I. [IV u. S. 153—277.] Kart. n. M. 1.20.

Masche, W., physikalische Übungen. Ein Leitfaden für die Hand des Schülers. In 3 Teilen. gr. 8.

I. Teil. Mit 14 Figuren. [VI u. 36 S.] 1911. M. —.60.

II. Teil. Mit 27 Figuren. [60 S.] 1911. M. —.80.

III. Teil. Mit 24 Figuren. [IV u. 51 S.] 1915. M. —.80.

Gscheidlen, E., an der Werkbank. Anleitung zur Handfertigkeit mit besonderer Berücksichtigung der Herstellung physikalischer Apparate. Für mittlere und reife Schüler. Mit 120 Fig. u. 44 Tafeln. [IV u. 60 S.] gr. 4. 1912. Geb. n. M. 4.—

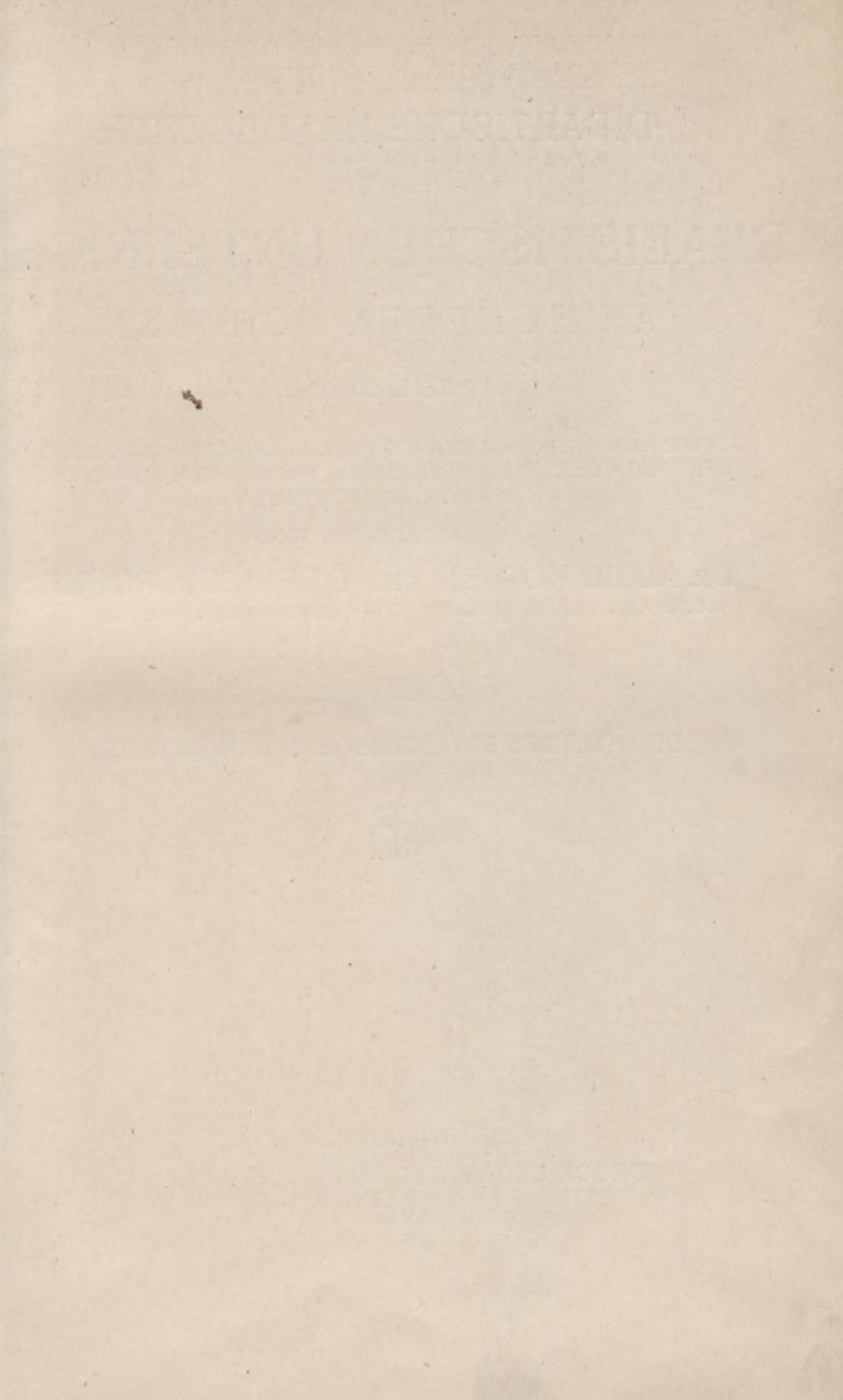
Keferstein, J., große Physiker. Bilder aus der Geschichte der Astronomie und Physik. Für reife Schüler, Studierende und Naturfreunde. Mit 12 Bildnissen auf Tafeln. [IV u. 233 S.] 8. 1911. Geb. n. M. 3.—

Rebenstorff, H., physikalisches Experimentierbuch. In 2 Teilen.

I. Teil: Anleitung zum selbständigen Experimentieren für jüngere und mittlere Schüler. Mit 99 Fig. [VI u. 230 S.] 8. 1911. Geb. n. M. 3.—

II. Teil: Anleitung zum selbständigen Experimentieren für mittlere und reife Schüler. Mit 87 Fig. [VI u. 178 S.] 8. 1912. Geb. n. M. 3.—

Wunder, L., physikalische Plaudereien. Mit 15 Figuren. [V u. 47 S.] 8. 1913. Steif geh. n. M. 1.—



DIDAKTISCHE HANDBÜCHER
FÜR DEN
REALISTISCHEN UNTERRICHT
AN HÖHEREN SCHULEN

IN ZEHN BÄNDEN

UNTER MITWIRKUNG VON WEILAND PROF. B. LANDSBERG-KÖNIGSBERG
I. PR., PROF. DR. C. MATZDORFF-BERLIN, PROF. O. OHMANN-BERLIN,
PROF. R. WATZEL-PRAG

HERAUSGEGEBEN VON

DR. ALOIS HÖFLER UND DR. FRIEDR. POSKE
O. Ö. PROF. A. D. UNIVERSITÄT WIEN PROF. AM ASKAN. GYMN. IN BERLIN

VIERTER BAND
DIDAKTIK DES PHYSIKALISCHEN UNTERRICHTS



LEIPZIG UND BERLIN
DRUCK UND VERLAG VON B. G. TEUBNER

1915

DIDAKTIK
DES
PHYSIKALISCHEN UNTERRICHTS

VON

DR. FRIEDRICH POSKE

PROFESSOR AM ASKANISCHEN GYMNASIUM
IN BERLIN

MIT 33 FIGUREN IM TEXT



We 34.

LEIPZIG UND BERLIN
DRUCK UND VERLAG VON B. G. TEUBNER

1915

*By 3
38.*



II 4915

SCHUTZFORMEL FÜR DIE VEREINIGTEN STAATEN VON AMERIKA:
COPYRIGHT 1915 BY B. G. TEUBNER IN LEIPZIG.

ALLE RECHTE, EINSCHLIESSLICH DES ÜBERSETZUNGSRECHTS, VORBEHALTEN.

Akc. Nr. 3435 / 50

DEM ANDENKEN
AN MEINEN VEREWIGTEN LEHRER
BERNHARD SCHWALBE
GEWIDMET

VORWORT

Der Abschluß dieses Bandes ist durch mancherlei Umstände verzögert worden. Er erscheint nun in einer Zeit, in der die Sorge um das Wohl des Vaterlandes und die Infragestellung der edelsten Güter menschlicher Kultur alle Gemüter bewegen. Dennoch haben Verfasser und Verlagsbuchhandlung geglaubt, sein Erscheinen nicht länger hinausschieben zu sollen. Will doch auch dieser Band, gleich den anderen der vorliegenden Sammlung, an seinem Teil beitragen zu jener Vertiefung und Verinnerlichung, die von jeher das auszeichnende Merkmal unseres deutschen Bildungswesens gewesen ist. Ist es doch andererseits gerade in dieser Zeit, in der unsere Waffen unerhörte, wenn auch nicht unerhoffte Erfolge erzielt haben, allen offenbar geworden, daß neben der begeisterten Hingabe unseres ganzen Volkes, neben der hervorragenden Leitung und Organisation unseres Heeres, auch der hohen Vollkommenheit unserer Technik ein nicht unerheblicher Anteil an diesen Erfolgen zu danken ist. Und ruht doch diese hohe Entwicklung unserer Technik auf dem Boden wissenschaftlicher Gründlichkeit und Gewissenhaftigkeit, die wir schon im vorbereitenden Unterricht unserer Schulen zu pflegen und zu erziehen bestrebt sind. So mag denn auch dieses Buch, das neben aller Anerkennung fremder Verdienste doch die Eigenart unserer auf deutschem Boden erwachsenen Unterrichtsmethoden betont, als ein dem Vaterlande und seinem Fortschreiten zu immer höheren Zielen dienendes angesehen werden. —

Das Buch behandelt in erster Reihe den physikalischen Unterricht der höheren neunklassigen Schulen Deutschlands und der ihnen entsprechenden Mittelschulen Österreichs. Auf die mit dem Einjährigengzeugnis abschließenden Realschulen des deutschen Reiches ist nur gelegentlich Bezug genommen worden, ebenso haben die höheren Mädchenschulen keine gesonderte Berücksichtigung erfahren. Der Verfasser hofft aber, daß das Buch in der vorliegenden Fassung genug Anregungen bieten wird, um auch die Auswahl und Behandlung des Unterrichts an diesen Schulen günstig zu beeinflussen. Schwerer wiegt der von mancher Seite gegen unsere Handbücher erhobene Vorwurf, daß sie nicht auch die Bedürfnisse des Volksschulunterrichts in Betracht gezogen haben. Allein man wird nicht in Abrede stellen können, daß mit einer

solchen Erweiterung der Aufgabe die Geschlossenheit der Darstellung erhebliche Einbuße erlitten hätte. Didaktische Grundsätze lassen sich nur im Hinblick auf bestimmte Bildungsziele scharf formulieren, und noch mehr wird die konkrete Ausgestaltung des Einzelnen der Bildungsstufe angepaßt sein müssen, auf die sie Anwendung finden soll. Darum hat auch der Verfasser dieses Bandes darauf verzichtet, mit seinen Vorschlägen über den ihm aus eigener Anschauung und Erfahrung bekannten Bereich des Schulwesens hinauszugehen. Vielleicht können aber manche seiner Ausführungen auch für den Volksschulunterricht fruchtbar werden.

In betreff des Wertes der von ihm gemachten Vorschläge hat der Verfasser keine übertriebenen Vorstellungen. Er möchte sich die schönen Worte zu eigen machen, die der allzu früh verstorbene BERNHARD LANDSBERG seiner Didaktik des botanischen Unterrichts (Band VII dieser Handbücher) vorangestellt hat: „Je reicher uns die Gelegenheit zuwächst, unsere Ansichten mit denen anderer zu vergleichen und soviel Verschiedenheiten trotz aller Übereinstimmung in den leitenden Ideen zu erkennen, je umfassender der Blick wird über die Menge von Wegen, die zum Ziel führen, um so mehr schwindet der Gedanke, daß einer dieser Wege der allein richtige sei und wir berufen ihn zu führen.“

Besonderen herzlichen Dank schuldet der Verfasser Herrn Professor Dr. K. NOACK, jetzt in Freiburg i. B., und Herrn Professor Dr. FR. C. G. MÜLLER in Brandenburg a. H. für sorgfältige Durchsicht der Korrekturbogen und eine Reihe wertvoller Ratschläge, nicht minder auch Herrn Professor Dr. A. HÖFLER für seine Mitwirkung beim Abfassen namentlich des allgemeinen Teils.

Der Verfasser kann endlich dieses Vorwort nicht schließen, ohne des Todes ERNST GRIMSEHLS zu gedenken, der am 30. Oktober in den Kämpfen um Langemarck bei Ypern für das Vaterland gefallen ist. Allenthalben in diesem Buch wird man die Spuren des Einflusses finden, den er auf die Didaktik des Physikunterrichts, und besonders auf die Vervollkommnung seiner experimentellen Seite ausgeübt hat. Wir werden seine geniale Erfindungsgabe, seine Tatkraft und sein Beispiel noch oft schmerzlich vermissen.

Berlin-Dahlem, im Dezember 1914.

FRIEDRICH POSKE.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Einleitung	1
Erster Teil.	
Allgemeines über Physik und physikalischen Unterricht.	
§ 1. Gegenstand, Aufgabe und Ziel der Physik	7
§ 2. Die Methode der Physik	14
§ 3. Aufgaben und Ziele des physikalischen Unterrichts	35
§ 4. Die Methode des physikalischen Unterrichts	39
§ 5. Zur Gliederung des Unterrichts	47
§ 6. Die praktischen Übungen	56
§ 7. Einzelfragen des physikalischen Unterrichts	72
Zweiter Teil.	
Die Unterstufe.	
§ 8. Physikalische Vorbegriffe. Statischer Kraftbegriff	97
§ 9. Von der Bewegung	118
§ 10. Hydromechanik	126
§ 11. Aeromechanik	132
§ 12. Wärmelehre	140
§ 13. Akustik	149
§ 14. Optik	152
§ 15. Magnetismus	160
§ 16. Elektrostatik	178
§ 17. Galvanismus	190
Dritter Teil.	
Die Oberstufe.	
§ 18. Einleitung	201
A. Mechanik.	
§ 19. Allgemeines	205
§ 20. 1. Stück: Wurf und freier Fall	209
§ 21. 2. Stück: Kraft und Masse	220
§ 22. <i>Exkurs über die Grundgesetze der Mechanik</i>	227
§ 23. 3. Stück: Arbeit und Energie	235
§ 24. 4. Stück: Die Kräfte am drehbaren Körper	241
§ 25. 5. Stück: Die Zentrifugalkraft oder Fliehkraft	247
§ 26. 6. Stück: Das Pendel	259
§ 27. Hydromechanik und Aeromechanik	274

B. Die Lehre von der Wärme.		Seite
§ 28. I. Der Temperaturbegriff.		278
§ 29. II. Kalorimetrie		281
§ 30. III. Wärme und Arbeit.		283
§ 31. IV. Dämpfe.		285
§ 32. Mitteilung und Leitung der Wärme.		290
§ 33. Zur Meteorologie		292
C. Wellenlehre und Akustik.		
§ 34. I. Das Problem der schwingenden Saiten		296
§ 35. II. Das Problem der Fortpflanzung des Schalles durch die Luft.		301
D. Optik.		
§ 36. I. Geradlinige Ausbreitung, Reflexion und Brechung des Lichts.		308
§ 37. II. Farbenzerstreuung durch das Prisma		313
§ 38. III. Wellentheorie des Lichtes		321
§ 39. IV. Auge und optische Instrumente		330
§ 40. V. Von der Strahlungsenergie		339
§ 41. VI. Das physiologisch-psychologische Grenzgebiet		345
E. Elektrizität und Magnetismus.		
§ 42. Einleitung		347
§ 43. I. Elektrostatische Maßbestimmungen und elektrischer Strom		350
§ 44. II. Magnetische Maßbestimmungen. Begriff der Stromstärke		354
§ 45. III. Das OHMSche Gesetz		363
§ 46. IV. Wärmewirkungen des Stroms; Stromenergie		370
§ 47. V. Chemische Wirkungen des Stroms. Quelle der Stromenergie galvanischer Elemente		373
§ 48. VI. Das magnetische Kraftfeld. Wechselwirkung zwischen Magneten und Stromleitern		378
§ 49. VII. Die Induktionserscheinungen.		384
§ 50. VIII. Elektrische Schwingungen und Wellen		396
F. Himmelskunde.		
§ 51. Die Stellung der Himmelskunde innerhalb des physikalischen Unterrichts		403
Nachwort von A. Höfler		407
Vierter Teil.		
Die Gestaltung des Lehrplans.		
§ 52. Die Stellung der Physik im Ganzen des naturwissenschaftlichen Unterrichts		410
§ 53. Lehrpläne		414
1. Meraner Lehrplan.		415
2. Der Lehrplan der bayerischen Oberrealschulen		418
Anhang I. Literaturübersicht		421
Anhang II. Die Einheiten und Formelzeichen des AEF		424
Sachverzeichnis		427

EINLEITUNG

Zu Beginn des vorliegenden Bandes der didaktischen Handbücher, der die Physik behandelt, sei an die allgemeinen Grundsätze erinnert, die am Anfang des I. Bandes in dem Abschnitt „Zur Einführung“ von den Herausgebern aufgestellt worden sind. Es sollten nicht noch einmal allgemein gehaltene Reformforderungen formuliert werden, und auch allgemeine methodische Erörterungen auf das knappste beschränkt bleiben; dagegen sollten Lehrgang und Methode unmittelbar am einzelnen und konkreten Stoff zur Darlegung kommen. Zwar war dabei nicht daran gedacht, einen fortlaufenden Kommentar zu einem bestimmten Lehrtext mit den entsprechenden methodischen Anweisungen zu geben, doch hat der Verfasser sich bei der Bearbeitung des physikalischen Unterrichtsstoffes davon überzeugt, daß es zweckmäßig ist, einen bestimmten Lehrgang zu entwerfen und in diesen die didaktischen Bemerkungen einzugliedern, derart, daß das Buch für den Leser zu einem bequemen Nachschlagebuch wird, ohne daß die Anordnung des Ganzen und das im einzelnen gewählte Vorgehen etwas anderes beanspruchen dürften, als ein Beispiel und eine Anregung für die Behandlung des überaus umfangreichen Stoffes zu sein.

Es sei ferner von neuem das Ziel hervorgehoben, daß aller realistische Unterricht – also die Gesamtheit der realistischen Unterrichtsfächer – für sich eine didaktische Einheit bilden kann und soll. Gerade im Hinblick auf dieses Ziel ist es von Bedeutung, daß die Physik eine zentrale Stellung unter den Naturwissenschaften einnimmt. Zutreffend sagt schon HELMHOLTZ vor mehr als einem Vierteljahrhundert, daß die Physik unter den Naturwissenschaften die weitesten Verallgemeinerungen mache, den Sinn der Grundbegriffe erörtere und die Prinzipien wissenschaftlicher Methodik für die Erfahrungswissenschaften enthalte.¹⁾ Hierin ist bereits eine zweifache Begründung für die grundlegende Stellung der Physik enthalten. Einesteils stellt die Physik die allge-

1) Über das Denken in der Medizin, Vorträge und Reden, Bd. II, S. 168.
Poske, Didaktik des physik. Unterr.

meinen Gesetze für alle Naturvorgänge auf und gibt damit allen naturwissenschaftlichen Fächern den inneren Zusammenhang.¹⁾ Anderenteils ist das Verfahren der Physik in der Tat vorbildlich für die Methode der übrigen Naturwissenschaften; der Schüler sieht hier „an dem denkbar einfachsten Stoff die denkbar exaktesten Methoden geübt“. ²⁾ [Es ergibt sich hieraus für diesen Band die besondere Aufgabe, die physikalischen und zugleich die naturwissenschaftlichen Methoden überhaupt einer näheren Beleuchtung zu unterziehen. Indem dies aber geschieht, wird zugleich noch einer anderen in der „Einführung“ betonten Aufgabe entsprochen, nämlich der Hervorhebung des humanistischen Bildungswertes, der allen realistischen Fächern innewohnt, der aber in der Physik am deutlichsten und vollkommensten ausgeprägt ist.

Ich erlaube mir an dieser Stelle einige Sätze zu wiederholen, die ich 1887 an die Spitze des ersten Bandes der von mir herausgegebenen Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht gestellt habe:

„Die physikalische Erkenntnis ist, ihrem Wesen nach, Einsicht in den rationellen Zusammenhang der Tatsachen, welche die Materie und deren Zustandsänderungen betreffen. In die Grundlagen und die Hauptrichtungen dieser Erkenntnis soll der Physikunterricht einführen. Er soll nicht nur den Inhalt dieser Erkenntnis mitteilen, sondern auch zeigen, wie solche Erkenntnis zustande kommt. Denn nur so vermag er die Überzeugung zu schaffen, daß es ein sicheres Wissen von den Dingen und den Vorgängen der Wirklichkeit gibt. Er hat zu diesem Zwecke die gedanklichen Prozesse klar und scharf herauszuarbeiten, durch welche physikalische Einsichten von jeher gewonnen worden sind und noch gewonnen werden.“

„Die Methode des physikalischen Erkennens muß auch die Methode des physikalischen Unterrichtes sein.“

„Das Verfahren der Physik ist aber seiner Natur nach nicht von demjenigen des wissenschaftlichen Denkens im allgemeinen verschieden, noch auch ist die Beweiskraft der Folgerungen im Bereiche des physikalischen Forschens eine geringere als auf anderen Wissensgebieten. Indem der Physikunterricht dartut, wie physikalisches Wissen erzeugt wird, liefert er eines der gültig-

1) So auch BASTIAN SHMID, Naturw. Unterricht, S. 227.

2) HÖFLER, Z. U. II, 8.

sten Zeugnisse von der Entstehung des Wissens überhaupt. Auch der Physikunterricht hat daher eine im eigentlichen Sinne humanistische Aufgabe.“

Wenn eine physikalische Didaktik versuchen will, der hier gestellten Aufgabe gerecht zu werden, so wird sie sich zuvörderst mit Fragen beschäftigen müssen, die nicht den Unterricht, sondern die Physik selbst als Wissenschaft angehen. Naturgemäß werden daher in den ersten Abschnitten Gegenstand, Aufgabe und Ziel der Physik (§ 1) sowie die Methode der Physik (§ 2) behandelt werden. Hieran erst schließt sich das, was über Aufgabe und Ziel des physikalischen Unterrichts (§ 3) sowie über die Methode des physikalischen Unterrichts (§ 4) zu sagen ist.

Den größten Teil des Buches bilden die schon erwähnten ausführlichen Lehrgänge, in die auch eine Lehrprobe, die ich dem als Didaktiker hochgeschätzten Professor Dr. K. NOACK in Gießen verdanke, eingeflochten ist (vgl. S. 162 ff.). Von der Lehrplangestaltung und ihren zu wünschenden Reformen soll in einem Schlußabschnitt die Rede sein.

Eine besondere Schwierigkeit erwächst jeder heut zu entwerfenden Didaktik der Physik daraus, daß die Eingliederung des modernen Verfahrens der Schülerübungen noch nicht so weit fortgeschritten ist, daß man schon sichere Richtlinien dafür angeben könnte. Ich habe deshalb vorgezogen, das, was über Schülerübungen zu sagen ist, in einem besonderen Abschnitt zusammenzustellen, doch habe ich die Überzeugung, daß gerade das Prinzip, das ich als grundlegend für den Klassenunterricht ansehen will (vgl. S. 41), auch das natürliche und selbstverständliche Motiv für die Einführung der praktischen Übungen in den Unterrichtsbetrieb selbst bildet.

Von didaktischen Vorarbeiten, denen ich mannigfache Hinweise und Anregungen verdanke, habe ich zu nennen:

1. I. KIESSLING, Physik, in Baumeisters Handbuch der Erziehungs- und Unterrichtslehre für höhere Schulen, 1. Aufl. 1895, Abschn. X, S. 1–73.

2. H. KEFERSTEIN, Physik an höheren Schulen, in W. Reins enzyklopädischem Handbuch der Pädagogik, 2. Aufl. 1907, S. 834–866.

3. E. GRIMSEHL, Didaktik und Methodik der Physik, in Baumeisters Handbuch, 2. Aufl. 1911, Abschn. X, S. 1–115.¹⁾

1) Auch als Sonderausgabe erschienen, Verlag von C. H. Beck, München.

Die Schrift von KIESSLING (ausführlich besprochen in Z. U. IX 97), ist das Werk eines praktischen, mit der experimentellen Technik wohlvertrauten Schulmannes, das in seinen Einzelvorschlägen noch heut viel Beachtenswertes enthält. Die organisatorischen Vorschläge bezüglich der Stoffverteilung u. dgl. sind jedoch größtenteils veraltet.

Die Schrift von KEFERSTEIN (besprochen in Z. U. IX 241 und XXI 192) zeichnet sich durch Eingehen auf philosophische und erkenntnistheoretische Grenzfragen aus, deren Beantwortung auch für den Betrieb des Physikunterrichts von Bedeutung ist. In didaktischer Hinsicht stellt sie trotz ihres geringen Umfangs einen erheblichen Fortschritt dar, da sie vielfach erst neuerdings aktuell gewordene Probleme in den Mittelpunkt der Betrachtung rückt.

Die Schrift von GRIMSEHL endlich (besprochen in Z. U. XXIV 117) trägt einen „stark subjektiven Charakter“, namentlich was die Anordnung und Auswahl der Versuchsanordnungen betrifft (wie der Verfasser selber im Vorwort zugibt), gibt aber doch über alle allgemeinen Fragen eine gute und vielseitige Orientierung.

Außer diesen drei Schriften, die sämtlich von Hamburger Schulmännern herrühren, kommen für unseren Zweck noch die Werke in Betracht, die sich mit der Technik des Physikunterrichts beschäftigen und dabei vielfach auch didaktische und methodische Bemerkungen einfließen lassen. Ich nenne hier zuerst die „Physikalische Technik“ von FRICK-LEHMANN, die in ihrer neuesten, vier starke Bände umfassenden Ausgabe zu einer Art von Enzyklopädie aller überhaupt vorhandenen Demonstrationsapparate geworden ist und damit allerdings weit über die Grenzen des Bedarfs unserer höheren Schulen hinausgeht. — Dann die „Physikalischen Demonstrationen“ von A. WEINHOLD (4. Aufl. 1904), die anfänglich auf die eigenen Einrichtungen des Verfassers beschränkt, nach und nach immer mehr auch anderweitig veröffentlichte Demonstrationsmittel berücksichtigt haben, im wesentlichen aber doch dem Bedürfnis großer Auditorien entsprechen. — Daran schließe ich die „Technik des physikalischen Unterrichts“ von FR. C. G. MÜLLER (Berlin, Salle 1906), eines der ausgezeichnetsten Werke, die wir besitzen, das weit mehr bietet, als der Titel verspricht; denn es enthält eine solche Fülle didaktischer Ratschläge, daß es sehr wohl als „Technik und Didaktik“ bezeichnet werden könnte. Wir werden im Lauf unserer Darstellung beständig Anlaß haben, auf dieses grundlegende Werk zu verweisen, das überdies

noch den Vorzug hat, auch dem mit geringen Mitteln Arbeitenden ein zuverlässiger Ratgeber zu sein. — Ebenfalls ausschließlich für den Unterricht an „Mittelschulen“ im österreichischen Sinne (d. h. an höheren Lehranstalten im reichsdeutschen Sinne) bestimmt ist K. ROSENBERGS „Experimentierbuch für den Unterricht in der Naturlehre“, 2 Bände, Wien, A. Hölder, 1908 und 1910.¹⁾ Es bietet eine Übersicht der wichtigsten experimentellen Hilfsmittel, die in den letzten Jahrzehnten seit Bestehen der Zeitschrift für den physikalischen Unterricht erschienen sind, in geschickter kritischer Sichtung und unter Einfügung zahlreicher technischer und didaktischer Ratschläge. Auch dieses sehr verdiente Werk bedeutet eine wertvolle Vorarbeit für unsere Darstellung, auf die wir uns zwecks Vereinfachung und Kürzung häufig zu berufen haben werden.²⁾

Auch in Lehrbüchern ist mannigfache didaktische Arbeit geleistet. Ich nenne von größeren Werken an erster Stelle die „Physik“ von A. HÖFLER (1904), die schon im Vorwort als eine der wichtigsten Aufgaben des physikalischen Unterrichts diese bezeichnet, „das natürliche, noch nicht physikalische Denken auf die Pfade des physikalischen Denkens hinüberzuleiten“. Demgemäß bietet es dem Lehrer reichliches Material für das dar, was die theoretische Didaktik als Stufe der „Vorbereitung“ bezeichnet. Überdies aber läßt es sich mehr als irgendein anderes selbst unter den für Hochschulen bestimmten Büchern auf kritische Erörterungen über die Grundbegriffe ein und bietet auf dieser Grundlage Formulierungen von ungewöhnlicher Schärfe und Klarheit, die auch in die für die Schulen bestimmte „Naturlehre für die oberen Klassen“ übergegangen sind. Auch für die Anordnung und Gliederung des Stoffes — von jeher ein besonders schwieriges Problem — liefert der Verfasser richtunggebende Gesichtspunkte, so daß es auch dem Schüler möglich wird, das ungeheure Gebiet gedanklich zu beherrschen.

Ebenso wie HÖFLERS „Physik“ geht auch das „Lehrbuch der Physik“ von E. GRIMSEHL (2. Auflage 1912) über die Grenzen des

1) Die dritte Auflage ist 1912/13 erschienen.

2) Von weiterer Literatur sei noch erwähnt das 1912 erschienene Buch von W. VOLKMANN, Anleitung zu den wichtigsten physikalischen Schulversuchen (Berlin, Rudolf Mückenberger). Es geht in erster Reihe auf die Technik der Schulversuche aus, läßt sich aber auch des öfteren auf didaktische Fragen ein und wirkt dadurch anregend auch da, wo ein auf Unterrichtserfahrung gestütztes Urteil zu anderen Ergebnissen führt.

Schulunterrichts hinaus; es zeichnet sich durch gründliche wissenschaftliche Behandlung des Stoffes aus in der ausgesprochenen Absicht, ein Unterrichtsmaterial zu liefern, das es ermöglicht, die Schüler in die wissenschaftlichen Forschungsmethoden einzelner Gebiete einzuführen. Als eine noch eingehendere Darstellung der Methoden wissenschaftlicher Forschung sei das ausgezeichnete Werk von E. MACH, „Erkenntnis und Irrtum“ (2. Auflage 1906), der Beachtung besonders empfohlen. Es bietet namentlich eine Fülle historischer Beispiele zu den einzelnen Verfahrensarten der Physik und ein reiches Material zur Psychologie der Forschung. Auch an das ältere, klassisch zu nennende Werk von E. MACH, „Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt“ sei hier erinnert.

Was die eigentlichen Schulbücher betrifft, so muß ich darauf verzichten, einzelne namhaft zu machen. Soweit Hinweise auf Lehrtexte erforderlich sind, beziehe ich mich in der Regel auf meine Bearbeitung von A. HÖFLERS Naturlehre, Unterstufe (4. Auflage 1912) und Oberstufe (3. Auflage 1911).

Schließlich habe ich des wertvollen und reichen Stoffes didaktischer und methodischer Art zu gedenken, der in den bisher erschienenen 27 Jahrgängen der Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht angehäuft ist.

Es erscheint unausführbar, diesen gesamten Stoff in einer Didaktik, deren Umfange immerhin gewisse Grenzen gesteckt sind, voll zu verarbeiten. Auch wird es immer vom subjektiven Urteil und der getroffenen Stoffauswahl abhängen, wieviel von dem dort Dargebotenen sich in die Darstellung aufnehmen läßt. Ich muß daher bezüglich aller von mir nicht berücksichtigten Arbeiten auf die erwähnten Jahrgänge der Zeitschrift verweisen.

Daß auch dieser Band mit den „Meraner Vorschlägen“ der Unterrichtskommission der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte in engem Zusammenhang steht, dürfte nach dem, was über diese Vorschläge in der Einführung zu Band I gesagt ist, selbstverständlich sein, um so mehr, als der Verfasser des vorliegenden Handbuchs auch den die Physik betreffenden Teil der „Meraner Vorschläge“ redigiert hat. Die dort gezogenen Richtungslinien sind im wesentlichen auch für die hier dargebotenen Einzelausführungen maßgebend gewesen.

Erster Teil.

Allgemeines über Physik und physikalischen Unterricht.

§ 1. Gegenstand, Aufgabe und Ziel der Physik.

1. **Gegenstand und Aufgabe.** Die Gesamtheit der mit den Sinnen wahrnehmbaren Dinge und Vorgänge der Wirklichkeit bezeichnet man als physische Naturerscheinungen (Naturerscheinungen im engeren Sinne), diese bilden den Gegenstand der Naturwissenschaft. Sofern nur leblose Körper und die an diesen sich abspielenden Vorgänge in Betracht kommen (oder auch solche, die den leblosen und lebenden Körpern gemeinsam sind), fallen sie in das Bereich der Physik, diese im weitesten Sinne genommen.¹⁾

Aufgabe der Physik ist es nicht nur, die Dinge und Vorgänge als isolierte Tatsachen zu beschreiben, sondern auch ihre gesetzmäßigen Zusammenhänge aufzusuchen. Sie vermag diese Aufgabe nur zu erfüllen, indem sie Begriffe und Urteile bildet, die den Tatsachen möglichst genau entsprechen, ein Prozeß, der sich nur langsam vollzieht, da sich die erforderlichen Begriffe zu meist nicht unmittelbar aufdrängen, sondern durch mühsame Denkarbeit gefunden werden müssen. Man hat wohl gesagt: Naturwissenschaft ist der Versuch, die Natur durch Begriffe aufzufassen.²⁾

Damit verwandt ist die Formulierung von MACH, daß die wissenschaftliche Forschung in der Anpassung der Gedanken an die Tatsachen und der Gedanken aneinander besteht. Die erste Art der Anpassung macht nach MACH³⁾ das Wesen der Beobachtung aus, die zweite das Wesen der Theorie; doch ist ersteres wohl zu eng gefaßt, da die Aufgabe der Anpassung der Gedanken an

1) Vgl. HÖFLER, Physik, Einleitung, wo den physischen Naturerscheinungen die psychischen gegenübergestellt sind.

2) RIEMANN, angeführt bei P. VOLKMANN, Grundzüge, S. 43.

3) MACH, E. u. J. (2) S. 165.

die Tatsachen an sich schon das Gebiet der Beobachtung weit überschreitet. Auch ist der Ausdruck insofern unbestimmt, als es sich bei Gedanken um zweierlei handeln kann, nämlich um Begriffe und um Urteile. An erster Stelle wird unser Augenmerk auf die Begriffe zu richten sein.

2. Ursprüngliche Verstandesbegriffe; Kausalbegriff. Unter den Begriffen, die für unseren Zweck in Betracht kommen, stehen die ursprünglichen Verstandesbegriffe obenan. Sie bilden die Werkzeuge, die uns für die erste Bearbeitung des Rohmaterials der Erfahrung zu Gebote stehen. Solche Begriffe sind die der Größe, der Gleichheit und Verschiedenheit, und für die Physik von besonderer Bedeutung der Begriff der Kausalität.

Was die Verwendung des Kausalbegriffs betrifft, so haben allerdings in neuerer Zeit manche Physiker ihn als metaphysisch verworfen und ihm jede Berechtigung innerhalb der Naturforschung abgesprochen. In E. MACHS Werk „Erkenntnis und Irrtum“ kommt, soviel ich sehen kann, das Wort Ursache überhaupt nicht vor.¹⁾ Aber es sollte doch zum Nachdenken Anlaß geben, daß KANT, obwohl er durch HUME aus dem dogmatischen Schlummer geweckt worden war, sich nicht veranlaßt gesehen hat, den Kausalbegriff zu verwerfen, macht er ihn doch vielmehr zu einer der Bedingungen der Möglichkeit der Erfahrung.²⁾ In der Tat, solange man eine Gesetzmäßigkeit, d. h. Notwendigkeit des Naturgeschehens zugibt, wird man auch den Kausalbegriff gelten lassen müssen. Ein Vorgang A ist die Ursache eines anderen Vorgangs B heißt nichts anderes als beide Vorgänge sind derart miteinander „verknüpft“, daß stets, wenn A sich ereignet, auch B sich ereignen muß. Man denke etwa an das Schulbeispiel: Wenn die Sonne auf einen Stein scheint, wird er warm. Das Begriffspaar Ursache und Wirkung ist in solchem Fall nichts anderes als das gedankliche Gegenbild eines realen Zusammenhangs, dessen Natur uns zunächst verschlossen bleibt, der aber zum Gegenstande weiterer Forschung werden kann. Das gleiche gilt für den Kraftbegriff, der nur als spezieller Fall des Ursachbegriffs anzusehen ist. (Vgl. Nr. 4.)

1) Man vgl. auch MACH, Die Mechanik (4) S. 513, und Geschichte und Wurzel usw. (2) S. 34, sowie HÖFLER, Z. U. XXIII 14.

2) In der „Kritik der reinen Vernunft“ heißt es geradezu: „Man versteht unter Natur den Inbegriff der Erscheinungen, sofern diese vermöge eines inneren Prinzips der Kausalität durchgängig zusammenhängen.“ (Werke, Berl. Ausg. III 288.)

3. Physikalische Begriffe. Von den physikalischen Begriffen im engeren Sinne ist zunächst nur zu sagen, daß sie der Regel nach das Ergebnis tiefer eindringender Forschung sind. Die Wege, auf denen man zu ihnen gelangt, sind durch die Methoden der Physik bestimmt, die nachher näher erörtert werden sollen. Zur Erläuterung diene das Beispiel des Gleichgewichts am Hebel. Die Begriffe Gewicht und Hebelarm werden unmittelbar durch die kunstlose, vorwissenschaftliche Betrachtung geliefert. Beobachtung und Versuch führen zur Aufstellung der Proportion für den Fall des Gleichgewichts. Hierbei treten nur die Begriffe der Größe, bzw. des Größenverhältnisses, und der Gleichheit, also ursprüngliche Verstandesbegriffe hinzu. Führt man nun den Begriff des Drehmoments ein, so ist dies kein unmittelbar gegebener, sondern ein zum Zweck tieferer Erfassung und Darstellung des Zusammenhangs ersonnener, spezifisch physikalischer Begriff. Auf einer weiteren Stufe der Betrachtung tritt der Begriff der Arbeit hinzu, ein physikalischer Begriff höherer Ordnung, durch den die Einsicht in die Natur des Vorgangs noch weiter gefördert und das einer großen Zahl mechanischer Vorgänge Gemeinsame festgestellt wird.

4. Gesetze. Die Physik bleibt aber bei der Aufstellung von Begriffen nicht stehen, sie bedient sich ihrer zur Bildung von Urteilen¹⁾, die den in der Wirklichkeit vorhandenen Zusammenhängen entsprechen; und sofern diese Urteile nicht auf einzelne Fälle beschränkt bleiben, stellen sie Gesetze dar, d. h. Sätze, denen wir eine allgemeinere Gültigkeit über den Bereich der ihnen unmittelbar zugrunde liegenden Erfahrung hinaus zuschreiben. So beschreibt das Wegzeitgesetz GALILEIS für den freien Fall den Zusammenhang von Zeit und Fallstrecke in einer allgemeinen, für jede künftige Erfahrung gültigen Gleichung; so verknüpft das Gesetz der Drehmomente die Wirkungen der einzelnen Kräfte, die an einem um eine feste Achse drehbaren Körper auftreten; so stellt das Ohmsche Gesetz einen Zusammenhang zwischen den drei Begriffen der Stromstärke, der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes dar. Aber es würde den Sachverhalt nicht vollkommen wiedergeben, wenn man etwa dies letztere Gesetz lediglich als eine formale mathematische Gleichung betrachtete

1) Darüber, daß die herkömmliche Definition des Urteils als einer Verbindung zweier Begriffe psychologisch und logisch unhaltbar ist, vergleiche man A. HÖFLER, Logik, § 41.

und nicht vielmehr den Gedanken damit verbände, daß hier ein Wirkendes (die elektromotorische Kraft) und ein die Wirkung gleichsam Hemmendes (der Widerstand), zusammen die Wirkung, nämlich die Stromstärke, bestimmen. Hier wie bei anderen Gesetzen ist die Kausalbeziehung nicht von der Hand zu weisen, wenn die „Beschreibung“ den Tatsachen völlig gerecht werden soll. Es gibt also Naturgesetze, nach denen jederzeit und an allen Orten an das Vorhandensein gewisser Ursachen das Eintreten bestimmter Wirkungen geknüpft ist. Gesetze dieser Art wollen wir erklärende Gesetze nennen. Man hat demnach zu unterscheiden zwischen bloß beschreibenden Gesetzen (wie das Wegzeitgesetz einer Bewegung) und erklärenden Gesetzen, die sich auf einen Kausalzusammenhang beziehen. Zu ersteren gehören z. B. auch die Keplerschen Gesetze; zu den letzteren das Newtonsche Gravitationsgesetz und alle Sätze über Energieverwandlung. Daß hierbei z. B. einmal die Wärme als Ursache von Bewegungsenergie und ein andermal die letztere als Ursache der ersteren auftritt, kann als kein ernstlicher Einwand gegen die Anwendung des Kausalbegriffs angesehen werden.

5. **Das System der Physik.** Die Arbeit der Physik ist aber auch mit der Aufstellung von Gesetzen noch nicht beendet; ihr Ziel ist vielmehr – wie in jeder eigentlich so zu nennenden Wissenschaft – ein widerspruchslloses und in sich zusammenhängendes System von Begriffen und Gesetzen. System ist „gestaltetes Wissen“. Hierfür ist die bloße Einheit, wie sie etwa durch einen Begriff vermittelt wird, nicht ausreichend. „Nicht Einheit schlechtweg, sondern systematische Einheit macht gemeine Erkenntnis allererst zur Wissenschaft.“¹⁾ Ein System erfordert zunächst die logische Gliederung des gesamten Erfahrungsmaterials, überdies aber noch den Nachweis durchgängiger Beziehungen zwischen den einzelnen Teilen des Systems. Auch hierbei spielt, speziell in der Physik, der Gedanke des kausalen Zusammenhangs, in der Form der durchgängigen kausalen Verknüpfung, die wichtigste Rolle und nimmt hier die Gestalt des sogenannten Kausalprinzips an. Während der Kausalbegriff als Verknüpfungsmittel in allen den Fällen dient, wo die Erfahrung uns die Bedingtheit einer Erscheinung durch eine andere ihr vorangehende erkennen läßt, so enthält das Kausalprinzip eine

1) KANT, Kr. d. r. V. 860, angeführt bei CHAMBERLAIN, Immanuel Kant, S. 585.

Forderung, mit der wir an die Erscheinungen herantreten, und die auch von dem der metaphysischen Spekulation Abgeneigten als heuristisches Prinzip zugestanden werden muß. Das Prinzip sagt aus, daß jede Veränderung eine Ursache, d. h. ein notwendiges Antezedens¹⁾ haben müsse, es ist gleichbedeutend mit dem Gedanken einer durchgängigen Gesetzmäßigkeit, d. i. eines notwendig aus Bedingungen folgenden Geschehens. Oder wie es HELMHOLTZ ausdrückt²⁾: „Das Kausalprinzip ist nichts anderes als die Voraussetzung der Gesetzlichkeit aller Naturerscheinungen.“ In dieser Formulierung ist auch der gedankliche Charakter, der dem Prinzip anhaftet, deutlich hervorgehoben.³⁾

Es liegt nun freilich in der Natur des menschlichen Geistes, daß er die Einheit des Systems nicht nur in einer durchgängigen Verknüpfung der Begriffe und Gesetze, sondern in einem obersten Begriff sucht, dem alle anderen sich unterordnen. Hierin wurzelt z. B. auch der moderne Monismus, dessen Fehler jedoch darin liegt, daß er die Existenz eines solchen Einheitsbegriffes nicht als Postulat, sondern als Dogma, und zwar als ein leeres und seelenloses Dogma, aufstellt. Auch innerhalb der physikalischen Forschung hat das Streben nach Einheitlichkeit zu einer Auffassung der Erscheinungen geführt, die man gewöhnlich als die mechanische Naturauffassung bezeichnet. Sie zielt darauf ab, alle Erscheinungen auf ein Wirkliches zurückzuführen, das nur mechanische Eigenschaften hat und sich nur nach mechanischen Gesetzen verändert.⁴⁾ Es läßt sich indessen nicht verkennen, daß wir heut weiter als je davon entfernt sind, daß diese Auffassung für alle Gebiete der Physik als durchgeführt oder auch nur mit einiger Wahrscheinlichkeit als durchführbar angesehen werden könnte.

Daneben hat neuerdings die energetische Naturauffassung den Anspruch erhoben, ein einheitliches und zugleich vollständiges Bild des Weltablaufs darzubieten. Niemand wird leugnen, daß das Prinzip der Energieverwandlung sich über alle Gebiete der Physik erstreckt und als das Gesetzmäßige in der Erschei-

1) A. HÖFLER, Logik, Gr. Ausg. S. 67; vgl. auch dessen Studien zur gegenwärtigen Philosophie der Mechanik.

2) HELMHOLTZ im Nachwort zum Abdruck seiner Schrift über die Erhaltung der Kraft. Wiss. Abh. I (1882) S. 68.

3) Man vgl. das über Hypothesen Gesagte, S. 29.

4) Vgl. HEYMANS, Gesetze und Elemente des wissenschaftlichen Denkens, S. 413.

nungen Flucht dem nach Einheit verlangenden Verstande hohe Befriedigung gewährt. Aber Fluß und Wandel der Energie ziehen vor den Augen des Beschauers vorüber wie ein kinematographischer Film. Soll ein tiefer reichendes Weltbild daraus werden, so bedarf es noch des Nachweises der Kräfte, von denen dieser Fluß und Wandel bestimmt wird. Diese Kräfte aber sind selbst nicht wieder energetischer Natur¹⁾, sondern hängen von der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Materie und den hierdurch bedingten Dispositionen ab. Und so ist es in letzter Instanz doch immer das Prinzip der kausalen Verknüpfung, das in aller Mannigfaltigkeit des Weltlaufs das einigende Band bildet.

6. Das physikalische Weltbild. Das Ziel alles physikalischen Forschens ist, wie wir sahen, Erkenntnis, oder bestimmter gesagt physikalische Welterkenntnis, sofern unter Welt zunächst nur die Gesamtheit der physikalischen Erscheinungen oder der der Physik zugängliche Ausschnitt der Weltvorgänge verstanden wird. Diese Welterkenntnis findet sich zusammengefaßt und wohlgeordnet niedergelegt in dem System der Physik.

Wen aber der Faustische Drang des Erkennens treibt, dem genügt nicht die Aufstellung eines Systems, das lediglich das Bedürfnis des Verstandes nach Übersichtlichkeit und Einheit befriedigt; ihn verlangt vielmehr nach einem Weltbilde²⁾, das uns diese Einheit in anschaulicher Form nahebringt und zugleich die sichere Grundlage bildet, auf der sich eine Weltanschauung im tieferen Sinne des Wortes aufbauen läßt.

Was wir unter physikalischem Weltbild verstehen, unterscheidet sich von physikalischer Welterkenntnis ebenso wie Anschauung von Begriff. Es muß letztlich möglich sein, den Blick von dem Begriffssystem der Physik wieder auf die Natur selbst zu richten. Es möge auch hier ein Wort von KANT³⁾ Platz finden: „Auf welche

1) Vgl. A. HÖFLER, Abh. z. Did. u. Phil. d. Naturw. I, Heft 2. Auch ist zu bedenken, daß „mechanisch“ und „energetisch“ überhaupt keine Gegensätze sind, sondern daß vielmehr das „Energetische“ nur einen Spezialfall des „Mechanischen“ darstellt.

2) Was bisher mit diesem Namen bezeichnet worden ist, deckt sich im wesentlichen mit der Gesamtheit teils hypothetischer, teils naturgesetzlicher Beziehungen, die den Inhalt der physikalischen Welterkenntnis ausmachen. So ist das physikalische Weltbild z. B. bei PLANCK (Die Einheit des physikalischen Weltbildes) verstanden, während E. LECHER unter dem Titel „Physikalische Weltbilder“ nur eine Reihe einzelner neuerer Ergänzungen und Vertiefungen der physikalischen Welterkenntnis vorführt.

3) Angeführt bei A. HÖFLER, Abh. z. D. u. Ph., I 2, S. 117.

Art und durch welche Mittel sich auch immer eine Erkenntnis auf Gegenstände beziehen mag, so ist doch diejenige [Art], wodurch sie sich auf dieselben unmittelbar bezieht, und worauf alles Denken als Mittel abzweckt, die Anschauung.“ Es gilt also, den im System dargestellten Weltzusammenhang wieder anschaulich zu erfassen, die Natur – nach HUMBOLDTS von SCHILLER entnommenem Ausdruck – als ein „von inneren Kräften belebtes und beseeltes Ganzes“ und zugleich als ein von Energieströmen durchflutetes und im Durcheinander zahlloser Wirkungen doch von Gesetzen beherrschtes All zu betrachten. Etwas vom GOETHESCHEN Naturgefühl muß die Vollendung des physikalischen Erkennens bilden. In diesem Sinne möchte auch das „Zurück zu NEWTON, vorwärts zu GOETHE“ zu verstehen sein, das HÖFLER¹⁾ einmal ausspricht. Und andererseits darf es doch nicht bei bloß gefühlsmäßiger Auffassung bleiben, sondern es muß die möglichst genaue Kenntnis der Vorgänge bis ins einzelne hinzukommen, damit der Anschauung Inhalt, Tiefe und Kraft verliehen wird.

Ein solches physikalisches Weltbild ist heut nur im Rahmen der kopernikanischen Lehre möglich, also als das mit physikalischem Inhalt erfüllte kopernikanische Weltbild! Andererseits ist aber nur in der Ausgestaltung zum Weltbilde das kopernikanische Weltsystem fähig, das Weltbild der Alten zu ersetzen, das auf eine durchgängige Einheit von Empfinden und Denken gegründet war.²⁾ Und wiederum wird auch jeder Versuch einer modernen Lebensphilosophie sich mit dem auf kopernikanischem Grunde ruhenden Weltbild in Einklang setzen müssen.

Als gänzlich ausgeschlossen allerdings muß es angesehen werden, daß ein physikalisches Weltbild jemals dazu geeignet sein könnte, die letzte Antwort auf die Frage nach dem Rätsel des Lebens und dem Sinn des Daseins zu geben. Vielmehr wird nur umgekehrt von der geistigen Seite her Aufklärung über den Sinn der Welt zu erwarten sein, denn nur das Höhere vermag über das Niedere Licht zu verbreiten. Damit ist die natürliche Begrenzung für den Gültigkeitsbereich eines physikalischen Weltbildes angedeutet.

1) Z. U. XXV 258.

2) Man vgl. E. GOLDBECK, Z. U. XXV 242 und HÖFLER, Did. Handb. II 276 bis 284, wo das astronomische Weltbild als ein Teil des physikalischen behandelt ist.

§ 2. Die Methode der Physik.

1. **Induktives Verfahren im allgemeinen.** Die Gesamtheit der Wege, auf denen die Naturforschung zu ihren Begriffen und Gesetzen gelangt, wird als die Methode der Naturforschung bezeichnet. Wenn wir uns auch im folgenden auf die Methode der Physik beschränken, so ist doch zu bedenken, daß diese Methode der Physik für das Verfahren aller Naturforschung vorbildlich ist, ja überhaupt allen Wissenschaften, deren Gegenstand irgend ein Teil der Wirklichkeit ist, zum Muster dient.

Während die Mathematik auf deduktivem Wege, von allgemeinsten Sätzen und Definitionen ausgehend, zu ihren Ergebnissen gelangt, schreitet die Naturwissenschaft von der Kenntnis des Einzelnen zu allgemeinen und umfassenden Erkenntnissen fort. Diese Methode des Aufsteigens vom einzelnen zum allgemeinen ist von jeher als Induktion oder als induktive Methode bezeichnet worden. FRANZ BACO VON VERULAM wird in der Regel als Vater der induktiven Methode angesehen, weil er zuerst eine Reihe von allgemeinen Vorschriften für dieses Verfahren ersonnen hat. Aber diese Vorschriften sind längst als unzulänglich und zum Teil als unzutreffend erkannt,¹⁾ die Naturforschung hat, unabhängig von BACO, unter der Führung von BACOS Zeitgenossen GALILEI und GILBERT andere Wege entdeckt und eingeschlagen. Das von BACO empfohlene Verfahren bestand der Hauptsache nach in einer tabellarischen Zusammenstellung aller vorhandenen Beobachtungen, die zu einem Problem in irgend einer Beziehung stehen, und in der dann folgenden Sichtung dieser Beobachtungen nach dem Prinzip der Übereinstimmung und Nichtübereinstimmung; daß dies ein ganz äußerliches Verfahren ist, beweist am besten das von BACO selbst gegebene Beispiel, das sich auf das Wesen der Wärme bezieht.²⁾ Ferner empfiehlt BACO noch das Verfahren der Ausschließung, das dem disjunktiven Schlußverfahren entspricht und in gewissen Fällen (wenn nämlich die Disjunktion vollständig ist) zu einem Ergebnis führt, aber zumeist nicht Anwendung finden kann, weil die Zahl der Möglichkeiten sich nicht erschöpfen läßt. Überdies fehlt es bei BACO an einer zutreffenden Würdigung des Experiments und es fehlt ferner an Einsicht in die wissenschaftliche Bedeutung der Hypothese. Das von BACO angegebene

1) Man vgl. z. B. J. v. LIEBIG über Francis Bacon v. Verulam, München 1863.

2) Novum Organum, Buch 2, Art. 11 und folgende. Man vgl. A. HÖFLER, Logik, § 75.

Verfahren des Sammelns und Zusammenstellens von Gleichartigem trifft hauptsächlich nur für die Naturbeschreibung zu und ist wohl der dort geübten Methode nachgebildet. Für die Physik (und Chemie) kommen vorwiegend andere Gesichtspunkte in Betracht, die im folgenden näher dargelegt werden sollen. Es sei aber schon hier bemerkt, daß es keineswegs zutreffend ist, den induktiven Teil der Forschung ausschließlich „im Zusammentragen, Sichten und Ordnen des Tatsachenmaterials“ zu erblicken, „das endlich unter gemeinsamen Gesichtspunkten zusammengefaßt wird“. ¹⁾

2. Einzeltatsachen und Verallgemeinerungen. Nur in den Anfängen der Forschung spielt das Sammeln und Ordnen von Erfahrungsmaterial eine gewisse Rolle. So hat es im Beginn der Elektrizitätslehre einer großen Zahl von Beobachtungen bedurft, um zuerst die beiden Gruppen der elektrischen und nicht elektrischen Körper, dann die der Leiter und Nichtleiter gegeneinander abzugrenzen, bis späterhin der erste dieser Gegensätze aufgehoben wurde durch die Erkenntnis, daß alle Körper durch Reiben elektrisch werden, während der zweite der Einsicht Platz machte, daß Leiter und Nichtleiter keine Gegensätze bedeuten, sondern eine allmählich vom einen Extrem zum andern laufende Reihe bilden.

Schon auf der untersten Stufe der Forschung ist es indessen möglich auf Grund einer einzigen Beobachtung einen Satz von mindestens annähernder Allgemeingültigkeit aufzustellen. Ist einmal beobachtet, daß ein Stück Bernstein durch Reiben elektrisch geworden ist, so läßt sich diese Tatsache sofort als allgemeiner Erfahrungssatz aussprechen. Die Berechtigung hierzu liegt in der universellen, von der Erfahrung durchweg bestätigten Voraussetzung der Gleichförmigkeit des Naturlaufs (J. ST. MILL); das will in unserem Fall zunächst besagen, daß dieses Stück Bernstein auch zu anderer Zeit und an anderem Ort dasselbe Verhalten zeigen wird. Geschieht dies nicht, so erwächst daraus ein Problem, nämlich die Aufgabe, nach der Ursache des veränderten Verhaltens zu forschen, worüber an anderer Stelle weiteres zu sagen sein wird. (Vgl. S. 18.)

Es kommt aber noch ein zweites hinzu; auch von jedem anderen Stück Bernstein erwarten wir, daß es unter gleichen Umständen das gleiche Verhalten zeigen wird. Wir stützen uns hier-

1) So GRIMSEHL, Didaktik S. 2.

bei auf eine Voraussetzung, die nur als besonderer Fall der Gleichförmigkeit des Naturlaufs anzusehen ist, nämlich, daß Stoffe derselben Art unter gleichen Umständen gleiches Verhalten zeigen werden. Andere Sätze solcher Art sind z. B.: Wasser kommt durch hinreichende Zufuhr von Wärme zum Sieden; Schwefel schmilzt bei 111° ; Hartgummi ist ein schlechter Leiter der Elektrizität. Es ist aber zu beachten, daß diese Sätze, einmal festgestellt, sogleich in den Inhalt des Begriffs der betreffenden Substanz aufgenommen und somit zu Bestandteilen der Definition dieser Substanz werden. Wir haben es also hier bereits mit dem logischen Grundphänomen zu tun, daß an der Hand der Erfahrung die Begriffe so gestaltet werden, daß sie den Tatsachen angepaßt sind oder den Tatsachen „entsprechen“. Ein ähnlicher Prozeß wird uns auch auf den höheren Stufen der induktiven Methode begegnen.

Die eben betrachtete Verallgemeinerung ist allerdings nur zulässig, solange es sich um Stoffe derselben Art (um identische Stoffe) handelt. Wollte man den Satz, daß Eis beim Erwärmen schmilzt, dahin erweitern, daß alle festen Körper durch die Wärme zum Schmelzen gebracht werden, so wäre dies ein bloßer Analogieschluß, dem die Verschiedenheit der in Betracht kommenden Stoffe entgegen stände. Und selbst wenn eine größere Zahl fester Stoffe das gleiche Verhalten zeigt, so läßt sich der Satz „Feste Körper werden durch Wärme geschmolzen“, doch nicht als ein allgemein gültiges Naturgesetz aufstellen. Die Verallgemeinerung versagt also, wo es sich um Zusammenfassung von Fällen handelt, die sich nicht auf völlig gleichartige Körper beziehen, sondern auf eine ganze Klasse von Körpern, die nur in einem gewissen Merkmal übereinstimmen. Es würde aus einer begrenzten Zahl von Fällen auf alle Fälle geschlossen werden, ein Verfahren, das die Logik als unvollständige Induktion bezeichnet und als nicht beweiskräftig ansieht.

In der Tat ist „keine noch so große Zahl von Einzelfällen ausreichend, um für sich allein einem aus ihnen induzierten allgemeinen Satz Evidenz oder Gewißheit zu verleihen“. ¹⁾ Schon ein einziger gegenteiliger Fall genügt, die vermeintliche Allgemeinheit des induzierten Satzes umzustürzen. Stellt man gleichwohl auf Grund einer Anzahl von Fällen einen allgemeinen Satz

1) HÖFLER, Logik, § 72.

auf, so kann man diesen nur als eine Regel bezeichnen. Hierher gehören Sätze wie: Alle Körper sind schwer. — Alle Metalle sind gute Wärmeleiter. — Alle Isolatoren sind dielektrisch u. s. f. So wird auch wohl der Satz, daß die Körper durch Erhöhung der Temperatur aus dem festen in den flüssigen und aus diesem in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen, als Aggregationsregel bezeichnet (HÖFLER, Physik). Die Regel verträgt Ausnahmen, das Gesetz nicht.

Eine andere Art von Verallgemeinerungen findet statt, wenn sich in einer Reihe gleichartiger Einzelfälle eine gleichbleibende Beziehung zwischen zwei oder mehreren Größen ergibt, die sich in Form einer funktionalen Abhängigkeit darstellen läßt. Man spricht in diesem Fall von einem beschreibenden Gesetz. Solche Gesetze sind das Wegzeitgesetz GALILEIS, das Reflexionsgesetz, das Brechungsgesetz, das Gesetz von BOYLE-MARIOTTE. Die Verallgemeinerung besteht hier darin, daß man die für einzelne Wertepaare oder -gruppen nachgewiesene Beziehung auf die ganze Reihe der Werte ausdehnt, die die in Betracht kommenden Größen in kontinuierlicher Folge annehmen können. Auch hier ist die Verallgemeinerung nicht vorbehaltlos ausführbar; sie geht von der Voraussetzung aus, daß in natura rerum eine derartige funktionale und gleichbleibende Beziehung existiert, und daß die beobachteten Einzelfälle dies Gesetz erkennen lassen. Es ist daher namentlich die Ausdehnung eines solchen Gesetzes über die Grenze des der Beobachtung unterworfenen Bereichs nur bedingungsweise zulässig, wie u. a. das Gesetz von BOYLE-MARIOTTE beweist. HÖFLER bemerkt (Log. § 89), daß man derartige Beziehungen überhaupt nicht Gesetze nennen würde, wenn man nicht mehr oder weniger bestimmt voraussetzte, daß die in jenen Beziehungen zum Ausdruck kommende Regelmäßigkeit einen bestimmten Grund habe und sich also als Notwendigkeit begreifen lasse. So kann das Wegzeitgesetz GALILEIS aus dem Geschwindigkeitsgesetz $v = bt$ abgeleitet, und dieses wieder aus der gleichförmigen Wirkung der Schwerkraft in dem homogen gedachten Kraftfeld der Erde deduziert werden. Die Aufstellung „beschreibender“ Gesetze bildet aber „das unentbehrliche Zwischenglied zwischen der Konstatierung der Einzeltatsachen und ihrer Erklärung“. So lange eine solche Erklärung nicht geleistet ist, hat man kein Recht, ein beschreibendes Gesetz als ein ausnahmslos gültiges anzusehen. Gesetze dieser Art pflügt man auch als „empirische“

Gesetze zu bezeichnen, namentlich wenn, wie bei Temperatur und Spannkraft des Wasserdampfes, für den Zusammenhang noch nicht einmal eine mathematische Formulierung ersichtlich ist.

3. Der Kausalzusammenhang. Es gibt aber in der Physik eine überaus große Zahl von Fällen, in denen wir schon aus einer einzigen Beobachtung oder einem einzigen Versuch auf ein ausnahmslos gültiges Gesetz schließen, nämlich überall da, wo der einzelne Fall bereits das Bestehen einer Notwendigkeitsbeziehung aufdeckt. Zum Beispiel: Ein bewegter Magnet ruft in einer benachbarten Drahtspule einen elektrischen Strom hervor; ein Strom, der an einer Magnetnadel vorbeigeführt wird, lenkt diese in einer genau bestimmten Weise ab. Auch hier spielt unausgesprochen die Überzeugung von der Gleichförmigkeit des Naturlaufs eine Rolle, aber angewendet auf die besondere Form der Kausalverknüpfung. Die Feststellung des Kausalzusammenhangs ist eine der Hauptaufgaben der induktiven Methode. Sie gestaltet sich verhältnismäßig einfach, wenn wir ein Experiment von der Art anstellen, daß durch einen uns bekannten Vorgang als Ursache ein anderer, ebenfalls bekannter Vorgang als Wirkung hervorgerufen wird; wie es in den erwähnten Beispielen der Fall ist.

Wesentlich schwieriger gestaltet sich der Nachweis einer Kausalbeziehung, wenn eine Erscheinung gegeben, aber ihre Ursache erst zu ermitteln ist. Vornehmlich auf die Aufsuchung und den Nachweis derartiger Kausalzusammenhänge beziehen sich die Vorschriften, die JOHN STUART MILL in seiner Induktiven Logik aufgestellt hat. Sie sind den Regeln BACOS nachgebildet, aber unter Berücksichtigung der nachbaconischen Naturforschung. Es muß MILL zum bleibenden Verdienst angerechnet werden, diese Untersuchung so weit durchgeführt zu haben, daß es keine Fälle zu geben scheint, die sich seinen fünf „Regeln“ nicht unterordnen ließen. Daß gleichwohl mit diesen logischen Schematen das Wesen der induktiven Forschung noch nicht erschlossen ist, wird sich bald herausstellen.

Wir geben die Regeln MILLS nachstehend nach HEYMANS¹⁾ in einer Formulierung, die weniger allgemein als die MILLSche ist, aber die größere oder geringere Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schlußarten deutlicher erkennen läßt.

1) HEYMANS, Die Gesetze usw. S. 272 ff.

- I. „Wenn zwei oder mehrere Fälle, in welchen ein neuer Zustand eintritt, nur einen Umstand gemein haben, so erklärt man diesen Umstand als die wahrscheinliche Ursache oder Mitursache des neu eintretenden Zustandes (Methode der Übereinstimmung).“
- II. „Wenn ein Fall, in welchem ein neuer Zustand eintritt, und ein Fall, in welchem derselbe nicht eintritt, alle Umstände bis auf einen gemein haben, während dieser nur in dem ersteren Falle vorhanden ist, so erklärt man diesen Umstand für die Ursache oder Mitursache des neu eintretenden Zustandes (Methode des Unterschieds).“
- III. „Wenn zwei oder mehrere Fälle, in welchen ein neuer Zustand eintritt, einen oder mehrere Umstände gemein haben, darunter aber nur einen, welcher in zwei oder mehreren Fällen, in denen der neue Zustand nicht eintritt, fehlt, so erklärt man diesen Umstand für die tatsächliche Ursache oder Mitursache des neu eintretenden Zustandes (Vereinigte Methoden der Übereinstimmung und des Unterschieds, oder indirekte Methode des Unterschieds).“
- IV. „Wenn ein Teil eines neu eintretenden Zustandes auf Grund vorhergehender Induktionen als die Wirkung bestimmter Umstände erkannt worden ist, so erklärt man die übrigbleibenden Umstände für die Ursache oder Mitursache des übrigbleibenden Teils des neu eintretenden Zustandes (Methode der Rückstände).“
- V. „Wenn ein quantitativ bestimmbarer neuer Zustand in größerem oder geringerem Maße eintritt, je nachdem bestimmte Umstände in größerem oder geringerem Maße vorhanden sind, so erklärt man diese Umstände für die wahrscheinliche Ursache oder Mitursache des neu eintretenden Zustandes (Methode der Begleitveränderungen).“

Die fundamentalste und für die Naturforschung wichtigste dieser fünf Regeln ist die zweite. Der Nachweis eines ursächlichen Zusammenhangs zwischen zwei Erscheinungen wird hier dadurch geliefert, daß mit der Aufhebung der Ursache auch die Wirkung aufgehoben wird. (Man denke z. B. an die Rolle des Luftdrucks beim Versuch von TORRICELLI, vgl. S. 23). W. WUNDT weist darauf hin,¹⁾ daß sich die allgemeinen logischen Regeln des induktiven Verfahrens auf folgende Formel zurückführen lassen:

„Unter den eine Erscheinung begleitenden Umständen sind diejenigen als wesentliche Bedingungen derselben anzusehen, deren Beseitigung die Erscheinung selber beseitigt und deren qualitative Veränderung eine qualitative Veränderung der Erscheinung herbeiführt.“

In dieser Formel sind nicht nur die Regeln II und IV sondern auch die übrigen drei Vorschriften MILLS enthalten. Die angegebene Regel entspricht übrigens zwei experimentellen Methoden, die sich als Elimination und Gradation der Bedingungen bezeichnen lassen (S. 21).

Die Beispiele, die MILL selbst für seine Vorschriften gibt, sind

1) WUNDT, Logik, 1. Aufl. II 301.

nicht durchweg glücklich gewählt.¹⁾ Überhaupt aber muß von den BACO-MILLSchen Regeln gesagt werden, daß diese logischen Schemata nur die Schale, nicht den Kern des durch sie gekennzeichneten Verfahrens darstellen. Nicht die Anwendung dieser logischen Formen an sich, sondern die Auffindung des Inhalts, auf den diese Formen passen, macht das eigentliche Verdienst der Forscher aus, die auf diesen Wegen etwas geleistet haben.²⁾ Um dies zu zeigen, bedürfen wir eines näheren Eingehens auf die Rolle, die das Experiment bei der Lösung eines Problems spielt. Zunächst soll aber das Verhältnis von Beobachtung und Experiment kurz besprochen werden.

4. Beobachtung und Experiment. Eine Beobachtung wird erst dadurch wissenschaftlich brauchbar, daß sie das „Wesentliche“ vom „Unwesentlichen“ scheidet, indem sie das Augenmerk auf die besonderen, im einzelnen Fall zu betrachtenden Umstände richtet. „Alles beobachten heißt in Wirklichkeit nichts beobachten; denn nur durch die Festlegung der Aufmerksamkeit in bestimmten Richtungen können die Tatsachengebiete abgegrenzt werden, für deren Umfang genaue Feststellungen ausführbar sind.“³⁾ Das massenhafte Anhäufen von Beobachtungsmaterial ist wertlos, wenn es nicht von vornherein auf Sichtung des Stoffes oder auf die Aufsuchung der Teile und Merkmale einer wahrgenommenen Erscheinung gerichtet ist. Schon dies aber erfordert eine Schulung

1) Als ein Paradebeispiel für die Regeln MILLS gilt die von MILL (*System II, Buch 3, Kap. 9*) selbst ausführlich dargelegte Theorie der Entstehung des Taus nach WELLS. Von dieser Theorie sagt WHEWELL, der schärfste Kritiker MILLS unter seinen Zeitgenossen, daß sie zwar zuweilen als eine originale Entdeckung gepriesen worden sei, in Wahrheit aber nur in der Zurückführung des Tauphänomens auf damals bereits entdeckte Prinzipien bestanden habe (*Nov. Organum renovatum S. 238*). Den Forschern des 18. Jahrhunderts war schon bekannt, daß der in der Luft in unsichtbarer Form enthaltene Wasserdampf durch Kälte zu Wasser kondensiert wird, und daß es eine bestimmte Temperatur, den Taupunkt gibt, unterhalb dessen die Ausscheidung des Wassers in Tropfen erfolgt. Die Erklärung des Tauvorgangs durch WELLS ist denn auch nicht als ein Beispiel zu den von MILL formulierten Regeln, sondern im Wesentlichen als eine Deduktion aus bekannten Gesetzen der Wärmelehre anzusehen. Es läßt sich also nicht aufrecht erhalten, daß die WELLSche Theorie einen besonders glücklichen Beweis für den inventorischen Charakter der BACO-MILLSchen Regeln abgibt; sie liefert vielmehr eine ausgezeichnete „negative Instanz“ dagegen, daß wichtigere Entdeckungen auf dem Wege des Zusammenstellens und Sichtens bloßer Beobachtungen gemacht werden.

2) Inwiefern aber doch die Logik von Wert bleibt, darüber wird in Bd. IX dieser Handbücher von A. HÖFLER näheres dargelegt werden.

3) DÜHRING, Logik und Wissenschaftslehre, 89.

des Verstandes nicht weniger als des Auges. So wird z. B. eine genaue Beschreibung des Regenbogens nicht bloß die Gestalt und die Farbenfolge, sondern auch die Orientierung zur Sonne und die Verschiebung der Erscheinung je nach dem Standort des Beschauers umfassen müssen. Häufig wird erst die wiederholte Beobachtung der gleichen Erscheinung unter verschiedenen Umständen dazu führen, gewisse gemeinsame und somit für die Erscheinung wesentliche Züge zu erkennen.

Für die wissenschaftliche Beobachtung kommt ferner in Betracht, daß sie durch den Gebrauch von Instrumenten eine erhebliche Vervollkommnung erfährt. Allbekannte Beispiele sind Fernrohr und Mikroskop, Telephon und Mikrophon, Spektroskop, Thermoskop, Galvanoskop zu nennen, wobei zu beachten ist, daß diese Vorrichtungen selber erst der experimentellen Methode ihren Ursprung verdanken.

Es kommen endlich behufs Präzisierung der wissenschaftlichen Beobachtung die Meßinstrumente zur Anwendung, die dazu dienen, die quantitativen Seiten des Vorgangs festzustellen. Das Messen in der Physik ist allerdings schon mehr als ein bloßes Beobachten, es steht dem Experimentieren näher, da es ein Operieren an den Dingen einschließt.¹⁾

Das Experiment ist ein außerordentlich viel mächtigeres Hilfsmittel der Forschung als die bloße Beobachtung, weil es uns ermöglicht, eine Erscheinung zu jeder Zeit und unter mannigfach veränderten Umständen hervorzurufen. Insofern es zum Wesen des Experiments gehört, daß man an den gegebenen Umständen eine völlig bestimmte Veränderung einführt, kann das Experiment vornehmlich zur Verwirklichung der Schemata der Eliminations- und der Differenzmethode (S. 19) dienen. Aber auch hier zeigt sich, daß das eigentlich Bestimmende des Verfahrens weder im logischen Schema, noch in der Ausführung des Experiments selbst zu suchen ist, sondern vielmehr in der Gedankenarbeit, die beiden vorausgeht. Man hat wohl gesagt, durch das Experiment werde eine an die Natur gestellte Frage beantwortet. Auch hieraus ist ersichtlich, daß es zu allermeist auf die Fragestellung ankommt. Diese Fragestellung wird in der Regel das Werk der freien wissenschaftlichen Phantasie sein, die denn auch beim Ausdenken des Experiments das Entscheidende ist.²⁾

1) DÜHRING a. a. O. 102.

2) Eine eingehendere Würdigung des Experiments und seiner Leitmotive findet man bei E. MACH, E. u. J. (2) 201 ff.

Und auch wo der Zufall zu einer Entdeckung geführt hat, gebührt doch der Aufmerksamkeit des Forschers und seiner Fähigkeit, da ein Problem zu sehen, wo andere achtlos vorbeigegangen wären, das Hauptverdienst.¹⁾

5. Problem und Experiment. Bei jeder Forschung, und so insbesondere bei der physikalischen, handelt es sich um die Lösung von Problemen. Überall, wo etwas Unerwartetes oder auch den sonstigen Erfahrungen Widersprechendes sich ereignet, drängt sich schon dem Ungebildeten eine Frage auf, die sich zunächst in der Regel auf das „Warum“, auf den kausalen Zusammenhang bezieht. Aber der Forscher sieht auch im Alltäglichen Probleme über Probleme. Die Fähigkeit, Probleme zu sehen ist geradezu ein Kennzeichen wissenschaftlichen Geistes, der dann aber vor dem „Warum“ insbesondere auch das „Wie“ der Erscheinung ins Auge faßt. Der nächste Weg zur Lösung eines Problems pflegt zu sein, daß eine Vermutung aufgestellt wird, durch die der Vorgang unserem Denken begreiflich, seine vermeintliche Ursache angegeben oder wie man sagt, der Vorgang erklärt wird. Schon den Alten war diese Art, Probleme anzufassen, geläufig. In der merkwürdigen, als „Probleme“ bezeichneten Schrift z. B., die dem Aristoteles zugeschrieben wird, ist eine große Zahl von Problemen in der Weise behandelt, daß zu jedem eine Erklärungsmöglichkeit oder eine Reihe von solchen gegeben wird, ohne daß aber zwischen diesen eine Entscheidung stattfindet. Hierbei blieben die Alten stehen²⁾, sie waren befriedigt, wenn die Denkbarkeit der Erscheinung, d. h. die Möglichkeit der Einordnung in das System vorhandener Erkenntnisse gesichert erschien. Der merkwürdige Ausdruck *σώζειν τὰ φαινόμενα* – die Erscheinungen retten – wird in diesem Zusammenhange verständlich.

Es ist der große Vorzug der neueren Naturforschung, daß sie über den bloßen Entwurf der Möglichkeiten zu einer Entscheidung über die Richtigkeit der aufgestellten Vermutungen fortgeschritten ist. Und die Entscheidung wird durch das Experiment

1) Man vgl. F. ROSENBERGER, Über die Genesis wissenschaftlicher Entdeckungen und Erfindungen, Braunschweig 1885.

2) Es war geradezu ein Grundsatz der aristotelischen Forschung, daß wir jenseits der sinnlichen Wahrnehmung bei dem stehen bleiben müssen, was möglich ist. ARISTOTELES, Meteor. I, 7, 343, angeführt bei LEWES: Aristoteles, 71. Nach anderer Richtung hin verlangt HÖFLER (als Gegenstück zu dem bekannten *Entia non sunt multiplicanda* . . .): „*Phaenomena non sunt minuenda praeter possibilitatem*“ als Warnung vor zu weitgehendem Reduzieren.

geliefert. Man sieht also, daß das Experiment in der neuen Forschung eine ganz andere Rolle spielt, als bei BACO und auch noch bei STUART MILL, wo es in erster Reihe der Beschaffung von Erfahrungsmaterial dient.

Für das Verhältnis von Vermutung und Experiment in der neueren Forschung ist ein typisches Beispiel der Versuch von TORRICELLI. Der Versuch war schon von GALILEI vorgeschlagen worden; dieser hatte vorausgesagt, daß ebenso wie eine Wassersäule auch eine gleich schwere (also 13,6 mal so kurze) Quecksilbersäule in einer oben geschlossenen Röhre stehen bleiben würde. Daß aber die Ursache hiervon der Luftdruck sei, war bloß eine Vermutung TORRICELLIS. Der Beweis wurde erst durch PASCAL geführt, indem er zeigte, daß bei Wegnahme der über dem Gefäße befindlichen Luft auch das Quecksilber in der Röhre herabsank (*expérience du vide dans le vide*) und dann durch den Nachweis, daß beim Aufsteigen auf den Puy de Dôme die Quecksilbersäule sich verkürzte. (*L'expérience décisive du Puy de Dôme*). Man erkennt leicht, daß hier die beiden experimentellen Methoden der Elimination und der Variation zur Anwendung kommen.

Ein anderes Beispiel ist die Erklärung der Fraunhoferschen Linien durch KIRCHHOFF und BUNSEN. Man könnte sich etwa denken, KIRCHHOFF habe die Vermutung gehabt, daß eine Absorption in der Sonnenatmosphäre die Ursache sei, und habe diese Vermutung durch einen Analogieversuch bestätigt, indem er das Licht einer irdischen Lichtquelle durch Natriumdampf gehen ließ. In Wirklichkeit war der Verlauf etwas komplizierter. Bekannt war damals schon die Koinzidenz der zwei dunklen D-Linien des Sonnenspektrums mit den zwei gelben Linien, die von einer mit Kochsalz gefärbten Flamme herrühren. Wohl um sich von dieser Koinzidenz zu überzeugen, ließ KIRCHHOFF Sonnenlicht durch eine kräftige Kochsalzflamme gehen und zerlegte das Licht durch Spalt und Prisma. War das Sonnenlicht hinreichend gedämpft (bei bewölktem Himmel), so erschienen im Spektrum, wie er erwartete, an Stelle der dunklen D-Linien zwei helle; bei direktem, ungedämpftem Sonnenlicht dagegen zeigten sich überraschenderweise die beiden Linien wieder dunkel und in viel größerer Deutlichkeit als ohne die Anwesenheit der Kochsalzflamme.¹⁾ Hier

1) KIRCHHOFF, Ges. Abh. S. 564. Daß die daran angeknüpfte Vermutung (s. folg. Seite) von BUNSEN herrührt, hat KIRCHHOFF in einer Abschiedsrede in Heidelberg vor seiner Übersiedelung nach Berlin mitgeteilt.

erst bot sich ihm ein der direkten Lösung zugängliches Problem; er vermutete die Ursache der Erscheinung in der Absorption des Lichtes an der betreffenden Stelle des Spektrums durch den Natriumdampf und bestätigte diese Vermutung durch einen einfachen Versuch, indem er das DRUMMONDSche Kalklicht durch eine mit Kochsalz gelb gefärbte Natriumflamme gehen ließ und so die dunklen D-Linien in einem Spektrum, in dem sie nicht vorhanden sind, künstlich hervorrief. (Vgl. unten S. 342.)

Nicht immer führt eine Vermutung unmittelbar zur Bestätigung durch das Experiment. Häufiger sind die Fälle, in denen eine Reihe von Vermutungen über die Ursache einer Erscheinung geprüft und als unzutreffend erkannt wird, ehe die richtige Lösung gefunden wird. Hier verbindet sich das Verfahren der Analyse mit dem der Exklusion, d. h. mit der Ausschließung einer größeren oder geringeren Zahl erdachter Ursachen, bis endlich die richtige durch ein zweckmäßig ersonnenes Experiment ihre Bestätigung findet.

Ein ausgezeichnetes Beispiel dieses Verfahrens ist NEWTONS Untersuchung der Dispersion des Lichtes beim Durchgang durch ein Prisma. NEWTON selbst hat zwar in seinem zusammenfassenden Werk über die Optik den Gang seiner analytischen Untersuchung durch eine synthetische, lehrbuchmäßige Darstellung verdunkelt. Es ist aber möglich gewesen, den Weg der Entdeckung mit Hilfe vorangegangener Veröffentlichungen NEWTONS über den Gegenstand zu rekonstruieren.¹⁾

Durch das Farbenspiel eines gläsernen Prismas angeregt ließ NEWTON das Sonnenlicht durch eine $\frac{1}{4}$ Zoll breite runde Öffnung des Fensterladens in das verdunkelte Zimmer fallen und bemerkte, wenn er das Prisma hinter die Öffnung hielt, auf der gegenüberliegenden Wand zu seiner Verwunderung nicht ein kreisrundes, sondern ein in die Länge gezogenes farbiges Bild, das oben und unten geradlinig, an den Seiten halbkreisförmig begrenzt erschien. Er vermutete zunächst, daß Unterschiede in der Dicke oder der Gestalt des Glases die Erscheinung veranlaßten; er ließ das Licht durch verschiedene Stellen des Glases fallen, veränderte die Größe der Ladenöffnung, brachte das Prisma außerhalb statt innerhalb derselben an, ohne daß sich jedoch die Erscheinung veränderte. Dann mutmaßte er, daß die Erscheinung auf Unregelmäßigkeiten in der Struktur des Glases zurückzuführen sei. Er brachte daher hinter dem ersten Prisma ein zweites in entgegengesetzter Lage an und bemerkte, daß statt des langen farbigen Bandes nunmehr wieder ein rundes helles Sonnenbild auftrat; Unregelmäßigkeiten in beiden Prismen hätten sich aber verstärken müssen. Nunmehr dachte er, es könnten die von verschiede-

1) Eine ausführliche Darstellung gibt W. WUNDT (Logik II 292), einen kurzen Auszug daraus SCHULTE-TIGGES, Ph. Pr. II 15, dem der obige Text zum Teil entnommen ist.

nen Punkten der Sonnenscheibe ausgehenden Strahlen unter verschiedenen Winkeln in das Prisma eintreten und deswegen eine verschiedene Brechung erfahren. Die Messung ergab aber, daß die Breite des prismatischen Bildes genau dem scheinbaren Durchmesser der Sonnenscheibe entsprach, die Länge dagegen um mehr als das fünffache größer war. Außerdem zeigte sich, daß geringe Veränderungen in der Stellung des Prismas ebenfalls nur geringe Verschiebungen des prismatischen Bildes bewirkten. Schließlich kam ihm der Gedanke, die Lichtstrahlen könnten nach ihrem Durchgang durch das Prisma, ähnlich wie ein Ball infolge einer Kombination von fortschreitender und drehender Bewegung auf krummlinigen Bahnen die Wand erreichen, indem etwa die Lichtteilchen infolge ihres Zusammenstoßes von den Orten größten nach denen kleinsten Widerstandes abgelenkt würden. NEWTON maß die Länge des prismatischen Bildes in verschiedenen Abständen vom Prisma, fand aber, daß die Länge des Bildes überall dem Abstand proportional war; auch diese Annahme war also hinfällig. Nun blieb noch die Vermutung, daß die verschiedenfarbigen Strahlen eine verschiedene Brechbarkeit besäßen und deshalb das weiße Licht beim Durchgang durch das Prisma in jene zerlegt würde. Um dies zu prüfen trennte NEWTON die einzelnen Bestandteile des Spektrums durch einen Lochschirm und ließ jede Farbe einzeln durch ein zweites Prisma gehen; dabei beobachtete er, daß die roten Strahlen am wenigsten, die violetten am meisten abgelenkt wurden, und daß andererseits keine weitere Zerlegung in neue Farben hinzutrat. Damit war die letzte Vermutung als zutreffend erwiesen.

Das von NEWTON angewandte Verfahren besteht also darin, daß Vermutungen aufgestellt und daraus Folgerungen abgeleitet werden, die sich durch das Experiment prüfen lassen. Man sieht aber, daß auch in diesem Falle das Verdienst weniger in der Anwendung der methodischen Regeln zu suchen ist, als vielmehr in dem Reichtum der wissenschaftlichen Phantasie, und in der Fähigkeit, die angemessenen Versuche zur Prüfung der Vermutungen zu ersinnen.

NEWTON hat bekanntlich den letzten Versuch als *Experimentum crucis* bezeichnet und ihm eine hohe Beweiskraft beigemessen.¹⁾ Der Beweis wäre in der Tat zwingend, wenn mit den untersuchten Fällen die Zahl der Möglichkeiten erschöpft wäre. Dies läßt sich nun hier, wie auch sonst zumeist, nicht behaupten²⁾, über-

1) Man vgl. P. BODE, Z. U. VII 296. Die Bezeichnung rührt aus dem Novum Organum Bacons her und bezieht sich auf das Wegweiskreuz an einer Weggabelung. Wo es sich nur um eine Gabelung handelt, wie bei dem berühmten Versuch von FOUCAULT über die Lichtgeschwindigkeit im Wasser, ist natürlich eine Entscheidung durch das Experiment von zwingender Kraft.

2) WUNDT sowohl wie SCHULTE-TIGGES sind der Meinung, daß mit der letzten Annahme in der Tat die Zahl der Möglichkeiten erschöpft gewesen sei; dann hätte es aber nach Ausschließung aller vorhergehenden Möglichkeiten gar keiner experimentellen Prüfung für die letzte mehr bedurft. Jene Meinung ist aber unzutreffend, es war z. B. die von den Optikern des Mittelalters vertretene Ansicht außer acht gelassen, daß die Farben etwas von dem Lichte Verschiedenes seien und dem Lichte beim Durchgang durch das Prisma beigemischt würden.

dies ist auch der Schluß von der Folgerung auf die Prämisse nicht unbedingt zutreffend. NEWTON hat es deshalb auch nicht für überflüssig gehalten, das Ergebnis noch durch weitere Versuche zu bestätigen (das *provare e riprovare GALILEIS!*). Er hat dann aber auch noch die fernere Vermutung hinzugefügt, daß das weiße Licht nicht nur durch das Prisma in farbige Lichtarten zerlegt werde, sondern daß es geradezu aus solchen Lichtarten bestehe. Um den Nachweis hierfür zu liefern, stellte NEWTON eine experimentelle Synthese an.¹⁾ Er hob die durch ein Prisma erzeugte Farbenzerstreuung wieder auf, indem er dicht hinter das erste Prisma ein zweites von derselben Beschaffenheit, aber in entgegengesetzter Stellung anbrachte, oder auch indem er die farbigen Strahlen durch eine Sammellinse wieder vereinigte. Auch dieses Verfahren ist typisch für die physikalische Induktion und bildet die notwendige Ergänzung zu der vorangegangenen Analyse.

Man hat das im Vorstehenden gekennzeichnete Verfahren der naturwissenschaftlichen Problembehandlung auf eine bereits von PLATO angegebene Methode, die „Methode der hypothetischen Begriffserörterung“ zurückführen wollen. „Diese Methode besteht darin, daß man eine Annahme zur Lösung einer vorgelegten Frage aufstellt und die aus ihr gezogenen Folgerungen auf ihre Richtigkeit prüft, indem man sie mit dem Bekannten und Anerkannten vergleicht.“²⁾ Nun ist in der Tat das Verfahren der neueren Naturforschung ein ganz ähnliches, aber die Folgerungen aus der gemachten Annahme werden nicht an allgemein anerkannten Sätzen, sondern unmittelbar an der Erfahrung geprüft. Die Rolle, die das Experiment in diesem Zusammenhange spielt, macht einen fundamentalen Unterschied von der platonischen Methode aus. Daß gleichwohl Fäden von PLATO zu GALILEI, einem feinen Kenner PLATOS, hinführen mögen, soll damit nicht in Abrede gestellt werden.³⁾

1) Man vgl. auch WUNDT, L. u. E. II 296.

2) A. RIEHL, Humanistische Ziele des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts. Dagegen A. HÖFLER, Besprechung von Riehls Schrift in der Monatsschrift f. h. Schulen 1910, und POSKE, Die humanistischen Elemente im realistischen Unterricht.

3) In jüngster Zeit hat G. KERSCHENSTEINER darauf hingewiesen, daß die Interpretation eines griechischen Textes (z. B. aus PINDAR) und die Lösung eines physikalischen Problems ganz analoge Gedankenprozesse erfordern. Der charakteristische Unterschied ist jedoch dieser, daß man sich im ersten Falle bei dem widerspruchlosen Zusammenstimmen der gefundenen Erklärung „mit dem Bekannten und Anerkannten“ beruhigt, während im zweiten Fall die Be-

6. Gedankliche Analyse. Wenn schon bei der experimentellen Lösung eines Problems eine gedankliche Konzeption mitwirkt, so spielt sich in anderen Fällen die Lösung zu ihrem wesentlichen Teile auf dem gedanklichen Gebiete ab. Diese Fälle begreifen wir unter der Bezeichnung der gedanklichen Analyse. Es handelt sich hierbei stets darum, die einfache, hinter einer komplizierten Erscheinung verborgene Grundgestalt des Geschehens, man kann auch sagen die Elementartatsache, aufzufinden. Auf diesem Felde vor allem betätigt sich die Eigenart des genialen Forschers; vorbildlich dafür ist die Forschungsart GALILEIS.

Zutreffend kennzeichnet GOETHE (in den Materialien zur Geschichte der Farbenlehre) diese Forschungsart mit folgenden Worten: „Schien durch die Verulamische Zerstreuungsmethode die Naturwissenschaft auf ewig zersplittert, so ward sie durch Galilei sogleich wieder zur Sammlung gebracht; er führte die Naturlehre wieder in den Menschen zurück und zeigte schon in früher Jugend, daß dem Genie 'Ein Fall für tausend gelte', indem er sich aus schwingenden Kirchenlampen die Lehre des Pendels und des Falles der Körper entwickelte. Alles kommt in der Wissenschaft auf das an, was man ein *Aperçu* nennt, auf ein Gewährwerden dessen, was eigentlich den Erscheinungen zum Grunde liegt. Und ein solches Gewährwerden ist bis ins Unendliche fruchtbar.“

Schon bei der Entdeckung des Beharrungsgesetzes ist diese Forschungsart wirksam. Hinter der allmählich langsamer werdenden Bewegung der auf wagerechter Ebene rollenden Kugel enthüllt sich dem Forscher, entgegen aller Tradition, die Unzerstörbarkeit der einmal eingepprägten Bewegung, die nur durch den Einfluß äußerer Umstände eine Verminderung erfährt. Wenn auch hintennach auf die Abweichungen von der Beharrung sich eine der MILLSchen Regeln¹⁾ anwenden ließ, so bleibt das Wesentliche der Leistung doch der geniale Blick, mit dem GALILEI von vornherein die Beharrung der Bewegung hinter allen durch äußere Umstände herbeigeführten Verzögerungen „erschaute“.²⁾

stätigung wenn irgend möglich durch ein Experiment zu erfolgen hat. Handelt es sich auf naturwissenschaftlichem Gebiet nur um die Erklärung aus bereits Bekanntem, so ist die Analogie mit dem sprachlichen Verfahren eine vollständige. Vgl. G. KERSCHENSTEINER, *Wesen und Wert des naturwissenschaftlichen Unterrichts*, B. G. Teubner, 1914.

1) Die Methode (V) der Begleitveränderungen.

2) Eine andere Darstellung des Entdeckungsganges gibt MACH (Mechanik,

In der als parabolisch erkannten Wurfkurve ferner sondern sich vor seinem scharf blickenden Geiste die beiden Komponenten der wagerechten gleichförmigen und der senkrecht abwärts gehenden beschleunigten Bewegung. Die mathematische Beziehung der Parabelkoordinaten zueinander gibt ihm das Gesetz an die Hand, nach dem der fallende Stein sich der Erde nähert; der Versuch auf der Fallrinne bestätigt diese Erwartung, nicht ohne daß dabei wieder die Arbeit des zerlegenden Denkens gemäß dem Parallelogramm der Bewegungen zu leisten ist.¹⁾ Noch durchdringender erscheint sein Scharfblick bei der Entdeckung des Gesetzes $v = bt$ für die Geschwindigkeit beim freien Fall, das dem sichtbaren, durch $s = \frac{1}{2}bt^2$ dargestellten Vorgang zugrunde liegt. Weiter erkennt er in der Pendelbewegung einen Spezialfall der Bewegung auf geneigter Bahn und leitet dann aus dem Wegzeitgesetz der gleichförmig beschleunigten Bewegung das Gesetz ab, daß die Schwingungsdauer des Pendels der Quadratwurzel aus der Pendellänge proportional sei.

Ein typischer Fall gedanklicher Analyse ist auch STEVINS Zerlegung einer Kraft nach dem Parallelogrammgesetz. Das erste berühmte Beispiel hierfür ist die Zerlegung der Schwere bei einem auf schiefer Ebene beweglichen Körper. Man weiß, welche Schwierigkeiten GALILEI, dem nur das Parallelogramm der Bewegungen bekannt war, zu überwinden hatte. Heut ist die Kraftzerlegung ein leicht zu handhabendes Kunstmittel, das überall da angewendet wird, wo die Richtung der von einer Kraft hervorgegerufenen Bewegung nicht mit der Richtung der Kraft zusammenfällt. Dabei kommt uns kaum noch zum Bewußtsein, daß wir es hier mit einer fundamentalen Entdeckung zu tun haben. Ja man muß die Kraftzerlegung als etwas noch Ursprünglicheres betrachten als die Kraftzusammensetzung, kommt doch die letztere erst dadurch zustande, daß sich von den beiden zusammen treffenden Kräften die gleichgerichteten Bestandteile erhalten, die entgegengesetzt gerichteten aufheben.²⁾

4. Aufl., S. 140), an eine Stelle in GALILEIS Discorsi anknüpfend. Doch fällt bei GALILEI, wie überhaupt bei den älteren Schriftstellern, „inventio“ und „doctrina“ nicht durchweg zusammen. Ich halte es für sehr wahrscheinlich, daß die von MACH hervorgehobene Betrachtung von GALILEI nur zum Zweck der Lehrdarstellung ersonnen worden ist.

1) Vgl. WOHLWILL, Galilei und sein Kampf für die kopernikanische Lehre, S. 141–163.

2) Vgl. DÜHRING, Prinzipien der Mechanik, S. 32 ff.

Aus neuerer Zeit seien als Beispiele gedanklicher Analyse FOURIERS mathematische Zerlegung der periodischen Bewegung und OHMS Erforschung des Vorgangs im Schließungskreis der galvanischen Kette genannt.

Es sei hier ergänzenderweise noch bemerkt, daß auch das „Gedankenexperiment“ eine nicht selten gebrauchte Form der gedanklichen Analyse darstellt (MACH, Z. U. X 1; E. u. I. [2] 183). Berühmte Beispiele hierfür sind die Lehre vom Temperaturgleichgewicht, CARNOTS Kreisprozeß, KIRCHHOFFS Herleitung des Gesetzes der Absorption und Emission.

7. Grundannahmen, Hypothesen, Fiktionen.¹⁾ Mit den bisher betrachteten sind die logischen Hilfsmittel der physikalischen Forschung noch nicht erschöpft. Es handelte sich bis jetzt immer noch um Aufsuchung der Elemente des Wirklichen und der Zusammenhänge zwischen ihnen. Aber darüber hinaus treten in der Physik Denkgebilde auf, denen wir Wirklichkeitscharakter beilegen, obschon sie sich nicht als Bestandteile der Wirklichkeit und der Erfahrung nachweisen lassen. Von dieser Art sind gewisse Grundannahmen, zu denen wir durch die Beschaffenheit unseres Denkens und zugleich durch die Natur der Dinge außer uns genötigt sind.

Eine dieser Grundannahmen ist die Materie; wenn eine Mehrheit von Vorstellungen beständig in räumlicher und zeitlicher Verbindung auftritt, so nehmen wir auch von den jenen Vorstellungen entsprechenden Wirklichkeitselementen an, daß sie zu einem „Ding“ vereinigt sind²⁾; finden sich unter jenen Vorstellungen auch die der Raumerfüllung und Undurchdringlichkeit, so bezeichnen wir die Dinge als „Körper“. Die Gesamtheit der Körper aber, insofern sie raumerfüllend und undurchdringlich sind, wird unter dem Begriff der „Materie“ oder des „Stoffes“ zusammengefaßt. Wir rühren mit diesen Begriffen an eines der schwierigsten Probleme der Philosophie. Dem Physiker steht die Auffassung am nächsten, daß der Begriff des Dinges mit unserer Wahrnehmung bereits von vornherein und unmittelbar verknüpft ist³⁾, so daß

1) Ausführlicher ist dieser Gegenstand behandelt in des Verfassers Aufsatz „Die Hypothese in Wissenschaft und Unterricht“, Z. U. XXV 1.

2) Inwiefern zur Bildung des Dingbegriffs streng genommen nicht einmal eine Mehrheit von Qualitätsbegriffen erforderlich ist, darüber sehe man A. MEINONG, Über die Erfahrungsgrundlagen unseres Wissens, Abhdl. z. Did. usw. I 6 (1906) S. 27.

3) Man vgl. dazu MEINONG a. a. O. S. 25 ff.

wir erst durch einen Abstraktionsprozeß dazu kommen, das Ding von seinen Eigenschaften zu unterscheiden. Dem natürlichen Denken erscheint der Dingbegriff kaum noch als Annahme, so wenig wie uns die Existenz der Außenwelt als eine Annahme ins Bewußtsein tritt.

Eine andere Grundannahme, die für die Physik in Betracht kommt, ist die der Kraft. Haben wir ein Gesetz ermittelt, das einen bestimmten Vorgang in der Wirklichkeit mit einem oder mehreren Vorgängen oder Zuständen nach dem Schema von Ursache und Wirkung verknüpft, so können wir nicht anders, als voraussetzen, daß in der Natur der Dinge ein Realgrund existiert, der die betreffende Verknüpfung zuwege bringt. Dieser Realgrund heißt Kraft. Daß der Kraftbegriff seinem Ursprunge nach mit dem Muskelgefühl verknüpft ist, das wir bei einer körperlichen Betätigung, insbesondere beim Überwinden eines Widerstandes haben, beweist nichts gegen die objektive Brauchbarkeit dieses Begriffs. Wenn HELMHOLTZ die Kraft als die „Objektivierung der Wirkung“ bezeichnet, so meint er damit, daß sie das objektive Gegenbild dessen ist, was in unserer Vorstellung als notwendige Verknüpfung einer Ursache mit ihrer Wirkung erscheint. Sobald die Kraft solcherart objektiv gefaßt wird, tritt sie selbst als „Teilursache“ zu den anderen Teilursachen hinzu und macht diese erst vollständig.¹⁾ Wenn die Bewegung eines Magneten in einen benachbarten Leiter einen galvanischen Strom hervorruft, so schreiben wir diese Wirkung der „induzierenden Kraft“ des Magneten zu, die somit das letzte Glied in der Reihe der Teilbedingungen bildet. Es ist ersichtlich, daß der Kraftbegriff in der hierdurch gekennzeichneten Auffassung nicht eine Erklärung bedeutet, sondern selbst ein Problem bleibt. Führt man dann die induzierende Kraft auf die Wirkung des magnetischen Feldes zurück, so verlegt man den Kraftbegriff nur an eine andere Stelle und bezeichnet die neu eingeführte Kraft als Feldstärke. So ist auch die Gravitationskraft der Ausdruck dafür, daß zwischen materiellen Körpern Zusammenhänge bestehen, die sich auf das Schema von Ursache und Wirkung zurückführen lassen, ohne daß bisher,

1) Man vgl. HÖFLER, Logik, § 28: „Die Begriffe Fähigkeit, Kraft, Vermögen, Disposition ... bezeichnen solche Teilursachen gegebener Erscheinungen, welche 1. im Vergleich zu anderen Teilursachen ... mehr oder minder bleibende Bedingungen sind, die aber 2. als solche nicht direkt wahrgenommen, sondern nur aus dem gesetzmäßigen Stattfinden der Erscheinungen erschlossen werden können.“

ähnlich wie bei der magnetischen Kraft, eine weitere Zurückführung auf von Ort zu Ort sich ändernde Zustände des Mediums gelungen wäre. Hiernach trifft der SCHOPENHAUERSCHE Ausspruch „Kraft ist Ursache, insofern sie unbekannt ist“ wenigstens einen Teil einer erschöpfenden Analyse des Kraftbegriffs.¹⁾ Und selbst wer den Wirklichkeitscharakter der Kraft in Abrede stellt, wird die Brauchbarkeit des Begriffs für die Darstellung des Zusammenhangs der Vorgänge zugeben müssen.

Im Unterschiede zu den eben besprochenen Grundannahmen sind Hypothesen im eigentlichen Sinne des Wortes solche Annahmen, die zum Zweck gedanklicher Zusammenfassung der Naturerscheinungen gemacht werden, ohne daß unser Denken dazu nötigte, gerade diese Annahmen zu machen. Die Annahme eines Kontinuums z. B. ist mit dem Denken ebenso verträglich wie die Annahme einer atomistischen Struktur der Materie. Dennoch hat man der letzteren den Vorzug gegeben, weil sie mit der Erfahrung in durchgängiger Übereinstimmung ist und zum Verständnis einer großen Zahl von Erscheinungen führt. Hypothesen sind in der Regel von der Art, daß der direkte Nachweis ihrer Richtigkeit außer dem Bereich der Möglichkeit liegt. So definiert BIEDERMANN²⁾: „Solche Voraussetzungen, welche um der Tatsachen willen gemacht werden, aber selbst der tatsächlichen Nachweisung (wenigstens vorderhand) sich entziehen, nennen wir Hypothesen.“ Wenn NEWTON in dem nur allzuoft angeführten Ausspruch „*hypotheses non fingo*“ die Aufstellung von Hypothesen ablehnt, so ist dies doch nicht in dem allgemeinen Sinn zu verstehen, den man ihm häufig beilegt. Die Ablehnung bezieht sich zunächst nur auf die überaus phantastische Hypothese der kartesischen Wirbel zur Erklärung der Bewegungen der Himmelskörper. Sagt er doch andererseits selbst: „Die Gravitation muß durch ein Agens verursacht sein, das beständig nach bestimmten Gesetzen wirkt; aber ob dieses Agens materiell oder immateriell sei, habe ich der Erwägung meiner Leser überlassen.“³⁾ Hypo-

1) SCHOPENHAUER, Handschr. Nachlaß S. 112, angef. bei HEYMANS, G. u. E. S. 359. - Über die Überführung der Kausalitätsbeziehung in eine Identitätsbeziehung vgl. man die lichtvollen Darlegungen von HEYMANS in Ostw. Ann. d. Naturphil. I u. Z. U. XV 369.

2) Die Bedeutung der Hypothese, Pr. Abh. Dresden 1894, S. 40; vgl. Z. U. VIII 170.

3) NEWTON, Brief an BENTLEY, 25. Februar 1692/93, angef. bei MACH, E. u. I. 237.

thesen waren übrigens für NEWTON selbst auch unentbehrlich, wie namentlich sein eigenes Verhalten in der Optik zeigt, wo er sich der Emissionshypothese anschloß. Ebenso wie diese war auch die Undulationstheorie eine Hypothese, an der nur die Periodizität des Vorganges durch die Tatsachen gefordert ist, während die mechanischen Schwingungen des Lichtäthers hypothetisch waren und, wie man weiß, neuerdings durch andere Vorstellungen verdrängt sind.

Es ist auch keineswegs ausgeschlossen, daß Hypothesen, die ursprünglich ohne Aussicht auf direkte Bestätigung aufgestellt worden sind, im Verlauf der Wissenschaftsgeschichte eine solche Bestätigung finden, daß sie aus Hypothesen zu unmittelbaren Darstellungen des Tatsächlichen werden. So ist die kopernikanische Hypothese heut als eine wohlbegründete Lehre anzusehen, die trotz gelegentlicher Anfechtungen doch fraglos der Wirklichkeit entspricht. Eine ähnliche Entwicklung scheint in neuester Zeit der atomistischen Hypothese beschieden zu sein. Hervorragende Physiker wie RUTHERFORD und PLANCK¹⁾ bekennen sich heut zu der Überzeugung von der Realität der Atome; wir erleben somit heute eines der bedeutsamsten Ereignisse der Wissenschaftsgeschichte, die Umwandlung einer Jahrtausende alten Hypothese in eine festbegründete, Wirklichkeit darstellende Lehre. (Z. U. XXV 3.)

Das Schicksal der meisten Hypothesen ist jedoch, daß sie beständiger Umbildung unterliegen und schließlich durch andere verdrängt werden. Dadurch wird ihr Wert nicht aufgehoben; nicht nur ermöglichen sie eine dem jeweilig erreichten Wissensstande angepaßte einheitliche Zusammenfassung der Tatsachen, sie dienen auch andererseits zu neuen Problemstellungen und damit zur Auffindung neuer Erscheinungen. Man hat aus diesem Grunde wohl von „Arbeitshypothesen“ gesprochen, die wesentlich dadurch, daß sie gewisse Fragestellungen an die Hand geben, von Nutzen sind.

Manche dieser Arbeitshypothesen sind selbst dann, wenn ihre Unhaltbarkeit erkannt ist, als bequeme Mittel der Darstellung beibehalten worden; sie werden namentlich im Unterricht noch immer gebraucht, nur muß dies in dem vollen Bewußtsein und mit dem offenen Eingeständnis geschehen, daß es sich um Fiktionen han-

1) So auch H. POINCARÉ in „Letzte Gedanken“ S. 199: „das chemische Atom ist somit eine Realität“.

delt. Von dieser Art sind der Wärmestoff, die Lichtstrahlen, der freie Magnetismus, die elektrischen Fluida. Man kann derartige „Erdichtungen“ auch als „Bilder“ oder „Gleichnisse“ bezeichnen, die nur dazu dienen, die Vorgänge auf einfache Art zu beschreiben.

Fiktionen anderer Art sind die Annahmen absolut starrer Körper, vollkommen elastischer Körper, völlig unzusammendrückbarer Flüssigkeiten u. dgl. m.¹⁾ Diese stellen Abstraktionen dar, die zum Zweck der Vereinfachung ersonnen sind, um verwickelte Erscheinungen wenigstens in ihren Hauptzügen zu beschreiben. Sie sind als erste Annäherungen (Approximationen) anzusehen, die in der Regel im weiteren Verlauf zu immer genauerer Anpassung an die Wirklichkeit umgebildet werden.

8. Deduktion und System. Daß die Deduktion bei der Analyse der Erscheinungen und als deren Ergänzung eine wichtige Stelle einnimmt, ist bereits früher erwähnt worden. Die Vorkämpfer der induktiven Methode, besonders FRANCIS BACON selbst (1561–1626), und schon der alte ROGER BACON (1214–1294), haben viel von der Unfruchtbarkeit des deduktiven Verfahrens geredet. Demgegenüber ist aber entschieden der Wert zu betonen, den die Deduktion für die Naturforschung besitzt. Jede, sei es experimentelle, sei es gedankliche Analyse, führt zu Einsichten elementarer Art, die ihrerseits wieder zu Ausgangspunkten von Synthesen werden können. So führt NEWTONS Lehre von der Dispersion des Lichts zu den Versuchen über Mischung von Spektralfarben, zur Herleitung der Komplementärfarben, zur Erklärung des Regenbogens usf. So schließt sich an GALILEIS Beharrungsgesetz durch Vermittlung der HUYGENSSchen Formel für die Schwingkraft die Entdeckung des Gravitationsgesetzes. Ein bemerkenswertes Beispiel für die schöpferische Kraft des Syllogismus ist auch die HUYGENSSche Auffindung des Schwingungsmittelpunktes und der reduzierten Länge des physischen Pendels.²⁾ Sie beruht auf dem durch geniale Intuition in Anknüpfung an einen GALILEISchen Gedanken gefundenen Obersatz: „Wenn ein physisches Pendel aus irgendwelcher Höhe bis zur tiefsten Lage des Schwerpunktes sich bewegt hat und nun die Verbindungen zwischen den einzelnen Massenpunkten gelöst werden, dergestalt, daß jede von diesen mit der erlangten Geschwindigkeit in einfacher Pendelbewegung weiterschwingt, so wird der Schwerpunkt aller Massenpunkte

1) HÖFLER, Logik, § 90. Physik, §§ 25, 35, 50, und Log. Anh. § 36.

2) Vgl. VAILATI, Scritti p. 136.

genau so hoch steigen, wie er vorher herabgefallen ist.“¹⁾ Als zweite Prämisse nahm HUYGENS den Galileischen Satz hinzu, der den Zusammenhang zwischen der Fallhöhe und der erlangten Fallgeschwindigkeit auf beliebig geneigter Bahn ausspricht. Die Folgerung aus diesen Prämissen wird durch das Experiment bestätigt, kann aber auf keine Weise aus dem Obersatz allein herausgelesen werden.

Die Deduktion ist ferner das gewaltige Mittel, durch das die „beschreibenden“ Gesetze, die das induktive Verfahren liefert, ihre Begründung und damit erst ihre volle Giltigkeit erlangen. Hier ist wieder als klassisches Beispiel das Wegzeitgesetz GALILEIS und seine Herleitung aus der Konstanz der Schwere anzuführen. Ein anderes Beispiel ist die Zurückführung des empirisch gefundenen Hebelgesetzes auf das Gesetz der Drehmomente und dessen Begründung durch die Theorie der am starren Körper wirkenden Kräfte.

Ein Hauptwert der Deduktion besteht aber schließlich darin, daß sie dazu dienen kann, die Erkenntnisse eines größeren Gebietes in ihrem Zusammenhange miteinander und mit gewissen allgemeinen Gesetzen darzustellen, derart, daß sich die speziellen Gesetze sowohl als die Einzelerkenntnisse aus diesen allgemeinen Gesetzen ableiten lassen. Ein solcher Zusammenhang würde, wenn er sich über das ganze Gebiet der Physik erstreckte, ein deduktives System der Physik liefern. Ein solches System gibt es zurzeit noch nicht und kann es nicht geben, da die Grundanschauungen und Grundbegriffe noch in beständigem Wandel begriffen sind. Die Rolle der Deduktion wird sich immer nur auf einzelne Teilgebiete erstrecken. Eine durchgängige Deduktion des ganzen Gebietes aus obersten Sätzen nach Art eines mathematischen Lehrgebäudes ist nicht ausführbar (und sollte daher auch im Unterricht nicht versucht werden).

Dennoch kann man von einem System der Physik im Sinne eines übersichtlichen Zusammenhanges reden. Der Begriff des Systems ist eben umfassender als der der Deduktion. Auch die bloße Anordnung des Stoffes nach gewissen leitenden Gesichtspunkten kann, wie das Beispiel der beschreibenden Naturwissenschaften zeigt, zu einem System führen. Ein solches System stellt auch die Physik, trotz beständiger Umgestaltungen, dar. Es

1) Vgl. MACH, M. (4) S. 178.

hat vor den Systemen der beschreibenden Naturwissenschaften den Vorzug, daß es nicht nur ein geordnetes Nebeneinander darstellt, sondern daß Beziehungen und Wechselwirkungen der mannigfaltigsten Art die Teile des Systems miteinander verknüpfen, und daß gewisse Begriffe, wie der der Masse, der Kraft, der Energie in allen Teilen eine bestimmende Rolle spielen.

Insofern in das System eine Reihe von unbewiesenen oder unbeweisbaren Sätzen mit eingeht, behält das Ganze scheinbar den Charakter der Unsicherheit und Unabgeschlossenheit. Gleichwohl gewinnt es im Lauf der Zeit einen hohen Grad von Zuverlässigkeit durch die Möglichkeit einer gegenseitigen „Verfestigung“ der Erkenntnisse.¹⁾

§ 3. Aufgaben und Ziele des physikalischen Unterrichts.

Die preußischen Lehrpläne von 1901 stellen als Lehrziel für die Naturwissenschaften das Folgende hin: „Bei dem Unterricht in den Naturwissenschaften ist die Aneignung einer Summe einzelner im Leben verwendbarer Kenntnisse, so schätzbar sie an sich ist, doch nicht das Endziel, sondern nur ein Mittel zur Förderung der allgemeinen Bildung. Der Schüler soll lernen, seine Sinne richtig zu gebrauchen und das Beobachtete richtig zu beschreiben; er soll einen Einblick gewinnen in den gesetzmäßigen Zusammenhang der Erscheinungen und in die Bedeutung der Gesetze für das Leben; er soll auch, soweit dies auf der Schule möglich ist, die Wege verstehen lernen, auf denen man zur Erkenntnis dieser Gesetze gelangt ist und gelangen kann. Anschauung und Versuch haben im Unterricht einen größeren Raum einzunehmen.“

In diesen Sätzen ist alles Wesentliche zusammengefaßt, was an nächsten und unmittelbaren Zielen, insbesondere auch für den Physikunterricht, in Betracht kommt. Wir gliedern diese Ziele, indem wir nacheinander die Ausbildung des Beobachtungsvermögens, die Übermittlung von Kenntnissen, die Einsicht in die gesetzmäßigen Zusammenhänge und die Wege, auf denen diese Kenntnisse und Einsichten gewonnen werden, einer kurzen Erörterung unterziehen. Faßt man die allgemeine Menschenbildung in ihrem weitesten Umfang ins Auge, so kommen in erzieherlicher

1) „Die Physik ist ein Begriffssystem mit rückwirkender Verfestigung.“
P. VOLKMANN, Erkenntnistheoretische Grundzüge S. 114.

Hinsicht noch die Bildung des Willens, die Erziehung zum praktischen Handeln und die sprachliche Ausbildung hinzu.¹⁾

1. **Die Ausbildung des Beobachtungsvermögens** kommt nicht allein der Physik, sondern allen Naturwissenschaften zu und wird vielleicht in den sogenannten beschreibenden Naturwissenschaften in noch größerem Umfange gepflegt. Was die Physik vor ihren Schwesterwissenschaften in dieser Richtung auszeichnet, ist die Nötigung, nicht ruhende Dinge, sondern Vorgänge in ihrem tatsächlichen Verlauf genau aufzufassen. Wie schwer dies ist, zeigt das bekannte Beispiel FARADAYS, der vor einem Versuch, der ihm vorgeführt werden sollte, die Frage stellte: „Worauf soll ich achten?“ Die Gefahr eines oberflächlichen und flüchtigen Beobachtens ist heut, im Zeitalter des „Kino“, vielleicht größer als jemals früher. Man wird daher nicht zuviel tun, wenn man die Vorrichtung, an der und mit der etwas gezeigt werden soll, in ihren Teilen beschreibt oder beschreiben läßt und womöglich auseinandernimmt bzw. aus den Teilen aufbaut, ehe man den Vorgang selbst vorführt. Und auch während der Vorführung ist es nötig, auf die Stelle und den Zeitpunkt hinzuweisen, an denen das zu Beobachtende sich abspielt.

Indessen ist damit noch keineswegs genug für die Ausbildung des Beobachtungsvermögens getan. Diese kann erst in vollem Maße dann erfolgen, wenn der Beobachtende mit dem Objekt oder dem Vorgang in engerer Fühlung steht, als dies bei Demonstrationsversuchen in vollen Klassen gemeinhin der Fall ist. Hier müssen die praktischen Schülerübungen hinzutreten, von denen an anderer Stelle ausführlicher die Rede sein wird.

2. **Die Übermittlung positiver Kenntnisse.** Obwohl die Aneignung bloßer „Kenntnisse“ an sich von manchen Seiten gering eingeschätzt wird, so ist doch zu betonen, daß die Einzelkenntnisse nicht nur ein Mittel zur Erlangung allgemeiner Bildung sind, sondern einen Bestandteil der allgemeinen Bildung selbst ausmachen, sofern man unter dieser nicht bloße inhaltsarme Allgemeinheiten versteht, sondern den Inbegriff von Kenntnissen, deren alle Menschen ohne Rücksicht auf ihren Beruf bedürfen, um das menschliche Leben und die sie umgebende Natur richtig aufzufassen. Kenntnis physikalischer Einzeltatsachen und Gesetze

1) Wir schließen uns in diesem Abschnitt mehrfach an die vortrefflichen Ausführungen von KEFERSTEIN, Ph. 843 ff., an.

ist z. B. notwendig, um die meteorologischen Erscheinungen zu verstehen, das gleiche gilt von den zahlreichen Gegenständen des täglichen Gebrauchs und besonders von den bewundernswürdigen Leistungen der heutigen Technik. Wenn auch eine Übertreibung des zulässigen Maßes von Kenntnissen zu widerraten ist¹⁾, so muß doch andererseits darauf gehalten werden, daß die Hauptergebnisse des Unterrichts gedächtnismäßig fest eingeprägt werden. Damit soll nicht dem Mißbrauch der nur gedächtnismäßigen Einprägung das Wort geredet werden. Das Ideal wäre ja, die erste Aneignung des Stoffes so eindringlich zu gestalten, daß sich die Ergebnisse von selbst einprägen. Doch wird die feste Aneignung zumeist nicht ohne öftere Wiedervergegenwärtigung möglich sein. Man Sorge nur, daß dies nicht in rein mechanischer Weise geschieht. Auch GRIMSEHL (D. 8) fordert mit Recht: „Die Schüler sollen sich einen gewissen Vorrat an positiven, auch zahlenmäßigen Kenntnissen durch die Anschauung und durch die verstandesmäßige Ableitung erwerben und dann gedächtnismäßig festlegen.“ Er verlangt besonders auch, daß die Schüler gewisse Naturkonstanten dauernd wissen, so die Fallbeschleunigung, die spezifischen Gewichte und die Wärmeausdehnungskoeffizienten einiger Stoffe, den Arbeitswert der kalorischen und der elektrischen Energie usf., wobei die weise Einschränkung anempfohlen wird, die Konstanten nur mit einer oder höchstens zwei Stellen merken zu lassen, weil dies zum schätzungsweisen Überschlagen der Größenverhältnisse in der Regel genügt. Braucht man, etwa bei den praktischen Übungen, genaue Zahlen, so stehen dafür Tabellen zur Verfügung. „Man kann den Wert der positiven Kenntnisse vergleichen mit dem Wert, den gutes Werkzeug für den Handwerker hat. So wie dem Handwerker die Arbeit erleichtert wird, wenn er sein Werkzeug in gutem Zustande erhält, so wird dem gebildeten Menschen die Erkenntnis der Umwelt und die Arbeit in dieser erleichtert, wenn er einen Vorrat von positiven Kenntnissen aus dieser Umwelt und für sie besitzt. Andererseits genügt der Besitz allein nicht; der Handwerker muß sein Werkzeug zu benutzen verstehen, der gebildete Mensch muß sein Wissen anzuwenden verstehen. Das ist es, wenn wir verlangen, daß aus dem Wissen ein Können werden soll.“ (GRIMSEHL, D. 10.)

1) Ich erinnere mich aus meiner Schulzeit, daß uns spezifische Gewichte und Härten einer großen Zahl von Mineralien zu lernen aufgegeben wurden, mit der Begründung, es schade nichts, wenn man auch diese wisse!

3. Einführung in die Erkenntnis der gesetzmäßigen Zusammenhänge und in das System der Physik. Der Unterricht soll nicht bloß die Kenntnis von Eigenschaften vermitteln, sondern in den Geist der Wissenschaft selbst einführen. Wissenschaft aber ist gestaltetes, zusammenhängendes Wissen. Schon auf der Unterstufe wird man sich nicht mit der Vorführung von Einzelheiten begnügen dürfen, sondern innerhalb engerer Bereiche die in ihnen herrschenden Zusammenhänge herausheben müssen.

Auf der Oberstufe wird nach und nach das Verständnis für das System der Physik als Wissenschaft und für die großen, innerhalb dieses Systems vorhandenen Zusammenhänge zu wecken sein. So verordnen auch z. B. die Lehrpläne für den Physikunterricht an den Württembergischen höheren Schulen (1912): „Es ist den großen systematischen Zusammenhängen nachzugehen und zu einer einheitlichen Auffassung der Gesamtheit der physikalischen Erscheinungen hinzuleiten.“ Nicht als ob auf der Oberstufe der Unterricht etwa schon von allem Anfang an in streng systematischer Anordnung zu geschehen hätte. Vielmehr soll mit den erweiterten Einsichten das System sich nach und nach von selbst ergeben. Ist das Lehrbuch gut systematisch angeordnet,¹⁾ so wird auch bei einem methodisch vorschreitenden Lehrverfahren, sofern nur der erarbeitete Stoff an der entsprechenden Stelle des Lehrbuchs eingereiht erscheint, eine immer vollkommnere Einsicht in das Ganze des Systems gewonnen werden. Es wird auch keine Gelegenheit versäumt werden dürfen, um die großen durchgehenden Gesichtspunkte, namentlich auch die Energieerhaltung, immer wieder zum Bewußtsein zu bringen; daß das Energieprinzip für sich allein nicht die Macht hat, ein so durchgearbeitetes Weltbild zu liefern, wie die dynamische Physik im engeren Sinne, ist bereits mehrfach dargelegt worden.²⁾

Daß im übrigen an den Abschluß des Physikunterrichts die Herausarbeitung eines physikalischen Weltbildes gehört, das dem gesicherten Stande des heutigen Wissens entspricht, — dies geht schon aus unserer Kennzeichnung der Physik als Wissenschaft hervor. Wir kommen darauf im weiteren Gang der Darstellung noch zurück.

1) Wie dies besonders in HÖFLERS Physik und in seiner Naturlehre für die Oberstufe der Fall ist. In diesen Werken sind zahlreiche Neuerungen in der Anordnung und logischen Gliederung des Stoffes durchgeführt, wie auch andererseits logische Mängel in der Anordnung und der Terminologie beseitigt worden.

2) HÖFLER, Zur gegenwärtigen Naturphilosophie S. 15 ff., KEFERSTEIN, S. 837.

4. Einführung in das wissenschaftliche Denken. Es sei hier nochmals an die in der Einleitung angeführten Worte erinnert: „Indem der Physikunterricht dartut, wie physikalisches Wissen erzeugt wird, liefert er eines der gültigsten Zeugnisse von der Entstehung des Wissens überhaupt. Auch der Physikunterricht hat daher eine im eigentlichen Sinne humanistische Aufgabe.“

Diese Worte, die ein Programm bedeuten, haben bisher mehrfach nähere Erläuterung gefunden, am eingehendsten in einem Aufsatz von HÖFLER¹⁾, der den Vorrang der Physik vor allen anderen Fächern bezüglich der Erziehung zum wissenschaftlichen Denken darauf zurückführt, daß der Schüler hier „an dem denkbar einfachsten Stoff die denkbar exaktesten Methoden geübt sieht.“ Ferner haben die sogenannten Meraner Lehrpläne der Unterrichtskommission der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte unter die Grundsätze für den Physikunterricht auch diesen aufgenommen: „Die Physik als Unterrichtsgegenstand ist so zu betreiben, daß sie als Vorbild für die Art, wie überhaupt im Bereich der Erfahrungswissenschaft Erkenntnis gewonnen wird, dienen kann.“

Über die Wege, welche die Physik einschlägt, um zu ihren Erkenntnissen zu gelangen, ist an früherer Stelle bereits das Wesentlichste dargelegt worden. Inwieweit der Unterricht diese Wege selbst einschlagen, und wie weit er wenigstens das Eindringen in das Verständnis dieser Wege ermöglichen kann, wird im nächsten Abschnitt noch näher zu erörtern sein.

§ 4. Die Methode des physikalischen Unterrichts.

Wir erinnern an unsere Forderung: Die Methode der Physik muß auch die Methode des physikalischen Unterrichts sein. Vieles, was hier zu sagen wäre, ist schon in den vorausgehenden Abschnitten erörtert worden. Es ist selbstverständlich, daß der Unterricht nicht all den oft verschlungenen Wegen folgen wird, die in der Forschung eingeschlagen worden sind. Nicht die Wege im einzelnen, sondern nur die Methode, d. h. die Art des Vorgehens, soll im Unterricht die gleiche sein, wie in der Wissenschaft.

Man hat ungeheuer viel darüber geschrieben, ob die induktive oder die deduktive Methode im Unterricht den Vorzug

1) Z. U. II 1 (1888), näher ausgeführt in HÖFLERS Antrittsvorlesung „Die humanistischen Aufgaben des physikalischen Unterrichts“ (Vieweg, 1904).

verdient, ja, man hat kurzweg jene der Unterstufe, diese mehr der Oberstufe zuweisen wollen. Mit Unrecht, denn beide gehen auf allen Stufen Hand in Hand. Sind die Gesetze auch induktiv gewonnen, so führen die Anwendungen doch beständig auf Deduktionen. Daß es unzulässig ist, den ganzen Unterrichtsstoff *more mathematico* deduktiv zu behandeln (soweit dies überhaupt möglich ist), wurde schon oben erwähnt (S. 34) und dürfte heute allgemein zugegeben werden.

Von Unterrichtsmethoden im engeren Sinn wird häufig die heuristische Methode der dogmatischen gegenüber gestellt. Mit unserem oben ausgesprochenen Prinzip ist nur die erste Methode verträglich. Man darf jedoch den Begriff der heuristischen Methode nicht so eng fassen, daß man darunter hauptsächlich die Betätigung der Schüler an praktischen Übungen versteht.¹⁾ Die heuristische Methode als solche kann auch im Klassenunterricht zu voller Geltung gebracht werden, sofern nur der Unterrichtende von den Schülern die Gedankengänge durchlaufen läßt, die zu einem Versuch oder einem Forschungsergebnis gedanklicher Art führen.

Von vornherein abzulehnen ist ein Verfahren, das noch in manchen Lehrbüchern, und gewiß auch öfter im Unterricht eingeschlagen wird, nämlich aus einer Einzelbeobachtung durch bloße Verallgemeinerung auf die Regel oder das allgemeine Gesetz zu schließen; so wenn aus einem Versuch über die Ausdehnung durch die Wärme „geschlossen“ wird, daß die Wärme alle Körper ausdehnt. Der Schein, daß so etwas ohne weiteres zulässig sei, sollte im Unterricht sorgfältig vermieden werden, denn zumeist handelt es sich dabei um die Art von Induktion, die wir als „schlechte Induktion“ bezeichnen müssen, und deren zeitweilige Anwendung das Verfahren der Naturwissenschaft überhaupt in ein falsches Licht gesetzt hat. Wo ein Einzelversuch mit einem allgemeinen Gesetz in Zusammenhang gebracht wird, sollte vielmehr der Einzelversuch nicht als Erkenntnisgrund, sondern als bloßes Beispiel oder auch als Bestätigung des Gesetzes angesehen werden.

Es gibt allerdings auch zahlreiche Fälle, in denen ein einziger Versuch eine entscheidende Bedeutung gewinnt; gerade diese Fälle kennzeichnen die eigentliche wissenschaftliche Methode

1) Vgl. DANNEMANN, Der naturwissenschaftliche Unterricht usw.

der Induktion (vgl. oben § 2 Nr. 3) und sollten auch bei dem heuristischen Verfahren eine wesentliche Rolle spielen.

Das heuristische Verfahren setzt seinem Begriff nach voraus, daß nach etwas noch Unbekanntem gesucht wird. Es muß also eine Fragestellung vorausgehen, oder anders ausgedrückt, es muß von einem Problem ausgegangen werden.

Das wissenschaftliche Denken beginnt mit der Fähigkeit, Probleme zu sehen und mit dem Verlangen diese Probleme zu lösen (vgl. § 2 Nr. 4). Das „Sich wundern“ ist nach einem alten Wort der Ursprung der Philosophie, es ist aber zugleich der Ursprung aller Wissenschaft. Sich wundern heißt, da ein Problem sehen, wo der nicht denkende Mensch achtlos vorübergeht. Können wir die Jugend dazu erziehen, Probleme zu sehen, so ist schon viel für ihre wissenschaftliche Ausbildung gewonnen, mehr noch, wenn wir sie dazu bringen, sich an der Lösung von Problemen selbst zu versuchen.

Und wie die Wissenschaft von Problem zu Problem fortschreitet, so muß es auch der Unterricht tun. Wer so verfährt, kann des lebhaftesten Interesses der Schüler sicher sein, die schon bei der Behandlung eines Problems auf das nächstfolgende begierig sein, ja, es mit Eifer selbst zu erkennen versuchen werden.

Die einfachsten Probleme sind die, die sich dem gesunden Menschenverstand (dem „vorwissenschaftlichen“ Denken) sozusagen von selbst aufdrängen, wie etwa: warum steigt das Wasser in den Saugpumpen in die Höhe? Warum ist ein Stein im Wasser leichter als in der Luft? Wie entsteht das Bild in einem Spiegel? Andere Probleme treten erst dem eigentlichen wissenschaftlichen Denken entgegen, so das berühmte Problem, mit dem GALILEI die neue Physik eröffnet: Nach welchem Gesetz muß die Geschwindigkeit eines bewegten Körpers zunehmen, wenn der zurückgelegte Weg dem Quadrat der Zeit proportional sein soll? Oder NEWTONS nicht minder berühmte Frage: Ist es die gleiche Kraft, die den Mond in seiner Bahn von der geraden Linie ablenkt, und die den Stein zur Erde fallen macht? Endlich drängen die technischen Erfindungen dem Kinde wie dem denkenden Laien heute allerorten Probleme besonderer Art auf: Wie ist eine Dampfmaschine eingerichtet, und wie ein Elektromotor?

Von diesen drei Arten von Problemen spitzt sich die erste Art im wesentlichen auf die Frage zu: Woher kommt das?

Ihr Ziel ist die Entdeckung einer Kausalverknüpfung. Die zweite Art beschäftigt sich vielmehr mit der Frage: Wie läßt sich das denken? (Z. B. daß am Hebel eine kleine Kraft eine große Last bewegen kann.) Die Probleme sind hier mehr theoretischer Art, sie zielen auf einen gedanklichen Zusammenhang ab. Die dritte Art endlich ist von wesentlich praktischer Natur: aber die Frage, wie ist das eingerichtet und wozu dient das, hängt mit der andern Frage eng zusammen, wie macht man das? Und so führen diese Probleme, richtig angefaßt, mitten in die Gedankenwelt des Erfinders hinein.

Nicht alle Probleme wird man im Kopf der Schüler entstehen lassen können. Gerade bei den bedeutsamsten, den im engeren Sinn wissenschaftlichen, wird man nicht umhin können, den historischen Weg einzuschlagen; aus der historischen Verdeutlichung des Problems aber erwächst dann erst das Verständnis und die Wertschätzung der Leistung, die wir dem großen Forscher verdanken.

Ebenso wenig ist es möglich, ein Problem immer sofort und sozusagen aus dem Handgelenk zu lösen. Das Problem der Saugpumpe ist ein besonders lehrreiches Beispiel. Erst nach der Entdeckung des Luftdruckes fiel die Lösung des Problems der Forschung als reife Frucht zu, und erst das Gesetz für die Spannkraft der Luft ermöglichte es, den Vorgang quantitativ zu verfolgen. Es wird sich an solchen Beispielen auch der Sinn dafür entwickeln lassen, daß es Probleme gibt, die noch heut aller Lösungsversuche spotten, und daß dies nicht einen Vorwurf für die Wissenschaft bedeutet, sondern vielmehr auf die Unerschöpflichkeit der Aufgaben hinweist, die der Wissenschaft gestellt sind. Ruft doch auch jede Lösung eines Problems neue Probleme hervor, so daß man von einer Genealogie der Probleme sprechen könnte.

Wir werden im speziellen Teil dieses Werkes den Versuch machen, den gesamten Unterrichtsstoff um gewisse Einzelprobleme zu gruppieren. Damit soll weniger ein Muster als vielmehr ein Beispiel gegeben werden. Es sind ja die mannigfachsten Problemstellungen, und daher die mannigfachsten Arten, den Gegenstand anzufassen, möglich. Was wir wollen, ist nur dies: Den Sinn für eine „Problemp Physik“ in unseren Lesern zu wecken und damit aller deduzierenden und zu frühzeitig systematisierenden Physik den Boden zu entziehen.

Andererseits darf, wenn das System das Ziel der physikalischen Forschung bedeutet (§ 1 Nr. 5), auch im Unterricht der Ausblick auf das Ziel nicht fehlen. Als das geeignetste Mittel hierfür erscheint die systematische Anordnung des Stoffes im Lehrbuch. Wenn die Ergebnisse des heuristischen Unterrichts in gewissen Zwischenräumen mit der Darstellung im Lehrbuch verglichen werden, so ergibt sich von selbst die Einsicht zunächst in gewisse Teilzusammenhänge, an die sich später bei zusammenfassenden Generalübersichten der Einblick in den Aufbau des Systems anschließt. Daneben wird bei allen Gelegenheiten die Bedeutung gewisser Grundbegriffe, wie namentlich des Energiebegriffs, für die einheitliche Auffassung der Erscheinungen zu betonen sein, ohne daß deshalb die Physik schlechthin zur Energetik gemacht oder gar in ein System deduktiver Ableitungen aus dem Energieprinzip verwandelt zu werden braucht. Bezüglich der systematischen Gliederung des Stoffes sagt übrigens KEFERSTEIN (Ph. 838) mit Recht, daß eine solche auf Grund der kinetischen Anschauung in der Schule völlig verfehlt wäre, es müsse hier vielmehr bei der herkömmlichen, vorzugsweise physiologisch begründeten Gliederung bleiben.¹⁾ Ja, „auch bei der vollkommensten Gestaltung der Physik ist stets das rein gegenständliche System durch die Hinweisung auf die Einrichtung des Inbegriffs der Wahrnehmungsorgane zu ergänzen und so die Zusammengehörigkeit aller wesentlichen Naturvorgänge mit den Verzweigungen der Empfindungen sichtbar zu machen.“²⁾

Mit der Forderung, den systematischen Zusammenhang der physikalischen Kenntnisse darzulegen, hängt die Frage der Abgrenzung des Stoffes eng zusammen. Man hat wohl gemeint, in Anbetracht der Fülle des zu bewältigenden Stoffes nicht nur auf einzelne mehr abseits der täglichen Erfahrung liegende Gegenstände, sondern selbst auf größere Gebiete der Physik ganz verzichten zu sollen. In dem Konflikt zwischen der Fülle des Stoffes und der Gründlichkeit seiner Ausnützung müsse eine Beschränkung der ersteren zu gunsten der letzteren eintreten.³⁾

1) Sehr treffend bemerkt auch B. HOFFMANN: Kein Unterricht, und sei er noch so einfach und bedingungslos, kann ohne wohlerrungene Stoffverteilung und Gliederung auf einen nennenswerten Erfolg rechnen. *Mathematische Himmelskunde* usw. S. 25 (IMUK-Abhandl. über den math. Unterr. in Deutschland usw. Bd. III Heft 4).

2) E. DÖHRING, L. u. W., 304–7.

3) So BOHNERT, U. Bl. XIV S. 117 ff.

Hier ist indessen der „Erziehung zum Beobachten und Schließen, sowie der Einführung in das wissenschaftliche Denken und die wissenschaftliche Arbeitsmethode“ doch ein zu ausschließlicher Einfluß eingeräumt. Niemand kann den Wert einer solchen Einführung höher einschätzen, als der Verfasser dieses Buches. Und doch ist es eine Übertreibung, wenn man aus diesem Grunde den Stoff so sehr beschränkt, daß selbst ganze große Gebiete, wie etwa die Wellenlehre, gegebenenfalls als entbehrlich, ja als schädlich angesehen und demgemäß übergangen werden. Man läuft bei diesem Vorgehen Gefahr, Bruchstücke darzubieten, was dem Charakter einer Wissenschaft gerade zuwiderläuft. Man hört ohnehin von Männern, die sich über ihren auf der Schule genossenen Physikunterricht aussprechen, nicht selten die Klage, daß ihnen zwar viele schöne Dinge vorgeführt worden seien, daß aber über den Zusammenhang und die Einheit des Ganzen kein Licht angezündet worden sei. In diese Gefahr gerät der Unterricht sowohl, wenn er den Stoff zu sehr häuft, als auch wenn er sich damit begnügt, eine willkürliche Auswahl bloß nach dem Gesichtspunkte der Brauchbarkeit des Stoffes für die Unterweisung in der Methode der Forschung zu treffen.

Ich kann daher auch GRIMSEHL nicht zustimmen, wenn er (D. 13) sagt: „Es sollen einige ausgewählte Kapitel im Schulunterricht mit einer solchen Gründlichkeit betrieben werden, daß hier die Schüler einen Einblick in die wissenschaftlichen physikalischen Forschungsmethoden erlangen; dagegen ist es nicht nötig, daß die Schüler einen gleichmäßigen Überblick über die ganze Physik bekommen; denn ein solcher Überblick würde, wenn man genügend gründlich sein wollte¹⁾, viel mehr Zeit zur Verarbeitung in Anspruch nehmen, als in der Schule für den Unterricht zur Verfügung steht. Es ist im Grunde genommen, gleichgültig, welches Gebiet, oder welche Gebiete man zur Einführung der Schüler in die Forschungsmethoden benutzt. Wenn der Lehrer selbst wissenschaftlich arbeitet, . . . so ist dasjenige Gebiet für die Schüler am fruchtbarsten, in dem sich auch der Lehrer wissenschaftlich betätigt; selbst dann, wenn es ein Gebiet ist, das den übrigen Fachlehrern als nebensächlich erscheinen könnte.“

Diese Sätze enthalten aber bemerkenswerter Weise in den ge-

1) Nicht von GRIMSEHL, sondern vom Verfasser hervorgehoben.

sperrt gedruckten Worten eben den Gedanken, durch den es möglich ist, den vom Verfasser angefochtenen Standpunkt eines Überblickes über die ganze Physik in die Wirklichkeit umzusetzen.¹⁾ Die Forderung „genügender Gründlichkeit“ kann nicht durchweg aufrecht erhalten werden, wenn man darunter eine wissenschaftlich exakte Durcharbeitung versteht. Aber man lasse sich durch den Vorwurf der Ungründlichkeit nicht in Verlegenheit bringen. Es ist in der Tat nicht notwendig, daß das ganze Gebiet gleichmäßig in „heuristischer“ Form und in diesem Sinne „gründlich“ behandelt wird. Man wird an einzelnen besonders dafür geeigneten Kapiteln einen Einblick in die wissenschaftliche Methode zu geben suchen, man braucht aber diese Behandlungsart nicht so weit auszudehnen, daß dadurch eine raschere, mehr cursorische Behandlung anderer Kapitel ausgeschlossen wird. Was wir befürworten, ist also ein Wechsel der Methode, die zu einem Teil heuristisch sein soll, zu einem anderen Teil dogmatisch geartet sein kann. Es hat sicher kein Bedenken, nachdem in gewissen Gebieten die Wege aufgezeigt worden sind, auf denen die Erkenntnis gewonnen wird, daß nun auf anderen Gebieten einfach mitgeteilt wird, zu welchen Ergebnissen die Wissenschaft gelangt ist. Man wird dies Verfahren nicht ungründlich schelten dürfen, sofern nur die Behandlung des Stoffes eine exakte ist. Es wird bei diesem Verfahren auch der Vortrag des Lehrers wieder zu seinem Recht kommen, der heute in der beständigen Wechselrede zwischen Lehrer und Schülern und über der Pflege praktischer Übungen in Gefahr ist verloren zu gehen. Soll diese dozierende Behandlung von Erfolg sein, so muß freilich verlangt werden, daß die Schüler über den Inhalt des ihnen Vorgetragenen ebenso Rechenschaft geben können, wie über den des gemeinsam Erarbeiteten. Dem kommt zu Hilfe, daß der Vortrag des Lehrers sich zweckmäßigerweise enger an das Lehrbuch anschließen wird, während bei dem „Probleme lösen“ das Lehrbuch mehr oder weniger zurücktritt.²⁾

1) Auch GRIMSEHL selbst hat sich neuerdings zu der Forderung eines Überblickes über das Gesamtgebiet bekannt, die ich hier vertrete (Pfungstversammlung zu München 1913).

2) Ich gedenke hier gern des Umstandes, daß mein verewigter Lehrer BERNHARD SCHWALBE, der als Methodiker in hohem Ansehen stand, vornehmlich in Vorträgen von oft akademischer Färbung uns die Physik nahebrachte, und daß seine Schüler diesem Verfahren ein reiches Maß gediegener Kenntnisse verdankten — die einzuüben und zu befestigen er allerdings alle erdenklichen Mittel anzuwenden verstand.

Auch bei dem hier empfohlenen Verfahren wird man nicht dazu gelangen, ein „lückenloses“ System aufzustellen; ein solches gibt es ja auch in der physikalischen Wissenschaft nicht. Man wird auch nicht ein möglichst umfangreiches Maß von Kenntnissen zu erzielen suchen. Aber man wird andererseits auch nichts zu übergehen brauchen, was für das Verständnis des Systems und für die Gewinnung eines physikalischen Weltbildes von Wichtigkeit ist. Prüft man von diesem Gesichtspunkt aus einige der Vorschläge, die bezüglich des Wegfalles gewisser Gegenstände gemacht sind, so wird man z. B. die Stoßwirkungen nicht vermissen wollen, weil sie der augenfälligste und insofern interessanteste Fall der Bewegungsübertragung sind, bei dem überdies Kräfte als Wirkungen der Bewegung auftreten, während sonst stets das Umgekehrte stattfindet. Man wird den Einfluß der Reibung nicht unerörtert lassen wollen, da ja gerade diese es ist, die den Nachweis der Übereinstimmung von NEWTONS Lex I und II mit der Erfahrung so schwierig macht. Man wird FOUCAULTS Pendel nicht übergehen dürfen, da es das einzige Mittel ist, im Unterricht die fundamental wichtige Erscheinung der Achsendrehung der Erde zu zeigen; man wird vom Kreisel nicht ganz schweigen dürfen, da die an ihm auftretenden Erscheinungen allbekannt und von praktischer Wichtigkeit sind und auch die Erklärung für einen der merkwürdigsten astronomischen Vorgänge, das Vorrücken der Nachtgleichen, liefern.¹⁾ Und nun gar ein Gebiet wie die Wellenlehre! Man kann den Vorschlag, diese dem oben erwähnten Prinzip zu Liebe zu übergehen, kaum ernsthaft nehmen. Ist doch die Wellenbewegung das Mittel, wodurch Energieübertragungen durch jedwede Art von Medium, sei es der Wasser- oder der Luftzean, sei es der welterfüllende Äther, stattfinden. Einem physikalischen Weltbilde würde ein wesentlicher Zug fehlen, wenn von diesen Vorgängen im Unterricht nicht eingehender die Rede gewesen wäre.

Immerhin wird es für den Lehrer eine sich ständig erneuernde Aufgabe sein, die Aufteilung des Stoffes zwischen dem heuristischen und dem systematischen Verfahren in der zweckmäßigsten Weise vorzunehmen; es bedarf dazu des Taktes und eines gewissen künstlerischen Gefühls, zudem muß man sich nach den

1) Allerdings wird man gut tun, das Kreiselproblem erst bei diesem Anlaß, also in der Astronomie zur Erörterung zu bringen, wie ja auch der FOUCAULTSche Pendelversuch durchaus in dieses Kapitel gehört.

vorhandenen experimentellen Hilfsmitteln richten. Auch wird man nicht bei jeder Wiederholung des Kursus in gleicher Weise verfahren, schon die Verschiedenheit der Generationen und das nicht ganz gleiche Zeitausmaß nötigen zu Anpassungen an die jeweiligen Verhältnisse.

Gänzlich ausgeschlossen sollte es aber sein, daß von seiten der Schulaufsicht bei Revisionen und Prüfungen die Bekanntheit mit bestimmten Gegenständen, die nicht durchaus zu den unbedingt erforderlichen gehören, von den Schülern verlangt wird, sofern nur anderweitig exakte Kenntnisse auf den im Unterricht behandelten Gebieten aufgewiesen werden.

§ 5. Zur Gliederung des Unterrichts.

1. Die Zweistufigkeit des Unterrichts. Es dürfte heute Übereinstimmung darüber herrschen, daß an Vollanstalten der Unterricht auf eine Unter- und eine Oberstufe zu verteilen ist. Vorangegangen ist darin Österreich mit der bereits im Organisationsentwurf von 1849 vorgeschriebenen Zweistufigkeit, erst spät sind die reichsdeutschen Schulen nachgefolgt, und noch heute ist wenigstens an den Gymnasien und Realgymnasien die Unterstufe so kümmerlich mit Stunden ausgestattet, daß eine den Forderungen der Didaktik entsprechende Berücksichtigung der Hauptgebiete der Physik kaum möglich ist.

Den Vorzug der Zweistufigkeit hat HÖFLER¹⁾ treffend dadurch gekennzeichnet, daß diese „es gestattet, Naturobjekte und Naturerscheinungen einmal den Sinnen und dem Denken des Knaben, und dann wieder dem des Jünglings vorzuführen“: Schon der Knabe hat zumeist, und sehr früh, ein lebhaftes Interesse für die Vorgänge in der Natur und nicht minder für mechanische Vorrichtungen und physikalische Experimente. Es wäre sehr unpädagogisch, dieses Interesse unbenutzt und unbefriedigt zu lassen, während doch andererseits „eine vertiefte mathematische und logische Behandlung des physikalischen Lehrstoffs nur reiferen Schülern gegenüber möglich ist und eine gewisse Vertrautheit mit der qualitativen Seite der Vorgänge sowie einige Übung in der begrifflichen Analyse und Synthese der Erscheinungen voraussetzt.“²⁾ Es kommt hinzu, daß eine eingehendere und syste-

1) Bemerkungen zu den Berliner Verhandl. über die Fragen des höheren Unterrichts. Österr. Mittelschule, Wien 1891.

2) KEFERSTEIN, Ph. 860.

matisch geordnete Darstellung eines Gebiets vielfach Kenntnisse und Anschauungen aus anderen Gebieten erfordert. Zur Gewinnung einer derartigen allgemeinen Orientierung soll die Unterstufe dienen, die deswegen auch häufig als propädeutischer Kursus bezeichnet worden ist.

Über die Abgrenzung der Unterstufe gegen die Oberstufe hat lange Zeit Unklarheit und Verwirrung geherrscht. Aus dem oben Gesagten geht schon hervor, „daß nur die allerelementarsten und einfachsten Dinge, die grundlegenden Tatsachen und die fundamentalsten Gesetze“¹⁾ in den Anfangsunterricht gehören. Vortrefflich ist dieser Standpunkt auch zum Ausdruck gebracht in den österreichischen Instruktionen von 1892, wo es heißt: „Von diesem allgemeinen Gesichtspunkte aus kann der Unterricht auf der Unterstufe nicht eine Art Auszug aus dem Lehrstoff der oberen Klassen darstellen und muß auf eine auch nur relative Vollständigkeit verzichten. . . . Das entscheidende Kriterium für die Auswahl des Stoffes ist in dem natürlichen Interesse gegeben, welches die Jugend in diesem Alter allen physikalischen Erscheinungen entgegenbringt, sobald sie ihrem Verständnis wirklich zugänglich sind. Von diesen verdienen wieder jene in erster Linie beachtet zu werden, welche sich spontan in der Natur abspielen, und erst in zweiter Linie jene Anwendungen der Naturgesetze, welche den Gebrauchsgegenständen des gewöhnlichen Lebens zugrunde liegen oder bei merkwürdigen Erfindungen hervortreten.“²⁾

Hierzu wäre nur zu bemerken, daß die Berücksichtigung der Vorgänge, die sich spontan in der Natur abspielen, für die Unterstufe doch nicht leicht fällt. Die meisten dieser Vorgänge – man denke nur an den Regenbogen und überhaupt die Mehrzahl der meteorologischen Erscheinungen – werden erst auf der Oberstufe dem Verständnis nähergeführt werden können, und auch hier wird dies vielfach auf Schwierigkeiten stoßen. Wenn man daher auch den spontanen Vorgängen der Natur, soweit sie dem Verständnis jüngerer Schüler zugänglich sind, auf der Unterstufe jede Bevorzugung gern einräumen wird, so werden daneben doch auch die „Gebrauchsgegenstände des gewöhnlichen Lebens“ und die „merkwürdigen Erfindungen“ nicht in die zweite Linie ver-

1) POSKE, Z. U. V 169.

2) Österreichische Verordnung für den Unterricht am Untergymnasium, Z. U. V 318.

wiesen werden dürfen. Nehmen sie doch gerade das Interesse der Knaben in höchstem Grade in Anspruch. So wird vieles aus der Physik der elektrischen Glühlampe schon auf dieser Stufe mit Erfolg behandelt werden können.¹⁾ Daß auch die Berücksichtigung der Technik auf der Unterstufe ihre Grenzen hat, hebt auch GRIMSEHL (D. 15) hervor, indem er es als verkehrt bezeichnet, auf der Unterstufe den Schüler etwa mit drahtloser Telegraphie oder mit Röntgenstrahlen zu behelligen. „Hierbei würde der Schüler für seine Erziehung, seine Geistesbildung nicht den geringsten Nutzen haben. Er würde diese Vorführungen im günstigsten Fall anstaunen, sie würden ihm Vergnügen bereiten, aber keineswegs in irgendeiner Weise zu seiner Bildung beitragen.“²⁾

2. Das Quantitative auf der Unterstufe. Daß Schlagwörter wie „experimentell“ und „theoretisch“ oder „induktiv“ und „deduktiv“ nicht geeignet sind, zu einer scharfen Abgrenzung der beiden Stufen zu dienen, ist an anderer Stelle bereits eingehend gezeigt worden.³⁾ Aber auch der Gegensatz „qualitativ – quantitativ“, der mit mehr Recht als die vorher angeführten sich zu einer charakteristischen Unterscheidung der beiden Stufen zu eignen scheint, läßt sich bei der heutigen Entwicklung unseres Unterrichts nicht mehr streng durchführen. Schon in der Statik ist die quantitative Formulierung der Gesetze der einfachen Maschinen nicht gut zu umgehen⁴⁾; in der Wärmelehre ist die Bestimmung der Schmelz- und der Kondensationswärme unentbehrlich, wenn bestimmte Vorstellungen geschaffen werden sollen; in der Lehre von der Elektrizität sind Volt und Ampère aus dem täglichen

1) Vgl. GRIMSEHL, D. 14; GRIMSEHL, Die elektrische Glühlampe usw.

2) Die Vorführung der Röntgenstrahlen im Kursus der U II möchte ich doch nicht so unbedingt verurteilen, wie es GRIMSEHL tut: die Vorführung schließt sich leicht an die Lichterscheinungen im luftverdünnten Raum an, die man mit der Influenzelektroskopmaschine zu demonstrieren pflegt, und gibt den Schülern immerhin eine erste Anschauung des vielgenannten Phänomens, das im übrigen als ein Problem (ebenso wie die Lichterscheinungen in Geißlerschen Röhren) stehen bleiben mag. Von Übel wäre nur der Versuch, auf unzureichender Grundlage hier zuviel erklären zu wollen. Bezüglich der drahtlosen Telegraphie usw. schließe ich mich natürlich vorbehaltlos GRIMSEHL an.

3) POSKE, Z. U. V 169; vgl. HÖFLER, Z. U. VI 117.

4) Der mathematische Unterricht muß für diese Stufe so weit vorgeschritten sein, daß Proportionen in algebraischer Form benutzt werden können. Dies ist selbst dann noch möglich, wenn der Beginn des Physikunterrichts mit dem Beginn des 13. Lebensjahres, also unserer U III zusammenfällt, wie an anderer Stelle dieses Handbuchs (Teil IV) befürwortet wird.

Leben selbst den Schülern in kleinen Städten so geläufig, daß auch der Gebrauch dieser Maße bzw. der entsprechenden Meßinstrumente auf der Unterstufe durchaus angezeigt ist (wenn schon die Theorie dieser Instrumente ganz der Oberstufe vorbehalten werden muß). Sind gar, wie in steigendem Maße der Fall, praktische Übungen schon für die Unterstufe eingeführt, so ist damit die Nötigung zu messenden Versuchen ganz von selbst gegeben; denn die Erfahrungen haben gelehrt, daß bloße qualitative Versuche für diese Übungen zu wählen nicht empfehlenswert ist (vgl. S. 66ff.). Immerhin wird diese vorwiegend zahlenmäßige Behandlung des Quantitativen doch an Genauigkeit und Vollständigkeit noch viel zu wünschen übrig lassen und damit auf eine mehr „wissenschaftliche Beschreibung und Erklärung der Tatsachen“ (HÖFLER) hinleiten.

3. Anordnung des Stoffes auf der Unterstufe. Hierüber sind die verschiedensten Ansichten ausgesprochen worden. In früherer Zeit hat man befürwortet, und zum Teil geschieht es noch jetzt, daß man mit den magnetischen und elektrischen Erscheinungen beginnen solle, da diese im wesentlichen rein experimentell zu behandeln seien. Dies mag für eine Zeit zutreffend gewesen sein, in der auf anderen Gebieten mehr mit Kreide und Schwamm als mit Experimenten gearbeitet und in der namentlich die Mechanik nur als ein Tummelplatz für Rechenübungen angesehen wurde. Heute, wo auf allen Gebieten das Prinzip der experimentellen Behandlung sich durchgesetzt hat, ist jene Begründung nicht mehr stichhaltig. Allerdings glaubte man mit jener Voranstellung dem jugendlichen Bedürfnis entgegenzukommen, ohne aber zu bedenken, daß sich die Erscheinungen dieses Gebiets nur mit Hilfe fiktiver Begriffe darstellen lassen. Man sollte aber vermeiden, bei der Einführung in eine Wissenschaft, die vom Wirklichen handelt, den Schülern gleich im Beginn solche Fiktionen¹⁾ zuzumuten. Weniger diesem Vorwurf ausgesetzt ist die Wärmelehre, die an alte, den Schülern geläufige Erfahrungen anknüpft und auch wohl den Substanzbegriff der Wärme bei ihnen vorfindet. Aber doch verlangt auch hier die Unterscheidung von Temperatur und Wärmemenge eine feinere Arbeit mit Begriffen, als mir für den Anfang passend scheint. Meiner Ansicht nach gehört die Mechanik an die erste Stelle, da es sich hier um noch primitivere, der

1) Auch wenn man sie heute mehr und mehr als Realitäten anzusehen geneigt ist, bleiben sie doch für den Anfänger Fiktion.

sinnlichen Wahrnehmung unmittelbar gegebene Begriffe handelt. Dazu kommt noch, daß auch in der geschichtlichen Entwicklung die Statik den Anfang gemacht hat und bereits zu einer gewissen Höhe entwickelt war, ehe die anderen Gebiete auch nur in Angriff genommen waren. Läßt dies nicht darauf schließen, daß die Grunderscheinungen der Mechanik, vor allem die Gesetze der einfachen Maschinen, dem natürlichen Denken am leichtesten zugänglich sind?

Man wende nicht ein, daß auch die Kraft in der Mechanik ein erdachter Begriff sei. Denn erstlich steht der Kraftbegriff als eine notwendige Grundannahme (S. 30) überhaupt auf einer anderen Stufe als die vorhergenannten, und zweitens ist für den Anfänger ebenso wie für das ganze vorwissenschaftliche Denken, die Trennung des abstrakten Kraftbegriffs von dem Träger der Kraft noch nicht vollzogen, derart, daß ihm das ziehende Gewicht, die gespannte Feder nicht bloß die Kraft selbst bedeuten, sondern wirklich sind. Wie könnte man sonst mit den Gewichten am Hebel schlechthin als mit Kräften operieren, wie sonst Kräfte durch gespannte Federn „darstellen“. Die Experimente der Statik sind freilich nicht so interessant wie die der Wärmelehre und der Elektrizität. Aber sollte es nicht auch das Interesse des Schülers erregen, wenn ihm nahegebracht wird, wie das merkwürdige Problem, das im Hebelgesetz enthalten ist, schon das Denken der Alten bewegt hat, und wie es zuerst GALILEI gelungen ist, hierüber einiges Licht zu verbreiten? Und sollte nicht auch die zahlreichen uralten Anwendungen der „einfachen Maschinen“ ihn zu fesseln vermögen?

Ich weiche mit der Forderung, die Mechanik an den Anfang zu stellen, sowohl von HÖFLER als von GRIMSEHL ab, während KEFERSTEIN meinem bereits in den Meraner Lehrplänen niedergelegten Vorschlage zustimmt. HÖFLER schließt sich den österreichischen Lehrplänen an, wo dem Unterricht in der Mechanik auf der Unterstufe die Wärmelehre, die Chemie, die Lehre vom Magnetismus und von der Elektrizität vorangestellt sind.¹⁾ Doch werden mit Recht der Wärmelehre zuvörderst einige Grundbegriffe (Volumen, Gewicht, spezifisches Gewicht) sowie einiges über Luft und Luftdruck vorausgeschickt. GRIMSEHL (D. 17) verlangt sogar, daß man noch einige weitere Begriffe aus der Mechanik, beson-

1) Z. U. VI 119.

ders aus der Bewegungslehre, sowie eine möglichst präzise Definition des Kraft- und des Massenbegriffs vorwegnehmen möge, „ohne Rücksicht darauf, daß diese Begriffe bei der späteren Behandlung der Mechanik auf der Oberstufe ebenfalls noch ausführlich behandelt werden“. Damit ist aber doch gerade der für die Unterstufe schwierigste Teil der Mechanik, die kinetische Kraftdefinition mit dem Begriff der Beschleunigung, an den Anfang gestellt!

Ich kann mich mit einer solchen Zerreißung des Stoffes nicht befreunden. Wenn man doch schon gewisse Dinge aus der Mechanik vorwegzunehmen für nötig findet, warum dann nicht lieber gleich mit einer propädeutischen Mechanik beginnen, in der alles Platz findet, was überhaupt von der Mechanik auf die Unterstufe gehört?¹⁾

Die Hauptschwierigkeit scheint in der Tat darin zu liegen, daß man im Interesse der Wissenschaftlichkeit gemeint hat, die exakte kinetische Definition der Kraft schon auf der Unterstufe geben zu müssen. Dies setzt dann natürlich die Versuche auf der schiefen Ebene und über den freien Fall nebst eingehenden Erörterungen über Geschwindigkeit und Beschleunigung voraus. Man wird damit aber dem Bedürfnis der Altersstufe, um die es sich hier handelt, nicht gerecht; dieses geht viel mehr auf konkrete Begriffe — zu denen ich auch die des Kraftmoments und der Arbeit zähle — als auf die fundamentalen Abstraktionen der modernen Physik. Beschränkt man sich, wie ich vorschlage, auf die statische Kraftdefinition, so wird das Hauptbedenken dagegen fortfallen, daß man den Unterricht auf der Unterstufe mit der Mechanik beginnt.

Endlich scheint es mir, wenn man überhaupt Wert darauf legt, das System der Physik zu immer klarerem Bewußtsein zu bringen, schon für die Unterstufe zweckmäßig die Reihenfolge, in der die großen Gebiete einander folgen, nicht ohne Not zu ändern, und namentlich der Mechanik ihre fundamentale Stellung im Anfang der Physik nicht zu nehmen. Es muß dann von vornherein den Eindruck der Notwendigkeit hervorbringen, wenn her-

1) Auch der bayerische Lehrplan für O. R. bringt übrigens die Mechanik gleich hinter der Wärme und auf der untersten Klassenstufe (IV = Untertertia der norddeutschen Anstalten), traut also den Schülern schon hier das nötige Auffassungsvermögen zu, womit dann freilich seltsam kontrastiert, daß auf der Oberstufe nach altbayerischer Tradition die Mechanik an das Ende des ganzen Lehrgangs gestellt wird.

nach auf der Oberstufe ebenfalls mit der Mechanik begonnen wird; und naturgemäß knüpft sich daran das Gefühl dafür, daß die Mechanik die Grundlage der gesamten Physik bildet.¹⁾ Sind doch auch alle Apparate in konstruktiver Hinsicht mechanischer Natur. Ich meine also, daß man die Bedeutung einer richtigen Anordnung für die Auffassung der Physik als eines einheitlichen Systems nicht außer acht lassen darf.

Was nun die weitere Anordnung des Stoffes betrifft, so wird man nicht ohne besonderen Grund die übliche Reihenfolge der Gebiete ändern, zumal auch für die Unterstufe schon die Lehre vom Galvanismus zweckmäßig den Abschluß des Unterrichts bildet.²⁾

Es sei endlich darauf hingewiesen, wie wünschenswert bei ausreichender Zeit die Einbeziehung der Astronomie in den Physikunterricht wäre, wofür die österreichischen Lehrpläne von 1908/9 nunmehr ein treffliches Vorbild geben. Auch der Meraner Lehrplan für Physik hat dieses Gebiet wenigstens Zusatzweise der Berücksichtigung empfohlen. Wenn freilich die Geographie einmal aufhörte, das Schmerzenskind und Aschenbrödel der Lehrpläne unserer höheren Schulen zu sein, so würde ihr an erster Stelle die dankbare Aufgabe zufallen, die Schüler durch die unteren und mittleren Klassen hindurch zur Beobachtung und zum Verständnis der Himmelserscheinungen anzuleiten und anzuhalten, wie dies HÖFLER ausführlich in Band II dieser Handbücher auseinandergesetzt hat.

Die vorstehenden Ausführungen gelten für Anstalten, an denen eine Unterstufe und eine Oberstufe, den verschiedenen Lebensaltern entsprechend, aufeinander folgen. Sie lassen sich jedoch in angemessener Anpassung auch auf solche Schulen anwenden, die einen einzigen Kurs etwa in derselben Zeit absolvieren, die an den neunklassigen Anstalten für die Unterstufe angesetzt ist. Hierher gehören namentlich die sechsklassigen Realschulen gemäß den preußischen Lehrplänen von 1901. Die Unterrichtsaufgaben für diese Anstalten sind durch die Verordnung im we-

1) Auch der Umstand, daß man neuerdings die Mechanik selbst elektromagnetisch zu fundieren sucht, kann an dieser historisch feststehenden Tatsache nichts ändern.

2) In meiner „Unterstufe der Naturlehre“ sind Schall und Optik hinter dem Galvanismus eingereiht lediglich aus dem Grunde, weil diese beiden Gebiete bei der unzureichenden Zeit in den preußischen Gymnasien und Realgymnasien in der Regel mehr oder minder unerledigt bleiben müssen.

sentlichen als übereinstimmend mit denen der entsprechenden Klassen (Sexta bis Untersekunda) der Oberrealschulen festgesetzt. Dies schließt jedoch nicht aus, daß im Hinblick auf den in Untersekunda bereits erfolgenden Abschluß die Methodik einigen Abänderungen, sei es verknüpfender, sei es ergänzender Art, zu unterwerfen ist. Auch hier sollte die Mechanik bzw. die Statik am Anfange des Kursus stehen, ans Ende dagegen wäre (wie im bayerischen O. R.-Lehrplan auf Klasse VI) eine „Betrachtung physikalischer Vorgänge als Energievorgänge“ zu setzen, und innerhalb dieses Rahmens sollten dann auch die Lehren vom freien Fall, senkrechten Wurf und Pendel eine Stelle finden, da sie für die Verwandlung der verschiedenen Formen der Energie ineinander die typischen Vorbilder aus der Mechanik liefern.

4. Die Oberstufe. Was der Oberstufe als ihr eigentümlich vorbehalten bleibt, ist an erster Stelle der Ausbau des Systems, d. h. die Verkettung der einzelnen Erscheinungsgebiete miteinander (GRIMSEHL, D. 16), und, damit eng verbunden, die mathematische Festlegung der Beziehungen und Gesetzmäßigkeiten, die sowohl für die einzelnen Erscheinungsformen als zwischen ihnen bestehen. Die methodische Anordnung und Behandlung des Stoffes wird sich diesen Gesichtspunkten anzupassen haben.

Noch mehr als auf der Unterstufe ist es hier angezeigt, einen großen Teil der Mechanik an den Anfang zu legen. GRIMSEHL (D. 18) weist mit guten Gründen den Einwand zurück, daß die Mechanik für Obersekunda zu schwer sei. Dies wird an Oberrealschulen keineswegs zu besorgen sein, eher schon an den Gymnasien, wo die mathematische Vorbildung der Schüler noch nicht ganz so weit vorgeschritten ist, daß ihnen die infinitesimalen Grundbegriffe, die am Eingang der Mechanik stehen, leicht nahegebracht werden könnten. Man wird jedenfalls an die Galileischen Betrachtungen über die beschleunigte Bewegung die strenge Fassung des Kraftbegriffs knüpfen, daran werden sich die Begriffe der Masse, weiterhin die der Arbeit, der Leistung, des Kraftmoments schließen. Ob auch, wie GRIMSEHL (D. 18) will, das Trägheitsmoment in diesen Anfangskursus gehört, sei dahingestellt; an Gymnasien bleibt oft überhaupt keine Zeit dafür übrig. In den „Meraner Lehrplänen“ habe ich vorgeschlagen, die Mechanik in zwei Teile zu zerlegen und den zweiten Teil, der auch das Trägheitsmoment einschließt, auf die nächsthöhere Klassenstufe zu verlegen.

Auch im übrigen ist es nicht ganz so gleichgültig, wie GRIMSEHL (a. a. O.) meint, in welcher Anordnung der Stoff dargeboten wird. Wenn er statt des altgewohnten, streng systematischen Unterrichtsganges eine Stoffanordnung nach allgemeineren Gesichtspunkten verlangt, so kann man dem wohl zustimmen, aber doch mit dem Vorbehalt, daß eben die Rücksicht auf das „System“ selbst den „allgemeinsten Gesichtspunkt“ darstellt. Wenn aus methodischen Erwägungen Abweichungen davon geboten sind (wie bei der Wellenlehre und Akustik, vgl. S. 295), so ist doch zu wünschen, daß diese Abweichungen nicht über das Notwendige hinausgehen und daß immer wieder das System sozusagen das Rückgrat der Stoffanordnung bildet.

Auch daß Magnetismus und Elektrizität an das Ende des eigentlichen Physikkurses zu stehen kommen, haben gewichtige Stimmen schon seit längerer Zeit gefordert.¹⁾ In den preußischen Lehrplänen von 1901 ist die ältere Anordnung noch stehen gelassen, in den methodischen Bemerkungen jedoch ist es freigestellt, den Stoff in den drei oberen Klassen auf andere Weise zu verteilen. Leider ist diese Befugnis viel zu wenig beachtet bzw. davon nicht so ausgiebig Gebrauch gemacht worden, wie zu wünschen wäre. An dies Gebiet schließen sich am besten auch die zusammenfassenden Rückblicke auf die Gesamtheit der physikalischen Erscheinungen unter dem Gesichtspunkte der Energieverwandlung an, wie in den Meraner Lehrplänen gefordert ist.

Unsere früheren Darlegungen über die Gewinnung eines physikalischen Weltbildes (S. 12) entspricht es, daß wir einen Kursus über kosmische Mechanik als Abschluß des Physikerunterrichts in die oberste Klasse verlegt wissen wollen. In diesem Kursus käme dann auch erst zur Sprache, was häufig dem System zuliebe schon innerhalb der Mechanik behandelt wird, dort aber aus Mangel an ausreichendem astronomischen Material in der Regel zu kurz kommt, nämlich die Gravitationslehre Newtons. Nach den Schwierigkeiten zu urteilen, die diese Lehre selbst noch Primanern bereitet²⁾, möchte ich doch meinen, daß ihre Behandlung noch nicht

1) So HÖFLER (Z. U. VIII 127): „schon deshalb, weil hier das Wechselspiel der Energie in seiner größten Mannigfaltigkeit vor das Auge des Schülers tritt“. — Zu nennen ist hier auch BÖRNER, Verh. der 5. rhein. Direktoren-Konferenz von 1893, und Vorwort zur 2. Auflage seines Lehrbuchs der Physik (1897).

2) Die Proportionalität der Gravitationskraft mit Mm darf natürlich nicht dogmatisch eingeführt, sondern es muß die Notwendigkeit dieser Einführung aufgezeigt werden (vgl. O. St. § 165).

in Obersekunda vorzunehmen ist, abgesehen davon, daß durch eine ausreichende Berücksichtigung dieses Kapitels die ohnehin schon stark belastete Zeit für die übrige Mechanik noch mehr verkürzt wird. Der Oberprimaner dagegen ist reif, den grandiosen Gedanken einer *Mécanique céleste* zu würdigen, ihm stehen auch die Kenntnisse aus der übrigen Physik so weit zur Verfügung, daß er die Errungenschaften der modernen Astrophysik begreifen kann.

Auf die Oberstufe gehört endlich eine Berücksichtigung der logischen und psychologischen Grundlagen des Erkennens. Es empfiehlt sich namentlich, Belehrungen über die logische Seite des Erkenntnisprozesses nicht abgetrennt zu geben, sondern an besonders geeigneten Stellen zur Sprache zu bringen. Daß dabei keine Überschätzung der logischen Formen eintreten darf, geht schon aus dem, was an anderer Stelle (S. 20) hierüber gesagt ist, hervor. Andererseits wird der Wert einer „Reflexion auf die immer wiederkehrenden Formen dieses Denkens“ und damit „eine bewußte Logik als Frucht der auf der Unterstufe geübten unbewußten“, immer „eine der wichtigsten humanistischen Aufgaben des physikalischen Unterrichts bleiben“ (HÖFLER, Z. U. VI 119). Ferner lassen sich besonders an die Gebiete der Akustik und Optik propädeutische Belehrungen aus dem Gesamtgebiet der psychischen Tätigkeiten anschließen, wofür aber hier keine eingehenderen Vorschläge gemacht werden sollen, da es sich dabei um außerhalb der Physik liegende Gegenstände handelt, die weniger durch die Physik selbst als durch das höhere, auf allgemeine Geistesbildung gerichtete Ziel des Gesamtunterrichts gefordert werden.¹⁾

§ 6. Die praktischen Übungen.

1. Auf der 63. Naturforscherversammlung zu Bremen hat BERNHARD SCHWALBE im Jahre 1891 die ersten Vorschläge für die Einrichtung praktisch-physikalischer Übungen an höheren Schulen gemacht.²⁾ Ungefähr gleichzeitig hat K. NOACK am Gymnasium zu Gießen solche Übungen eingerichtet und bald darauf

1) Über die Beziehungen zur philosophischen Propädeutik vgl. man besonders O. POMMER, Z. U. XXVII, 8 (1914) und Monatshefte für den naturw. Unterricht 1914, H. 1 u. 2, sowie POSKE, Unterrichtsblätter 1914.

2) B. SCHWALBE, Über die Möglichkeit der Einrichtung eines physikalisch-praktischen Unterrichts an höheren Schulen, vgl. Z. U. IV 209.

einen Leitfaden für physikalische Übungen (Berlin 1892) herausgegeben. Der fruchtbare Gedanke hat sich anfänglich nur langsam Bahn gebrochen; heut beherrscht er bereits alles Denken über den physikalischen Unterricht in einem Grade, daß man von einer sich vollziehenden Umwälzung in der gesamten Methodik des Faches reden kann.¹⁾ Wenn gleichwohl in dem speziellen Teil dieses Handbuchs noch nicht eine durchgängige Verknüpfung des Unterrichts mit den Schülerübungen zugrunde gelegt ist, so hat dies hauptsächlich darin seinen Grund, daß die Erfahrungen, die bisher auf diesem Gebiete gemacht wurden, doch noch zu neu sind, als daß sich daraufhin schon eine völlige Umgestaltung der didaktischen Darstellung ausführen ließe. Auch wird, selbst wenn die Übungen sich bei uns einmal völlig werden eingebürgert haben, doch ein beständiges Wieder- und Wiederprüfen des Verhältnisses von Klassenunterricht und Übungen nötig sein, wenn den letzteren ihre Lebendigkeit und Frische gewahrt bleiben soll. Die Übungen dürfen nie zur Schablone werden. Und übrigens wird sich zeigen, daß mit dem in diesem Handbuch befürworteten methodischen Verfahren die Schülerübungen nicht nur verträglich sind, sondern daß sie sich ihm ganz natürlich als gleichartige Glieder einfügen.

Als Begründung für die Einführung der Schülerübungen wird zusammenfassend in dem Bericht der Unterrichtskommission der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte von 1905 folgendes angeführt:

„Es genügt nicht, daß der Schüler die Versuche nur von weitem, auf dem Experimentiertisch des Lehrzimmers, vor sich

1) Über die Entwicklung in den letzten 20 Jahren vgl. besonders W. LEICK, Schülerübungen, Leipzig 1910, wo auch eine ausführliche Literaturübersicht gegeben ist. Aus der reichen Literatur seien hier angeführt:

K. NOACK, Leitfaden für physikalische Schülerübungen. Berlin 1892.
 —, Aufgaben für physikalische Schülerübungen. Berlin 1905. 2. Aufl. 1911.
 H. HAHN, Wie sind die physikalischen Schülerübungen praktisch zu gestalten? (Abh. z. Didaktik usw. I, 4). Berlin 1905.
 —, Handbuch für physikalische Schülerübungen. Berlin 1909, 2. Aufl. 1912.
 —, Leitfaden für physikalische Schülerübungen. Berlin 1909, 2. Aufl. 1914.
 E. GRIMSEHL, Ausgewählte physikalische Schülerübungen. Progr.-Abh. 1906. Nr. 914.
 H. ALT, Schülerübungen zur Einführung in die Physik. Leipzig 1910.
 O. FREY, Physikalische Schülerübungen. Leipzig 1910.
 W. MASCHE, Physikalische Übungen. Teil I u. II. Leipzig 1911. (Teil III u. IV in Vorbereitung.)
 Man sehe ferner die jährlichen Berichte in Z. U.

gehen sieht, wobei selbst unter günstigen Umständen nur eine mangelhafte Auffassung der Vorgänge möglich ist. Man lernt selbst beim einfachsten Experiment erst umsichtig, logisch und kritisch beobachten und handeln, wenn man es selbst ausführen muß. Es muß daher dem Schüler die Möglichkeit geboten werden, durch Selbstanstellen von Versuchen in innigere Fühlung mit den Objekten zu treten. Nur auf diesem Wege wird ein Hauptmangel beseitigt werden, der heute unsern höheren Schulen mit Recht zum Vorwurf gemacht wird, nämlich daß den Schülern die Fähigkeit fehlt, Naturobjekte und Naturvorgänge genau zu beobachten und richtig zu beurteilen¹⁾

Es wird hieran der Grundsatz geknüpft: „Für die physikalische Ausbildung der Schüler sind planmäßig geordnete Übungen im eigenen Beobachten und Experimentieren erforderlich.“ Aus dem Gesagten ist bereits zu ersehen, daß mit den praktischen Übungen keine Vermehrung des Wissensstoffes beabsichtigt ist, sondern daß es lediglich auf Vertiefung und Sicherung des im Unterricht ohnehin darzubietenden Stoffes ankommt. Zugleich wird aber durch die Übungen noch einem andern Unterrichtsziel entsprochen, wie für die Schülerübungen zuerst wohl NOACK mit großer Schärfe, in einem 1904 zu Gießen gehaltenen Vortrage (Z. U. XIV 365) hervorgehoben hat: „Die Schüler sollen erkennen und lernen, wie in den Naturwissenschaften ein Problem erfaßt und behandelt wird, wie experimentelle und logische Erwägung mit einander abwechseln, mit einem Wort sie sollen in der naturwissenschaftlichen Methode der Erkenntnis geübt werden, die zwar immer mehr auch auf andern Wissensgebieten ihre Früchte trägt, die aber in gleicher Reinheit und Durchsichtigkeit, wie in Physik und Chemie, wohl nicht wieder in Wirksamkeit tritt.“

Die in diesen Worten enthaltene Forderung ist in der vorher angeführten Äußerung der Unterrichtskommission nur gestreift; während dort der Nachdruck auf die Unmittelbarkeit des Eindrucks, auf die Befassung mit dem konkreten Stoff gelegt ist, wird hier das methodische Ziel mit Bestimmtheit als das Wesentliche hervorgehoben. Dies steht übrigens völlig in Übereinstimmung mit dem, was wir von Anfang an als die Aufgabe des gesamten physikalischen Unterrichts bezeichnet haben.

1) Eine Reihe weiterer Gründe zu Gunsten der Schülerübungen findet man bei HAHN (Abh. z. Didaktik usw. I, 4).

2. Die Bewegung ist bei uns noch zu jung, um die Gefahren schon deutlich erkennen zu lassen, die in der bloßen Befassung mit dem Konkreten um des Konkreten willen versteckt sind. Auch sind unsre Schüler so sehr an die Abstraktheit des gesamten Unterrichtsverfahrens gewöhnt, daß ihnen die bloße Möglichkeit, sich mit den Objekten selbst zu befassen, zusammen mit der Erlaubnis einer freieren Beweglichkeit schon Reiz genug bietet, und ihnen wenigstens eine Zeit lang Interesse abgewinnt. In Amerika, wo der Betrieb der praktischen Übungen schon auf einen größeren Zeitraum ausgedehnt gewesen ist, hat man jedoch merkwürdige Erfahrungen gemacht, die uns wohl zum Nachdenken veranlassen können.¹⁾

Man hat in Amerika für den Physikunterricht in der *High School* schon vor Jahrzehnten Verzeichnisse von Versuchen aufgestellt, die für die Laboratoriumsarbeit besonders geeignet sind.²⁾ Über den Erfolg des Betriebes spricht sich ein neuerer Schriftsteller sehr skeptisch aus: „Ist das Verständnis der Physik, das die Schüler dadurch tatsächlich erlangen, die Zeit, die Mühe und die Ausgaben wert, die es erfordert hat? Zugegeben, daß einige Schüler ein Verständnis dadurch erlangen, so müssen wir auch eingestehen, daß bei sehr viel mehr von ihnen dies nicht der Fall ist.“³⁾ Und nun gar die Schüler! „Sie sprechen vom Stumpsinn der praktischen Übungen und sehen sie als ein notwendiges Übel an, nur dazu gut, um die Berechtigungen zu erlangen, die an die Absolvierung des Kursus gebunden sind.“

Der Autor glaubt den Hauptgrund des Mißerfolges darin zu erkennen, daß die Übungen zumeist auf die Bestätigung physikalischer Gesetze gerichtet sind, der die Schüler kein großes Interesse abgewinnen können, ebensowenig wie den Konstantenbestimmungen, die an eigens dafür bestimmten Apparaten nach genauen Vorschriften ausgeführt werden. Ja er geht noch weiter und stellt auch in Abrede, daß Schüler sich dafür begeistern könnten, die Resultate solcher Experimente um des bloßen Wissens wegen festzustellen. „Warum sollte der Schüler begierig

1) Ich folge in diesen Ausführungen hauptsächlich dem Buche von CH. MANN, *The Teaching of Physics*, Chicago 1912, dessen Verfasser einer der angesehensten Physiklehrer der Vereinigten Staaten ist. Allerdings sind, wie mir H. HAHN mitteilt, diese im Westen der Vereinigten Staaten hervorgetretenen Schwierigkeiten im Osten bereits überwunden.

2) So die Harvard descriptive list von 1887 u. a.

3) MANN, a. a. O. 249.

darauf sein, das Zerreißgewicht eines Drahtes oder den Reibungskoeffizienten eines Holzwürfels gegen die Unterlage kennen zu lernen? Welches innere Bedürfnis wird durch dieses Experiment befriedigt?“

Und es ist für uns von Bedeutung, daß er zu Änderungsvorschlägen gelangt, die sich mit den oben angeführten Äußerungen von NOACK über den Zweck der Übungen zwar nicht decken, aber doch berühren. Er verlangt, daß vor allem der Geist des „Sichwunderns“ in dem Schüler geweckt werde; sie müßten in eine Situation gebracht werden, die sie gleichsam an einen Scheideweg stellt, sie zum Nachdenken nötigt und zu einer ihnen selbst interessant erscheinende Problemstellung führt; das Problem müsse von der Art sein, daß es nur durch Messungen oder wenigstens Versuche im Laboratorium gelöst werden kann.

Es ist nun interessant zu sehen, wie der amerikanische Schulmann die Probleme sofort nicht von der theoretischen sondern von der praktischen Seite her einführt. Er stellt eine größere Zahl solcher Probleme zusammen, von denen ich einige herausgreife: „Arbeitet ein gegebener Gasmotor besser im untersten oder im obersten Stock eines Hauses?“ – „Welche Art Kessel ist auf einem gegebenen Gasbrenner am brauchbarsten, einer aus Eisen, Zinn, glasiertem Steingut oder Aluminium, und in welchem Verhältnis?“ – „Ist es billiger, Wasser mit einem Destillierapparat zu destillieren (bei gegebenem Gaspreise) oder destilliertes Wasser vom Drogisten zu kaufen, und um wieviel?“ – „Strahlt eine Kohlefadenlampe oder eine Wolframlampe mehr Hitze pro Wattstunde aus, und wie viel mehr?“ – „Wie viel Kubikmeter Tannenholz sind zu einem Floß nötig, das einen Menschen von 50 kg Gewicht tragen soll?“ – „Wieviel Eis wird in einem Eisschrank geschmolzen, wenn darin 1 Liter Milch von 20° C. auf 2° C. abgekühlt wird?“ – „Wie lang ist die Schallwelle deiner eigenen Stimme?“

Indessen, so interessant diese Anregungen auch sind und so angebracht es auch sein mag, ab und zu eine Aufgabe in dieser Weise zu formulieren, wir werden dem amerikanischen Schulmann doch darin nicht folgen dürfen, daß wir diese Wendung ins Praktische gleichsam zum allgemeinen Prinzip erheben. Dies schon deswegen nicht, weil zwischen amerikanischen und deutschen Jungen doch wohl ein beträchtlicher Unterschied hinsicht-

lich der Empfänglichkeit für theoretische Probleme besteht. Unsere Schüler wird es immer reizen, die Schmelzwärme des Eises zu bestimmen, auch ohne daß der Eisverbrauch im Haushalt dabei in Frage kommt.

Immerhin aber müssen auch diese fremden Erfahrungen uns darin bestärken, daß das Interesse der Schüler durch die Art der Problemstellung nach Möglichkeit erregt werden muß. H. HAHN hat ein sehr richtiges Gefühl hierfür gezeigt, indem er in seinem Handbuch die Aufgaben durchweg in der Frageform aufstellte. Nur ist damit noch nicht alles getan; es muß dafür gesorgt werden, daß die Frageform nicht doch wieder nur als eine Aufforderung zur Ausführung einer gegebenen Vorschrift aufgefaßt wird.¹⁾

3. Nimmt man es nun aber mit dem Problemlösen ernst, so gelangt man andererseits leicht zu der Forderung, daß die Schüler in den Übungen die Gesetze selbst entdecken sollen. Dagegen ist mit Recht eingewendet worden, daß das kein Entdecken genannt werden kann, wenn die Schüler auf vorgeschriebenem Wege und mit vorbereiteten Apparaten ein physikalisches Gesetz zu ermitteln suchen. Die Schüler werden sich nicht einbilden dürfen, auf diese Weise ein oder das andere Gesetz selbst entdeckt zu haben. Gleichwohl steckt in dem Wort vom „Entdecken“ ein richtiger Kern. Nicht eigentlich ein Selbstentdecken, wohl aber eine Art von Nachentdecken und damit eine Teilnahme an dem Schaffen der großen Entdecker und Erfinder ist in den physikalischen Übungen möglich. Wie die Philologie ihr Wesen im „Wiedererkennen des Erkannten“ findet, so kann man hier sich ein „Wiedererforschen des Erforschten“ zum Ziel setzen. Zum mindesten gibt es eine Anzahl von Aufgaben, die in dieser Richtung ausgewertet werden können. So die Aufsuchung der Gesetze schwingender Saiten, des Zusammenhangs von Pendellänge und Schwingungsdauer, des Zusammenhangs von Volum und Spannkraft der Gase und dergl. mehr, also „beschreibender“ Gesetze, die auf empirischem Wege gefunden sind. Doch

1) Die Imperativform, die in HAHNS Anleitungen der Kürze halber gewählt ist, hat zu der Meinung Anlaß gegeben, als bestände das ganze Verfahren im wesentlichen in der Ausführung solcher Vorschriften. (KERSCHENSTEINER a. a. O.) Nichts kann irriger sein, da doch HAHN selber in dem Schlußkapitel seines Buches sich darüber ausspricht, in welcher Weise er die einzelnen Aufgaben vorbereitet zu sehen wünscht.

ist die Anzahl dieser Aufgaben nicht allzu groß. Man wird in der Regel die Problemstellung beträchtlich vertiefen können, wenn man das Gesetz nicht nur für gewisse einfache Zahlenverhältnisse wie beim Pendel für die Längen 1, 4, 9, ableitet, sondern den funktionalen Zusammenhang allgemeiner (beim Pendel durch die Konstanz des Quotienten T^2/l , beim Boyleschen Gesetz durch die Konstanz von $p \cdot v$ für beliebig herausgegriffene Werte der einen Variablen) aufdecken läßt. Ja, es ist geradezu ein Problem für sich, ob das Gesetz, nachdem es für gewisse einfache ganzzahlige Verhältnisse nachgewiesen worden ist, sich auch bei ganz beliebiger Wahl des Größenverhältnisses als richtig erweist. (Vgl. § 2, S. 17.)

Es gibt aber auch Gesetze, deren Charakter dem „Nachentdecken“ widersteht. So ist es nicht angängig, das Brechungsgesetz auf induktivem Wege abzuleiten; wer dem historischen Gang der Entdeckung nachgegangen ist, weiß auch auf welchem Umwege man zu diesem Gesetz gelangt ist (vgl. S. 311), und daß mit einfacher „Induktion“ ohne den genialen Blick des Entdeckers nichts auszurichten war. Es heißt die Geschichte mißachten oder fälschen, wenn man den Schein erweckt, als ließe sich dieses Gesetz so bequem nachentdecken. Ähnliches gilt von den Coulombschen Gesetzen für magnetische wie für elektrische Wirkungen und vom Ohmschen Gesetz, bei denen die gedankliche Intuition der experimentellen Feststellung vorausging. Bei diesen Gesetzen wird man sich also mit der Prüfung der Richtigkeit innerhalb der durch die Verhältnisse gezogenen Grenzen begnügen müssen.¹⁾ Dem scharfen Urteil von COLMAN²⁾, daß das bloße Bestätigen den Verstand stumpf mache, möchte ich mich nicht anschließen, sofern nur das Bestätigen nicht den Grundcharakter der Übungen abgibt, sondern bloß in bestimmten Fällen geübt wird.

Um Probleme handelt es sich dagegen auch, wo Abweichungen der Messungen von dem erwarteten Resultat hervortreten, der Einfluß störender Umstände zu untersuchen ist u. dgl. mehr. Auch hierbei werden wirkliche Entdeckungen gemacht, deren Wert nicht gering eingeschätzt werden darf.

Der Begriff des Problemlösens ist ferner nicht auf quantitative Verhältnisse beschränkt, er findet auch Anwendung bei

1) Dagegen ist das Gesetz für den Widerstand auf experimentellem Wege auffindbar.

2) Vgl. Z. U. XV 58.

zunächst qualitativen Zusammenhängen. Eine größere Zahl der in HAHNS Handbuch gestellten Aufgaben ist von dieser Art. Die Fragen, ob Kupfer und Eisen gleich gut leiten, ob der elektrische Widerstand von der Temperatur abhängig ist, diese und viele andere sind von Interesse, weil sie zur Auffindung von neuen Tatsachen führen. Auch auf diesem Gebiet sind Entdeckerfreuden zu holen, und zwar leichter als bei der Auffindung von Gesetzen. Wer zum erstenmal, etwa mit der WHITINGschen Röhre, sich davon überzeugt, daß die Energie eines fallenden Körpers sich in Wärme umsetzt, in dem muß etwas von dem Entdeckergefühl ROBERT MAYERS lebendig werden, das er empfand, als er Quecksilber in einem Gefäß schüttelte und dessen Erwärmung nachwies! Auch die Tatsachen der Konstanz des Schmelz- und des Siedepunktes gehören hierher; besonders aber ist die Darstellung des Temperaturgangs beim Erhitzen vom Fixiernatron durch eine empirische Kurve eine der schönsten und lehrreichsten Aufgaben aus dem ganzen Gebiet und um so lehrreicher, als sich an die Feststellung unmittelbar die Frage nach der Ursache des eigenartigen Verlaufs der Kurve anschließt.

An solche mehr oder weniger qualitative Feststellungen knüpfen sich häufig auch die Forderungen einer genauen quantitativen Bestimmung, d. h. einer Messung an. Solche Aufgaben bilden einen großen Teil des üblichen Aufgabenmaterials. Man kann sie ja auch in Frageform und scheinbar in Problemform kleiden, ihr Reiz liegt aber doch hauptsächlich in dem Anspruch, dem wissenschaftlich festgestellten Wert einer Größe durch die Messung so nahe wie möglich zu kommen. Der Wunsch nach Erreichung größtmöglicher Genauigkeit ist hier ein Ansporn zu recht sorgfältigem Arbeiten und insofern von nicht geringem erzieherischem Wert.

Wir sehen also, daß der Gedanke des Problems in dem enger begrenzten Sinn, wie wir ihn oben gefaßt haben, sich doch nur in einem Teil der Übungsaufgaben verwirklichen läßt. Daneben treten die Feststellungen von Tatsachen, die Messungen, die Bestätigungen von Gesetzen als Aufgaben hinzu, denen ebenfalls ein spezifischer Wert beigemessen werden muß. Fügen wir noch die Übungen hinzu, die auf eine Anwendung der erkannten Gesetze abzielen, so haben wir eine Mannigfaltigkeit der Aufgaben, die eine Gewähr dafür bietet, daß der Betrieb nicht der Einseitigkeit, der Schablone und damit der Langweile verfällt. Je nach

der Unterrichtsstufe werden in diesen Übungen bald die „Probleme“, bald die Konstatierung von Tatsachen, bald die Messungen, bald die Aufsuchung oder Bestätigung von Gesetzen und deren Anwendungen überwiegen.

In betreff der zu erzielenden Genauigkeit der Messungen wird noch ein Wort am Platze sein. Man hat zuweilen die Genauigkeit bis zu dem Grade treiben wollen, wie er bei wissenschaftlichen Messungen erforderlich und erreichbar ist.¹⁾ Ohne die bildende Kraft derartiger Arbeiten in Abrede stellen zu wollen, möchte ich doch der bestimmten Überzeugung Ausdruck geben, daß derartige Präzisionsleistungen in das Laboratorium der Hochschule gehören. Die Entwicklung der Schülerübungen hat lange daran zu leiden gehabt, daß sie allzusehr dem Hochschulpraktikum nachgebildet waren. Eigentlich lebensfähig sind sie erst geworden, seit sie nicht falschen Idealen nachjagten, sondern sich auf das dem Schülerstandpunkt Angemessene beschränkten. Auch hier handelt es sich darum, zu begreifen, „wie im Bereiche der Erfahrungswissenschaften Wissen gewonnen wird“, und dazu muß eine Annäherung genügen, die von dem angewendeten Verfahren einen Begriff gibt, ohne alle Feinheiten der Ausführung hinein zu ziehen. Daß dabei die mit einfachen Mitteln und in der zugemessenen Zeit erreichbare Genauigkeit gleichwohl möglichst angestrebt werden soll, ist schon vorher bemerkt worden.

4. Wir wenden uns nun zu der Einordnung der Übungen in den Unterricht. Hier ist zuerst die Frage, ob die Übungen wahlfrei (fakultativ) oder verbindlich (obligatorisch) sein sollen, zu beantworten. Die Entwicklung der letzten Jahre hat dahin gedrängt, daß man allgemein den verbindlichen Übungen den Vorzug gibt, diese also auch fest in den Unterrichtsgang einordnet. Geschieht dies, so ergibt sich von selbst auch das Arbeiten „in gleicher Front“, wobei alle Schüler einzeln oder zu je zweien die gleiche Aufgabe bearbeiten, als die allein mit dem Massenunterricht verträgliche Form.²⁾

In der Regel lassen sich nicht mehr als 20 Schüler gleichzeitig beschäftigen; steigt die Zahl über 20, so muß die Klasse in zwei Abteilungen zerlegt werden, die dieselben Übungen ge-

1) Man vgl. auch HAHN, Handbuch, Vorwort IX.

2) Man sehe namentlich HAHN „Wie sind usw.“ (1904) S. 16, der dies Verfahren als erster in Deutschland eingeführt hat; ferner GRIMSEHL, Pr. 1906, S. 4 und neuerdings W. BRÜSCH, Progr.-Abh. Lübeck 1913.

trennt aber parallel ausführen, im Klassenunterricht dagegen vereinigt bleiben können.¹⁾ Die Schwierigkeiten, die sich daraus für den Stundenplan und für den Betrieb des Physikunterrichts in seiner Gesamtheit ergeben, sind nicht gering. Sie lassen sich auf verschiedene Weise heben. Wo es angeht, legt man die physikalischen und die chemischen Übungen in zwei Stunden parallel zu einander, so daß die eine Abteilung in der ersten Stunde physikalische, in der andern chemische Übungen ausführt und daß beide Abteilungen in der zweiten Stunde mit einander wechseln. In anderen Fällen legt man die Übungen in die Anfangs- und Endstunden je eines Vormittags, wobei es aber nicht immer leicht zu erreichen ist, daß der gemeinsame Unterricht in der Klasse dann einsetzt, wenn beide Abteilungen ihre Übungen ausgeführt haben. Richtiger ist es daher, den ganzen Unterricht zu teilen, und die lehrplanmäßigen Stunden nicht streng in Klassenunterrichtsstunden und Übungsstunden zu scheiden, sondern die Übungen stets dann eintreten zu lassen, wenn der Unterrichtsgang es erfordert.

Nur durch eine derartige Anordnung läßt sich auch bei größeren Klassen das ermöglichen, was neuerdings als Verwebung der Übungen in den Unterricht bezeichnet worden ist (HAHN, Z. U. XVII 73, 1904), und was einen wesentlichen Unterschied des deutschen Verfahrens vor dem amerikanischen bedeutet, bei dem Klassenunterricht und Laboratoriumsunterricht völlig getrennt sind. Die Übungen werden erst dann ihren vollen Nutzen für die physikalische Bildung der Schüler erweisen, wenn sie in beständige innige Wechselwirkung mit dem Unterricht gebracht sind.

Das Ideal wäre, daß jeder Schüler für sich allein arbeitete, sofern nicht die Natur der Aufgabe das Zusammenarbeiten von zweien oder mehreren erfordert.²⁾ Äußere Umstände zwingen meist dazu, die Schüler der Regel nach zu zweien zusammen arbeiten zu lassen, und man macht aus der Not eine Tugend, wenn man dieser Arbeitsweise noch besondere Vorzüge gegenüber dem Einzelarbeiten zuschreibt. Manche halten es für zweckmäßig, wenn ein besserer und ein schlechterer Schüler zusammen arbeiten, andere befürchten darin eine Unterdrückung des einen

1) W. BRÜSCH glaubt im Notfall noch bis zu 30 Schüler in ungeteilten Klassen vereinigen zu können.

2) HAHN gibt in seinem Handbuch bei jeder Aufgabe an, ob sie sich für einen oder mehrere Schüler eignet.

Schülers durch den andern und stellen lieber möglichst gleichartige Schüler zusammen. Jedes hat seine Vor- und Nachteile, jedenfalls muß man suchen, in Fällen wo sich Unzuträglichkeiten ergeben, diese abzustellen.¹⁾

Wo wahlfreie Übungen eingerichtet sind (wie es meist an Gymnasien der Fall sein wird), lassen sich diese nicht unmittelbar mit dem Unterricht verweben, sie laufen bestenfalls neben dem Unterricht her, werden aber in der Mehrzahl der Fälle vom Klassenunterricht unabhängig sein. Hier wird auch das Prinzip des Arbeitens in gleicher Front nicht durchführbar sein, da die Schüler in der Regel verschiedenen Klassen angehören werden. Es wird also die sogenannte „regellose Arbeitsweise“ Platz greifen. Immerhin empfiehlt es sich, wenigstens Schüler derselben Klasse in gleicher Front zu beschäftigen, um wenigstens in einem engeren Kreise die Vorzüge dieses Verfahrens zu verwirklichen. Wenn nur Einzelversuche ausgeführt werden, kann man diese häufig so einrichten, daß sie auch für den Klassenunterricht verwendbar sind und von den Schülern selbst, die dann gleichsam Assistenten des Lehrers werden, in der Klasse nochmals vorgeführt werden.

Auch da wo Frontübungen eingeführt sind, braucht es übrigens darum nicht ausgeschlossen zu sein, daß auf der obersten Stufe einzelne besonders befähigte Schüler mit schwierigeren oder ausführlicheren Einzeluntersuchungen beschäftigt werden. Solche Untersuchungen werden sogar in manchen Fällen eine erwünschte Ergänzung bilden, die schon zu den Hochschulübungen überleitet, und wobei besonders eine besonnene Kritik von hohem Nutzen sein kann. Doch bleibt abzuwarten, ob sich ein derartiges Verfahren allgemeiner bewähren wird.

5. Auswahl der Versuche. Für die Auswahl der Versuche kommt nicht systematische Vollständigkeit hinsichtlich des zu behandelnden Stoffes, sondern wesentlich die methodische Rücksicht in Betracht, welche Versuche der betreffenden Unterrichtsstufe angemessen sind und ob die verschiedenen näher erörterten methodischen Übungsarten auch in rechtem Verhältnis zueinander stehen. Daneben kommt auch in Betracht (LEICK S. 31) welche Fähigkeiten in dem Schüler entwickelt werden sollen und welche Übungen am geeignetsten dafür sind.

1) END, Z. U. XXVI 317.

Es würde auch sicher zu weit führen, wenn man auf allen Gebieten der Physik die Erkenntnisse mehr oder minder vollständig wollte durch Schülerübungen gewinnen lassen. Es gilt hier dasselbe, was schon früher in allgemeiner Hinsicht gesagt ist, daß es genügen muß, wenn den Schülern „auf einzelnen Teilgebieten die Methoden der wissenschaftlichen Forschung näher gebracht werden.“¹⁾

Auf der Unterstufe wird ein Hauptaugenmerk darauf zu richten sein, daß der Schüler lernt, einfache Vorgänge genau zu beobachten und zu beschreiben. Ein schönes Beispiel dafür bieten die Vorgänge beim Erwärmen von Flüssigkeiten (LEICK S. 32). Aber neben bloß qualitativen Versuchen sind auch quantitative für diese Stufe wohlgeeignet, namentlich wo nur einfachere Wägungen erforderlich sind. So die Bestimmung des spezifischen Gewichts durch Wasserverdrängung, die Bestimmung der Ausdehnungszahl von festen und flüssigen Körpern, die Schmelzwärme des Eises und die Verdampfungswärme des Wassers, einfache Messungen von Stromstärken und Widerständen. Endlich ist für diese Stufe auch die Herstellung einfacher Apparate (Heronsball, Spritzflasche, Wasserheizungsmodelle usw. (vgl. LEICK S. 18) empfehlenswert.²⁾

Für die Oberstufe kommen die feineren methodischen Erwägungen in Betracht, die vorher angestellt worden sind. Hier werden die Versuche vielfach mit zusammenhängenden theoretischen Betrachtungen in Verbindung zu setzen sein, indem sie entweder zu derartigen Betrachtungen Anlaß geben (Pendel) oder als Anwendungen, Bestätigungen, Ergänzungen zu solchen hinzutreten (Bestimmung vom g mit dem Pendel).

Es ist auch angeregt worden (LEICK S. 31), die Übungsaufgaben derart zu wählen, daß der Schüler eine größere Zahl von Stunden dabei verweilt, und sich dadurch wichtige Tatsachen und Erscheinungen in ihrem Zusammenhang, wenn möglich von verschiedenen Seiten her, näher bringt. Es würde von solchen Aufgaben im Laufe eines Semesters naturgemäß nur eine kleine Zahl zur Bearbeitung kommen. Doch dürfte ein solches Verfahren

1) So spricht sich auch ein preußischer Ministerialerlaß vom 13. Juni 1910 aus; vgl. J. NORRENBERG in der Zeitschrift „Aus der Natur“, 9. Jahrg., Heft 1.

2) Von den Übungen in HAHNS Handbuch sind nach Mitteilung des Verfassers für die Unterstufe geeignet: I 1, 3, 9, 10, 15; IIA 1, 8, 15, 24, 28, 35, 37; III 1, 3, 4; IV 1; VII 1, 3–9; VIII 1, 2; X 1–3, 5, 6, 8, 41, 48.

(wie schon in Nr. 4 angedeutet) wohl nur bei der regellosen Arbeitsweise anwendbar sein, da im andern Fall ein gleichmäßiges Fortschreiten der Schülergruppen und eine gleichzeitige Verwertung der Ergebnisse im Klassenunterricht sehr erschwert sein wird. Wohl aber wird es ausführbar sein (nach HAHNS Vorgang) öfter eine Reihe mit einander zusammenhängender Aufgaben derart aneinander anzuschließen oder auch nach der Methode des allseitigen Angriffs bearbeiten zu lassen, daß sich dann eine zusammenfassende Betrachtung im Klassenunterricht anknüpfen läßt.

Neben den physikalischen Übungen mögen gelegentlich auch geodätische und astronomische Messungen eine Stelle finden, ferner wird nach P. JOHANNESSEN¹⁾ auch der Bau von Apparaten für einzelne Schüler, die nach der praktischen Seite hin besonders begabt sind, von Nutzen sein.

Bei der Fülle von Möglichkeiten, die auf diesem Gebiet sich darbieten, muß namentlich davor gewarnt werden, daß durch Vorschriften eine zu strenge Festlegung des einzuschlagenden Verfahrens erfolgt. Hier ist der Persönlichkeit des Lehrers ein recht großes Maß von Freiheit zu gewähren, und man darf auch solche Richtungen, die sich weit von dem durchschnittlich Anerkannten entfernen, gelten lassen, wenn nur die Hauptziele dieses Unterrichts, Schulung im methodischen Denken und Ausbildung in der praktischen Bemeisterung eines gegebenen Stoffes, nicht verloren gehen.

6. Das bei den Übungen einzuschlagende Lehrverfahren umfaßt naturgemäß mehrere Stufen, die wir als Vorbereitung, Ausführung und Auswertung unterscheiden. Als Vorbereitung ist alles das anzusehen, was der Lehrer der Klasse insgesamt vor dem Eintritt in die Ausführung der Übungen mitteilt und mit ihr erörtert. Je nach der Art der Übung kann dies mit wenigen Worten geschehen oder aber eine längere Zeit, bis zu einer Lehrstunde und darüber, erfordern. Die Vorbereitung hat in das Problem, beziehungsweise in die zu lösende Aufgabe einzuführen. Dies mag je nach dem besondern Fall auf historischem Wege, oder im Anschluß an alltägliche Beobachtungen, oder endlich in Anknüpfung an Erscheinungen, die aus dem Unterricht bereits bekannt sind, geschehen. So können die Versuche über das Pendel zweckmäßig an die Legende von GALILEIS Pendelbeobachtung-

1) Eine Schülerwerkstatt Z. U. XXII 259, vgl. auch XXIV 65.

gen oder an die Regulierung der Pendeluhr durch Änderung der Länge der Pendelstange anknüpfen, die Versuche über das BOYLEsche Gesetz ergeben sich als ein Problem aus den Erscheinungen, die ein Barometer im luftverdünnten Raum zeigt (S. 138), einfache Versuche über Interferenz und Beugung des Lichtes gehen auf tägliche Beobachtungen über Interferenzfarben zurück. Eine umfassende Vorbereitung, zum Teil durch Demonstrationsversuche des Lehrers, erfordern Themata wie das OHMSche Gesetz, die Induktionsströme u. a. Hier werden die grundlegenden Versuche dem Klassenunterricht zufallen müssen, Spezialisierungen und Anwendungen dagegen den Übungen zuzuweisen sein. Es hieße aber das heuristische Prinzip übertreiben, wollte man auch in diesen Fällen die Gesetze von den Schülern „entdecken“ lassen.

Die Vorbereitung wird auch die genauere Anleitung zur Anstellung des Versuchs umfassen müssen. Nur im Notfall sollte man sich, wie im Hochschulunterricht, damit begnügen, den Schülern bloß eine gedruckte Anleitung oder ein hektographiertes Blatt in die Hand zu geben. Es ist einer von den Vorzügen der Übungen in gleicher Front, daß man hier mit allen Schülern gemeinsam das zum Versuch Nötige besprechen kann. Aber auch hier wird man sich, wenn es irgend angeht, nicht mit der bloßen Mitteilung begnügen. Die Kunst des Lehrers wird vielmehr darin bestehen, die Schüler zur Beantwortung der Frage „Wie werden wir es machen?“ anzuregen, und die beabsichtigte Art der Ausführung gleichsam in ihren Köpfen erst entstehen zu lassen, dabei auch etwaigen Varianten, die einzelne Schüler beibringen, nach Möglichkeit Spielraum zu gewähren. Wenn auch vom Entdecken und Nachentdecken nur in bescheidenen Grenzen die Rede sein kann, so ist andererseits doch hier die Gelegenheit für eine erfinderische Tätigkeit gegeben, und dies ist vielleicht das Beste, was die Übungen an positivem Ertrag abwerfen können. Man vermeide, wie es oft im Hochschulpraktikum geschieht und aus mancherlei Gründen in der Regel nicht anders geschehen kann, dem Übenden einen fertigen Apparat in die Hand zu geben, an dem er nur Einstellungen zu machen und Ablesungen auszuführen hat; sondern man nötige ihn, gewisse Teile der Versuchsanordnung selber zu ersinnen und zusammensetzen, ehe er den eigentlichen Versuch beginnt. Je nach der Stufe, auf der der Übende steht, kann man ihm in dieser Hinsicht mehr oder

weniger zumuten. Es ist sehr erziehlich, z. B. auch nur einen Draht selbst für einen bestimmten Zweck biegen oder wickeln, oder eine Skala regelrecht aufzuhängen. Das Anpassen der Dinge an die Gedanken ist eine nicht minder wichtige Sache als das Anpassen der Gedanken an die Dinge. Alles Erfinden ist im Grunde nichts anderes als ein Anpassen der Dinge an die Gedanken. Erfinden aber ist die eigentliche Funktion des Menschengenies.¹⁾ Hierzu anzuleiten sollte in weit höherem Maße als bisher der Unterricht sich angelegen sein lassen.

7. Bezüglich der Ausführung der Versuche können wir uns kurz fassen. Soweit es sich um Beobachtungen handelt, kommt es auf Genauigkeit des Sehens, Vollständigkeit auch im Beachten des scheinbar Nebensächlichen an; hierzu durch Fragen während der Versuche selbst die Schüler anzuhalten, dürfte nicht überflüssig sein. Wo Messungen auszuführen sind, ist auf Präzision zu halten, so weit solche mit den verwendeten Instrumenten erreichbar ist. Die Ergebnisse sind sofort, in der Regel tabellarisch, in ein Heftchen einzutragen. Die Schüler sollen möglichst selbständig arbeiten, ein Eingreifen des Lehrers wird jedoch nicht zu vermeiden sein, wo die eigne Kraft des Schülers versagt oder wo er grobe Fehler begeht, die für das Resultat des Versuchs oder auch für den benutzten Apparat verhängnisvoll werden können.²⁾

Hinsichtlich der Auswertung der Übungen ist zunächst die Ausführung der Rechnungen in Betracht zu ziehen. Es ist ein ziemlich allgemein verbreiteter Mißstand, daß die Schüler in betreff der erreichbaren und der wünschenswerten Genauigkeit kein klares Urteil besitzen und sich daher oft mit unnötig langen Rechnungen plagen, wo ein abgekürztes Rechnen mit wenigen Ziffern besser zum Ziele führt. Beachtenswert ist in dieser Hinsicht noch heute die Promotionsthese von H. HERTZ aus dem Jahre 1880³⁾: Ein Fehler von $\frac{1}{100}$ des wahren Wertes bildet die Grenze für die wünschenswerte Genauigkeit, ein Fehler von $\frac{1}{1000}$ des wahren Wertes die Grenze für die mögliche Genauigkeit in der Bestimmung einer physikalischen Konstanten; genauer als bis auf $\frac{1}{10000}$ ihres Wertes läßt sich kaum eine physikalische Konstante auch nur definieren.“ P. VOLKMANN (a. a. O.) fügt dem noch hinzu, daß

1) CHAMBERLAIN, GOETHE, S. 145.

2) GRIMSEHL, Pr. 1906, S. 2.

3) Angeführt bei P. VOLKMANN, Fragen, S. 36.

hiernach der Begriff der wünschenswerten Genauigkeit in der Physik ein Rechnen mit zwei bis dreiziffrigen Zahlen, der Begriff der möglichen Genauigkeit ein Rechnen mit drei- bis vierziffrigen Zahlen bedinge. Das Rechnen mit fünfziffrigen und höherstelligen Zahlen bilde in der Physik nur eine Ausnahme, für den elementaren Unterricht würde es einer „unerwünschten“, ja „unmöglichen“ Genauigkeit entsprechen.

Dementsprechend wird es auch ein lehrreicher Teil der Bearbeitung physikalischer Übungen auf der Oberstufe sein, in jedem Fall die mögliche Genauigkeit festzustellen, indem der wahrscheinliche Fehler der bei der Übung vorkommenden Ablesungen ermittelt wird. Der Schüler gewinnt einen weit klareren Einblick in die Erscheinung selbst dadurch, daß er sieht, in welcher Weise die in Betracht kommenden Faktoren das Resultat beeinflussen (LEICK S. 26).

Des weiteren wird die Auswertung des Versuchs in der Erörterung des aus ihm errechneten Resultats zu bestehen haben. Hier wird, sofern ein mathematisch formuliertes Gesetz in Frage kommt, zu entscheiden sein, ob die Abweichungen die Grenze der möglichen und zulässigen Fehlergröße nicht überschreiten, oder ob sie von dem Betrage sind, daß Versehen oder Irrtümer anzunehmen sind. Auch die Aufdeckung von solchen wird nicht ohne Nutzen sein, ja häufig sogar den wertvollsten Ertrag der Übung darstellen, wenn bei der Aufsuchung ein methodisches Verfahren angewendet wird.

Es mag sich weiter eine Erörterung darüber anschließen, ob und inwiefern ein aus dem Versuch gefolgertes Gesetz als ein wirklich bewiesenes anzusehen ist. Hier ist immer von neuem der Neigung zu vorschneller Verallgemeinerung entgegen zu treten und zu betonen, daß alle unsere empirisch gefundenen Gesetze der fortwährenden weiteren Prüfung unterworfen bleiben. An dem Beispiel des BOYLESchen Gesetzes ist zu zeigen, daß eine Verallgemeinerung für beliebige Gase und beliebige Druck- und Temperaturverhältnisse nicht zulässig ist.

Es hat sich endlich immer mehr als zweckmäßig erwiesen, daß auf Grund der stattgehabten Besprechung eine kurze schriftliche Ausarbeitung erfolgt. Von dieser sagt W. END in seinem Bericht über die Unterrichtserfahrungen an den Realanstalten Bayerns: „Diese Ausarbeitung, die zu Hause zu geschehen hat, wird als einer der wichtigsten Punkte der ganzen Übung von

sämtlichen Lehrern verlangt. Sie soll unter Vermeidung alles Nebensächlichen einen kurzen, klaren Bericht über die Übung, Skizzen der benutzten Übungsgeräte und die notwendigen Tabellen (wenn möglich auch graphische) enthalten. Die Anfertigung dieser Berichte bereitet erfahrungsgemäß am Anfang den Schülern große Schwierigkeiten, namentlich die Unterscheidung des Haupt- und Nebensächlichen, ist aber zugleich eine ausgezeichnete Schulung für eine kurze, knappe und klare Ausdrucksweise. Gewarnt muß davor werden, mehr als die Skizzen der Apparate zu verlangen, die Schülern verwenden sonst auf die Ausführung der Zeichnungen (auch des Nebensächlichen) eine unverhältnismäßig große Zeit. Dagegen kann die sorgfältige Zeichnung von Übungs- und Demonstrationsapparaten Gegenstand des technischen Zeichnens sein.“

§ 7. Einzelfragen des physikalischen Unterrichts.

1. **Das Experiment im Unterricht.** Der Bedeutung, die dem Experiment als Forschungsmittel zukommt, entspricht der Wert, den es für den Unterricht besitzt. So betonen insbesondere auch die preußischen Lehrpläne von 1901, daß in dem Unterkursus der Physik durchweg das Experiment, aber in der möglichst einfachen Form, als Grundlage zu dienen habe, und daß es auch auf der Oberstufe ein wesentlicher Teil des Unterrichts sei. Allerdings bedarf der erste dieser Sätze, wie KEFERSTEIN (Ph. 849) bemerkt, einer gewissen Einschränkung, da der Unterricht der Unterstufe so viel als möglich an die Beobachtungen in der Natur und an die Erfahrungen des Alltagslebens anknüpfen sollte. Erst wo diese sich als unzureichend erweisen und Fragen auftreten, die ohne Zuhilfenahme eigens ersonnener Vorrichtungen sich nicht lösen lassen, hat das Experiment einzutreten.

Die Bedeutung des Experiments für den Unterricht besteht darin, daß es uns ermöglicht, eine Erscheinung, so z. B. die Farbenzerstreuung durch ein Prisma oder die Beugungerscheinung durch einen engen Spalt, unter von uns selbst hergestellten Bedingungen und zu einer dafür geeigneten Zeit hervorzurufen. Aber dies erschöpft den Zweck des Experiments nicht; es spielt vielmehr vor allem eine entscheidende Rolle, wenn es sich darum handelt, ein sich uns aufdrängendes Problem zu lösen, also eine an die Natur gestellte Frage zu beantworten. Erst an zweiter Stelle kommt hinzu die Feststellung von funktionalen Zusammenhängen und von quantitativen Bestimmungen, an dritter endlich

die Bestätigung von Folgerungen, die aus früher erkannten Sätzen oder aus hypothetischen Annahmen hergeleitet sind.

In allen diesen Fällen aber darf das Experiment der Regel nach nicht als ein gänzlich unvorbereitetes an die Schüler herantreten. Dies ist da, wo es sich um die Lösung eines Problems handelt, selbstverständlich. Aber auch in den anderen Fällen wird, sei es durch gedankliche Hinleitung, sei es durch historische Einführung, in den Schülern eine gewisse Erwartung geweckt werden müssen. Ja man kann auch dadurch, daß man den Erfolg einer Versuchsanordnung erraten läßt, die Aufmerksamkeit aufs höchste spannen und so den Erfolg des dann ausgeführten Versuchs steigern.¹⁾

Der günstigste Fall ist der, daß die Schüler selber die Versuchsanordnung ersinnen, die für einen bestimmten Zweck erforderlich ist, oder daß sie wenigstens Vorschläge machen, wie der Versuch angestellt werden könnte. GRIMSEHL berichtet (D. 65), daß ein großer Teil der von ihm konstruierten Apparate eigentlich auf solche Art von seinen Schülern, d. h. durch das Zusammenarbeiten der ganzen Klasse, erfunden worden sei. Aus meiner eigenen Praxis möchte ich anführen, daß es z. B. schon auf der Unterstufe gelingt, die verschiedenen Methoden der Bestimmung des Gewichts der Luft (Evakuieren, Verdünnung der Luft durch Aussaugen oder Erwärmen, Verdichtung durch Hineinblasen oder besser Komprimieren mittels einer Druckpumpe) von den Schülern selbst finden zu lassen.

Bezüglich der Benutzung von Apparaten ist zu beachten, was GRIMSEHL in einem Vortrag zu Halle 1904²⁾ als obersten Grundsatz aufgestellt hat: „Dort, wo ein physikalischer Vorgang ohne Apparat vorgeführt werden kann, ist die Benutzung eines Apparats zu verwerfen.“ Doch möchte ich nicht mit GRIMSEHL so weit gehen, daß der Apparat unter allen Umständen völlig Nebensache bleiben müsse. Für viele Experimente ist der Apparat etwas durchaus Wesentliches, und dies gilt nicht zum wenigsten von den zahlreichen Apparaten, die GRIMSEHL selbst angegeben hat. Der Apparat verkörpert vielfach den Grundgedanken des Experiments. Man braucht z. B. nur an GRIMSEHLS Apparat zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents zu denken, um dies als selbstverständlich zu erkennen. Wenn dem aber so ist, so be-

1) MACH, E. u. I. (2) 194.

2) Unterr.-Bl. f. d. math. u. naturw. Unterr. 1904.

hält doch wohl KIESSLING (D. 24) recht mit seiner Forderung: „Zu welchem Zweck nun auch ein Versuch oder eine messende Versuchsreihe angestellt werden soll, immer muß vorher eine genaue Beschreibung des Apparats mit Hervorhebung der wesentlichen und unwesentlichen Teile und des besonderen Zwecks derselben gegeben werden, sei es durch den Lehrer selbst oder infolge geeigneter Fragestellung desselben von den Schülern.“ KIESSLING empfiehlt daher auch, die Zusammenstellung der zu einem Versuch erforderlichen Geräte möglichst vor den Augen der Schüler vorzunehmen. Wo dies etwa nicht tunlich ist oder ein Apparat nicht auseinandergenommen werden kann, ist durch Modelle, körperliche Querschnitte oder mindestens durch schematische Zeichnungen das Verständnis zu vermitteln.

Andererseits wird es in der Regel nicht ratsam sein, „eine Erscheinung etwa zuerst eingehend zu beschreiben und dann zu zeigen“. Ist die Richtung der Aufmerksamkeit im allgemeinen angegeben, so soll der Schüler selbst beobachten und das Beobachtete beschreiben. Dies gilt namentlich auch für Schülerübungen, wie HAHN in seinem Handbuch vortrefflich im einzelnen durchgeführt hat.

Auch wenn der Apparat im Lehrbuch abgebildet ist, sollte man die Schüler von ihm eine Skizze in ihrem Heft entwerfen und das Versuchsergebnis hinzufügen lassen. Ein solches Verfahren dient besser zur Einprägung und zum Festhalten des Gesehenen als ein nachträgliches Wiederholen aus dem Lehrbuch, wobei sich leicht der gedruckte Text an die Stelle des unmittelbar Wahrgenommenen schiebt.

Für die Ausführung des Experiments ist das sichere Gelingen eine selbstverständliche Forderung. Besser ist es, einen Versuch gar nicht anzustellen, als ihn dem Mißlingen auszusetzen. Immerhin kann einmal selbst ein wohl vorbereitetes Experiment mißlingen. Dies soll auch im Universitätsunterricht vorkommen, wo ganz andere Hilfsmittel zur Verfügung stehen. Nicht jeder hat die Geistesgegenwart, während des Unterrichts vor der Klasse den etwaigen störenden Umständen nachzuspüren. Aber man sollte es sich zur Pflicht machen, den Versuch mit besserem Erfolg so bald als möglich zu wiederholen und die Schüler über die Ursachen des Mißlingens zu unterrichten; dann kann selbst ein fehlgeschlagener Versuch noch zum Quell eigenartiger Belehrung werden.

Für die Ausführung eines Versuchs muß als Regel gelten, daß der Aufbau so einfach und übersichtlich wie nur irgend möglich sein soll. Zu vermeiden sind alle unnötigen Stative, Klötze u. dgl. (man sehe, was GRIMSEHL, D. 68, hierüber sagt). Wichtig ist auch, daß der Tisch nicht gleichzeitig mit Apparaten und Utensilien besetzt ist, die nicht unbedingt zu dem Versuch gehören, und selbst die Hinterwand sollte, soweit dies irgend zugänglich, keine störenden oder ablenkenden Objekte enthalten. Wenn auch dem Schüler eine gewisse Fähigkeit des Abstrahierens von der Umgebung anerzogen werden soll, so ist es doch andererseits eine der einfachsten ästhetischen Forderungen, daß die Umgebung nicht störend oder ablenkend wirken darf. Es gehört bekanntlich ohnehin noch ein gewisses Maß an Energie von seiten der Schüler dazu, sich durch keine außer ihnen oder in ihnen liegenden Umstände von der Aufmerksamkeit auf den Gegenstand des Unterrichts abwendig machen zu lassen. Die eben hervorgehobenen Gesichtspunkte sprechen auch gegen die Verwendung von Universalapparaten, weil diese häufig Überflüssiges enthalten oder doch den Schein erwecken, als ob die Vorgänge eng an den Apparat gebunden und sozusagen von ihm abhängig wären. Es ist ohne Frage wirksamer, wenn eine Versuchsanordnung im einzelnen Falle ad hoc hergerichtet und bis zu einem gewissen Grade improvisiert wird, als wenn man immer wieder zu derselben stereotypen Vorrichtung greift. Auch der allzu häufige Gebrauch des Projektionsapparats ist zu widerraten. Die unmittelbare Beobachtung des Vorgangs ist in den meisten Fällen vorzuziehen, selbst wenn man die Schüler gruppenweise an den Apparat herantreten lassen muß. In vielen Fällen wird man die Sichtbarkeit des Vorgangs dadurch steigern können, daß man den Versuch nicht auf dem Experimentiertisch, sondern auf einem Tischchen ausführt, das unmittelbar vor den Schülern, etwa am Anfang des Mittelganges (der aus vielen Gründen zu empfehlen ist) aufgestellt ist. Dies gilt z. B. für die einfachsten Versuche zum Magnetismus und zur Reibungselektrizität. In anderen Fällen wird man sich das Herumzeigen einer Versuchseinrichtung an verschiedenen Stellen der Klasse nicht verdrießen lassen dürfen. Für die Projektion kommen nur wenige Fälle in Betracht, z. B. der Ausschlag eines Kondensatorelektroskops infolge der Ladung durch galvanische Elemente und Batterien; aber selbst in diesen Fällen genügt die Projektion mit Hilfe einer Lampe und zweier

Linsen, oder auch bloße Schattenprojektion, ohne daß es des eigentlichen Projektionsapparats bedarf.

In bezug auf „Gedankenexperimente“ endlich vgl. man das in § 3 Gesagte.

2. **Das Mathematische im physikalischen Unterricht.**¹⁾ Gegenüber dem namentlich in früheren Jahrzehnten geübten Verfahren, die Physik vorwiegend als eine mathematische Wissenschaft zu behandeln, vertreten die „Meraner Lehrpläne“ den neuerdings wohl allgemein zur Anerkennung gelangten Grundsatz: die Physik ist im Unterricht als Naturwissenschaft zu betreiben. Wenn hiermit der Charakter dieses Unterrichts als vorwiegend empirisch gekennzeichnet ist, so soll damit doch die mathematische Seite des Gegenstandes nicht über Gebühr in den Hintergrund gedrängt werden. Ist doch „die Mathematik die Grammatik der Sprache, in der die Natur zu uns redet.“²⁾ Schon die elementarsten Gesetze der Mechanik lassen sich nur in dieser Sprache völlig bestimmt aussprechen. Es ist also jedenfalls von der Mathematik so weit Gebrauch zu machen, als es der Zweck des Physikunterrichts auf unseren höheren Schulen erfordert.

Nur gegen ein Übermaß der mathematischen Behandlung ist Einspruch zu erheben. Ein solches liegt vor, wenn gewisse Anwendungen von vorwiegend mathematischer Natur (z. B. Beispiele für die Wurfbewegung, Berechnung von Trägheitsmomenten) allzusehr betont werden; solche Anwendungen gehören in die Mathematikstunden. Aber auch bei der Ableitung von Formeln, die durchaus innerhalb der Grenzen des Physikunterrichts fallen, kann leicht des Mathematischen zuviel geschehen, namentlich wenn Formeln elementar abgeleitet werden, die ihrer Natur nach eigentlich höhere Mathematik erfordern (wie die Pendelformel oder die Formel für die Geschwindigkeit der Fortpflanzung von Wellen in einem elastischen Medium). Die Befriedigung des Lehrers, der solche elementaren Ableitungen ausklügelt oder auch nur vorträgt, ist in der Regel unverhältnismäßig viel größer als der Nutzen für die Schüler.³⁾ In der Regel werden die allerein-

1) Man vgl. hierzu besonders F. PIETZKER, Beziehungen zwischen dem mathematischen und physikalischen Unterricht, Z. U. III 105; A. HÖFLER, Das Mathematische im physikalischen Unterricht, Z. U. XVIII, 1; H. E. TIMERDING, Die Mathematik in den physikalischen Lehrbüchern. Teubner 1910.

2) HELM in Zur Förd. d. ph. U. III 222.

3) Ein Schrecken für die Maturitätsprüflinge an österreichischen Gymnasien war lange Jahre hindurch die Ableitung der Pendelformel; die neuesten Instruktionen von 1909 haben sie glücklich beseitigt.

fachsten mathematischen Operationen für die quantitative Festlegung der in Betracht kommenden Begriffe und Gesetze hinreichen. Und selbst in diesen einfachsten Fällen darf, wie GRIMSEHL treffend bemerkt, die Entwicklung der Formel und die Formel selbst nicht etwa als das Endziel des physikalischen Unterrichts angesehen werden. „In der Schule ist noch lange nicht alles getan, wenn die Formel entwickelt ist, sondern die sich aus der Formel ergebende Bildung der Begriffe muß durchgeführt und erreicht werden. Der Schüler muß die Formel nicht nur herleiten können und auswendig wissen, ... sondern er muß sie gewissermaßen physikalisch fühlen und verstehen.“¹⁾

Die letzte Bemerkung GRIMSEHLS trifft eine Stelle im Physikunterricht, an der, um mich recht drastisch auszudrücken, das feinste Gift der Mathematik seine vielfach noch nicht erkannten schädlichen Wirkungen ausübt. Der an die Strenge des mathematischen Denkens gewöhnte Physiker glaubt es der Mathematik an Exaktheit der Definitionen gleich tun zu müssen, er definiert z. B.: „Den Quotienten des von einem Körper durchlaufenen Weges und der dazu gebrauchten Zeit nenne ich die Geschwindigkeit des Körpers“; oder: „das Produkt aus Kraft und Weg nenne ich Arbeit“ – und er glaubt mit solchen Definitionen die Physik auf eine Stufe mit der Mathematik zu stellen. Hiergegen ist schon vor mehr als zwei Jahrzehnten mit den folgenden Worten protestiert worden.²⁾

„Es mag daran erinnert werden, daß jeder physikalische Begriff eine anschauliche Grundlage hat, und daß der Zusammenhang mit dieser Grundlage nicht aufgehoben werden darf, wenn das volle Verständnis des Begriffs erhalten bleiben soll. So bedeutet Geschwindigkeit nicht den Quotienten s/t ..., sondern vielmehr einen eigenartigen Zustand eines Körpers, dessen genaue Messung mit Hilfe dieses Quotienten möglich wird; so bedeutet Masse nicht den Quotienten p/g , sondern eine Eigenschaft, vermöge welcher ein Körper unter der Einwirkung einer bestimmten Kraft eine bestimmte Beschleunigung erfährt. Ebenso ist die anschauliche Bedeutung des Potentials eines Körpers nicht durch die Formel für das bloß gedachte Arbeitsquantum gegeben, welches nötig sein würde, um die Elektrizitätsmenge Eins aus dem Unendlichen bis an die Oberfläche des Körpers zu führen. Das Potential eines Körpers ist vielmehr ein Zustand, vermöge dessen allerdings in dem be-

1) GRIMSEHL, D. 24.

2) POSKE, Z. U. III 161; dazu Bemerkungen von A. HÖFLER, Z. U. VIII 125.

zeichneten Fall eine Arbeitsgröße aufgewendet werden müßte, der aber bestehen kann, ohne daß dieser Fall jemals verwirklicht wird.“

Es sei im Anschluß hieran noch bemerkt, daß auch eine der noch heute am meisten umstrittenen Definitionen, nämlich Kraft = Masse \times Beschleunigung, weder eine Identität noch eine Begriffsfestsetzung bedeutet, sondern lediglich eine Maßbestimmung für einen unabhängig hiervon in der Anschauung bereits gegebenen Begriff. Gerade solche Begriffe sind es, die „physikalisch gefühlt und verstanden werden müssen“.

Was nun die mathematischen Kenntnisse betrifft, die der Physikunterricht bei den Schülern voraussetzen muß, so ist mit Recht darüber geklagt worden, daß der mathematische Unterricht den Bedürfnissen des physikalischen bisher zu wenig entgegengekommen sei¹⁾, weil der ihm gegebene Zuschnitt einem Ziel entspreche, das ohne Rücksicht auf die Verwendung für physikalische Fragen gesteckt sei. Es würde bei dem Entwurf eines idealen, die Anpassung der einzelnen Unterrichtsfächer aneinander ernstlich ins Auge fassenden Lehrplans auch der mathematische Lehrstoff und seine Verteilung nicht unerhebliche Änderungen erfahren müssen. Die neuere Reformbewegung auf dem Gebiet des mathematischen Unterrichts geht erfreulicherweise davon aus, daß die Anwendungen der Mathematik mehr beachtet werden sollten. Namentlich auch die vielerörterte „Erziehung zum funktionalen Denken“ kommt den Bedürfnissen des Physikunterrichts aufs kräftigste entgegen. In der Physik handelt es sich ja fast beständig und so sehr um funktionale Beziehungen, daß man die Physik als die Wissenschaft von den funktionalen Zusammenhängen bezeichnen könnte. Läßt sich der mathematische Unterricht erst auf solche Betrachtungen ein, so kann ihm die Physik die wertvollste Hilfe leisten durch Darbietung von Begriffen und Abhängigkeiten, die nicht auf dem Boden der reinen Mathematik gewachsen sind. Man denke nur an die Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung. Wenn die Funktionalbeziehungen der Mathematik lediglich formale Zuordnungen bedeuten, so stellen die Funktionalbeziehungen der Physik natürliche Zusammenhänge dar und bieten somit der Mathematik ein willkommenes Feld der Anwendungen.

Was die Physik an mathematischen Voraussetzungen braucht,

1) F. PIETZKER, Z. U. III 105–112; KEFERSTEIN, Ph. 852.

hat HÖFLER in dem mathematischen Anhang seiner „Physik“ zusammengestellt, und damit auch dem Mathematiklehrer ein wertvolles Material geliefert, sofern nur der Lehrplan Spielraum genug bietet, um davon Gebrauch zu machen. Aber selbst innerhalb des lehrplanmäßigen Stoffes läßt sich dem Bedürfnis des physikalischen Unterrichts noch in ganz anderer Weise vorarbeiten, als es vielfach geschieht. KIESSLING (D. 29) hat schon auseinandergesetzt, daß die Proportionslehre ganz anders als bisher betrieben werden müsse und daß namentlich die Herleitung der zusammengesetzten Verhältnisse aus den einfachen eine stärkere Berücksichtigung erfordere. Noch dringlicher erscheint es mir, daß der Begriff des verschwindend Kleinen im geometrischen und stereometrischen Unterricht nicht so ganz beiseite geschoben wird, wie es neuerdings vielfach zu geschehen scheint. So sollte bei der Proportionalität der Abschnitte, die auf einem Strahlenbüschel durch Parallelen begrenzt werden, nicht bloß der Fall der kommensurablen Strecken, sondern auch der der inkommensurablen behandelt werden, und ähnlich bei dem Satz, daß sich Rechtecke von gleicher Grundlinie wie ihre Höhen verhalten.¹⁾ Entsprechendes gilt auch von dem Cavalierischen Prinzip (vgl. HÖFLER, Didaktik d. m. U. 217), dessen Herleitung bereits den Grundgedanken der Integralrechnung enthält. Sind derartige Betrachtungen voraus- oder nebenhergegangen, so wird den Schülern das Verständnis der Grundbegriffe der Bewegungslehre nicht allzu schwer fallen, selbst wenn die Elemente der Infinitesimalrechnung noch nicht in den Umfang des mathematischen Lehrstoffs einbezogen sind.

Wünschenswert bleibt freilich, daß der Unterricht in der Mechanik von Anfang an die Grundbegriffe der Bewegungslehre in der präzisen mathematischen Fassung aufstellt, die nur in der Sprache der Infinitesimalrechnung möglich ist, und daß auch die weitere Verwendung jener Begriffe sich auf die Bekanntheit mit diesem mächtigen mathematischen Werkzeug stützen kann. Wie dies zu ermöglichen sei, hat HÖFLER²⁾ bereits so ein-

1) In der neueren Bearbeitung des in Norddeutschland noch immer verbreiteten MEHLERSchen Lehrbuchs durch SCHULTE-TIGGES (Ausgabe für Gymnasien) sind die obenerwähnten Grenzbetrachtungen einfach weggelassen und durch weniger exakte Ableitungen ersetzt, bei denen die Kommensurabilität vorausgesetzt und der Beweis zudem auf ein bloßes Beispiel mit kleinen ganzen Zahlen beschränkt ist.

2) Didakt. Handb. I 372 ff.

gehend erörtert, daß hier der Hinweis darauf genügen mag. Einiges Spezielle zu dieser Frage in § 18.

Schließlich sei noch des graphischen Verfahrens gedacht, das als Mittel zur Darstellung funktionaler Zusammenhänge für die Physik besonders wertvoll ist. Es dient nicht nur zur übersichtlichen Zusammenfassung von Versuchsergebnissen, sondern führt in dazu geeigneten Fällen auch unmittelbar zur Auffindung einfacher Gesetzmäßigkeiten. GRIMSEHL (D. 27) verweist darauf, daß der Zusammenhang von Pendellänge und Schwingungszeit bei solcher graphischer Darstellung durch eine Kurve wiedergegeben wird, die der Schüler leicht als Parabel erkennt. „Ein paar Worte genügen, um die Schüler zu dem selbständigen Schlusse anzuregen, daß die Pendellänge in derselben Abhängigkeit zur Schwingungszahl des Pendels steht, wie die Fallstrecke eines frei fallenden Körpers zur Fallzeit, daß also die Pendellänge dem Quadrat der Schwingungszahl proportional, und demnach die Schwingungszeit der Quadratwurzel aus der Pendellänge proportional ist.“

Von anderen graphischen Darstellungen sei als besonders lehrreich die bildliche Wiedergabe magnetischer und elektrischer Kraftfelder erwähnt (HÖFLER, Physik und Naturlehre f. d. oberen Klassen). Ein räumliches Modell für die graphische Darstellung des Zusammenhangs von p , v und t beschreibt E. MACH in Z. U. V 138; man vgl. auch HÖFLER, Physik, Leitaufgabe 144.

3. Die physikalischen Aufgaben. Dieser Gegenstand gehört scheinbar zu dem vorher behandelten, insofern bei physikalischen Aufgaben der Regel nach das Mathematische mitspielt. Es wird sich aber zeigen, daß den physikalischen Aufgaben auch unabhängig von ihrer meist mathematischen Einkleidung eine hohe Bedeutung für den physikalischen Unterricht zukommt.

An erster Stelle sind physikalische Rechenaufgaben überall da von Nutzen, wo es auf die Veranschaulichung und Versinnlichung von physikalischen Gesetzen ankommt. (Physikalische Aufgaben erster Art.) Ja vielfach wird schon die erste Demonstration eines Gesetzes an der Hand bestimmter Versuchsergebnisse in zahlenmäßiger Form erfolgen. Es gehört hierher¹⁾ die Bestimmung des spezifischen Gewichts, der spezifischen Wärme, der Schmelz- und Kondensationswärme, der Ausdehnungskoeffi-

1) Vgl. KOPPE, Z. U. I 66.

zienten, der Schwingungszahl eines Tones, der Wellenlänge des Lichts, der elektromotorischen Kraft, der Stromstärke und des Widerstandes usw. Man wird, nachdem solche physikalischen Begriffe durch zahlenmäßige Bestimmungen festgelegt sind, es nicht unterlassen dürfen, sie durch einfache Rechenbeispiele immer und immer wieder einzuüben. Noch mehr ist eine Erläuterung durch Rechenbeispiele da nötig, wo eine gesetzmäßige Beziehung zuerst in allgemeiner Form abgeleitet worden ist, wie die Beziehung zwischen Arbeit und lebendiger Kraft. Hier muß eine Reihe bekannter Beispiele (der Rammhämmer, Hammer und Nagel, GRIMSEHLS Federpistole) einsetzen, um das abstrakte Gesetz der Anschauung näherzubringen. Ja man wird am besten tun, mit einer solchen Einzelaufgabe zu beginnen und an deren Lösung erst die allgemeinere Betrachtung anzuschließen.

Die volle bildende Kraft der physikalischen Aufgaben tritt aber erst dann hervor, wenn die Forderung gestellt wird, eine zusammengesetzte physikalische Erscheinung in ihren quantitativen Beziehungen zu verfolgen und rechnungsmäßig darzustellen. Diese Aufgaben, die als physikalische Aufgaben zweiter Art bezeichnet werden mögen, erfordern eine produktive Tätigkeit und neben der mathematischen Behandlung zugleich ein im eigentlichen Sinn physikalisches Denken. Ihr Zweck ist die Übung in der Anwendung physikalischer Begriffe auf die Erscheinungswelt.¹⁾ Sie werden in der Regel der häuslichen Bearbeitung zu überlassen sein. Aufgaben dieser Art findet man in einigen neueren Aufgabensammlungen (BUDDE-JOHANNESSON, FLIEDNER-BRÄUER) zusammengestellt.

Eine weitere Art physikalischer Aufgaben ist von der Art, daß sie keine mathematische Behandlung erfordern, sondern lediglich das physikalische Denken in Bewegung setzen. Aufgaben dieser Art werden als physikalische Denkaufgaben bezeichnet (Z. U. I 110). Beispiele solcher Aufgaben hat wohl zuerst R. KOHLRAUSCH (Vater) in Rinteln (1844) veröffentlicht; dann hat HELM²⁾ auf diese Aufgaben hingewiesen und ihnen eine Reihe

1) Ein Beispiel dieser Art ist folgendes: An einem um seine Mitte drehbaren Stabe von der Länge l ist eine ihm gleiche Masse m verschiebbar. Wie weit entfernt von der Stabmitte ist m anzubringen, wenn das Pendel Sekunden schlagen soll? (BUDDE-JOHANNESSON, Nr. 214a.) Vgl. ebd. Nr. 544c.

2) HELM, Progr. der Annenschule zu Dresden 1885 und Zeitschr. z. F. d. ph. U. III 227.

von weiteren hinzugefügt. Einen Anhang solcher Denkaufgaben enthält auch die Unterstufe der Naturlehre von A. HÖFLER sowie deren reichsdeutsche Bearbeitung. Viele von diesen Aufgaben sind freilich der Art, daß sie zwar das Denken der Schüler namentlich auf der Unterstufe lebhaft in Bewegung setzen, aber doch zumeist nicht ohne Mitwirkung des Lehrers gelöst werden können. Man stelle sie daher zunächst zur Überlegung, bespreche sie dann in der Klasse und suche dabei das Denken der Schüler auf den richtigen Weg zu leiten. Man sieht leicht, daß bei richtiger Behandlung diese Denkaufgaben ein vorzügliches Mittel abgeben, um die Schüler in das Wesen der heuristischen Methode und somit der physikalischen Forschung einzuführen. Hierauf hat neuerdings auch G. KERSCHENSTEINER hingewiesen.¹⁾

Endlich ist noch der Leitaufgabe zu gedenken. HÖFLER hat diesen Begriff (Z. U. XV 1) eingeführt und dafür im Anhang seiner Physik nicht weniger als 230 Beispiele zusammengestellt. Er versteht darunter solche Aufgaben, durch die (im Unterschied von gewöhnlichen Übungsaufgaben) vorwiegend der theoretische Lehrstoff der Physik ergänzt und solcherart dem sehr verschiedenen Ausmaß der Begabung und Arbeitswilligkeit der verschiedenen Schülerindividualitäten weitestgehende Rechnung getragen werden kann und soll. Angesichts dieser sehr umfassenden, im wesentlichen auf Erweiterung des Lehrstoffs gerichteten Begriffsbestimmung möchte ich die an sich glückliche Bezeichnung der Leitaufgaben mehr auf einen Teil des von HÖFLER a. a. O. behandelten Gebiets, nämlich auf solche Aufgaben beschränken, die von grundlegender Bedeutung für den Lehrgang selbst sind und in diesem nicht fehlen dürfen, vielmehr den „eisernen Bestand“ desselben ausmachen. HÖFLER selbst führt als Beispiel die klassische Aufgabe ROBERT MAYERS an, aus c_p und c_v der Luft, dem spezifischen Gewicht der Luft usw. das mechanische Wärmeäquivalent zu berechnen. Er wünscht die Aufgabe innerhalb des Lehrtextes selbst geradezu als Aufgabe vorgeführt und scharf in die drei Teilfragen gegliedert zu sehen: a) Welche mechanische Arbeit ist bei der Ausdehnung der Luft entgegen dem konstanten Druck von 76 cm Quecksilber geleistet worden? b) Eine um wieviel größere

1) Vortrag auf der 22. Jahresversammlung des Vereins zur Förd. d. math. und naturw. Unterrichts, München 1913; vgl. Monatshefte f. d. n. Unterr. 1913 Heft 11/12 und die auf S. 27 angeführte Schrift.

Wärmemenge ist zur Temperaturerhöhung um 1°C verbraucht worden, wenn sich der Kolben entgegen jenem Druck verschob, als wenn er unbeweglich gewesen wäre? c) Wieviel Meterkilogramm sind also einer Kilogramm-Kalorie äquivalent?

Solcher Aufgaben gibt es innerhalb des physikalischen Schulpensums eine ganze Anzahl, darunter auch solche, die den Charakter der Vorbereitung des neuen Lehrstoffs tragen. So die für die Zentralbewegung wichtige Aufgabe: Wie groß müßte die Anfangsgeschwindigkeit einer parallel zur Erdoberfläche abgeschossenen Kugel sein, damit sie (abgesehen vom Luftwiderstand) die Erde umkreise? (Auch ohne Benutzung der Formel für die Zentripetalbeschleunigung läßt sich durch eine ganz elementare Betrachtung, der Wert $c = 7,905\text{ km}$ ableiten, eine andere Ableitung bei HÖFLER, Leitaufgabe 33.) Ebendahin gehört NEWTONS „Mondrechnung“ (HÖFLER, L. A. 34), die Ableitung der Barometerformel (HÖFLER, L. A. 124) und vieles andere. HÖFLER empfiehlt, den Text des Lehrbuches so umzuformen, daß die hierfür geeigneten Teile des Lehrstoffes geradezu in die Form der Aufgabe gebracht werden, und er hat dies in seinem Lehrbuch an manchen Stellen selbst so durchgeführt. Aber auch wenn das Lehrbuch nicht diese Fingerzeige bietet, wird man gut tun, den neuen Gegenstand zunächst in der Frage- oder Aufgabeform vorzuführen. Es gehört dies zu dem Wesen einer Problemphysik, wie sie von uns bereits an anderer Stelle gekennzeichnet worden ist. Die Leitaufgaben verwandeln die starre Masse des Systems gleichsam in einen lebendigen Fluß und dienen damit einer der obersten Aufgaben aller Didaktik, der beständigen Erregung des Interesses. Von diesem Gesichtspunkte aus dürfen die Leitaufgaben als ein nicht unwesentliches Stück im Ganzen des Lehrvorganges gelten.

4. Wiederholungen und schriftliche Arbeiten. Das alte Wort *repetitio est mater studiorum* gilt auch für den Physikunterricht. In erster Reihe gilt es für den Lehrer selbst. Man wird eine neue Unterrichtsstunde nicht beginnen dürfen, ohne daß man den Inhalt der vorhergehenden Stunde den Schülern in gemeinsamer Besprechung wieder ins Bewußtsein ruft. Dabei wird man sich nicht selten veranlaßt sehen, auf einzelne mangelhaft verstandene Punkte ausführlicher zurückzukommen. Es ist auch nicht nötig, daß diese Besprechung jedesmal in einer förmlichen Prüfung besteht; in den Oberklassen kann man jedenfalls hiervon in der Regel absehen und dafür lieber in gewissen größeren Zwischen-

räumen eine zusammenhängende Wiederholung ansetzen. Aber auch hierbei sollte man sich hüten, durch bloßes Abfragen des Lehrstoffs die Stunde zu einer Plage für Lehrer und Schüler zu machen. Eine neue Fragestellung oder das Hineinwerfen einer Denkaufgabe kann das Interesse lebhafter anfachen, als die Forderung einer bloßen Reproduktion. Allerdings hängt hier viel von der Persönlichkeit des Lehrers und seiner geistigen Beweglichkeit ab. Und auch die einfache Reproduktion kann zu einem Bildungsmittel für den Schüler werden, wenn man ihn dazu anhält, sich in zusammenhängenden Sätzen auszudrücken, oder auf der oberen Stufe in einem kurzen Vortrag über das Besprochene Rechenschaft zu geben. Man muß immer wieder die Erfahrung machen, wie ungeschickt sich in dieser Beziehung selbst begabtere Schüler anstellen.

Nach dem Urteil KEFERSTEINS (Ph. 853) können Repetitionen dadurch besonderen Wert gewinnen, daß sie dieselben Vorgänge noch einmal unter veränderten Gesichtspunkten betrachten lehren. Auch kann man dem Versuch bei der Wiederholung eine Stelle gönnen. B. SCHWALBE pflegte dabei die zur ersten Vorführung benutzten Apparate wieder auf den Experimentiertisch zu stellen und von einzelnen Schülern in Gang setzen zu lassen (z. B. Elektroskope). Endlich können die Wiederholungen auch „von konkreten, durch die Art der Einkleidung das Interesse der Schüler erregenden Aufgaben ausgehen, bei deren Lösung die zu wiederholenden physikalischen Lehren zur Anwendung und zu inniger Verknüpfung gelangen“ (KEFERSTEIN a. a. O). In dieser Art pflegte ED. MAISS zu repetieren. Er entwickelte zwar die „Ableitungen“ mit den Schülern, verlangte sie aber hinterher in der Regel von diesen nicht, sondern ließ statt dessen Beispiele rechnen – Beispiele und wieder Beispiele (Z. U. XIV 49)! Auch sein Prüfen, selbst bei der Maturitätsprüfung, bestand in überwiegendem Maße in dem Lösenlassen von Aufgaben.

Als ein sehr geeignetes Mittel der Wiederholung haben sich mir seit einer langen Reihe von Jahren auch schriftliche Klassenarbeiten besonderer Art bewährt, die weder in der ausführlichen Bearbeitung eines umfassenden Themas, noch in dem bloßen Lösen von Aufgaben bestehen. Ich stelle vielmehr eine Anzahl Fragen, in der Regel sechs, die sich auf ein bestimmt begrenztes, nicht zu kleines Gebiet des durchgenommenen Pensums beziehen. Diese Fragen erstrecken sich teils auf die

Begründung von Gesetzen, teils auf deren Anwendung, teils auf Wiedergabe besonders eindringlicher Versuche; je nach der Klassenstufe überwiegt mehr das rein Erfahrungsmäßige oder das Gedankliche; auch haben sich eingestreute leichtere Denkaufgaben, die nicht vorher behandelt waren, als besonders anregend namentlich für die besseren Schüler erwiesen. Die Antworten bestehen meist in wenigen kurzen Sätzen, so daß die Zeit von wenig mehr als $\frac{1}{2}$ Stunde, die nach dem Diktieren der Aufgaben noch übrig bleibt, zur Bearbeitung ausreicht. Man wird auch im Zensieren nicht zu streng sein dürfen, hat aber andererseits die Möglichkeit, alle Schüler mit gleichem Maße zu messen. In der Regel stellt sich bei der schriftlichen Bearbeitung heraus, daß ein oder der andere Gegenstand von einer Zahl von Schülern noch mangelhaft aufgefaßt worden ist, oder daß sich mit einer etwas abweichend vom Besprochenen abgefaßten Frage nicht alle haben zurechtfinden können. In solchen Fällen ist dann eine kurze Besprechung angezeigt.

Nachstehend gebe ich als Beispiel eine zufällig herausgegriffene Reihe von Fragen, die in einer Obersekunda bearbeitet worden sind:

1. Welcher Temperatur war ein Luftthermometer ausgesetzt, wenn bei konstantem Volumen der Druck von 760 mm auf 950 mm gestiegen war?
2. Worauf beruht es, daß eine Mischung von Eis und Kochsalz sich bis -21° C. abkühlt?
3. In die Höhlung eines Eisblockes gießt man 60 gr. Wasser von 100° . Wieviel Eis wird dadurch geschmolzen?
4. Wie mißt man die Spannkraft des Ätherdampfes bei gewöhnlicher Temperatur (20° C.) und wie groß ist sie?
5. Wie hängt das Sieden des Wassers mit der Spannkraft der entwickelten Dämpfe zusammen, und welche Abhängigkeit des Siedepunktes ergibt sich hieraus?
6. Erhitzt man Wasser in einem durch einen Kork verschlossenen Kochkolben, so wird mit dem Kork auch ein großer Teil des Wassers herausgeschleudert. — Woher rührt dies?

Abgesehen von diesen Repetitionsarbeiten sind auch namentlich in den Oberklassen, ausführlichere schriftliche Arbeiten sehr angebracht, die sich mit der eingehenderen Darstellung eines bestimmten Themas beschäftigen. Den Wert solcher Arbeiten hat SCHULTE-TIGGES in einer lesenswerten Programmabhandlung

auseinandergesetzt.¹⁾ Man darf hiernach die Herstellung eines klar angeordneten und fehlerfrei abgefaßten Berichtes über einen gegebenen Stoff wohl als das Ziel bezeichnen, zu dem ein guter Unterrichtsbetrieb führen soll.²⁾ An der Erreichung dieses Zieles vermag auch der Physikunterricht an seinem Teil mitzuwirken, ja er arbeitet dadurch zugleich für seine eigenen Ziele, denn es ist unverkennbar, daß die Nötigung, von seinen Kenntnissen und dem Grad der erlangten Einsicht genaue schriftliche Rechenschaft abzulegen, auch die Klarheit des Verständnisses selbst fördert. Auch die in Preußen bestehende Vorschrift der kleinen Ausarbeitungen erscheint in diesem Zusammenhange als wohlberechtigt. Allerdings soll man sich hüten, das Thema zu allgemein oder zu unbestimmt zu stellen, weil die Schüler dann leicht, auch ohne viel zu wissen, um das Thema herum reden und doch etwas geleistet zu haben glauben, wenn nur eine gehörige Anzahl von Zeilen auf dem Papier steht. Man wird gut tun, in der Fragestellung gleich eine Art von Disposition zu geben, an die die Schüler gebunden sind, also z. B. nicht „die Dampfmaschine“, sondern: „welche Gesetze finden bei der Dampfmaschine Anwendung“. Andere Themata dieser Art sind: Wie kann man die Zerlegung des weißen Lichts in seine Bestandteile und deren Wiedervereinigung zeigen? — Zu welchen Versuchen läßt sich das Elektroskop verwenden? — Welche Ähnlichkeit besteht zwischen dem Beschlagen der Fensterscheiben und der Taubildung?³⁾

Auch in der Reifeprüfung ist, wenigstens an den Realanstalten, zumeist eine schriftliche physikalische oder chemische Arbeit vorgeschrieben. Ein Erlaß des preußischen Unterrichtsministers vom 15. Februar 1911 läßt es erfreulicherweise frei, daß in den Prüfungsarbeiten „bald wichtige Erscheinungen und Versuche beschrieben, bald bekannte Gesetze abgeleitet oder deren Anwendung in Technik und Wissenschaft dargelegt, bald auch über engere oder weitere Gebiete ein zusammenfassender Überblick geboten wird.“ Er fordert aber andererseits, daß nicht nur gedächtnismäßig angelerntes Wissen wiedergegeben wird, sondern daß das Thema den Prüflingen Gelegenheit bietet nachzuweisen,

1) Die Bedeutung der schriftlichen Arbeiten für den physikalischen Unterricht. Pr. Abh. des Realgymnasiums zu Barmen, Ostern 1892 (Pr. Nr. 469).

2) Ähnlich HIECKE, Der deutsche Unterricht, angeführt bei SCHULTE-TIGGES.

3) Eine größere Anzahl solcher Themata gibt SCHULTE-TIGGES in der erwähnten Abhandlung. Man sehe auch die physikalischen Aufgaben von BUDDENHANN, Anhang.

wie weit sie in das Verständnis der Naturerscheinungen eingedrungen sind und wie weit sie den Sinn der Naturgesetze wirklich erfaßt haben. Es wird auch vor einer zu weit gehenden Berücksichtigung der mathematischen Seite des Gegenstandes gewarnt und vielmehr besonders empfohlen, daß die Schüler Gelegenheit finden, in den Prüfungsarbeiten solche Gegenstände schlicht darzustellen, die sie selbst erlebt und beobachtet haben und für die ihnen vielleicht eigene Versuche oder Messungen zu Gebote stehen; Rechnungen sollen nur soweit ausgeführt werden, als sie für den Nachweis des Verständnisses der gestellten Aufgabe unentbehrlich sind, etwa auch die behandelten Gesetze an einem möglichst einfachen Beispiel klar in die Erscheinung treten lassen.

Sollen derartige Leistungen in der Reifeprüfung aufgewiesen werden, so müssen auch im Unterricht schon Übungen in dieser Richtung stattfinden. Um aber die ohnehin schon knapp bemessene Zeit nicht noch mehr zu verkürzen, wird man solche Übungen vorwiegend dem häuslichen Fleiß überlassen müssen.¹⁾

Was durch solche Übungen an Fähigkeit der zusammenhängenden Darstellung gewonnen wird, kommt auch den mündlichen Leistungen der Schüler zu gute, die auf den obersten Stufen gehalten werden sollten, in kurzem Vortrag über einen eben behandelten Teil des Pensums Bericht zu erstatten. Es ist wohl eine ziemlich allgemeine Erfahrung, daß die Schüler dazu nur schwer zu bringen sind. Auch zeigt sich eine starke Verschiedenheit der Begabung darin, daß manche Schüler mehr zur mündlichen, andere mehr zur schriftlichen Form der Darstellung befähigt sind.

5. Das Lehrbuch. Seit in den preußischen Lehrplänen von 1892 der Satz ausgesprochen war, daß die Lehrbuchfrage einer besonderen Regelung bedürfe, ist diese Frage nicht aus der öffentlichen Erörterung verschwunden. Es ist aber insofern eine Klärung eingetreten, als man immer deutlicher eingesehen hat, daß eine Lösung dieser Frage nicht durch Verordnungen der Unterrichtsbehörden und auch nicht durch bloße allgemeine Diskussion über den Wert der einen oder andern Art von Lehrbüchern erfolgen kann, sondern durch immer wiederholte Versuche, in neu

1) Dies ist auch die Meinung von P. RÜHLMANN in der Programmabhandlung „Das Schriftliche im mathematischen und physikalischen Unterricht“. Halle a. S. 1912, Pr. Nr. 374. Ebenso GRIMSEHL, D. 82.

verfaßten Lehrbüchern dem erstrebten Ziele näher zu kommen. Es wird sich auch nicht verkennen lassen, daß in dieser Richtung gerade in der letzten Zeit Erfreuliches geleistet worden ist.

Das Lehrbuch hat heute eine andere Aufgabe als in früheren Zeiten. Man ist immer mehr von der alten Sitte abgekommen, das Lehrbuch Paragraph für Paragraph zu absolvieren. Das Lehrbuch soll vielmehr nur zusammenfassen und in exakter Form festhalten, was im Unterricht erarbeitet worden ist. Ich führe hier aus einem Vortrag vom Jahre 1901¹⁾ folgende Sätze an, die auch heut noch Geltung haben:

„Keine Lehrbuchphysik, sondern lebendige Physik muß die Losung sein. Die Lehrbuchphysik führt zu Dogmatismus, d. h. zu dem geraden Gegenteil dessen, worin der Bildungswert der Physik besteht. In fast allen andern Fächern lernt man aus dem Lehrbuch, hier sollen die Schüler aus den Erscheinungen selber und aus der vom Lehrer und Schüler gemeinsam vorgenommenen Bearbeitung dieser Erscheinungen lernen. Dennoch können wir das Lehrbuch, wenigstens auf der Oberstufe, nicht entbehren, schon der systematischen Übersicht des Stoffes wegen, die als Abschluß des Unterrichtes nicht fehlen darf. Der Schüler der Oberstufe wird auch leicht imstande sein, die dem Unterricht entsprechenden Abschnitte zu Hause selbständig durchzuarbeiten und darüber in der Klasse kurz zu berichten. Man wird auch hinsichtlich mancher Ableitungen sekundärer Art auf das Lehrbuch verweisen und dies überhaupt für den häuslichen Fleiß mehr heranziehen dürfen. Ich möchte das Gesagte kurz so formulieren, daß das Lehrbuch den Unterricht begleiten, aber nicht beherrschen soll. Ich könnte auch sagen, ein Lehrbuch der Physik ist nicht dazu da, damit danach unterrichtet wird. Gerade die irrige Meinung, daß dem so sei, hat dazu geführt, den Unterricht lange Zeit allzu systematisch zu gestalten“ ...

HÖFLER spricht sich im Vorwort zur „Physik“ in ähnlicher Weise aus²⁾, er betont namentlich die Notwendigkeit einer klaren logischen Gliederung des Stoffes, wie sie nur bei systematischer Anordnung möglich ist. „Wie immer der Schüler zu den Einzelerfahrungen gekommen ist – am besten durch eigenes Beobach-

1) F. POSKE, Über Grundfragen des physikalischen Unterrichts, Unterr. Bl. f. d. math. u. naturw. Unterr. VII Nr. 4 (1901).

2) Man vgl. auch A. HÖFLER, zum Gebrauch der Oberstufe der Naturlehre beim mündlichen Unterricht (Vieweg 1910).

ten und Experimentieren —, so bleibt es doch sein gutes Recht, schließlich auch sein logisches Bedürfnis nach einem nicht nur aus solchen Einzelkenntnissen bestehenden, sondern allmählich sich zu einem Ganzen rundenden Gesamtbilde seines physikalischen Wissens befriedigt zu sehen.“ Andererseits behält sich HÖFLER für den mündlichen Unterricht die volle Freiheit der Stoffanordnung vor. Und gleicherweise weichen auch die methodischen Anordnungen, die im speziellen Teil dieser Didaktik vorgeschlagen sind, ganz erheblich von der Stoffanordnung ab, die der Verfasser in seinem Lehrbuch für die Oberstufe befolgt hat.

Auch GRIMSEHL (D. 56) verlangt, daß das Physiklehrbuch in seiner ganzen Stoffanordnung systematisch sein müsse, fügt aber hinzu, daß die einzelnen Kapitel methodisch aufgebaut sein sollen. Dies letztere wird auch soweit zulässig sein, als nicht dem Lehrer für die Gestaltung seines Unterrichts zu enge Schranken gezogen werden. Denn es lassen sich wohl die Ergebnisse eines methodischen Unterrichtsganges leicht in eine systematische Lehrbuchform einordnen, nicht so leicht aber mit einem andersartigen methodischen Lehrgang in Einstimmigkeit bringen. Im übrigen ist auch GRIMSEHL der Meinung, daß der Unterricht sich nicht ängstlich an das Lehrbuch anschließen solle; viele Physiklehrer werden „ihren Lehrgang in jedem Jahr von dem in vergangenen Jahren abweichen lassen, nicht nur der Abwechslung wegen, sondern weil sich der Unterrichtsgang oft von selbst, etwa durch Querfragen einzelner Schüler, das eine Mal anders gestaltet als das andere Mal.“ Eben dies ist das charakteristische Merkmal eines lebendigen Unterrichts.

Eine neuerdings erst aufgetauchte Frage ist die, ob es sich empfiehlt, auch die Anleitung zu physikalischen Schülerübungen in das Lehrbuch aufzunehmen. So lange das Verfahren der Schülerübungen sich noch im vollen Fluß der Entwicklung befindet, ist es sicher nicht ratsam, die Vorschriften für das Verfahren im Lehrbuch festzulegen, bringt doch Jahr für Jahr noch Änderungen und Verbesserungen sowohl in der Auswahl als in der Art der Ausführung der Versuche mit sich. Aber selbst wenn einmal eine gewisse Stabilität auf diesem Gebiet eingetreten sein sollte, dürfte es doch noch an Bedenken gegen die Aufnahme der Übungen in das Lehrbuch nicht fehlen. Man hat in Amerika bekanntlich mit einem festen Kanon vorgeschriebener Übungen keine guten Erfahrungen gemacht. Abgesehen davon, daß dadurch

dem Lehrer die Freiheit der Bewegung beeinträchtigt wird, auch für die Schüler behalten die Übungen größeren Reiz, wenn sie nicht ein für allemal als ein zu absolvierendes Pensum vorgeschrieben sind, sondern wenn sie aus dem Bedürfnis des Unterrichts und den in diesem gestellten Problemen herauswachsen und so gleichsam den Schein der Freiheit an sich tragen. Man soll solche psychologischen Motive nicht beiseite schieben. Das Lehrbuch wird also wohl am besten auch in Zukunft im wesentlichen den Lehrstoff nach Art des amerikanischen *text-book* umfassen, nur soll es nicht wie dieses, in der Klasse gelesen und dann „gelernt“ werden, sondern es soll zur Befestigung und Ergänzung des im Unterricht Gelernten dienen.

6. Das Geschichtliche im physikalischen Unterricht. Hierüber enthalten die Meraner Vorschläge die Bemerkung: „Die Geschichte der Physik ist nicht durch beiläufige Erwähnung von Namen und Jahreszahlen, sondern wesentlich dadurch zu berücksichtigen, daß an geeigneten Stellen an historische Fragestellungen und Gedankengänge angeknüpft und auf bedeutsame historische Zusammenhänge hingewiesen wird.“ Diesem Gesichtspunkte gemäß sind in dem vorliegenden Buche vielfach die historischen Beziehungen angedeutet worden, die für den Unterricht in Betracht kommen, so daß sich an dieser Stelle ein näheres Eingehen darauf erübrigt.

Es ist indessen nicht außer Acht zu lassen, daß häufig der ursprüngliche Gang der Entdeckung sich nicht zur unmittelbaren Übernahme in den Unterricht eignet, der Gang der Entdeckung ist zumeist ein verschlungener, durch Vorurteile des Zeitalters, Mangelhaftigkeit des empirischen Materials oder Unvollkommenheit der methodischen Hilfsmittel beeinflusster; ein Beispiel der letzteren Art ist der umständliche Weg, auf dem GALILEI den Übergang von dem Fall auf der Fallrinne zum freien Fall vollzieht. Der hier notwendig gewesene Umweg ist für die spätere vereinfachte Betrachtung überflüssig geworden. Noch weniger wird der Unterricht den historischen Irrwegen nachzugehen haben; nur ausnahmsweise, wie im Fall des *horror vacui* wird es sich lohnen, darauf Bezug zu nehmen. Im ganzen wird es sich oft empfehlen, statt der historischen Um- und Irrwege vereinfachte Wege aufzusuchen, die den Gedankengang der Entdeckung klarer hervortreten lassen. Daß man dabei nicht zu weit gehen darf, zeigt besonders das Beispiel des Beharrungsgesetzes, wo man in

der Regel sich damit begnügen zu können glaubt, daß man die längere Fortdauer der Bewegung bei verminderter Reibung anführt und daran sofort das Postulat der gleichförmig geradlinigen Bewegung nicht nur auf horizontaler Bahn, sondern für jede beliebige Richtung anschließt. Daß die Hauptschwierigkeit des Problems in der Gültigkeit des Satzes für eine zur horizontalen geneigte Richtung und für die lotrechte Richtung lag, wird dabei ganz verschwiegen.¹⁾

Beachtenswerte Bemerkungen macht auch P. JOHANNESSEN²⁾ darüber, daß die zeitliche Reihe der Tatsachen noch keine Geschichte liefert, damit vielmehr „aus der Überlieferung die wertvollen Tatsachen und die sie verbindenden Gedanken hervortreten, muß sie mit den Augen des Denkers und bisweilen auch des Dichters angeschaut werden.“ Durch Auslese und Ergänzung soll so eine Reihe gedanklich zusammenhängender Vorstellungen gewonnen werden, die eine „Idealgeschichte“ darstellen. JOHANNESSEN sagt: „Wenn wir den jungen Geist zu einer Erkenntnis an der Hand ihrer Geschichte führen wollen, so müssen wir die Idealgeschichte der Erkenntnis konstruieren.“ Die Gefahr bei diesem Vorgehen liegt aber darin, daß dadurch die wahre Geschichte leicht gefälscht wird. So ist bei dem von JOHANNESSEN a. a. O. angegebenen Beispiel vom Thermometer die Erfindung des Quecksilberthermometers erst an die Entdeckung des Schmelzpunktes und des Siedepunktes angeschlossen, während in Wahrheit diese Fixpunkte eben mit Hilfe des Quecksilberthermometers entdeckt worden sind.³⁾ Man wird also im allgemeinen doch einer vereinfachten vor einer „idealisierten“ Geschichte den Vorzug geben. Man fällt sonst gar zu leicht in den Fehler, daß man darstellt, nicht wie eine Entdeckung gemacht worden ist, sondern wie sie hätte gemacht werden können.

Für genauere Belehrung auf diesem Gebiet zu empfehlen sind, nächst MACHS bekannten Schriften zur Geschichte der Mechanik

1) Man vgl. O. St. § 7 und 8.

2) „Der organische und der mechanische Erzieherstandpunkt“. Aus der Natur 9. Jahrg., 1912. Heft 1, S. 19.

3) HALLEY wies 1688 mit Quecksilberthermometern die Konstanz des Siedepunktes des Wassers nach und fand, daß das Quecksilber die Temperatur der Umgebung rasch annehme und abgebe; schon die Florentiner Akademiker hatten (vor 1660) erkannt, daß zur Erwärmung des Quecksilbers eine kleinere Wärmemenge nötig sei als zu der einer gleich großen Menge Wassers (nach BURCKHARDT, Z. U. XVII 43).

und der Wärmelehre, besonders die Werke von FERD. ROSENBERGER.¹⁾ Aus der umfangreichen Spezialliteratur sind unten noch einige weitere Schriften angegeben.²⁾

Zur Einführung in die geschichtliche Entwicklung der Physik kann auch die Lektüre einzelner ausgewählter Schriften hervorragender Forscher, oder auch von Abschnitten aus solchen Schriften dienen; freilich wird diese Lektüre bei der Knappheit der dem Unterricht zur Verfügung stehenden Zeit zumeist dem Privatfleiß der Schüler zu überlassen sein. Über einen Schülerlesekreis, in dem Schriften von KANT, LAPLACE, BREWSTER studiert wurden, berichtet höchst anziehend P. JOHANNESSON in Z. U. XXIV 70. Ein reiches Material hierfür bietet das Werk von F. DANNEMANN „Aus der Werkstätte großer Forscher“³⁾, sowie manche Bände von W. OSTWALDS Klassikern der exakten Wissenschaften.

Es verfehlt auch nie des Eindrucks, wenn man in der Lage ist, einzelne Originalwerke im Unterricht vorlegen zu können, z. B. OTTO VON GUERICKES Werk *De vacuo spatio*, oder einzelne bedeutsame Stellen im Urtext aufzuschlagen, wie die drei *Leges motus* oder den Flächensatz in NEWTONS *Principia mathematica philosophiae naturalis*. Sehr wirksam sind auch Abbildungen von Originalapparaten (z. B. aus den Büchern von MACH oder GERLAND und TRAUMÜLLER), besonders wenn man Vergrößerungen davon herstellt und längere Zeit im Lehrzimmer aufhängt.

Man wird endlich, trotz der beschränkten Zeit, nicht versäumen dürfen, hier und da ein Wort von den oft erschütternden Lebensschicksalen der Heroen unsrer Wissenschaft einzuflechten und auch die Schüler teilnehmen zu lassen an den Kämpfen, von denen das Leben dieser Großen zumeist erfüllt gewesen ist. Hier ragt neben GALILEI vor allem die herrliche Gestalt JOHANNES

1) FERD. ROSENBERGER, Die Geschichte der Physik in Grundzügen. 3 Teile. Braunschweig, Fr. Vieweg & Sohn 1882, 1884 und 1887–90, sowie desselben Verfassers „ISAAC NEWTON und seine physikalischen Prinzipien“, Leipzig, Joh. Ambr. Barth 1895.

2) WHEWELL, Geschichte der induktiven Wissenschaften; FISCHER, Geschichte der Optik; HELLER, Geschichte der Physik; GERLAND, Geschichte der Physik; GERLAND u. TRAUMÜLLER, Geschichte der Experimentierkunst; DÜHRING, Kritische Geschichte der allgemeinen Prinzipien der Mechanik.

3) Man vgl. auch DANNEMANN, Grundriß einer Geschichte der Naturwissenschaften, 2 Bde., Leipzig, W. Engelmann, und desselben auf 4 Bände berechnetes Werk „Die Naturwissenschaften in ihrer Entwicklung und ihrem Zusammenhange“, ebd.

KEPLERS hoch empor, von ihm zu hören, bedeutet für unsere heranwachsende Jugend einen bleibenden Gewinn. Solche humanistischen Schätze soll man nicht ungehoben lassen.¹⁾ Ja, es ist wohl unbestreitbar, daß durch solche lebendigen Eindrücke mehr für die geistige Ausbildung geleistet wird, als durch Anhäufung von Kenntnissen und durch Einprägung eines auf die Prüfung berechneten Wissens.

Zur Belegung des historischen Sinns können auch die Bilder hervorragender Physiker dienen, die an den Wänden des Lehrzimmers aufgehängt sind.²⁾ K. HAAS bringt im Physiksaal auch Gedenktafeln an, die neben dem Geburts- und Sterbetag berühmter Physiker Notizen aus ihrem Leben und die Angabe ihrer wichtigsten Entdeckungen enthalten. Daten wie die Auffindung der KEPLERSchen Gesetze, die Entdeckung des Sauerstoffs, die erste Beobachtung der Protuberanzen u. a. sind in diesen Tafeln angegeben.³⁾ Es läßt sich nicht verkennen, daß durch solche Mittel unserm Unterrichtsfach der Charakter des Unhistorischen genommen wird, der sonst leicht dem rein sachlich behandelten Gegenstande anhaftet, und daß dadurch die Physik in den Kreis der Kulturwissenschaften auch äußerlich eingegliedert erscheint.

In noch höherem Grade würde diese Eingliederung verwirklicht sein, wenn es gelänge, den Zusammenhängen der Physik mit der Geschichte der allgemeinen Kultur nachzugehen. Hierbei würde, um nur von der neueren Zeit zu sprechen, die Rolle in Betracht kommen, die die Physik in dem Denken eines DESCARTES, eines LEIBNIZ, eines KANT gespielt hat, der Einfluß der NEWTONschen Weltmechanik auf die Aufklärung des 18. Jahrhunderts und dgl. mehr. Doch ist wohl nur in glücklichen Ausnahmefällen ein Eingehen auf solche Beziehungen möglich, etwa im Zusammenhange mit der Kennzeichnung des modernen physikalischen Weltbildes, die an anderer Stelle berührt ist (S. 12).

1) Als biographische Schriften auch für die Hand des Schülers seien besonders empfohlen: A. KEFERSTEIN, Große Physiker, und F. A. SCHULZE, Die großen Physiker und ihre Leistungen, beide bei B.G. Teubner in Leipzig; ferner auch S. GÜNTHER, GALILEI und KEPLER.

2) Solche Bilder sind u. a. bei Ambrosius Barth in Leipzig erschienen; sowie bei Lenoir u. Forster und bei Alois Pichlers Ww. u. Sohn in Wien, neuerdings auch bei der Photographischen Gesellschaft in Berlin.

3) K. HAAS, Über das historische Element im Physikunterricht, vgl. Z. U. VIII 181.

7. Physik und Technik. Es gibt noch heute wissenschaftliche Physiker, die den technischen Leistungen keine gleichberechtigte Stellung neben der wissenschaftlichen Forschung einräumen mögen. Wie unberechtigt diese Geringschätzung ist, zeigt ein Blick auf die Geschichte der Wissenschaft. Man braucht sich nur an OTTO VON GUERICKE zu erinnern, dessen berühmte Erfindung mit Spekulationen über den leeren Raum zusammenhing, die rein wissenschaftlicher Natur waren; oder an JAMES WATT, der in dem jahrzehntelangen Lauf der allmählichen Entwicklung seiner Maschine eine ganze Reihe von wissenschaftlichen Feststellungen machte¹⁾; oder an WERNER VON SIEMENS, der in seiner Person Wissenschaft und Technik vereinigte. Man denke auch an das, was H. VON HELMHOLTZ in bezug auf die Bezwingung eines widerspänstigen Drahtes geäußert hat.

Es ist auch noch nicht gar zu lange her, daß die Verfasser von physikalischen Lehrbüchern das Eingehen auf die technischen Anwendungen der Physik ablehnten mit der Begründung, daß diese Anwendungen nicht zur Wissenschaft gehörten.

Der physikalische Unterricht kann heute die Besprechung neuerer technischer Erfindungen nicht mehr abweisen, er würde sich dadurch eines der Gegenstände berauben, die das Interesse der Jugend am stärksten fesseln, und die auf ganz natürliche Weise zu wissenschaftlichen Fragestellungen hinleiten. Eine Gefahr liegt allerdings darin, daß der Unterricht sich zu sehr in technische Einzelheiten verlieren kann. Hiervor muß aufs entschiedenste gewarnt werden. Wohl aber sollte dargelegt werden, welche physikalischen Gesetze den bemerkenswertesten Erfindungen zugrunde liegen. In diesem Sinne sprechen sich auch die Meraner Lehrpläne aus²⁾: „Wenn auch die technischen Anwendungen der Physik neben der Erkenntnis der uns umgebenden Natur erst in zweiter Reihe in Betracht kommen, so ist doch zu fordern, daß die Grundlagen für das Verständnis der Wirkungsweise der wichtigsten technischen Einrichtungen dargeboten werden, und daß an allen geeigneten Stellen auf die technischen Anwendungen hingewiesen wird.“³⁾

1) Man findet Näheres darüber in REULEAUX, Geschichte der Dampfmaschine (Vieweg 1891).

2) GUTZMER, Die Tätigkeit, S. 124.

3) Man vgl. auch das im Abschnitt „Wärme“ von den kalorischen Maschinen Gesagte.

Wenn Erfindungen wie die elektrische Glühlampe im Unterricht eine Stelle finden, so ist dies um so berechtigter, als solche Lampen vielfach auch im Unterricht selbst zu Demonstrationszwecken verwandt werden¹⁾; auch an den späteren Vervollkommnungen der Glühlampe soll man nicht vorbeigehen, da jede von diesen auch auf einer mehr oder weniger erheblichen Leistung in wissenschaftlicher Hinsicht beruht. Andererseits ist auch eine Erfindung wie der Explosionsmotor, obwohl er im Unterricht selbst keine Rolle spielt, doch der näheren Betrachtung wert, da er ein wahres Wunderwerk an mechanischer Konstruktion und an scharfsinniger Nutzbarmachung einer anscheinend unbeherrschbaren Naturkraft darstellt.

Man wird übrigens öfter sogar in die Lage kommen, von Erfindungen zu sprechen, die von der Technik bereits wieder fallen gelassen sind. So liefert das BELLSche Doppeltelefon in der ursprünglichen Form ohne Mikrophon noch immer eine der wirksamsten Demonstrationen für Energieverwandlung und Energieübertragung. So ist der Kohärer, obwohl er in der Praxis der drahtlosen Telegraphie durch wirksamere Detektoren längst überholt ist, doch noch immer für den Unterricht ein bequemes Mittel zum Nachweis elektrischer Wellen. Und auch die alte Kolbenluftpumpe wird, auch wenn sie längst von modernen Rotationspumpen für alle praktischen und Laboratoriumszwecke ersetzt worden sein wird, doch in den Sammlungen kein unnützes Dasein führen²⁾; stellt sie doch für alle Zeiten das handgreiflichste Mittel der Evakuierung dar, und ist sie doch die Stammutter der Dampfmaschine (auf dem Wege über PAPIN und SAVERY) geworden.

8. Verhältnis zu den übrigen Naturwissenschaften. Es liegt in der Gesamtanlage dieser didaktischen Handbücher begründet, daß den Beziehungen der einzelnen realistischen Fächer ein Hauptaugenmerk zugewandt wird. Nachdem bereits (in Nr. 1) das Verhältnis zur Mathematik erörtert worden ist, soll hier das Verhältnis zu den anderen naturwissenschaftlichen Fächern betrachtet werden. Es ist vor allem daran zu erinnern, daß die Gesamtheit dieser Fächer eine didaktische Einheit zu bilden hat, insofern das Ergebnis des Unterrichts eine Erkenntnis des Naturgan-

1) Man vgl. E. GRIMSEHL, Die Glühlampe im Dienste des physikalischen Unterrichts, Abh. z. Did. u. Phil. I 1.

2) HÖFLER, Zum Gebrauche usw.

zen und eine klare Vorstellung von der Stellung des Menschen zu diesem Naturganzen sein muß. Die einzelnen Gebiete dürfen darum nicht als Sonderfächer nebeneinanderstehen, deren Vertreter sich sogar, wie es vorkommen soll, feindlich gesinnt sind, sondern es muß die Herstellung möglichst vieler Verbindungen zwischen ihnen angestrebt werden, es darf an „Verzahnungen“ zwischen ihnen nicht fehlen.

Es ist erfreulich, konstatieren zu können, daß hervorragende Vertreter der Physik einer solchen Verbindung eifrig das Wort geredet haben. So hebt GRIMSEHL¹⁾ hervor, daß die Physik nicht erst dann zu beginnen hat, wenn im Lehrplan dieser Gegenstand angesetzt ist, sondern daß bereits im Naturgeschichtsunterricht der Unterstufe Gelegenheit genug vorhanden ist, physikalische Erscheinungen in einer dem Verständnis des Kindesalters angemessenen Form zu besprechen. Es sei ein schwerer Fehler, daß die Schüler von Physik nichts zu wissen bekommen in einem Alter, in dem sie am empfänglichsten für diese Wissenschaft sind. Selbst wenn einmal an den norddeutschen höheren Schulen der Anfang des Physikunterrichts um ein Jahr tiefer angesetzt ist, wird immer noch das gleiche Bedürfnis für die untersten Stufen des Naturgeschichtsunterrichts bestehen. Es wird gewiß nichts schaden, daß physikalische Dinge auf diesen Stufen ohne strenge Methode vorgebracht werden. Handelt es sich doch hier vor allem darum, den Schülern die Anschauung von einfachen physikalischen Vorgängen zu vermitteln, ohne daß eine eigentliche physikalische Erklärung in Betracht kommt. Erscheinungen dieser Art sind z. B. der Gewichtsverlust im Wasser, das Haften an der Wand durch den Luftdruck, die Wärmeleitung durch gute und schlechte Leiter, die Diffusion der Gase durch poröse Wände, die Schwingungen eines tönenden Körpers u. dgl. m. Man soll nicht befürchten, mit solcher Vorwegnahme dem physikalischen Unterricht selbst zu schaden. Vielmehr gilt hier das zutreffende Wort von B. SCHMID²⁾: „Wenn der Schüler mit dem beginnenden Physikunterricht bereits über ein gewisses Maß von physikalischen Kenntnissen verfügt, und, was eigentlich noch wichtiger ist, wenn er an diesen Unterricht mit der Überzeugung herantritt, daß es sich um eine Vertiefung in ein Gebiet handelt, das

1) „Über den Betrieb der Physik als Naturwissenschaft“, U. Bl. f. Math. u. Nat. 1904, Nr. 3. und D. 20.

2) B. SCHMID, Der naturwissenschaftliche Unterricht, S. 230.

ihm draußen in der Natur sowohl als drinnen in der Schule ... sowie im praktischen Leben begegnet ist, dann sind wir sicher, daß wir die richtigen Bedingungen für eine erfolgreiche Aufnahme des Unterrichts geschaffen haben.“

Auch auf der Mittelstufe wird der biologische Unterricht nicht selten Gelegenheit haben, an physikalische (wie an chemische) Erscheinungen zu erinnern und solche für das Verständnis biologischer Einrichtungen heranzuziehen. Hier sei namentlich auf ein interessantes Buch von SCHÖNICHEN¹⁾ aufmerksam gemacht, das der Verfasser zwar zunächst für die Hand des Physiklehrers bestimmt hat, das aber doch viel mehr geeignet ist, dem Biologen die Bezugnahme auf die Physik nahezu legen. In der Regel werden einfache Freihandversuche (nach HAHNS schöner Sammlung) ausreichend sein, um das zugrunde liegende physikalische Prinzip zu erläutern. Die Physik ihrerseits wird nicht versäumen dürfen, namentlich auch auf der Oberstufe die Beziehungen zur Biologie zu beachten. Nicht bloß daß beim Seh- und Hörorgan die physiologische Seite gebührend zu berücksichtigen sein wird, auch an anderen Stellen (Luftdruck, Festigkeitslehre) ergeben sich Anknüpfungen. Die Frage, inwiefern der tierische und menschliche Körper als Maschine aufzufassen sei, kann auch dem Physiker Anlaß zu lehrreicher Erörterung werden; und es schadet nichts, wenn gerade der Physiklehrer auf die spezifische Verschiedenheit zwischen dem Organischen und dem Mechanischen hinweist.²⁾

Noch inniger als zur Biologie sind die Beziehungen der Physik zur Chemie, besonders auf der Unterstufe, wo man an einen für beide Fächer gemeinsamen propädeutischen Unterricht, etwa in der Art von OSTWALDS Schule der Chemie, denken könnte. Auf der Oberstufe bezeichnet schon der Name der physikalischen Chemie ein zu beiden gehöriges Grenzgebiet. Hier ist eine freundschaftliche Auseinandersetzung unumgänglich. Der Physiker wird dem Chemiker gern das nähere Eingehen auf die elektrische Dissoziation und die elektrolytische Stromleitung überlassen, wenn nur andererseits dafür Sorge getragen wird, daß die Behandlung durch den Chemiker und die durch den Physiker nicht in Wider-

1) W. SCHÖNICHEN, Biologie und Physik. Ein Beitrag zur Konzentration der naturwissenschaftlichen Fächer. Leipzig, R. Voigtländer, 1909.

2) Eine Übersicht der Beziehungen von Botanik und Physik hat B. LANDSBERG in Bd. VII dieser Handbücher gegeben.

spruch miteinander treten, und daß die erforderlichen chemischen Kenntnisse vorhanden sind, wenn die Physik ihrer bedarf, und umgekehrt. Den Beziehungen beider Unterrichtsfächer weiter nachzugehen, wird Sache des V. Bandes dieser Handbücher sein.

Auch zur Geographie führen von der Physik mannigfache Fäden hinüber: Hier kommen schon auf der Unterstufe die physikalischen Eigenschaften des Wassers und seine mechanischen Einwirkungen auf die Erdrinde in Betracht. GRIMSEHL empfiehlt die verschiedene Wärmekapazität von Land und Wasser, auf der die Verschiedenheit von Land- und Seeklima beruht, durch einen einfachen Versuch zu erläutern, indem man zeigt, daß von zwei gleichen Bunsenbrennern der eine ein mit Wasser gefülltes Gefäß in gleicher Zeit nicht auf ebenso hohe Temperatur erwärmt wie ein gleich schweres Gefäß, in dem ein Teil des Wassers durch einen Stein von gleichem Gewicht ersetzt ist. Auch meteorologische Erscheinungen, wie die Entstehung der Luftströmungen, die Kondensation des Wasserdampfes (Versuche von KIESSLING, Z. U. XI 19), werden vielfach Gelegenheit zu einfachen Versuchen geben. Und andererseits wird auf der Oberstufe die Physik die Gesetze zu erörtern haben, die den meteorologischen Vorgängen zugrunde liegen.

Daß für die Geologie zur Veranschaulichung der Bildung von Gebirgsformationen einfache physikalische Schulversuche verwendbar sind, hat B. SCHWALBE in einem beachtenswerten Aufsatz gezeigt.¹⁾ Die Beziehungen der Mineralogie zur Physik endlich liegen auf der Hand, sind ja die allgemeinen Eigenschaften der Mineralien vorwiegend rein physikalischer Natur; die wichtigsten dieser Eigenschaften, die in den Polarisationserscheinungen sich kundgeben, dürften allerdings größtenteils außerhalb des Rahmens der Schulphysik liegen.

1) Das geologische Experiment in der Schule, Z. U. X 65, 217.

Zweiter Teil. Die Unterstufe.

§ 8. Physikalische Vorbegriffe. Statischer Kraftbegriff.

Allgemeines. Der in § 5 dargelegte Plan für den zweistufigen Unterricht bietet für die Mechanik den besonderen Vorteil, daß von den beiden fundamentalen Einteilungen der Mechanik die eine auf der Unterstufe, die andere auf der Oberstufe zur Verwertung kommt; dort der Gegensatz von Statik und Kinetik, hier der Gegensatz von Phoronomie und Dynamik, der für die abschließende Stufe der angemessenste ist. Schon Aristoteles wußte, daß das begrifflich Einfachste nicht das uns Nächstliegende ist. Uns am nächsten liegt der statische Kraftbegriff, der, wenn man will, anthropomorphisch an die Empfindungen von Zug und Druck anknüpft. Gereinigter und einfacher, weil im wesentlichen an Raum- und Zeitbegriff anschließend, aber auch abstrakter, erscheint der kinetische Kraftbegriff. Der Unterschied beider entspricht genau dem Unterschied der beiden Unterrichtsstufen, wie er oben schon gekennzeichnet ist.¹⁾

Durch die Bevorzugung der Statik soll die Lehre von der Bewegung keineswegs ausgeschlossen sein. Die Grundbegriffe und die einfachsten Erscheinungen dieses Gebiets gehören sicher auf die Unterstufe. Aber die Bewegungen auf der schiefen Ebene und der freie Fall werden nicht in dem Umfange, wie es heute wohl noch vielfach geschieht, zu behandeln sein. Die Gesetze beider haben ja ihren eigentlichen Wert für den Unterricht in der experimentellen Begründung des Beschleunigungsbegriffs, und können ohnehin erst auf der Oberstufe ihre feinere Durcharbeitung im Anschluß an

1) Auch JOHANNESON in seiner klug durchdachten „Physikalischen Mechanik“ beschränkt sich auf den statischen Kraftbegriff; die vortrefflichen Lehrpläne für die bayrischen Oberrealschulen schreiben gleich nach der Wärme die Elemente der Mechanik der Ruhe (einschließlich Kraft und Arbeit) vor und ziehen erst am Schlusse des Unterkursus bei der Betrachtung physikalischer Vorgänge als Energieverwandlungen den freien Fall, den senkrechten Wurf und das Pendel heran.

GALLEIS klassischen Gedankengang finden. Durch Wegfall dieser Abschnitte wird der Unterricht in der Mechanik auf der Unterstufe beträchtlich entlastet. Der Hauptvorteil besteht aber darin, daß nun erst eine einheitliche Gestaltung des Lehrgangs möglich ist: Man wird sich beim Lesen des folgenden Abschnitts davon überzeugen können, daß ein deutlich erkennbarer Zusammenhang vorhanden ist, der die Reihe der Probleme miteinander verknüpft. Auf diesen Zusammenhang ist auch an den Verbindungsstellen aufmerksam gemacht, es sei deshalb hier nur die Reihenfolge der hauptsächlichsten Gegenstände zusammengestellt:

Physikalische Vorbegriffe. — Die Kräfte und ihr Gleichgewicht; die Arbeit. — Gleichgewichtslagen schwerer Körper. — Festigkeit und Elastizität. — Fallbewegung und Beharrungsgesetz. — Reibung. — Schwungkraft. — Pendelbewegung und Stoß als Energieübertragung.

Lehrgang.

1. **Physikalische Vorbegriffe.** Das früher als Einführung so beliebt gewesene Kapitel der „allgemeinen Eigenschaften“ hat man jetzt wohl allgemein fallen lassen. Es ist nicht gerechtfertigt, an den Eingang eines Gebiets, das der Gewinnung von Erfahrungswissen gewidmet sein soll, eine Reihe von allgemeinen Begriffen und Definitionen zu stellen. Den unbefriedigenden Eindruck der diese Art der Einführung auf die Schüler machte, schildert OSTWALD¹⁾ zutreffend:

„Wenn Sie sich der ersten Stunden erinnern, in denen Sie mit den Grundbegriffen der Physik vertraut gemacht worden sind, so wird Ihnen auch das dumpfe Gefühl erinnerlich sein, das Ihren Versuchen, sich einigermaßen Bestimmtes bei diesen Erörterungen zu denken, gefolgt ist, und das durch das Bild vom Mühlrad im Kopfe nur zu deutlich gekennzeichnet wird. Wir haben alle aufgeatmet, wenn wir uns von diesen Betrachtungen zum Hebel, zur Fallmaschine oder sonst etwas Reellem wenden durften.“

H. KIESSLING (D. 32) hat die Gründe überzeugend dargelegt, aus denen es unangebracht ist, die sog. allgemeinen Eigenschaften an den Anfang des Unterrichts zu stellen. Es wird sich also, wenn man nicht gleich in medias res gehen will, nur um einige Vorbegriffe handeln. Zunächst um den Begriff des Körpers. Zum Begriff des Körpers gehört Raumausdehnung und Undurchdringlichkeit. An die erstere schließen sich die Angaben und Versuche über Längen-, Flächen- und Raummessung. Hier ist bereits dem häuslichen Betätigungsdrang der Schüler freier Spielraum zu gewähren, falls nicht schon im mathematischen Unterrichte Ausreichendes in dieser Hinsicht geschehen: „Volumbestimmungen von

1) OSTWALD, Vorlesungen über Naturphilosophie, 1. Aufl., S. 150.

Wohnräumen, Schränken, Geräten, Berechnungen von Flächen im Freien u. dgl. m.“

Die Undurchdringlichkeit ist als charakteristisches Merkmal der Körperlichkeit nicht zu übergehen.¹⁾ Aber es heftet sich daran eine gewisse Schwierigkeit, die durch das Wort „Porosität“ gekennzeichnet ist. Man wird gut tun, hierbei nicht zu verweilen, sondern über Fälle wie Schwamm, Kreide, Zucker als nur scheinbare Ausnahmen hinwegzugehen. Ein Ausblick auf die atomistische Struktur der Materie und vermeintliche Poren zwischen den Atomen wäre nicht angebracht.

Da die Schüler im Beginn auf Versuche gierig sind, lasse man sie nicht zu lange warten. Die Volumausmessung mit Hilfe eines graduierten Gefäßes ist für den Anfang sehr geeignet, danach auch die Versuche über die Raumerfüllung der Luft (U. § 3), die an die Frage anknüpfen: „Ist auch die Luft ein Körper?“ – Hier ist der einfache Versuch wichtig, daß man eine Glasröhre am oberen Ende mit dem Finger verschließt und ins Wasser taucht. Das beim Lüften des Fingers beobachtete Aufsteigen des Wassers dient später zur Einführung in die Hydrostatik. Die bei einer längeren Röhre gut zu beobachtende Kompression der Luft wird in der Aerostatik weiter behandelt. Der Ausblick, der sich bei einem so einfachen Versuch auf künftig zu behandelnde Probleme eröffnet, hat eine eigentümliche suggestive Kraft, wie denn überhaupt die künstliche Isolierung einer Erscheinung unter Ausschaltung alles vermeintlich Störenden nicht durchweg als didaktisches Prinzip gelten darf.

Die Unterscheidung der drei Aggregatzustände („Formarten“ nach dem Vorschlag OSTWALDS, besser vielleicht noch „Zustandsformen“) ist durch rein empirische Definitionen zu geben; die früher übliche Unterscheidung auf Grund der Anziehungs- und Abstoßungskräfte der Atome ist verwerflich; diese ist nur ein hypothetischer Versuch zur Erklärung der drei Zustandsformen, kann aber eben darum nicht als Definition dienen.

Manche Leitfäden stellen an den Anfang eine genauere Beschreibung der Instrumente für die Längen- und Zeitmessung (Nonius, Mikrometerschraube, Pendeluhr). Sollte dies auch im Unterricht geschehen, so wäre es zwar sehr systematisch, aber sehr wenig didaktisch gedacht. Ratsamer ist es, von diesen Meßinstrumenten erst dann zu sprechen, wenn sie gebraucht werden; daß sie im Lehrbuch überhaupt eine Stelle finden, ist schon im Hinblick auf die Schülerübungen erwünscht.

Gewicht und Fallbewegung (U. § 4) geben häufig Gelegenheit, von der Anziehungskraft der Erde oder der Schwerkraft zu sprechen. Doch sollte man hiervon an dieser Stelle noch absehen, da ja der

1) Descartes und seine Schule haben bekanntlich das Merkmal des Körperlichen nur in die räumliche Ausdehnung gesetzt und sich dadurch zu den widersinnigsten Folgerungen bezüglich der Natur des Vakuums verleiten lassen.

Kraftbegriff vor der Hand noch völlig ungeklärt ist. Von den Mitteln zur Gewichtsbestimmung der Körper wird zweckmäßigerweise schon hier die gemeine Wage vorgeführt, daneben auch die Federwage, deren Eichung hier als eine empirische aufzufassen ist.

Wichtig ist, daß in der Physik der auf eine Unterlage ausgeübte Druck als Gewicht bezeichnet wird. Dagegen das, was den Druck ausübt, was drückt, nennt man die Masse des Körpers.

Es ist leicht klar zu machen, daß man mit der gewöhnlichen Wage im täglichen Leben nicht Gewichte, sondern Massen bestimmt. Man mißt die Massen durch den Druck, den sie auf die Unterlage (die Wagschale) ausüben. Masse und Gewicht sind also einander proportional. Die Physik setzt auch die Massen verschiedener Körper, die gleiches Gewicht haben, einander gleich, also z. B. die Masse von 1 kg Blei ebenso groß wie die Masse von 1 kg Wasser. Genaueres auf der Oberstufe. Auf die Veränderlichkeit des Gewichts im Gegensatz zur Unveränderlichkeit der Masse schon hier hinzuweisen ist ganz angebracht, um die Bedeutung der Masse als eigentlicher Naturkonstante zu kennzeichnen.

Die Masseneinheit bezeichnet man als Gramm, also ebenso wie die Gewichtseinheit. Die hieraus entstehende Schwierigkeit ist erst auf der Oberstufe von Belang, für die Unterstufe ist eine Unterscheidung in der Schreibweise kaum erforderlich (vgl. Teil III, § 19).

Das spezifische Gewicht ist als das Gewicht von 1 ccm des betreffenden Stoffes zu definieren. Die Behandlung (U. § 5) macht keine Schwierigkeit. Der Stoff gehört zu den auch für Schülerübungen recht interessanten.

Die Verschiedenheit des spezifischen Gewichts der Körper weist auf eine Eigenschaft der Masse hin, die man als Dichte bezeichnet. Wir schreiben einem Stoff, der ein doppelt so großes spezifisches Gewicht hat wie ein anderer, auch eine doppelt so große Dichte zu. Die Zahlen für die Dichten sind demnach dieselben wie die für die spezifischen Gewichte.

Mit der Bestimmung des Gewichts der Luft wird dieses Kapitel abgeschlossen. Zum Nachweis der Schwere der Luft sind zwei GALILEISCHE Versuche geeignet (U. § 6). Eine zahlenmäßige Bestimmung wird am besten mit Hilfe der Luftpumpe vorgenommen. Man braucht sich nicht zu scheuen, den im Pensum „noch nicht dagewesenen“ Apparat zu benutzen.¹⁾ Kennen die Schüler doch viele Erfindungen in Wissenschaft und Technik aus dem täglichen Leben, auch die Luftpumpe ist ihnen mindestens von der Fahrradpumpe her als Druckpumpe nicht unbekannt. Wenn einstweilen noch manches an dem Apparat unerklärt bleibt, so schadet das nichts, es wird im Gegenteil das Interesse für

1) Dieser Ansicht ist auch ROSENBERG I, 135.

das künftig im Unterricht zu Erwartende angeregt und die Spannung gesteigert.

2. Der Kraftbegriff. Das Wort Kraft ist uns aus dem täglichen Leben geläufig. Biegen wir einen Baumast um eine gewisse Strecke herunter, so erfordert dies eine bestimmte Kraft, die von den Muskeln unseres Armes ausgeübt wird. Wollen wir die Kraft messen, so hängen wir an dieselbe Stelle des Astes so lange Gewichtstücke an, z. B. 20 kg, bis er um dieselbe Strecke herabgebogen ist. Wir dürfen dann sagen, daß die Kraft unseres Armes ebenso groß gewesen ist, wie der Zug des Gewichtstückes.

Wir bezeichnen nun in der Physik alles, was als Zug oder Druck an einem Körper wirksam wird, als Kraft.¹⁾ So den Zug eines auf eine Wagschale gelegten oder an eine Federwage gehängten Gewichtstückes; aber auch den Druck, den die Pulvergase in einer Flinte auf die Kugel ausüben; den Druck, den eine zusammengepreßte Luftmasse auf den Kolben ausübt (Versuch U. § 2); den Zug, den eine gespannte Spiralfeder auf einen an ihrem freien Ende angebrachten schweren Körper ausübt usf.

Um was für eine Kraft aber auch es sich handle, stets kann durch ein Gewichtstück derselbe Druck oder Zug hervorgebracht werden. Man kann demnach jede beliebige Kraft durch den Druck oder Zug eines Gewichtes ersetzen. Die Größe der Kraft wird durch die Größe dieses Gewichtes, also in Kilogramm und Gramm gemessen. Da eine Federwage durch Gewichte „geeicht“ ist, so kann man die Größe einer Kraft auch direkt bestimmen, indem man sie an einer Federwage wirken läßt. Die Federwage wird dadurch zum „Kraftmesser“ oder „Dynamometer“. Das Nötigste über Richtung und Angriffspunkt einer Kraft (U. § 15) wird ebenfalls hier einzufügen sein; ebenso die graphische Darstellung von Kräften durch Strecken. Hier mag auch der Begriff der „Schwerkraft“ oder der Anziehungskraft der Erde zur Sprache kommen.

Wirkt eine Kraft auf einen frei beweglichen Körper, so setzt sie ihn in Bewegung. (So auch die Schwerkraft, wenn der Körper, auf den sie wirkt, nicht gestützt ist, vgl. U. § 4). Es können aber auch zwei oder mehr Kräfte, die in verschiedenen Richtungen wirken, so an einem Körper angebracht sein, daß dieser in Ruhe bleibt. Man sagt dann, die Kräfte seien im Gleichgewicht. Beispiele: Zwei Menschen, die an den beiden Enden eines Seiles gleich stark ziehen; das Gewicht an der Federwage ist mit der Spannkraft der Feder im Gleichgewicht, das an einem Seil hängende Gewicht mit der Spannung des Seiles; der Druck eines auf dem Tisch liegenden schweren Körpers wird durch den Widerstand des Tisches aufgehoben. Auch dieser Widerstand

1) Ich unterscheide mich hier prinzipiell von GRIMSEHL (D. 86) wie auch von HÖFLER und anderen Methodikern, die den Kraftbegriff auch auf der Unterstufe schon im dynamischen Sinn eingeführt wissen wollen.

pfl egt daher als eine Kraft angesehen zu werden. Das Gleichgewicht zweier an den Enden eines Seils wirkenden Kräfte leitet zur Rolle und damit zu den einfachen Maschinen über.

3. **Die einfachen Maschinen.**¹⁾ Als solche bezeichnet man herkömmlicherweise Hebel, Rolle, Rad an der Welle, schiefe Ebene, Keil, Schraube. Diese Vorrichtungen sind keineswegs als elementare Bestandteile aller Maschinen anzusehen.²⁾ Andererseits fallen sie immerhin noch unter den allgemeinen Begriff der Maschine, die z. B. nach REULEAUX folgendermaßen definiert ist: „Eine Maschine ist eine Verbindung widerstandsfähiger Körper, welche so eingerichtet ist, daß mittels ihrer mechanische Naturkräfte genötigt werden können, unter bestimmten Bedingungen zu wirken.“³⁾

Die Abgrenzung des Begriffs „einfache Maschinen“ gegen den der Maschinen im heutigen Sinne ist nicht leicht, auch bilden sie keineswegs vom Gesichtspunkt der Kinematik angesehen eine einheitliche Gruppe.⁴⁾ Auch im Sinne der systematischen Physik gehören sie an verschiedene Stellen, so die schiefe Ebene in das Kapitel der Bewegungen auf gezwungener Bahn, der Hebel in das Kapitel von der Drehung der Körper.⁵⁾ Dennoch meine ich, daß für den ersten Unterricht die Vorrichtungen in dieser Zusammenstellung beibehalten werden sollten. Gehören sie doch zu den ehrwürdigsten Inventarstücken der menschlichen Kultur, die schon den ältesten Völkern Dienste geleistet und den Gegenstand der ersten physikalischen Untersuchungen gebildet haben. Es kommt hinzu, daß sich gerade an diese einfachen Vorrichtungen Betrachtungen anknüpfen lassen, die ungezwungen zu dem Begriff der Äquivalenz der Arbeit hinleiten; daß sie auch noch anderweitig Ausgangspunkte für die Anwendung der analysierenden Methode bilden, wird sich im weiteren Verlauf zeigen. Allerdings ist es aus Gründen, die bald erhellen werden, zweckmäßig, sich auf die drei einfachen Maschinen: Rolle, schiefe Ebene und Hebel zu beschränken.⁶⁾ Will man sie zusammenfassend kennzeichnen, so empfiehlt sich eine kurze Begriffsbestimmung nach Art derjeni-

1) GRIMSEHL, Die Rolle und der gemeine Flaschenzug Z. U. XV 138; Kraftübertragung durch den Flaschenzug unter Berücksichtigung der Reibung, ebd. XVI 65; Mechanische Kraftübertragung durch schiefe Ebene, Keil und Schraube, XVII 129. Vgl. auch Unterrichtsbl. f. Math. u. Nat. IX 78; Ztschr. f. math. u. naturw. Unterr. XXXIV 98. — POSKE, Das Hebelgesetz in historischer und didaktischer Beziehung, Z. U. XV 5. — REULEAUX, Rolle und Flaschenzug Z. U. XVI 1. — KEFERSTEIN, Die Ableitung des Hebelgesetzes nach Grimsehl, Z. U. XVI 269.

2) Vgl. REULEAUX, Lehrbuch der Kinematik I 38 und GRIMSEHL D. 88.

3) REULEAUX a. a. O. 38; ebd. S. 592 ff. eine Zusammenstellung anderer Definitionen.

4) REULEAUX a. a. O. 273 ff.

5) GRIMSEHL D. 88.

6) So schon KANT nach Mitteilung von KEFERSTEIN, Z. U. XV 273.

gen von MACH (MACH u. ODSTRCIL § 125): „Jede Vorrichtung, welche die Übertragung der Wirkung einer Kraft vermittelt, heißt eine Maschine.“

Es gehört zu den Glanzleistungen GALILEIS, daß er die Gesetze der einfachen Maschinen mit dem Hebelgesetz in Zusammenhang gebracht hat. Im Interesse einer einheitlichen Auffassung war dies sicher ein Fortschritt. Auch in manche Lehrbücher und in den Unterricht ist diese dem Kindesalter der Mechanik angehörige Zurückführung der einfachen Maschinen aufeinander wenigstens teilweise übergegangen, ohne daß dies didaktisch zu rechtfertigen wäre, da die Zurückführung in der Mehrzahl der Fälle eine durchaus künstliche ist — ein erster stammelnder Versuch der werdenden Wissenschaft, in die Vielheit der „mechanischen Potenzen“ Einheit und Ordnung zu bringen. Gegen die Zurückführung insbesondere der Rolle auf den Hebel hat sich namentlich GRIMSEHL gewandt.¹⁾ In der Tat gehört dies Verfahren zu denselben deduktiven Gewohnheiten, die wir auch an anderen Stellen ablehnen müssen. So wertvoll die Deduktion für das System der Wissenschaft ist, so verhängnisvoll kann sie, vorzeitig angewandt, für den Unterricht werden.

Es ist vor allem für die Unterstufe angemessener, jede der einfachen Maschinen aus ihren eigenen Bedingungen heraus zum Verständnis zu bringen. Man beginnt zweckmäßig mit

4. Rolle und Flaschenzug. Beide fallen unter den gemeinsamen Begriff der Seilmaschine. Von einfachen Beispielen der Kraftübertragung ausgehend (GRIMSEHL, L. § 43) kann man zunächst den Gebrauch des Seils erläutern, durch das eine am einen Ende ziehende Kraft in unveränderter Größe auf das andere Ende übertragen werden kann. Soll die Richtung der Kraft geändert werden, so kann man das Seil um einen festen Körper (Tischkante, Gardinenring) legen. Zur Verminderung der Reibung dient die feste Rolle. Die Gleichheit von Kraft und Last im Falle des Gleichgewichts ist hier eine einfache Folge des Gesetzes der Seilübertragung; ebenso auch, daß die Richtungen von Kraft und Last nicht parallel zu sein brauchen.

Die bewegliche (lose) Rolle, praktisch von geringer Bedeutung, ist methodisch von Wert, weil hier die Verteilung der Lastwirkung auf zwei Seile leicht verständlich ist. Es läßt sich daher hier vorhersagen, daß die Kraft gleich der Hälfte der Last sein wird. (Vorbereitung durch Ziehen an einem doppelten Seil; die Abhängigkeit der Kraftverteilung von der Lage der Angriffspunkte zueinander braucht an dieser Stelle nicht in Betracht gezogen zu werden.)

Beim Flaschenzug tritt dasselbe Problem in allgemeinerer Form auf: Wie kommt es, daß die Kraft nicht so groß zu sein braucht wie die Last? (Versuch.) In welchem Verhältnis steht im Fall des Gleichgewichts die Kraft zur Last? Kann man darüber von vornherein durch

1) Z. U. XV 138; ihm stimmt REULEAUX bei, Z. U. XVI 1.

Nachdenken etwas ausmachen? Bei drei paar Rollen verteilt sich die Last L gleichmäßig auf sechs Seile, also entfällt auf jedes Seil ein Zug von $L/6$. Dies braucht nicht als Vermutung hingestellt zu werden (JOHANNESON, P. M. S. 15), sondern kann wie das Entsprechende bei der beweglichen Rolle als unanfechtbar gelten; es gehört dies zu den instinktiven Einsichten (MACH), die im Anfangsunterricht ebenso wie in den Anfängen der Wissenschaft keiner Kritik unterliegen. (Von der etwaigen Nichtparallelität der Seile wird abgesehen.)

Das so abgeleitete Gesetz kann durch den Versuch freilich nur unvollkommen bestätigt werden. Es ist erforderlich, den Versuch nicht mit einem der wenig brauchbaren Unterrichtsmodelle, sondern mit einem wirklichen Flaschenzug anzustellen, für den ein Deckenhaken angebracht sein muß (HAHN, Sch.-Ü. 128). JOHANNESON [a. a. O.] empfiehlt, das Lastgewicht solange zu verkleinern, bis es langsam steigt, dann zu vergrößern, bis es langsam sinkt. Der Mittelwert der beiden Belastungen entspricht etwa dem Gesetz. Vorläufige Besprechung der Reibung. Welchen Schluß auf die Größe der Reibung kann man aus dem eben erwähnten Versuch ziehen? Näheres auf der Oberstufe.

Der angestellte Versuch zeigt auch, daß eine am Flaschenzug hängende Last durch eine viel kleinere Kraft in die Höhe gezogen werden kann. An dieser Stelle tritt den Schülern das Hauptproblem der Mechanik entgegen, das zu dem Begriff der Arbeit führt. Um zur Aufklärung hierüber zu gelangen, wollen wir von der Reibung absehen, das Gesetz $K = L/6$ also als streng gültig annehmen. Dann würde eine überaus kleine Vermehrung von K (oder ein einmaliger Anstoß) genügen, um die Aufwärtsbewegung von L hervorzurufen. Bei Beachtung der Seillängen ergibt sich, daß L nur um den sechsten Teil der Strecke steigt, um die sich K abwärts bewegt, also z. B. um 1 m, wenn K sich 6 m nach unten bewegt. Denkt man sich die Last L in sechs gleiche Teile von je $\frac{1}{6}L$ geteilt, und diese sechs Teile der Last nacheinander etwa mit Hilfe einer festen Rolle durch die Kraft K gehoben, wobei man das Lastseil so lang macht, daß man nach Hebung eines $\frac{1}{6}L$ das folgende am unteren Ende des Lastseils befestigen und durch weitere Senkung von K in die Höhe ziehen kann — so sieht man, daß K im ganzen das Sechsfache des Lastwegs, also 6 m, zurücklegen müßte, um bei der angenommenen Einrichtung die ganze Last L emporzuziehen.

Die Leistung der Kraft K am Flaschenzuge ist demnach nicht verschieden von der Leistung, die auch an einer einfachen Rolle hervorgebracht werden könnte; die Kraft K muß in beiden Fällen den gleichen Zug längs derselben Strecke ausüben. Bedenkt man nun noch, daß die Kraft K an der einfachen Rolle wirkend eine Last $L/6$ auf die Höhe 6 m heben würde, so ergibt sich: es ist dieselbe Leistung, wenn L um 1 m, oder wenn $L/6$ um 6 m gehoben wird. Das Produkt von Last und

Weglänge ist aber in beiden Fällen dasselbe. Man hat dieses Produkt daher gewählt, um die durch das fallende Gewicht K geleistete Arbeit zu messen.

An diese Stelle gehört nun auch eine weitere vorläufige Orientierung über das Maß der Arbeit und die Arbeitseinheit 1 mkg.¹⁾

Unterscheidet man die Arbeit beim Heben des Lastgewichts als „gewonnene“ Arbeit von der beim Sinken des Kraftgewichts „verlorenen“ Arbeit, so kann man das Gesetz des Flaschenzugs auch in der Form aussprechen: Bei der Hebung einer Last durch Hilfe eines Flaschenzuges ist die gewonnene Arbeit gleich der verlorenen. Es ist also durch den Flaschenzug keine Arbeitersparnis zu erzielen, es findet nur eine Arbeitsverwandlung statt. Es wird natürlich daran zu erinnern sein, daß an Stelle des Gewichts K auch die Hand des Menschen oder ein Pferd den Zug auf das Seil ausüben kann, und daß die Größe der Kraft K wie auch die der geleisteten Arbeit dann dieselbe wie vorher ist. Auch die „goldene Regel der Mechanik“ wird hier noch eine Stelle finden können, etwa in der Form: Was man an der Kraft spart, muß man am Wege zusetzen, oder: Je kleiner die Kraft, desto größer muß der Weg sein, wenn man eine bestimmte Arbeit hervorbringen will, erläutert an Flaschenzügen von verschiedener Rollenzahl. Potenzflaschenzug und Differentialflaschenzug können auf dieser Stufe außer Betracht bleiben.

5. **Die schiefe Ebene.** Wir gehen von einer Beobachtung im Alltagsleben, von dem Gebrauch der Schrotleiter am Frachtwagen aus. Als Übergang kann die Frage dienen: Gibt es noch andere Fälle, in denen eine große Last durch eine geringere Kraft gehoben wird? Erfahrungsgemäß bedarf man einer geringeren Kraft, um eine Last längs der Schrotleiter, als um sie lotrecht emporzuheben. Wie mag das zugehen? Wir studieren den Vorgang genauer, indem wir die Vorrichtung durch eine geneigte ebene Fläche (daher „schiefe Ebene“) ersetzen. Wir setzen ein Gewichtstück zunächst auf eine wagerechte ebene Fläche und neigen diese langsam. Erst bei einem gewissen Neigungswinkel kommt das Gewichtstück ins Rutschen. Je glatter die Fläche und die Unterseite des Körpers, desto früher beginnt die Bewegung. Wir sehen ein, daß die Reibung hier mitspielt und suchen diese möglichst auszuschalten, indem wir ein gut poliertes Brett als Unterlage wählen und einen fast reibungslos laufenden kleinen Wagen an die Stelle des Gewichtstückes setzen (Apparat von FR. C. G. MÜLLER, T. 36). Einige Versuche ergeben den Satz: Die Kraft verhält sich zur Last wie die Höhe

1) Daß die Arbeit bei Hebung von 1 kg um h Meter gleich dem h fachen der Arbeitseinheit gesetzt wird, kann ja kritischen Bedenken unterliegen, die indessen für unseren Zweck kein Gewicht haben. Sofern man das Gewicht bei geringerer Hubhöhe als konstant ansehen kann, macht es keinen Unterschied, ob man eine Last von der Erde aus gerechnet von 0 auf 1 m, oder von 9 auf 10 m hebt.

zur Länge der schiefen Ebene oder $K:L = h:l$. (Nachdenkende Schüler bemerken schon, daß wie beim Flaschenzug der Kraftweg länger als der Lastweg ist.)

Eine einfache Überlegung zeigt, daß ein Teil vom Gewicht des Körpers durch die schiefe Ebene getragen (durch den Widerstand aufgehoben) wird, während ein anderer Teil durch die längs der schiefen Ebene ziehende Kraft gehalten werden muß. Der große holländische Wasserbaumeister STEVIN (1548 bis 1620) hat entdeckt, wie man diese beiden Teile bestimmen kann. Stellt man die auf den Körpers wirkende Kraft der Schwere durch eine lotrechte Strecke dar und macht diese zur Diagonale eines Parallelogramms, so daß die eine Seite der schiefen Ebene parallel, die andere zu ihr senkrecht ist, so geben diese die Größe der obigen beiden Kräfte an. (Satz von der Zerlegung der Kräfte!) Aus ähnlichen Dreiecken folgt dann auf bekannte Weise der bereits experimentell aufgefundene Satz von der schiefen Ebene. (Eine sehr genaue Bestätigung des Satzes ist mit der schönen von JOHANNESSEN [M. 19 und Z. U. XI 257] konstruierten Radwage ausführbar, doch eignet sich der Versuch wohl weniger zur Demonstration als zur Übung im Schülerpraktikum.)

Hält die Kraft K einer Last L auf der schiefen Ebene das Gleichgewicht, so tritt eine Hebung der Last wieder erst nach Zufügung eines geringen Übergewichts zu K (oder nach einem einmaligen Anstoß) ein. Läßt man das Übergewicht außer Betracht, so ist bezüglich der zu leistenden Arbeit leicht folgendes einzusehen. Die Kraft K würde, durch eine Strecke von der Länge l sinkend, durch Vermittlung einer festen Rolle eine ebenso große Last K um die Höhe l heben können, also imstande sein, die Arbeit Kl zu leisten. Diese Arbeit ist aber, wegen $Kl = L \cdot h$, ebenso groß wie die zur Hebung von L auf die Höhe h erforderliche, es wird also auch hier an Arbeit nichts gespart, sondern die gewonnene Arbeit ist gleich der verlorenen, es findet nur eine Arbeitsverwandlung statt. Natürlich sind diese Dinge an konkreten Zahlenbeispielen zu verdeutlichen.

Die Anwendung der schiefen Ebene zur Erklärung von Keil und Schraube gehört zu dem herkömmlichen eisernen Bestand einer jeden elementaren Physik. Die Unterordnung unter die schiefe Ebene ist indes eine künstliche¹⁾, in Wahrheit wird hier nicht ein Körper auf eine schiefe Ebene gehoben, sondern die schiefe Ebene wird unter eine Last geschoben; ferner ist bei beiden nicht das Verhältnis $h:l$, sondern das Verhältnis $h:b$ (Höhe zu Basis der schiefen Ebene) maßgebend, wovon

1) Die übliche Aufwicklung eines rechtwinkligen Dreiecks aus Papier auf eine Zylinderfläche demonstriert nur die Entstehung einer Schraubenlinie, trägt aber nichts Wesentliches zur Erklärung der Schraubenwirkung bei. Vgl. GRIMSEHL Z. U. XVII 132.

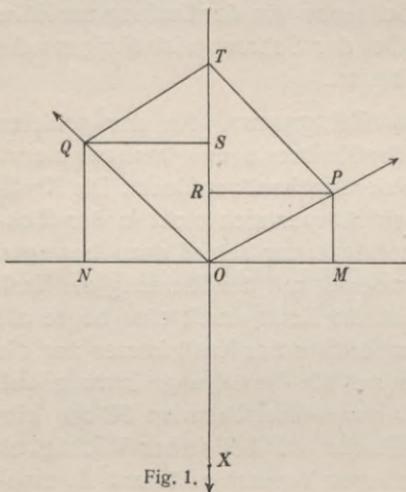
man auf der Unterstufe am besten ganz absieht; endlich spielt bei beiden die Reibung eine so große Rolle, daß eine Hauptverwendung beider nicht in der Bewegung von Lasten, sondern in dem Festhalten durch Reibung besteht. Es scheint mir daher angebracht, beide Vorrichtungen aus dem Pensum der Unterstufe zu streichen, jedenfalls sie nicht mehr zu den wesentlichen Stücken des Unterrichts zu rechnen. Charakteristisch ist für beide, daß eine Kraft senkrecht zu ihrer Richtung eine Wirkung ausübt, was nur durch eine zweimalige Kraftzerlegung möglich wird. Beide Vorrichtungen können aber auch ohne genauere Analyse und unter Absehen von der Reibung als Anwendungen des Gesetzes der Erhaltung der Arbeit verwandt werden (s. unten). Es ergibt sich dann für den Keil ohne weiteres, daß die Kraft sich zur Last verhält wie die Höhe zur Basis, und bei der Schraube wie der Umfang zur Höhe eines Schraubengangs (vgl. Nr. 10). Bei der Schraube ist übrigens die schiefe Ebene mit dem Wellrad kombiniert.

6. Kraftzerlegung und Kräfteparallelogramm. An der schiefen Ebene haben wir ein erstes Beispiel der Kraftzerlegung kennen gelernt. Wir haben damit ein wichtiges Prinzip der Mechanik entdeckt. Die Kraftzerlegung findet immer statt, wenn ein Körper sich nicht in der Richtung der auf ihn wirkenden Kraft, sondern nur schief dazu bewegen kann, wenn also die Richtung der Bewegung mit der Richtung der Kraft einen spitzen Winkel bildet. Stellt man die Kraft durch eine begrenzte Strecke dar, so tritt als wirksame Komponente der Kraft immer nur die Projektion (Ablotung) dieser Strecke auf die Bewegungsrichtung auf. Die andere Komponente senkrecht zu der widerstehenden Fläche gibt den Druck des Körpers gegen diese Fläche an. Bei seiner Wichtigkeit wird das Prinzip noch durch einen weiteren Versuch erläutert. Zu empfehlen ist hierfür der Apparat von GRIMSEHL (U. § 21, Z. U. XVII 257). Man vgl. auch GRIMSEHL, L. f. R. § 19.

Ist die Richtung der möglichen Bewegung senkrecht zur Kraft-richtung, so ist die Komponente in Richtung der Bewegung null, d. h. es kann keine Bewegung stattfinden. Dem widerstreiten aber die Beobachtungen an Windmühlen und Segelschiffen. Einen hübschen Versuch zur Demonstration der horizontalen Komponente des Gewichts gibt MÜLLER (T. § 22) an. Man läßt eine Holzwalze auf dem schrägen Aufsatz eines kleinen Wagens herunterrollen, dadurch bekommt der Wagen einen kräftigen Anstoß nach rückwärts. Auch zur Theorie des Segelns findet man ebenda eine brauchbare Demonstration. Die Erklärung beruht auch hier auf zweimaliger Kraftzerlegung. Daß die Erscheinungen streng genommen in die Dynamik gehören, darf bei dem großen Interesse der Jugend für diese Dinge an der Besprechung nicht hindern.

Naturgemäß schließt sich an die Kraftzerlegung die Frage nach der Zusammensetzung von Kräften, die unter einem Winkel gegeneinander

auf einen Körper wirken, an. Die Schüler kommen leicht selbst auf den Gedanken, wie man es anstellen kann, um zwei Kräfte unter einem Winkel gegeneinander wirken zu lassen. Man benutzt den bekannten Apparat (nach VARIGNON), der am besten zwei Rollen in gleicher Höhe trägt (die Rollen können auch an der Wandtafel angeschraubt sein); man legt über die Rollen eine Schnur, die an den Enden mit ungleichen Gewichtstücken belastet ist; zieht man einen Punkt der Schnur, der zwischen den Rollen liegt, abwärts, so spürt man einen Zug aufwärts, wenn man den Faden festzuhalten sucht. Nun wird durch Anhängen eines dritten Gewichtstückes Gleichgewicht hergestellt. Durch Übertragen der Fadenrichtungen auf eine dahinter gestellte Tafel und Abtragen von Längen, die den Gewichten entsprechen, findet man das Parallelogramm-



gesetz. Die Resultierende der beiden Seitenkräfte muß der dritten angebrachten Kraft gleich und entgegengesetzt gerichtet sein, wenn Gleichgewicht bestehen soll; sie wird durch die Diagonale des in bekannter Weise gebildeten Parallelogramms dargestellt.

[Der Zusammenhang dieses Gesetzes mit dem Gesetz der Kraftzerlegung geht aus einer Betrachtung¹⁾ hervor, die E. MACH (M. [4] 38) an die Hand gibt: An drei in einem Punkt O zusammenlaufenden Schnüren (Fig. 1) mögen Kräfte wirken, die einander das Gleichgewicht halten. Wird nun

aus zweien der Kräfte, z. B. OP und OQ das Parallelogramm gebildet, und jede der beiden Kräfte in zwei Komponenten nach der Richtung der dritten Kraft (OR und OS) und senkrecht dazu (OM und ON) zerlegt, so zeigt sich, daß die Komponenten OM und ON einander aufheben, die anderen beiden OK und OS aber zusammen die Diagonale OT bilden. Diese letztere muß der dritten nach OX gerichteten Kraft entgegengesetzt und gleich sein, wenn Gleichgewicht stattfinden soll. Mit nur wenig mehr Mühe kann man die Parallelogrammfigur auch aus der Voraussetzung ableiten, daß bei der Zerlegung der Kräfte OP und OQ zwei gleichgerichtete und zwei entgegengesetzt gleiche, also sich aufhebende Komponenten entstehen. Diese einfache Betrachtung enthält ein Grundschemata alles Naturgeschehens, nämlich, daß bei irgendwelchem Zusammenwirken die entgegengesetzten Bestandteile einander aufheben, die gleichartigen aber sich addieren.]

1) Eine andere mehr experimentell gehaltene Herleitung aus dem Satz von der Kraftzerlegung bei MACH und ODSTRCIL § 129.

Eine recht genaue Bestätigung des Parallelogrammgesetzes kann mit drei Federwagen gegeben werden, die über einem Reißbrett an einem Ring ziehen. Der Versuch eignet sich besonders für Schülerübungen (U. [3] Fig. 43; Hahn, Handbuch, II. Aufg. 8).

Die funktionale Abhängigkeit der Resultierenden von dem Winkel, den die Komponenten bilden, wird ersichtlich durch eine Reihe von Figuren, die man mit denselben Komponenten aber mit veränderlichem Winkel ausführen läßt. Am besten läßt man entsprechende Versuche damit parallel gehen.

7. Der Hebel. Als Vorbereitung auf die Betrachtung des Hebels können Hinweise auf Hebebaum und dgl. dienen (HÖPLER, Ph. § 29). Geeigneter wohl noch ist die Wippe, da hier deutlich zwei angebbare Kräfte, nämlich die Gewichte der darauf sitzenden Kinder, vorhanden sind. Frage: Wie muß das kleinere (leichtere) Kind seinen Platz wählen, um dem größeren (schwereren) das Gleichgewicht zu halten oder gar es in die Höhe zu heben? An die noch unbestimmte Antwort, daß das kleinere Kind den größeren Abstand von der Unterstützungsstelle haben muß, schließt sich sofort die genauer gefaßte Frage: Wie ändert sich die Wirkung einer Kraft mit ihrem Abstand von der Unterstützungsstelle?

Zur Beantwortung wird die Wippe durch eine Stange ersetzt, die um eine durch ihren Mittelpunkt geführte Achse drehbar ist und an der Gewichte, die Kraft und Last darstellen, in verschiedenen Abständen „angreifen“ können. Eine solche Stange stellt einen Hebel dar. Nur verwirrend wäre es, hier die Fiktion eines „mathematischen“ Hebels, also einer „gewichtlosen Geraden“ einzuführen. Auch KEFERSTEIN (D. 863) rügt, daß die höhere Schule gerade in der Mechanik vielfach mit völlig unrealisierbaren Abstraktionen arbeite.¹⁾ K. ROSENBERG (I, 111) verlangt ferner mit Recht, daß man einen Hebel benutzen solle, dessen Achse durch den Schwerpunkt geht. „Man verlange nicht, daß sich der Hebel im Falle des Gleichgewichts von selbst horizontal stelle.“ „Das Gleichgewicht ist bei einem Hebelapparat nur dadurch konstatierbar, daß der Hebel, in die horizontale Lage gebracht, in derselben ruhig stehen bleibt, nicht aber dadurch, daß er aus dieser Lage gebracht, von selbst in dieselbe zurückkehre“. Die Hebelapparate der Mechaniker haben zumeist die Achse oberhalb des Schwerpunkts. Am meisten zu empfehlen ist ein Hebel mit verstellbarer Achse (z. B. ERNECKE Nr. 5105).

Daß an der Hebelstange gleiche Kräfte in gleichen Abständen sich

1) Auf der Brüsseler Weltausstellung 1910 fand ich Berichte über Seminare an höheren deutschen Schulen, darin u. a. eine ausgearbeitete Lehrprobe über den Hebel, in der folgende (unbeanstandete) Frage vorkam: Wie muß der Hebel beschaffen sein, damit wir ihn (!) nicht in Rechnung zu ziehen brauchen? Antwort: Er muß gewichtslos sein!

das Gleichgewicht halten, erscheint dem Schüler als selbstverständlich, ohne daß man ihm das Prinzip vom fehlenden Grunde hier schon anzuführen braucht. Um so mehr Verwunderung erweckt es, wenn man die eine der Kräfte in den doppelten Abstand versetzt und zeigt, daß die „Drehwirkung“ dann doppelt so groß ist. Daran schließt sich der Nachweis, daß diese Drehwirkung proportional dem Abstand des Angriffspunkts von der Achse wächst. Wie anderwärts gezeigt (U. § 30) ergibt sich hieraus leicht der Begriff des Drehmoments und daraus der Hebelsatz in der üblichen Form.

Diese Heranführung an den Hebelsatz scheint mir den Vorzug zu verdienen vor der herkömmlichen Demonstration des Satzes durch Wahl eines oder einiger willkürlich gewählter Fälle, in denen die Momente von Kraft und Last einander gleich sind. Es hat sein Bedenkliches, den Hebelsatz auf solche Art durch eine sehr unvollständige Induktion zu stützen, die immer dem Zweifel Raum läßt, ob auch die Produktengleichung (oder die Proportion) in allen Fällen erfüllt sein wird. Das vorher angegebene Verfahren läßt dagegen schon auf Grund weniger Fälle leicht übersehen, daß der Satz vom Drehmoment mit einer an Gewißheit grenzenden Wahrscheinlichkeit auch für beliebige längere Hebelarme gelten wird. Es hat überdies den Vorzug, daß es den Begriff des Drehmoments, der sonst aus der Proportion etwas künstlich abgeleitet wird, der Anschauung unmittelbar als das eigentlich in Betracht kommende nahebringt.

Die Unterscheidung von zweiseitigem und einseitigem Hebel bietet prinzipiell nichts Neues. Auch die Anwendung zur Schnellwaage findet zweckmäßig schon hier ihren Platz. Gegen die Beibehaltung der Einteilung in geradlinige und Winkelhebel, ebenso in einarmige und zweiarmige (besser ein- und zweiseitige) hat GRIMSEHL (S. 89) sich mit scharfen Worten gewendet. Es sind das doch aber nicht „müßige Spekulationen“, sondern Einzelfälle, deren Unterscheidung zunächst nötig ist, wenn zu dem allgemeinen Begriff des Drehmoments aufgestiegen werden soll. Es entspricht also diese Einteilung durchaus den Forderungen eines induktiven Unterrichts. Auch liefert die Überleitung des Winkelhebels in den einseitigen Hebel wieder ein hübsches Beispiel für einen funktionalen Übergang. (Man drehe den einen Arm eines zweiseitigen Hebels so weit bis er in die Richtung des anderen Armes fällt; MACH — ODSTRCIL § 134).

Ob man indessen schon auf der Unterstufe vom Hebelsatz zu dem Satz von den Drehmomenten aufsteigen will (wie bei MACH-ODSTRCIL a. a. O.), hängt von den Zielen der Unterstufe ab. Für Realschulen, die mit der Unterstufe abschließen, mag es sich empfehlen, an solchen Anstalten, wo eine Oberstufe folgt, kann davon wohl abgesehen werden. Eine Deduktion des Hebelsatzes aus dem allgemeinen Satz von den

Drehmomenten ist für die Unterstufe keinesfalls angebracht und wird der Oberstufe vorzubehalten sein.

Das Hebelgesetz war übrigens schon lange vor ARCHIMEDES bekannt. Dieser aber ist der erste, der einen Beweis zu geben versucht hat. Den Archimedischen Beweis mitzuteilen hat nur dann Wert, wenn man auch die Schwäche des Beweises nicht unbemerkt läßt. Andere Beweisversuche sind gefolgt. Über die spätere Behandlung des Problems vergleiche man das zur Oberstufe Gesagte. —

Die Betrachtung des Hebels als Maschine kann ähnlich wie die des Flaschenzuges vorgenommen werden. Ein geringes Übergewicht (oder ein Anstoß) an dem einen der beiden Gewichte setzt den Hebel in Bewegung; gibt man dem kleineren Gewicht einen Anstoß nach unten, so geht das größere Gewicht in die Höhe. Auch hier erhebt sich die Frage, wie das möglich ist. Diese Frage hat schon die Griechen beschäftigt. Doch zeigte erst eine von GALILEI angestellte Überlegung, daß diese Wirkung einer kleineren Kraft gegen eine größere Last beim Hebel ebensowenig wunderbar ist, wie beim Flaschenzug (U. § 30). Auch die Gleichheit der Arbeiten von Kraft und Last ist sofort ersichtlich. Denn Kraft und Last verhalten sich umgekehrt wie die Hebelarme, diese direkt wie die lotrecht gerechneten Wege, also Kraft und Last umgekehrt wie die lotrechten Wege. Auch für den Hebel ist daher der Satz von der Gleichheit der Arbeiten und somit auch von der Arbeitsverwandlung erwiesen. Letzteres hat zunächst nur zu bedeuten: die Arbeit, die das Kraftgewicht direkt durch sein Sinken leisten könnte, wird durch eine andere ersetzt, die sich aus einer größeren Last und einem kleineren Wege zusammensetzt.

Es ist schließlich wieder der Übergang von der Abstraktion zur Wirklichkeit zu machen: Hebebaum, Brechstange, Schiebkarren, Zange, Scheere usf. Auch die biologische Anwendung auf die Bewegung der Gliedmaßen durch die Muskeln ist nicht zu vergessen; hierbei der Unterschied des Geschwindigkeitshebels vom Krafthebel. Eine besondere Betrachtung erfordert der bei einigen Anwendungen auftretende Winkelhebel. Hat man eingesehen, daß es sich beim Hebel immer um die Drehwirkung der Kraft an einem Hebelarm handelt, so versteht man auch leicht, daß der eine Hebelarm in der Ebene des Hebels gegen den anderen Hebelarm unter einem beliebigen Winkel verstellt werden kann, ohne daß sich etwas an dem Ausdruck des Hebelsatzes ändert. Nur bleibt die Betrachtung zunächst auf Kräfte beschränkt, die senkrecht zum Hebelarm wirken. Schief wirkende Kräfte erfordern eine Kraftzerlegung, gemäß dem bei der schiefen Ebene aufgefundenen Prinzip. Ist dies dargelegt, so ist auch sofort die Briefwage verständlich; die gleicharmige Wage läßt sich erst später, nach den Schwerpunktssätzen behandeln.

Dagegen schließt sich hier noch das Wellrad an, das als eine Verbindung von Hebel und Rolle angesehen werden kann (U. § 31). Allerdings spielt hier, worauf FR. C. G. MÜLLER (T. § 25) hinweist, die Kraftübertragung durch Torsion eine wesentliche Rolle, worauf aber auf der Unterstufe ebensowenig einzugehen ist wie auf die Spannungsverhältnisse im Hebel.

8. Der Schwerpunkt. Die Betrachtung des Schwerpunkts knüpft unmittelbar an den Hebel an. Zur Einführung dient die Frage: *Welchen Druck hat wohl der Stützbalken der Wippe, oder die Achse der Hebelstange auszuhalten?* Die Schüler vermuten, daß der Druck gleich der Summe der Gewichte ist, die auf die Stange wirken. Wie können wir prüfen, ob dies richtig ist? Wir hängen die Hebelstange, an der zunächst zwei gleiche Gewichte in gleichen Abständen von der Achse angebracht sein mögen, an einem Faden auf, der über eine Rolle geführt ist, so daß der an einem Ende des Fadens wirkende Zug des Hebels durch ein am anderen Ende angebrachtes Gewicht äquilibriert wird. (Der Faden kann auch durch eine Federwage ersetzt werden.) Der Versuch liefert die Bestätigung für die vorherige Vermutung, sofern auch das Gewicht der Hebelstange mit berücksichtigt wird. Der Versuch verläuft ebenso, wenn ungleiche Gewichte an der Hebelstange wirken (U. Fig. 63, O. Fig. 58). Die beiden getrennten Gewichte üben also auf den Faden einen ebenso großen Zug aus, als wenn beide vereint am Aufhängungspunkt des Hebels angebracht wären. Man kann demnach den Aufhängungspunkt als den Angriffspunkt der Resultierenden der beiden durch die Gewichte dargestellten Kräfte ansehen.

Hier schließen sich zwei lehrreiche *Aufgaben* an, die zwar nicht den Gang der Betrachtung unterbrechen dürfen, aber doch gelegentlich als Übungsstoff behandelt werden sollten.

1. Zwei verschieden große Gewichte sind an den Endpunkten einer wagerechten Stange, von deren Gewicht abgesehen wird, angebracht; in welchem Punkt der Stange muß eine Kraft angebracht werden, die den beiden Kräften „das Gleichgewicht hält“?
2. In einem beliebigen Punkt einer wagerechten Stange von deren Gewicht wieder abgesehen wird, ist ein schwerer Körper angehängt. Wie groß sind die Kräfte, die an den Enden der Stange lotrecht aufwärts wirken müssen, um Gleichgewicht herzustellen? — Anwendung auf den Fall, daß eine Last an einer Stange von einem Knaben und einem Mann, die an den beiden Enden angreifen, getragen werden soll.

Es ist nicht außer acht zu lassen, daß in der zweiten Aufgabe bereits eine Verallgemeinerung der am Hebel gewonnenen Gleichgewichtssätze gefordert ist, insofern es sich hier um parallele Kräfte handelt, die nicht mehr durch abwärts wirkende Schwerkräfte dargestellt zu sein

brauchen. Wiederum bleibt die eingehende Behandlung dieser Verallgemeinerung der Oberstufe vorbehalten.

Die obige Erfahrung wenden wir nun auf die unbelastete Hebelstange an, deren Gewicht bisher noch außer acht gelassen war. Daß sie auch unbelastet um eine durch den Mittelpunkt gehende Achse im Gleichgewicht ist, erklärt sich aus dem Satz vom gleicharmigen Hebel, wenn man diesen auf paarweise korrespondierende Stücke der beiden Hebelhälften anwendet. Die Hebelstange bleibt auch noch im Gleichgewicht schweben, wenn sie im Mittelpunkt an einem Faden aufgehängt wird. Der Mittelpunkt ist wiederum als der Angriffspunkt der Resultierenden aller auf die Stange wirkenden Schwerkkräfte anzusehen. Ihr Gewicht übt auf den Faden einen ebenso großen Zug aus, als wenn alle auf sie wirkenden Schwerkkräfte im Mittelpunkt vereinigt wären. (Dies hat schon der vorhergegangene Versuch nebenbei gelehrt.) Dieser Punkt heißt der Schwerpunkt der Stange. Der Schwerpunkt fällt zunächst mit dem geometrischen Mittelpunkt zusammen. Das ändert sich, sobald die Masse nicht gleichmäßig über die Stange verteilt ist, wie schon der obige Versuch mit ungleichen Gewichten zeigt. Eine einfache Vorrichtung, die man zur Demonstration des Schwerpunkts für diesen Fall benutzen kann, beschreibt MÜLLER (T. § 26).

Der Schwerpunkt kann auch in diesem Falle definiert werden als der Angriffspunkt der Resultierenden aller auf den Körper wirkenden Schwerkkräfte.¹⁾ Eine Folgerung hieraus ist es, daß ein nur der Schwere unterworfenen Körper bei Unterstützung des Schwerpunkts in Ruhe bleibt. Diese Eigenschaft wird häufig als Definition aufgestellt, sie reicht aber nicht aus, da sie bei schweren Körpern die nicht im Schwerpunkt selbst unterstützt sind, unbestimmt wird.

Daß es in jedem Körper einen und nur einen solchen Punkt gibt, ist auf dieser Stufe ein Erfahrungssatz. Die weiteren Versuche dazu, bei denen die Körper entweder auf einer Spitze balanciert oder in einem Punkt oberhalb des Schwerpunkts aufgehängt werden, sind in allen Lehrbüchern angegeben, ebenso das experimentelle Verfahren zur Ermittlung des Schwerpunkts. Die Ermittlung durch geometrische Betrachtungen sollte sich auf die einfachsten Fälle (Kreisscheibe, rechteckige und dreieckige Platte) beschränken.

9. Gleichgewichtslagen schwerer Körper. Zur Überleitung kann nochmals die Hebelstange dienen, wenn sie so eingerichtet ist, daß die Achse auch unterhalb oder oberhalb des Mittelpunkts verlegt werden kann. Eine Holzstange (nach FR. C. G. MÜLLER Fig. 27) mit drei übereinanderliegenden Bohrungen, durch die eine Stricknadel gesteckt werden kann, genügt auch schon für diesen Zweck. Das überraschende

1) MACH, U. § 139 sagt weniger präzise: Der Punkt, in welchem wir uns das Gewicht des Körpers angreifend denken können.

Umschlagen des Hebels, wenn die Achse sich unterhalb des Schwerpunkts befindet, reizt zur Aufstellung des Problems: *Wie verhält sich ein schwerer Körper, wenn er im Schwerpunkt, oder oberhalb oder unterhalb des Schwerpunkts unterstützt ist?* Die Lösung mag zunächst an den einfachsten körperlichen Modellen (z. B. MACH, U. Fig. 32 und 33) geschehen. Das Drehmoment wird durch Zerlegung der Kraft zeichnerisch genau darzustellen sein. Unterscheidung der drei Arten des Gleichgewichts (U. § 38). Hier wird auch erst die oben angegebene experimentelle Bestimmung des Schwerpunkts gerechtfertigt. Anwendung: auf einen lotrechten Stab in den drei Aufhängungen; eine Kugel auf ebener, konkaver oder konvexer Unterlage (GRIMSEHL, L. Fig. 141–143).

Von Wichtigkeit ist hier namentlich die zu deutlichem Bewußtsein zu erhebende Einsicht, daß der Schwerpunkt eines der Schwerkraft überlassenen Körpers stets die möglich tiefste Lage einnimmt. Diese Einsicht hat in der Geschichte der Physik eine große Rolle gespielt (GALILEI, HUYGENS!).

Unterstützungsfläche und Stabilität. Erörterung an einfachen Modellkörpern (z. B. MACH, U. Fig. 94). Fragen: In welchem Sinne würde die Schwerkraft die Körper um eine Grundkante K drehen? Was würde mit dem Schwerpunkt geschehen, wenn die Drehung in beiden Fällen ausgeführt würde? (MACH). Zum Umwerfen genügt ein minimaler Stoß, wenn der Schwerpunkt senkrecht unter der Kippkante liegt.

Als Maß der Standfestigkeit dient die zum Umwerfen des Körpers erforderliche Arbeit. Man kann leicht zeigen, daß zur Drehung des Körpers um eine Kante die Erhebung des Schwerpunkts um eine gewisse Strecke h erforderlich ist, und daß demnach eine Arbeit $P \cdot h$ zu leisten ist, wenn P das Gewicht des Körpers bedeutet. Diese Arbeit wird größer, wenn der Schwerpunkt (S) weiter von K absteht und tiefer liegt (MACH, § 140).

Hier erst schließt sich auch die gleicharmige Wage an. Das Wesentliche, zu der Betrachtung des gleicharmigen Hebels hinzukommende ist, daß der Schwerpunkt unter der Achse liegt. Legt man auf eine Wagschale ein kleines Übergewicht, so rückt der Schwerpunkt ein wenig nach dieser Seite und die Wage dreht sich. Wie lange? Fragen (nach MACH): „Kann jeder zweiseitige gleicharmige Hebel eine Wage vorstellen? Was würde bei ungleicher Belastung geschehen, wenn der Schwerpunkt in der Achse läge und wenn die Verbindungslinie der Aufhängungspunkte der Schalen ebenfalls durch die Achse ginge? Wie verhielte sich der Wagebalken, wenn der Schwerpunkt oberhalb der Achse läge?“ – Im übrigen s. U. § 39.

In bezug auf die beim Hebel bereits vorgeführte Schnellwage ist hier nachzutragen, daß auch bei dieser der Schwerpunkt unterhalb der Achse liegen muß.

10. Die Erhaltung der Arbeit. Als Abschluß der Betrachtungen über die drei einfachen Maschinen muß eine Zusammenfassung des über den Arbeitsbegriff Ermittelten folgen. In allen betrachteten Fällen hat sich gezeigt, daß die Maschine im Gleichgewicht ist, wenn bei einer eintretenden Bewegung das Produkt aus Kraft und Weg gleich dem Produkt aus Last und Weg ist. Wenn also durch ein geringes Übergewicht (das wesentlich auch zur Überwindung der Reibung erforderlich ist) wirklich Bewegung eintritt, und von der durch dieses geleisteten Arbeit abgesehen wird, so folgt, daß auch dann die beiden Produkte einander gleich gesetzt werden können. Nennt man das beim Sinken des einen Gewichts auftretende Produkt „verlorene Arbeit“, die beim Heben des andern auftretende „gewonnene Arbeit“, so ergibt sich, daß bei einer Arbeitsleistung an diesen Maschinen die verlorene Arbeit gleich der gewonnenen ist. (Prinzip der Erhaltung der Arbeit.) Man kann auch die Bezeichnungen „aufgewendete“ Arbeit und „geleistete“ Arbeit wählen (MACH). Schon hier ist der Hinweis am Platze, daß dieses Prinzip sich als allgemein gültig erwiesen hat. Als Beispiel empfiehlt sich die Betrachtung der Schraube, wo der in Richtung der Achse ausgeübte Druck (der „achsiale Druck“) sich leicht aus dem Prinzip berechnen läßt. — Erwähnung verdient hierbei die Verwendung der Schraube als feinstes Werkzeug zur Messung sehr kleiner Längen (Mikrometerschraube). — Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile (U. § 33).

Auch die Definition der Arbeitseinheit bedarf einer Ergänzung. Zwar halte ich es nicht für angezeigt, an dieser Stelle, wo der physikalische Begriff der Arbeit als etwas ganz Neues für den jugendlichen Geist auftritt, durch Hinzunahme eines anderen Kraftmaßes Verwirrung zu stiften. Von den Begriffen Dyn und Erg sollte daher an dieser Stelle noch nicht gesprochen werden. Doch dürfte es unbedenklich sein, $1 \text{ Joule} = \frac{1}{9,81} \text{ kgm}$ oder $\sim \frac{1}{10} \text{ kgm}$ einzuführen.

Auch der Begriff der Leistung ist hier schon heranzuziehen. 1 Pferdestärke (PS) = 75 kgm pro Sek. oder $\sim 734 \text{ Joule pro Sek.}$

Bezeichnet man 1 Joule pro Sek. als 1 Watt, so wird

$$1 \text{ PS} \sim 734 \text{ Watt.}$$

Dies ist für die Schüler der Unterstufe noch leicht faßbar und auch interessant, da sie alle schon von Watt und Kilowatt gehört haben.

Daß ein kräftiges Arbeitspferd dauernd nur etwa $\frac{1}{2}$ PS, ein Mensch dauernd nur etwa $\frac{1}{8}$ PS zu leisten vermag, darf nicht unerwähnt bleiben.

11. Festigkeit und Elastizität. Die Betrachtungen an den einfachen Maschinen legen die Erwägung nahe, daß erst die Festigkeit der Körper die dort beobachteten Vorgänge möglich macht. Was würde geschehen, wenn ein Seil, eine Rolle, ein Flaschenzug, ein als schiefe Ebene dienendes Brett, ein Hebel, ein Wagebalken zu stark belastet würden? Was beobachtet man, wenn man ein lotrecht herabhängendes Seil, oder

einen ebenso aufgehängten Draht immer stärker belastet? Der Versuch wird bis zum Eintritt des Zerreißen fortgesetzt (absolute Festigkeit). Eine ausgezeichnete Darstellung der ganzen Versuchstechnik gibt MÜLLER (T. § 28). Der Vorgang verdient in allen Einzelheiten genau verfolgt und beschrieben zu werden. „Der vollständig und gründlich durchgeführte Zerreißversuch erfordert fast eine ganze Stunde, gibt aber auch entsprechend zu lernen“. Unzulässig ist es, die „Belastung“, bei der das Zerreißen eintritt, als Zerreißfestigkeit zu bezeichnen. Letztere ist eine Eigenschaft, deren Größe durch die Maximalbelastung gemessen wird.

Die Beobachtung des Verhaltens des Drahts während der Verlängerung legt die Frage nahe: *In welchem Verhältnis ändert sich die Länge des Drahtes mit der Belastung?* – Gesetz von HOOKE: die Verlängerung des Drahtes ist der Größe der Belastung proportional. Bei anderer Länge und anderem Querschnitt ergibt sich die Erweiterung des Gesetzes: die Verlängerung des Drahtes ist bei gleicher Belastung direkt proportional mit der Länge und umgekehrt proportional mit dem Querschnitt.

Bei diesen Versuchen wird auch schon die Zugelastizität des Drahtes und die Elastizitätsgrenze entdeckt. Hier sind bestimmte Zahlen von Nutzen: die Grenze liegt für Stahldraht von 1 qmm Querschnitt bei 50 kg, für Bleidraht von gleicher Stärke schon bei 0,25 kg. Vom Elastizitätsmodul braucht auf der Unterstufe nicht die Rede zu sein.

Für Biegungs- und Torsionselastizität dienen bekannte Versuche. Zu Demonstration der Torsionsfestigkeit gibt MÜLLER (T. § 25) ein einfaches Modell an. Ebenda (§ 28) wird das Abdrehen eines 4 mm dicken Eisendrahtes auf der Drehbank empfohlen, wobei guter Draht auf je 1 cm Länge mindestens eine Windung zeigt.

Im Anschluß hieran kann noch über Härte einiges angegeben und der Begriff der Kohäsion erläutert werden. Hier ist auch die Stelle, wo zuerst von der molekularen Struktur der Körper gesprochen werden kann; es muß aber der Schein vermieden werden, als ob aus der Teilbarkeit auf molekulare Geteiltheit geschlossen werden könnte. Die zunächst durchaus hypothetische Natur der Annahme von Molekülen ist hier stark zu betonen. Auch die Adhäsion findet am besten hier ihre Stelle. Geeignete Versuche sind das Haften von Silber oder Goldfolie an Messing und Spiegelglas. Zu verwerfen sind die Adhäsionsplatten, da hier die Wirkung des Luftdrucks mitspielt.

§ 9. Von der Bewegung.

1. **Einleitendes.** Da wir gesehen haben, daß Kräfte unter Umständen Bewegungen hervorbringen, so liegt es nahe, daß wir uns nun der Betrachtung der Bewegungen zuwenden.

Am Anfang stehen Darlegungen über den relativen Charakter von Bewegung und Ruhe, anknüpfend an Beobachtungen der Schüler bei

Eisenbahnfahrten, die Beobachtungen in Luftschiffen und dgl. Als einfachste Art der Bewegung ist dann die gleichförmige Bewegung zu betrachten. Ihre Definition erfordert den Begriff der Geschwindigkeit noch nicht, es genügt zu sagen, daß dabei in gleichen Zeiten gleiche Wege zurückgelegt werden. Die Erweiterung auf „beliebig klein gewählte gleiche Zeiten“ ist naheliegend.

Der Begriff der Geschwindigkeit ist nur eine Präzisierung dessen, was man im gewöhnlichen Leben mit Schnelligkeit oder Langsamkeit bezeichnet. Falsch aber ist es, den in 1 Sek. zurückgelegten Weg Geschwindigkeit zu nennen. (So z. B. auch noch MACH-ODSTRCIL § 146.)

Ebenso unrichtig ist es zu sagen, daß der Quotient $\frac{s}{t}$ Geschwindigkeit genannt werde. Denn Geschwindigkeit ist nicht ein bloßer mathematischer Ausdruck, Geschwindigkeit bedeutet vielmehr etwas Qualitatives¹⁾, einen Zustand des bewegten Körpers, der durch den Quotienten aus Weg und Zeit gemessen wird.

Der Begriff der Geschwindigkeit wird zunächst für die gleichförmige Bewegung aufgestellt, wendet man ihn auf eine nicht völlig gleichförmige Bewegung an, so erhält man den Begriff der mittleren Geschwindigkeit. So sind z. B. die Geschwindigkeiten von Eisenbahnzügen, Rennpferden usw. zu verstehen. Nicht unterlassen sollte man einige direkte Messungen solcher mittleren Geschwindigkeiten auf dem Schulhofe unter Benutzung der Stechuhr, z. B. beim Gehen, beim schnellen Laufen, beim Radfahren.

2. Die Fallbewegung und das Beharrungsgesetz.

a) Eine der alltäglichsten nicht gleichförmigen Bewegungen ist die Fallbewegung. Wir nehmen eine Metallkugel, die an einem Faden aufgehängt ist (also ein „Lot“); brennen wir den Faden durch, so fällt die Kugel zur Erde. Die Schnelligkeit des Körpers an verschiedenen Stellen der Bahn ist schwer zu beurteilen, doch bewegt er sich augenscheinlich anfangs langsamer, später schneller, d. h. die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege nehmen beständig zu. Dies können wir auch daraus schließen, daß die Wucht des Aufschlagens um so stärker und der Schall um so lauter ist, je tiefer der Körper gefallen ist. Man nennt eine solche Bewegung eine beschleunigte Bewegung.

Von messenden Versuchen über Fallstrecke und Fallzeit ist hier abzusehen, doch kann durch Versuche mit verschiedenen, namentlich verschieden schweren Fallkörpern festgestellt werden, daß diese nahezu gleich schnell fallen. Bei diesen Versuchen wird auch der Luftwiderstand augenfällig, der bei Schnellbahnen und Luftschiffen eine so große Rolle spielt. Es verdient schon hier erwähnt zu werden, daß GALILEI das gleich schnelle Fallen der Körper im luftleeren Raum vorhergesagt hat,

1) POSKE, Z. U. III 161 u. a. vgl. weiter unten S. 213.

obwohl er noch nicht imstande war, einen dazu geeigneten luftleeren Raum herzustellen, und daß erst OTTO VON GUERICKE dieser Nachweis gelungen ist. Der Versuch macht an dieser Stelle großen Eindruck. Die Vorwegnahme der Luftpumpe unterliegt auch hier keinem Bedenken. (vgl. S. 102). Als Freihandversuch ist daneben das Fallenlassen einer Münze mit darauffliegendem Papierstückchen zu empfehlen.

b) Wir werfen nun eine Kugel möglichst lotrecht in die Höhe, sie steigt nur um eine gewisse Strecke, und um so höher, je stärker sie geworfen wurde. Im höchsten Punkte muß die Geschwindigkeit der Kugel aufgehört haben, da die Kugel von dort wieder herunterfiel. Wir schließen daraus, daß die Geschwindigkeit der Kugel beim Steigen beständig abgenommen hat. Eine solche Bewegung heißt eine verzögerte Bewegung.

c) Wir erteilen drittens der Kugel eine Bewegung in wagerechter Richtung, und um ihr Fallen zu verhindern, lassen wir sie auf einer wagerechten Ebene laufen. Die Kugel läuft allmählich langsamer, aber je glatter die Bahn ist, desto geringer scheint die Abnahme der Geschwindigkeit zu sein. Auf einer glatten und genau wagerechten Eisfläche z. B. würde sich die Kugel auf eine sehr weite Strecke hin fast gleichförmig und überdies in gerader Linie bewegen.

GALILEI war der erste, der auf Grund anderweitiger scharfsinniger Überlegungen den Gedanken aussprach, daß ein auf wagerechter Bahn befindlicher Körper, einmal in Bewegung gesetzt, sich mit unverminderter Geschwindigkeit und in gerader Linie weiter bewegen würde, sofern nur alle Hindernisse entfernt würden. Dieser Gedanke hat sich in der Folgezeit als richtig bewährt, er findet seinen Ausdruck in dem sogenannten Beharrungsgesetz. (Es ist der Stufe angemessen, das Gesetz hier zunächst nur für die Bewegung in wagerechter Richtung auszusprechen.) — Wir überzeugen uns nun durch Versuche davon, daß die Reibung in der Tat je nach der Beschaffenheit der Oberflächen, zwischen denen sie stattfindet, veränderlich ist.

3. Von der Reibung. Ein quaderförmiger oder würfelförmiger Holzklotz werde an einem Federdynamometer mit etwa gleichbleibender Geschwindigkeit über eine wagerechte Holzplatte gezogen¹⁾; die vier Langseiten des Klotzes seien etwa roh, poliert, mit Tuch und mit Messing

1) Nach JOHANNESSEN, P. M. 37. Der Apparat von KELLERMANN Z. U. XIV 30 (vgl. ROSENBERG II, 25) eignet sich für diese Versuche auch recht gut. Hier wird ein Schlitten mittels eines über eine Rolle geführten Fadens durch ein sinkendes Gewicht gezogen. Man muß das Gewicht nur so groß nehmen, daß es gerade die Reibung überwindet. Noch besser ist es ein kleines Dynamometer zwischen Faden und Schlitten einzuschalten. Auf die Gleitplatte können Streifen aus Holz, Papier, Glas, Blech, Sandpapier usw. aufgelegt werden. Der Apparat ist auch für rollende Reibung eingerichtet.

bezogen. Die nahezu konstante zur Überwindung der Reibung erforderliche Kraft kann am Dynamometer abgelesen werden. Es ergibt sich:

a) Die Reibung hängt von der Rauigkeit der Reibungsflächen und von ihrem Stoff ab.

Durch verschiedene Belastung des Reibungskörpers kann man überdies noch das Gesetz ableiten:

b) Die Reibung wächst in demselben Verhältnis wie der auf die Reibungsfläche ausgeübte Druck.

Unter a) gehört auch noch der interessante auf dem Eise anzustellende Versuch über die Größe der Reibung zwischen Stahl und Eis, die beim Fortziehen eines auf Schlittschuhen stehenden Menschen zu überwinden ist. Sie beträgt etwa $\frac{1}{60}$ des Gewichts. Zu bemerken ist jedoch, daß hierbei das Schmelzwasser unter den Schlittschuhen als Schmiermittel wirksam ist.

Es wird endlich an dem vorher beschriebenen Apparat, indem man den Klotz auf zwei Walzen setzt, die rollende Reibung untersucht, die nur etwa den 100. Teil der gleitenden Reibung beträgt. Eine weitere Verminderung der Reibung wird dadurch erreicht, daß man den Wagen auf Schienen laufen läßt. [Ein Exkurs kann noch auf das Rad in physikalischer und wirtschaftlicher Hinsicht eingehen, vgl. JOHANNESSON a. a. O. 38.] Weiteres über die Reibung vgl. U. § 14.

Versuche solcher Art legen die Vermutung nahe, daß bei völliger Beseitigung der Reibung das Galileische Beharrungsgesetz in aller Strenge erfüllt sein würde. (Man vgl. aber das zur Oberstufe Gesagte § 22.)

4. Horizontaler Wurf, Parallelogramm der Bewegungen. Frage: *Was geschieht, wenn ein Körper in wagerechter Richtung in Bewegung gesetzt wird, ohne daß er sich auf einer festen Unterlage befindet?* — Versuch: Ein in horizontaler Richtung (etwa aus einer Federpistole) abgeschleuderter Körper fällt längs einer krummen Linie, der Wurfkurve zur Erde. Der Versuch gibt Anlaß zur Vermutung, daß hier eine Zusammensetzung von zwei Bewegungen stattfindet. (Auch Galilei ist auf diesem Wege zur Einsicht in das Parallelogrammgesetz gelangt.)

Erläuterung durch den Versuch mit einem Kreidestück, das an der Tafel längs eines seitlich verschobenen Lineals abwärts bewegt wird (U. § 16, ROSENBERG, I 96).

Auf den schiefen Wurf wird man an dieser Stelle nicht einzugehen brauchen. Wohl aber wird das Parallelogrammgesetz auch unter dem Gesichtspunkt der Unabhängigkeit der Bewegungen zu besprechen sein: Ist ein Körper zwei Bewegungen zugleich unterworfen, so gelangt er an denselben Ort, als wenn er die beiden Bewegungen nacheinander ausführte. Die überraschende Tatsache, daß ein horizontal geworfener und ein senkrecht fallender Körper in gleicher Zeit den Fußboden er-

reichen, läßt sich auf verschiedene Weise leicht demonstrieren.¹⁾ Die geometrische Zusammensetzung zweier Bewegungen bei veränderlichem Winkel liefert wieder ein Beispiel funktionaler Abhängigkeit (U. § 16).

Eine Zusammensetzung der Bewegungen ähnlich wie beim wage-rechten Wurf findet auch bei einer anderen historisch höchst bedeutsamen Erscheinung statt. Gegen die Umdrehung der Erde war im Zeitalter Galileis der Einwand erhoben worden, daß ein von einem Turm fallender Stein nicht am Fuße des Turmes den Boden erreichen, sondern hinter der sich drehenden Erde zurückbleiben würde. Galilei wies aus dem Beharrungsgesetz nach, daß dies nicht der Fall sei, da der Stein auch während des Fallens an der Drehung der Erde teilnehme. Er bestätigte dies auch durch Versuche, bei denen man auf einem schnell fahrenden Schiff schwere Körper von einem Mast herunterfallen ließ. Ja er machte die Voraussage, daß im Gegenteil ein durch eine große Höhe herabfallender Stein der Erde nach Osten vorauseilen müsse, diese Vorhersage fand erst 200 Jahre später eine glänzende Bestätigung durch die Versuche von Benzenberg (1802) und Reich (1832). Erst dieses Beispiel wird den Schülern einen Einblick in die Bedeutung der Galileischen Entdeckung geben, die sonst leicht wie etwas fast Selbstverständliches erscheint.

5. Bewegung und Kraft. Das Beharrungsgesetz gibt nun aber den Anlaß, noch eingehender solche Bewegungen zu betrachten, bei denen eine Abweichung sei es von der Gleichförmigkeit, sei es von der Geschwindigkeit stattfindet.

a) Zunächst der erste dieser beiden Fälle. Beispiele aus dem Leben sind das Anziehen eines Pferdes am Wagen, einer Lokomotive am Eisenbahnzuge. Die frühere Untersuchung über die Reibung (Nr. 3) hat gelehrt, daß eine gewisse Kraft nötig ist, die Reibung zu überwinden; ist diese Kraft vorhanden, so setzt der Körper eine einmal begonnene Bewegung gleichförmig fort. Soll die Bewegung beschleunigt werden, so muß die wirkende Kraft größer sein, als die zur Überwindung der Reibung erforderliche. Versuche ähnlich den bei der Reibung angestellten: ein auf Schienen laufender Wagen wird an einem Faden gezogen, der über eine Rolle geführt und am abwärts gerichteten Ende durch ein Gewicht belastet ist. (Ähnlich HÖFLERS Apparat, U. § 12, doch ist Anschluß an eine Fallmaschine nicht erforderlich.)

Aus Beobachtungen und Versuchen dieser Art lernen wir, daß Kräfte nicht bloß Zug- und Druckwirkung, sondern auch Bewegung hervorbringen können. (Zwei „Hauptwirkungen“ der Kräfte U. § 12.)

Wir machen dabei noch zwei weitere Beobachtungen: 1. Belasten wir den Wagen, so ist der in gleicher Zeit zurückgelegte Weg kürzer

1) HARTL, Z. U. VII 246; S. KRAUS, Z. U. IX 138; H. HAHN, Freihandversuche I 73. Apparat von Löwy (Verzeichnisse der Mechaniker, z. B. ERNECKE Nr. 5206).

als bei unbelastetem Wagen. Eine Kraft erteilt also einem Körper eine um so langsamere Bewegung, je größer die zu bewegendende Masse ist. (Dies dürfte für die Unterstufe genügen; weiteres Eingehen hat nur Zweck, wenn die Gleichung $k = mb$ entwickelt werden soll, also für die Oberstufe.) 2. Hört die Kraft auf zu wirken, so bewegt sich der Körper (abgesehen von der Reibung) nach dem Beharrungsgesetz, also annähernd gleichförmig weiter.

b) Eine Abweichung von der Geradlinigkeit wird im Eisenbahnbetrieb durch Schienen erreicht, die in einer Kurve geführt sind. Eine solche Bewegung nennt man zwangsläufig. Die tägliche Erfahrung lehrt uns hier die Erscheinungen der Zentrifugalkraft kennen. Das Herauspringen des Wagens aus den Schienen, das Herausgeschleudertwerden von einem Straßenbahnwagen finden aus dem Beharrungsgesetz ihre Erklärung (U. § 13 b, Nr. 5). Der Versuch mit dem am Faden gehaltenen und im Kreise geschwungenen Stein schließt sich an. Jeder Junge weiß von der Schleuder, daß der Stein in der Richtung der Tangente abfliegt. Im übrigen ist es nur verwirrend, von einer Zentralkraft zu reden und etwa zu sagen: Einen an einem Faden gehaltenen Stein zwingt man dadurch zur Kreisbahn, daß man den Stein mit einer konstanten Zugkraft an sich heranzieht. Denn erstlich findet die Kreisbewegung auch statt, wenn man den Faden am Zentrum festmacht und den Stein durch einen einmaligen Anstoß (natürlich auf wagerechter Unterlage) in Bewegung setzt, und zweitens läßt man in jenem Falle die Zugkraft nicht konstant, sondern periodisch auf den Faden wirken. (Vgl. Abschnitt III § 25.)

Man begnüge sich vielmehr den zentrifugalen Zug oder Druck zu konstatieren, der bei einer solchen zwangsläufigen Kreisbewegung auftritt; auch an Wagenräder, an zerspringende Schwungräder ist zu erinnern. Die Erklärung, die auf infinitesimalen Betrachtungen beruht, läßt sich auf der Unterstufe nicht streng geben. Die üblichen elementaren Ableitungen sind sämtlich unstreng, auch die von GRIMSEHL (L. f. R. 55) versuchte. Zum Verständnis dürfte es hier ausreichen, daß der Körper, da er sich von der Peripherie zu entfernen strebt, auf die Verbindung mit dem Zentrum beständig einen Zug oder auf die kreisförmigen Schienen einen Druck ausübt. Eben diesen Zug oder Druck nennt man Zentrifugalkraft.

Von den Versuchen mit der Schwungmaschine sind namentlich hier zu empfehlen: das Abfliegen von Kugeln, das Heben eines an der Achse angebrachten Gewichtes, der Zentrifugalregulator, ein Modell der Zentrifugaleisenbahn.

6. Das Pendel. An die Betrachtung der zwangsläufigen Bewegung und des im Kreise geschwungenen Körpers schließt sich naturgemäß die des Pendels an, auf die schon beim Schwerpunkte vorbereitet worden ist.

Das Pendel ist nicht als ein an einem Faden frei aufgehängter Körper, sondern als ein stabil aufgehängter Körper zu bezeichnen, der unter dem Einfluß der Schwere Schwingungen ausführen kann. Auch die Fiktion des mathematischen Pendels sollte vermieden werden, vielmehr ist an den ganz realen Spezialfall des Fadenpendels anzuknüpfen (denn die „Vernachlässigung“ des Fadengewichts kommt erst für die mathematische Herleitung der Formel in Betracht).

An eine möglichst genaue Beschreibung des Schwingungsvorgangs schließt sich die *Frage*: *Wie kommen die Schwingungen des Pendels zustande?* Hier ist die bekannte Zerlegung der Schwerkraft vorzunehmen, aus der hervorgeht, daß die wirksame Kraftkomponente um so größer ist, je größer der Ausschlagswinkel, und daß sie beim Sinken der Pendelkugel beschleunigend, beim Aufsteigen verzögernd wirkt.

Durch Versuche werden nun die drei „Erfahrungssätze“ über das Fadenpendel ermittelt. 1. Die annähernde Unabhängigkeit der Schwingungsdauer von der Schwingungsweite wird aus der größeren Komponente erklärlich, die bei größerem Ausschlagswinkel wirkt. 2. Die Unabhängigkeit vom Stoff und vom Gewicht wird verständlich durch die Parallele mit dem entsprechenden Fallgesetz. 3. Der Zusammenhang von Schwingungsdauer und Pendellänge, dessen Begründung als Problem der Oberstufe vorbehalten bleibt. GALILEIS Verdienst besteht nicht nur darin, daß er den dritten Pendelsatz entdeckt hat, sondern vor allem darin, daß er eine Erklärung dafür aus dem Fallgesetze gegeben hat. GRIMSEHL (L. f. R. 20) gibt die GALILEISCHE Erklärung, die indessen die Kenntnis der Bewegungsgesetze für die schiefe Ebene zur Voraussetzung hat.

Einiges über das physische Pendel und die Pendeluhr (U. § 43, GRIMSEHL, L. f. R. § 10) schließt sich hier noch an. Die Veränderung der Schwingungszeit des Uhrpendels durch Verkürzen und Verlängern sollte nicht übergangen werden.

Das Pendel gibt endlich noch Anlaß zu einer prinzipiellen Erweiterung des Arbeitsbegriffs. Die zum Heben der Pendelkugel auf eine Höhe h über der tiefsten Lage erforderliche Arbeit ist, nach Analogie der schiefen Ebene, darzustellen durch das Produkt aus dem Gewicht der Pendelkugel und der Höhe h . Die aufgewendete Arbeit geht scheinbar wieder verloren, wenn die Kugel zur Gleichgewichtslage herabsinkt. Aber die Kugel hat nun die Fähigkeit erhalten, auf der anderen Seite wieder zu gleicher Höhe zu steigen. Diese Fähigkeit besitzt die Kugel vermöge der erlangten Geschwindigkeit. Man schreibt der Kugel daher eine Bewegungsenergie zu, und versteht dabei unter „Energie“ nichts anderes als eben die Fähigkeit Arbeit zu leisten. Die Bewegungsenergie äußert sich auch in der „Wucht“ mit der die bewegte Kugel gegen ein Hindernis stößt (ähnlich die Bewegungsenergie eines frei herabgefallenen Körpers). Da die Kugel zur gleichen Höhe emporsteigt, so vermag die

Bewegungsenergie eine Arbeit zu leisten, die der vorher aufgewendeten Arbeit gleich ist: oder die aufgewendete Arbeit erscheint in der Bewegungsenergie wieder.

Nun kann man aber auch die Arbeit, die in der gehobenen Kugel steckt, als Energie bezeichnen (da der gehobenen Kugel ebenfalls die Fähigkeit zukommt, Arbeit zu leisten). Wir haben also am Pendel den einfachsten Fall der Energieverwandlung und der Energieerhaltung vor uns.

Wo die Arbeit bleibt, die beim Herabfallen einer Bleikugel auf ein Steinpflaster verschwindet, mag schon hier angedeutet werden, da die Erwärmung einer solchen Kugel leicht nachweisbar ist. Auch beim Flachhämmern eines Eisendrahtes ist die Erwärmung durch die verschwundene Bewegungsenergie beträchtlich.

7. Der Stoß. Ein Beispiel für die Aufhebung und das Übertragen von Bewegungsenergieen liefert der Stoß, der sich um so mehr als Abschluß der Mechanik fester Körper auf der Unterstufe eignet, als er auf der Oberstufe zumeist aus Mangel an Zeit nicht mehr behandelt zu werden pflegt.

Zum unelastischen Stoß, der uns hier am meisten interessiert, nimmt man am besten (nach FR. C. G. MÜLLER, T. 90) Bleikugeln, die man bifilar aufhängt.

1. Versuch: Gleiche Massen aus gleichen Höhen (also mit gleichen Geschwindigkeiten) gegeneinanderstoßend, kommen beide zur Ruhe.
2. Zieht man nun die eine Masse seitwärts und läßt sie gegen die andere ruhende fallen, so gehen beide mit geringerer Geschwindigkeit weiter.

Daß sich der zweite Versuch aus dem ersten und sogar die Größe der resultierenden Geschwindigkeit ableiten läßt, hat zuerst HUYGENS durch eine klassische Betrachtung gezeigt. Die Geschwindigkeit der beiden Kugeln seien $+v$ und $-v$. Man erteile beiden noch eine gemeinsame Geschwindigkeit $+v$ (HUYGENS denkt dazu den Versuch auf einem Boote ausgeführt, vgl. MACH, *M*(4), 346 ff.), dann erhält die erste Kugel die Geschwindigkeit $2v$, die zweite die Geschwindigkeit 0. Da sich aber $+v$ und $-v$ im vorigen Versuch aufgehoben, so ist die Geschwindigkeit beider Kugeln nach dem Stoß $= v$, d. h. halb so groß wie die Geschwindigkeit der ersten Kugel vor dem Stoß. Hier wird also die Bewegungsenergie z. T. als solche vernichtet, zum Teil übertragen. Auch der elastische Stoß ist von Ertrag für die Einsicht in die Natur der Bewegungsenergie.

1. Der Fall einer Elfenbeinkugel auf eine berußte Eisen- oder Marmorplatte zeigt die elastische Einbiegung der Kugel, ihr Aufsteigen die (nahezu) unveränderte Wiederherstellung der Bewegungsenergie. Besonders schön zeigen Stahlkugeln (Fahrradlagerkugeln) dies Aufsteigen.

2. Der Stoß zweier gleicher Elfenbein- (oder Stahl-)kugeln aus gleichen Höhen zeigt den Austausch der beiden Bewegungsenergien (die Kugeln sind zwei durcheinander hindurchschwingenden Pendeln vergleichbar).
3. Der Stoß einer bewegten gegen eine ruhende Kugel zeigt den gänzlichen Übergang der Bewegungsenergie von der bewegten Kugel auf die ruhende. Die Erklärung dieses Versuchs aus dem vorigen hat ebenfalls HUYGENS gegeben (MACH, a. a. O.).

Mit diesen vorläufigen Feststellungen über die Bewegungsenergie kann die Mechanik fester Körper auf der Unterstufe abschließen.

§ 10. Hydromechanik.

Gegen die noch heute vielfach übliche deduktive Behandlung der Hydrostatik habe ich mich bereits in einem 1893 erschienenen Aufsatz¹⁾ gewendet.

Man pflegt das Prinzip der gleichmäßigen Druckfortpflanzung durch einen oft nur in Gedanken ausgeführten Versuch zu erläutern und daraus die hydrostatischen Gesetze abzuleiten. Doch ist die deduktive Behandlung aus den früher angeführten allgemeinen Gründen für die Unterstufe überhaupt nicht angemessen. Auch historische Gründe sprechen keineswegs für die Beibehaltung des bisherigen Lehrverfahrens. Aus dem schon erwähnten Aufsatz seien nachstehende Ausführungen hier mitgeteilt:

Die bisherige Lehrdarstellung rührt in ihren Grundzügen von PASCAL her und findet sich in der nach seinem Tode 1663 veröffentlichten, angeblich aus dem Jahre 1653 herrührenden Abhandlung „*De l'équilibre des liqueurs*“. Aber der Entdecker des Prinzips, ebenso wie des sogenannten PASCALSchen Paradoxons ist nicht PASCAL, sondern STEVIN, der in seinem 1634 zu Leyden erschienenen Hauptwerk eine völlig klare Herleitung der hydrostatischen Gesetze auf ganz anderer Grundlage als der PASCALSchen gegeben hat. PASCAL hat durch seine deduktive Darstellung die Physik der ganzen Folgezeit beeinflusst, während die originellen Überlegungen STEVINS fast unbekannt geblieben sind.

Es läge nun nahe, für einen mehr physikalisch gearteten Lehrgang der Hydrostatik auf die Gedanken STEVINS zurückzugehen. Diese stützen sich größtenteils auf die Verwendung eines eigenartigen Kunstgriffs, der Überlegung nämlich, daß in einer im Ruhezustande befindlichen Flüssigkeit die Ruhe nicht gestört wird,

1) Z. U. VI 273.

wenn beliebige Teile der Flüssigkeit starr gedacht oder durch feste Wände abgegrenzt werden.¹⁾ Auf diese Weise gelangt STEVIN mit Leichtigkeit zu dem Satze von den kommunizierenden Röhren und zu dem Gesetze über die Unabhängigkeit des Bodendrucks von der Gestalt des Gefäßes. Indessen ist dieser Gedanke trotz seiner wundervollen Einfachheit doch nicht für den Anfangsunterricht, zum mindesten nicht für die grundlegenden Betrachtungen geeignet. Er setzt ein zu feines Verständnis statischer Verhältnisse voraus, als daß er im Anfange, wo erst physikalische Anschauungen gewonnen werden sollen, benutzt werden dürfte; auch hat er zu sehr den Charakter eines geistreichen Einfalls und ist daher zu wenig geeignet, in das eigentliche physikalische Denken einzuführen. Im Laufe des Unterrichts wird man indes mit Vorteil an diesen STEVINSchen Gedanken erinnern können.

Für einen der Unterstufe gemäßen induktiven Lehrgang werden vielmehr die einfachsten, dem Gesichtskreis der Schüler am nächsten liegenden hydrostatischen Beobachtungen zum Ausgang zu nehmen sein. Ich habe a. a. O. einen solchen Lehrgang mitgeteilt (vgl. auch U. § 44ff.) und gebe nachstehend in Kürze den Gedankengang wieder, der in einer fortgesetzten Analyse der beobachteten Erscheinungen besteht.

Lehrgang.

1. Beobachtung des ruhenden Wassers in einem Gefäß. Feststellung der wagerechten Oberfläche. (Nebenbeobachtung des Anstiegs an den Rändern und Hinweis auf das Problem der Kapillarität.)

2. Eintauchen einer beiderseits offenen, oben mit dem Finger verschlossenen Röhre in Wasser; Aufsteigen des Wassers nach Lüftung des Fingers.²⁾ Schluß auf einen nach oben gerichteten Druck. Tieferes Einsenken der Röhre lehrt die Zunahme des Drucks mit der Tiefe unter dem Wasserspiegel kennen.

3. Frage: Herrscht ein solcher Druck im Wasser auch unabhängig von dem Umstande, daß die verschlossene Röhre plötzlich geöffnet wird? Versuch mit dem unten durch eine angedrückte Platte verschlossenen Glaszylinder. Schluß auf den Aufdruck im Innern der Flüssigkeit. Die Größe des Aufdrucks wird (annähernd) durch Einfüllen von (gefärbtem) Wasser in den Zylinder erkannt. Weitere Folgerung: Auch bei nicht verschlossenem Zylinder muß ein solcher Aufdruck vorhanden sein, da sonst die Wassermasse im Zylinder nicht getragen

1) Vgl. MACH, M. (4) 88 ff.

2) Vgl. im Abschnitt Vorgebrieffe (58): Körperlichkeit der Luft.

würde. Ja auch an einer beliebigen Stelle in der freien Flüssigkeit muß ein von unten wirkender Druck vorhanden sein, der mit einem gleich großen, von oben nach unten wirkenden Druck im Gleichgewicht steht.

4. Den nach unten wirkenden Druck kann man direkt nachweisen, indem man eine am unteren Ende zweimal rechtwinklig umgebogene Röhre verwendet.

5. Eintauchen einer nur einmal rechtwinklig kurz umgebogenen Röhre lehrt, daß in der Tiefe auch in horizontaler Richtung ein Druck stattfindet, dessen Größe wiederum durch das Gewicht einer bis zum Wasserspiegel reichenden Flüssigkeitssäule gemessen wird.

6. Ein Flüssigkeitsteilchen im Innern der Flüssigkeit wird einem von allen Seiten her wirkenden Druck ausgesetzt sein, der mit der Tiefe zunimmt (Versuch U. § 88). Begriff des hydrostatischen Druckes oder Innendruckes. (An dies Ergebnis kann sich der Hinweis auf das Problem der Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten schließen. Der Druck von 10 m Wasserhöhe bewirkt eine Kompression um $\frac{1}{20000}$ oder 50 Millionstel des Volumens.)

7. Die Größe des hydrostatischen Druckes auf ein beliebiges Flächenstück im Innern der Flüssigkeit ist aus seiner Tiefe unter dem Wasserspiegel berechenbar. Als spezifischer Druck oder Druck schlechthin soll künftig immer der Druck pro qcm bezeichnet werden. Dann ergibt sich: Der Druck ist an allen Stellen einer wagerechten Ebene, die in beliebiger Tiefe durch das Innere einer Flüssigkeit gelegt ist, gleich groß.

8. Der Druck auf den Boden eines Gefäßes (zunächst senkrechte Wände vorausgesetzt) ist auf dieselbe Weise bestimmt. Der Gesamtdruck auf den Boden soll Bodendruck heißen. Gesetz des Bodendruckes.

9. Frage: Wie verhält es sich mit dem Bodendruck in Gefäßen, deren Wände nicht senkrecht sind? Die Frage läßt sich (ohne zunächst den PASCALSchen Versuch anzustellen) durch folgende

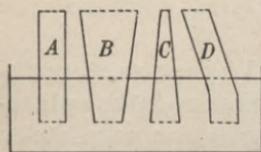


Fig. 2.

Überlegung beantworten: Man senke mehrere unten offene Gefäße mit gleich großer Bodenöffnung aber verschieden gestalteter Wandung (PASCALSche Gefäße) in eine mit Wasser gefüllte Wanne bis zu gleicher Tiefe ein (Fig. 2). Das Wasser wird in allen Gefäßen die gleiche Höhe haben wie die des Wasserspiegels in der Wanne.

Nach den früheren Feststellungen (Nr. 2, 3, 7) ist aber der an den Bodenöffnungen herrschende Aufdruck bei allen Gefäßen gleich groß. Folglich muß auch der Druck der in den Gefäßen befindlichen Flüssigkeit an der Bodenöffnung gleich groß sein. Darin kann keine Änderung eintreten, wenn man den Boden durch eine Bodenplatte schließt. Hiermit ist das PASCALSche Paradoxon gefunden, das besser nach STEVIN das

STEVINSche Paradoxon genannt wird. Es wird durch den bekannten Versuch nur bestätigt.¹⁾

10. Der eben angestellte Versuch läßt indessen noch immer das Erklärungsbedürfnis unbefriedigt. Bei dem nach oben erweiterten Gefäß *B* sieht man wohl noch ein, daß der Druck der senkrecht über den Seitenwänden befindlichen Flüssigkeit von diesen getragen wird. Zum Verständnis des Sachverhalts bei dem nach oben verengten Gefäß verhilft am besten folgende Abänderung des Versuchs. Man setze auf das zylindrische Gefäß dicht schließend ein engeres Rohr auf und stelle fest, daß der Bodendruck auf das doppelte wächst, wenn man zunächst das Gefäß bis zum oberen Rande gefüllt hat und nunmehr auch die Ansatzröhre noch bis zu gleicher Höhe füllt. Demnach wirkt der Druck der aufgesetzten Flüssigkeitssäule *efgh* (Fig. 3) auf den Boden *ab* gerade so, als wenn auf diesem eine überall gleich weite Säule stände, die bis zur Höhe von *gh* reichte. Man muß hieraus schließen, daß der auf jedes qcm von *ef* ausgeübte Druck sich gleichmäßig auf jedes qcm der Bodenfläche *ab* fortpflanzt.

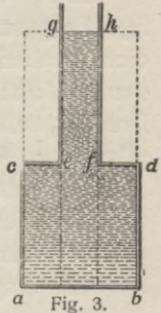


Fig. 3.

Die Schüler gelangen so gleichsam zur Entdeckung des Gesetzes der gleichmäßigen Druckfortpflanzung, das nun noch durch andere Versuche erläutert werden mag.²⁾ Will man den Versuch über die gleichmäßige Druckfortpflanzung in befriedigender Form anstellen, so kommt nur der Apparat von RECKNAGEL (Z. U. VII 7, ROSENBERG I 120, MÜLLER 96) in Betracht. Die von SCHWÄLBE (Z. L. u. B., III 1) angegebene Versuchsanordnung eignet sich mehr zu einem Schülerversuch.

Hiernach ist es auch leicht, den Sachverhalt an dem nach oben verengten Gefäß selbst zu verstehen (Fig. 4). Alle Stellen des Bodens zwischen *m* und *n* erfahren unmittelbar den vollen Druck, der der Höhe *mc* oder *nd* entspricht. Die Stelle *o* dagegen erfährt unmittelbar einen Druck entsprechend der Druckhöhe *or*, dazu aber noch den Druck einer Säule von der Höhe *qd*, insgesamt also einen Druck, der der Höhe *nd* entspricht.

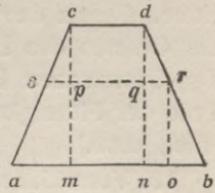


Fig. 4.

1) Unter der großen Zahl von Apparaten hierfür empfiehlt ROSENBERG (I 122) am meisten den von HARTL (Z. U. IX 117); MÜLLER (T. 101) gibt dem (jedoch nicht von Pascal herrührenden) Apparat mit andrückbarer Bodenplatte den Vorzug, ich schließe mich der letzteren Ansicht an mit dem Vorbehalt, daß der die Platte andrückende Hebel ein gleicharmiger ist, so daß man die Größe des Bodendrucks unmittelbar an den aufgelegten Gewichtstücken erkennt. Der ursprünglichen PASCALSchen Form entspricht am meisten der von STEFLITSCHek in Wien angefertigte Apparat, den HÖFLER XVI 257 beschreibt.

2) Vgl. PFAUNDLER, Physik des tägl. Lebens, S. 104.

11. Denkfrage: Wie kommt es, daß das Gewicht eines Gefäßes von der Form Fig. 3 oder 4 durch den größeren Bodendruck nicht vergrößert erscheint? — Antwort: Der Aufdruck gegen die Wandstücke ce und fd kommt in Abzug.

12. An den Versuch (Fig. 3) schließt sich noch eine weitere wichtige Folgerung, wenn man die Flüssigkeitssäule $efgh$ durch einen dicht schließenden Kolben mit darauf lastendem Gewichtstück ersetzt denkt: Auch für einen gegen ein bewegliches Wandstück wirkenden Druck („äußerer“ Druck) gilt das Gesetz der gleichmäßigen Druckfortpflanzung. Anwendung auf die hydraulische Presse.

Das Auffällige der verstärkten Wirkung an der hydraulischen Presse verschwindet vollends, wenn man die Produkte von Kraft und Weg auf beiden Seiten vergleicht. Das Gesetz der Erhaltung der Arbeit bei der Kraftübertragung findet sich auch hier bestätigt.

13. Anwendung des Gesetzes der Druckfortpflanzung auf den Seitendruck (unter Bezugnahme auf Nr. 5). Demonstration durch ein an eine tubulierte Flasche angesetztes Wasserstandsrohr; Ausströmen aus seitlichen Öffnungen (Problem des Flüssigkeitsstrahls!), SEGNER'S Wasserrad (Hinweis auf die Turbinen in Nr. 21). Die vollständige Erklärung des Rückstoßes kann hier noch nicht gegeben werden, doch ist ein Hinweis auf den hydrodynamischen Charakter der Erscheinung am Platze. Übergang zu den kommunizierenden Gefäßen.

14. Ein weiteres und ein engeres Rohr werden durch einen Schlauch verbunden und mit Wasser gefüllt. Beim Heben und Senken der Röhren gegeneinander bleiben die Oberflächen der Flüssigkeit stets in gleicher Höhe. Gesetz der kommunizierenden Röhren. Zurückführung auf die Gesetze des Boden- und Seitendrucks. (Hier auch ev. Einfügung der STEVIN'Schen Betrachtung mit Hilfe des Starrwerdens beliebiger Teile der Flüssigkeit, was wieder zu dem archimedischen Gesetz überleiten kann.)

15. Verschieden schwere Flüssigkeiten in den Schenkeln eines U-förmigen Rohres. Gesetz der Höhen unter scharfer Präzisierung, von welcher Stelle aus die Höhen zu messen sind. („Die lotrechten Abstände beider Flüssigkeitsspiegel von der gemeinsamen Grenzfläche verhalten sich umgekehrt wie die spezifischen Gewichte oder die Dichten der Flüssigkeiten.“)

16. Problem des Schwimmens. Daß ein auf dem Wasser schwimmender Körper an seiner Unterseite einen Aufdruck erfährt, folgt aus den Gesetzen des hydrostatischen Druckes. Wann wird ein schwimmender Körper gerade ganz in das Wasser eintauchen oder an einer beliebigen Stelle im Innern des Wassers schweben? Offenbar wenn sein Gewicht gleich dem des von ihm verdrängten Wassers ist, denn dann wird er ebenso wie wenn er aus Wasser bestände, von dem umgeben-

den Wasser getragen. — Was ist zu erwarten, wenn der Körper schwerer als Wasser ist? — Archimedisches Gesetz vom Gewichtsverlust eines in Wasser eingetauchten Körpers. Bestätigung durch den Versuch mit Hohlzylinder und Vollzylinder an der Wage. Nicht überflüssig ist auch der Versuch mit einem unregelmäßig gestalteten Körper unter Auffangen des verdrängten Wasser in einem graduierten Gefäß (MÜLLER 104, ROSENBERG I, 128). Begriff des Auftriebs. Nun erst die Erzählung von der Entdeckung durch ARCHIMEDES. (Der berühmte Versuch mit dem Kranze, nicht Krone des HIERO beruhte nicht auf diesem Gesetz, sondern auf dem Umstande, daß gleich schwere Körper aus verschiedenen dichtem Stoff verschieden große Wassermengen verdrängen.)

17. Da bei dem Versuche Nr. 16 ein Teil des Gewichts des Körpers von dem umgebenden Wasser getragen wird, so muß das Gewicht des Wassers um den Gewichtsverlust des eingetauchten Körpers vergrößert erscheinen. Versuch mit dem auf eine Tafelwage gestellten Gefäß.¹⁾

Genauere Erklärung aus dem Steigen der Flüssigkeit. Dies ist angebrachter als die Heranziehung des in diesem Fall völlig formelhaften Newtonschen Prinzips der Aktion und Reaktion.

Es lohnt sich auch noch zu zeigen, daß auch ein starr an einem Stativ befestigter Körper (oder der Finger der Hand) in das Wasser getaucht eine Vermehrung des Gefäßgewichts hervorruft. Hier hat das Stativ bzw. der Finger dem entsprechenden Aufdruck das Gleichgewicht zu halten, sie wirken also so, als ob an ihrer Stelle sich eine bis zur Oberfläche reichende Flüssigkeitsmasse befände.

18. Der zweite archimedische Satz, für das Schwimmen: Ein Körper der leichter ist als Wasser, sinkt so tief ein, daß das Gewicht des verdrängten Wassers gleich dem ganzen Gewicht des Körpers ist. Versuch durch Wasserverdrängung aus einem Ausflußgefäß.²⁾ Die weiteren Sätze über das Schwimmen siehe U. § 54.

Es läßt sich auch vorhersagen, daß der Auftrieb bei einem Körper der leichter als Wasser ist, nicht wirken kann, wenn der Körper fest auf dem Boden des Gefäßes aufliegt. Versuche: Kork in Quecksilber (MÜLLER 104); Eisenwürfel in Quecksilber (ROSENBERG I 132).

19. Bestimmung des spezifischen Gewichts fester Körper mit der hydrostatischen Wage.

20. Bestimmung des spezifischen Gewichts flüssiger Körper mit dem Skalenaräometer.

21. Arbeitsleistung des fließenden Wassers. Dieses Kapitel ist auch auf der Unterstufe als Abschluß der Hydromechanik sehr am Platze,

1) Versuchsanordnungen bei ROSENBERG I, 130; Verbindung dieses Versuchs mit dem archimedischen unter Benutzung einer Federwage bei ROSENBERG ebd., mit Hilfe einer Briefwage bei GRÜNFELD, Z. U. XXIV, 354.

2) ROSENBERG I, 130.

da es den in der Mechanik fester Körper gewonnenen Begriff der Bewegungsenergie erweitert und in einer praktisch überaus wichtigen Anwendungsart vor Augen führt. Die unter- und überschlächtigen Wasserräder sind durch Abbildungen oder Modelle zu erläutern. Bei den ersteren wirkt das Betriebswasser durch seine Stoßkraft, bei den letzteren hauptsächlich durch sein Gewicht.

Bei den horizontalen Wasserrädern oder Turbinen wird die Arbeit, die einer gegebenen Fallhöhe entspricht, in Bewegungsenergie der Schaufelräder umgesetzt, MÜLLER (T., S. 111) empfiehlt zur Demonstration der mit einer Hochdruckwasserleitung zu erzielenden Arbeitsleistung eine Rabesche Turbine, die für sehr mäßigen Preis von den Mechanikern geliefert wird.

§ 11. Aeromechanik.

Über die Notwendigkeit, auch in der Aeromechanik den bisher üblichen dogmatisch-deduktiven Lehrgang durch einen induktiven zu ersetzen, habe ich mich bereits in einem Aufsätze von 1902 ausgesprochen.¹⁾ Folgende Ausführungen daraus mögen hier nochmals eine Stelle finden.

Wie in der Hydrostatik der PASCALSche Versuch der Druckfortpflanzung, so wird hier vielfach der Versuch TORRICELLIS an die Spitze gestellt und die ganze Aerostatik wesentlich als ein Anwendungsgebiet für die hydrostatischen Gesetze behandelt. Daß hier eigenartige Probleme auftreten, die eine gesonderte Untersuchung erfordern, wird kaum beachtet, noch viel weniger den Schülern zum Bewußtsein gebracht. Über ein Gebiet, das zu den interessantesten der ganzen Physik gehört, wird mit mangelhaften Begründungen und lose aneinander gereihten Versuchen rasch hinweggegangen, obwohl gerade hier sich Gelegenheit bietet, das Verfahren der Physik an einfachen und sozusagen klassischen Beispielen klarzulegen. Auch eine systematische Anordnung der Luftpumpenversuche, wie SCHWALBE (Z. U. XII 328) sie vorgeschlagen hat, kann tiefergehenden methodischen Forderungen nicht genügen. Man muß vielmehr sich bemühen, den Problemen nachzugehen, die sich schon bei den ersten Versuchen aufdrängen und deren natürliche Aufeinanderfolge sich bei Beachtung des historischen Ganges der Entdeckungen leicht ergibt. Bei einer solchen Behandlung treten insbesondere auch die Ver-

1) Ein Lehrgang der Aerostatik, Z. U. XV 321; zu vgl.: Über Grundfragen des physikalischen Unterrichts, U. Bl. 1901 Nr. 3 und 4.

dienste OTTO VON GUERICQUES in das richtige Licht, denen eine viel zentralere Stellung in der Aerostatik gebührt, als ihnen gemeinhin eingeräumt ist.

In der nun folgenden Übersicht des Lehrganges sind nur die hauptsächlichsten Fragestellungen angegeben und die Versuche angedeutet, die als Leitversuche gelten können.

Der Lehrgang schließt an die Feststellungen an, die bereits in dem Abschnitt über physikalische Vorbegriffe erledigt sind. Die Fragen: „Ist die Luft ein Körper“, und „Hat die Luft Gewicht“ sind bereits dort beantwortet. Noch einmal aufzunehmen ist aber die Zusammendrückbarkeit der Luft.

Lehrgang.

1. Durch welche besonderen Eigenschaften unterscheidet sich die Luft von den anderen (festen und flüssigen) Körpern? Sie ist unsichtbar (aber fühlbar als Wind); sie hat keine selbständige Gestalt und ist hierin den Flüssigkeiten ähnlich. Um dies zu demonstrieren wird Luft aus einem Gummiballon in einen mit Wasser gefüllten Zylinder gepreßt. Wie bei den Flüssigkeiten ist hieraus auf die leichte Verschiebbarkeit der Teilchen zu schließen. Der Gebrauch des Gummiballons leitet aber zu der Vermutung über, daß die Luft zusammendrückbar ist. Dies wird durch den Versuch mit dem Kompressionszylinder bestätigt. Dabei erweist die Luft sich als elastisch, d. h. sie nimmt nach dem Aufhören des Druckes ihr früheres Volumen wieder an. Auch der kartesianische Taucher findet hier gut seine Stelle und kann zu Denkfragen sowie zur Wiederholung hydrostatischer Gesetze benutzt werden.

2. An den früheren Nachweis des Gewichtes der Luft schließt sich jetzt die Frage: „Übt die Luft einen Druck aus?“ Dies ist nicht selbstverständlich, wie denn noch GALILEI die Frage verneinte, da ja Luft in Luft, zufolge dem archimedischen Prinzip, nicht schwer sei.

Den entscheidenden Nachweis für den Druck der Luft hat OTTO VON GUERICKE durch seine berühmten Luftpumpenversuche erbracht. Entgegen der damals allgemein herrschenden Meinung, daß es einen leeren Raum nicht geben könne, hatte sich GUERICKE zur Aufgabe gestellt, einen leeren Raum herzustellen, indem er die Luft aus einem Gefäße auspumpte. Seine „Luftpumpe“ war nach dem Vorbilde der schon aus dem Altertum bekannten Wasserpumpen konstruiert. Man muß hier eine kurze Beschreibung und Demonstration der Wasserpumpen geben, die Erklärung dagegen einstweilen als Problem stehen lassen. Es empfiehlt sich auch hier auf den „horror vacui“ hinzuweisen, der als eine brauchbare Erklärung gelten mußte, so lange keine bessere gefunden war.

Auf die Beschreibung der Luftpumpe GUERICQUES folge die Demonstration einer einstiefeligen Hahnluftpumpe und der Nachweis des Luftdruckes durch das Haften eines Rezipienten am Teller der Pumpe, die Zurückbewegung des herausgezogenen Kolbens, das Zersprengen einer Blase, die Magdeburger Halbkugeln. Von dem berühmten Regensburger Versuch von 1654 sollte möglichst ein Originalbild vorgezeigt werden.

Die Frage, wie sich die Luft beim Herausziehen des Kolbens verhält, bleibe zunächst noch unerörtert. (Auch GUERICKE hat dies lange Zeit nicht ergründet, vielmehr geglaubt, daß die Luft vermöge ihrer Schwere aus dem Rezipienten in den Stiefel hinabsinkt.) Das Entweichen der Luft während des Pumpens ist leicht durch Salmiaknebel, Rauch oder Papierschnitzel zu zeigen.

Daß wirklich die Luft wenigstens zum größten Teil aus dem Rezipienten entfernt ist, zeigt man durch das Geräusch des Wiedereintretens der Luft beim Öffnen des Hahns, oder durch Einsteigenlassen von Wasser in ein mit Hahn versehenes Gefäß.

3. Hat der Druck der Luft eine meßbare Größe? GUERICKE suchte die „Kraft des Luftdrucks“ durch Anhängen von Gewichtstücken an den Kolben eines Rezipienten oder an die Magdeburger Halbkugeln zu messen. (*Exper. Magdeb. Lib. III* Fig. 13, 14, 15; vgl. U. § 59.) WEINHOLD verwendet hierbei einen Flaschenzug. (Dem.₃ 183). Eine genauere Bestimmung wird sich erst weiterhin (Nr. 5) ergeben.

4. Wie erklärt sich nunmehr das Steigen des Wassers im Saugrohr einer Wasserpumpe? Zur Vereinfachung der Erscheinung bediene man sich einer beiderseits offenen Glasröhre mit dichtschließendem Kolben (U. § 57). Es ist nach dem Vorhergegangenen der Druck der Luft, der auf die freie Oberfläche des Wassers wirkt, als Ursache ersichtlich. Hieraus erklärt sich auch, daß das Wasser in einem umgekehrten, gefüllten Zylinder nicht herabsinkt, wenn man den Zylinder über die Wasserfläche hebt oder auf die Brücke einer pneumatischen Wanne stellt. Freihandversuch mit einem Trinkglase!

Da die Größe des Luftdrucks begrenzt ist (Nr. 3), so wird auch die Steighöhe des Wassers in den Pumpenrohren begrenzt sein (Beobachtung der Brunnenmacher schon im Altertum!). Zu GALILEIS Zeiten wußte man, daß die Steighöhe höchstens 10 m beträgt. GALILEI schloß hieraus, daß Quecksilber nur bis zur Höhe 10 m : 13,6 oder ~ 76 cm steigen würde; es müsse also möglich sein, auf diese Weise ein „Vakuum“ herzustellen. Aber erst TORRICELLI (1643) stellte den Versuch an und gab auch zuerst die richtige Erklärung.

5. TORRICELLIS Versuch und die Messung des Luftdrucks. Der Versuch ist so fundamental, daß man nicht zu rasch über ihn hinweggehen sollte. Die Analogie des Luftdruckes mit dem Wasserdruck kann

durch einen Versuch verdeutlicht werden, indem ein oben offenes Rohr in Quecksilber getaucht wird, das sich auf dem Boden eines tiefen, nach dem Einsenken der Röhre mit Wasser zu füllenden Gefäßes befindet. Dem aus dem Wasser herausragenden Rohr entspräche in der Atmosphäre ein bis über deren Grenze hinausragendes offenes Rohr; diesem gleichwertig ist das geschlossene TORRICELLISCHE Rohr, da es die Einwirkung eines von außen kommenden Druckes ausschließt. Die Analogie mit dem Wasserdruck tritt auch darin hervor, daß beim Neigen des Rohres die vertikale Höhe des Quecksilbers die gleiche bleibt und daß diese Höhe von der Gestalt und Weite des Rohres unabhängig ist. VIOLLE (Lehrbuch I, 2, 745) empfiehlt, eine ganze Reihe von Röhren verschiedener Gestalt anzuwenden, um dies wichtige, den hydrostatischen Verhältnissen entsprechende Gesetz zu verdeutlichen.

Als Parallelversuch nach dem Vorbild der kommunizierenden Röhren ist noch der Versuch mit einem Heberbarometerrohr geeignet oder mindestens das Vorzeigen eines Heberbarometers, da dies für einen späteren Versuch von Nutzen ist. Zu erinnern ist auch an das Wasserbarometer von O. v. GUERICKE.¹⁾ Aus dem Versuch von TORRICELLI ergibt sich die Größe des Luftdrucks zu 1,033 kg auf 1 qcm.

6. Wie kann man unmittelbar beweisen, daß beim TORRICELLISCHEN Versuch der Luftdruck als Ursache wirksam ist? (Einen solchen Beweis hat TORRICELLI noch nicht geliefert.)

a) Man zeigt, daß bei Aufhebung der Ursache auch die Wirkung aufhört. (*Cessante causa cessat effectus.*) PASCAL war der erste, der vor der Erfindung der Luftpumpe die Notwendigkeit eines solchen Nachweises erkannt hat. (*Expérience du vuide dans le vuide*, vgl. MACH M.₄ 117.) BOYLE hat sich zuerst der Luftpumpe für diesen Nachweis bedient.

Versuch: Die TORRICELLISCHE Versuchsanordnung, am besten in der Heberrohrform, wird in den Rezipienten der Luftpumpe gebracht und die Luft ausgepumpt. Die Quecksilbersäule sinkt (nahezu) bis zum Niveau des Gefäßes oder des offenen Schenkels.²⁾ Das schon hier auftretende Problem, wie die Höhe der Quecksilbersäule mit dem Verdünnungsgrad zusammenhängt, wird noch zurückgestellt.

1) Im physikalischen Institut zu Breslau ist ein solches Barometer dauernd aufgestellt.

2) VIOLLE (Lehrbuch I, 2, 743) empfiehlt in den Hals eines tubulierten Rezipienten zwei Heberbarometer einzusetzen, deren eines den offenen Schenkel im Innern, das andere außerhalb hat, während der längere Schenkel in eine wieder abwärts gebogene Röhre von gleicher Länge ausläuft, deren Ende in das Innere des Rezipienten reicht (LEYBOLD Nr. 929). Man vgl. auch DUCRUE (Z. L. u. B. II, 32), der das Gefäß beim TORRICELLISCHEN Versuch mit Ansatzrohr und Hahn versieht, so daß die Luft über dem Quecksilber ausgepumpt werden kann.

b) Der ursächliche Zusammenhang kann auch durch das Prinzip der korrespondierenden Veränderungen (wie STUART MILL es nennt) nachgewiesen werden. Dies war der Zweck des berühmten Versuches über die Abnahme des Luftdruckes mit der Höhe, der von PASCAL angegeben, von PERIER auf dem Puy de Dôme bei Clermont am 19. September 1648 ausgeführt worden ist. In der Höhe von 975 m sank die Quecksilbersäule um 85 mm. Ein entsprechender Versuch kann mit einem guten Barometer angestellt werden, das man aus einem unteren in ein oberes Stockwerk des Gebäudes bringt. Auf 10 m Erhebung sinkt die Quecksilbersäule um 1 mm.

7. Schon TORRICELLI hat beobachtet, daß die Höhe der Quecksilbersäule veränderlich ist und daraus auf die Veränderlichkeit des Luftdrucks geschlossen. GUERICKE hat aus dem plötzlichen starken Fallen des Quecksilbers einen Sturm vorhergesagt. — Auf die Beobachtung TORRICELLIS gründet sich der Gebrauch des Barometers.

8. Versuch mit dem Winkelheber, oder Saugheber, bei dem nur der Luftdruck, noch nicht die Spannkraft der Luft in Betracht kommt. Über die Erklärung des Versuchs haben Kontroversen stattgefunden.¹⁾ Auch die Darstellungen der Lehrbücher zeigen große Verschiedenheiten.

a) Nach einer Auffassung zieht die schwerere Flüssigkeitssäule im längeren Schenkel die leichtere im kürzeren nach sich, die Gewichts-differenz beider soll die treibende Kraft für die Bewegung der Flüssigkeit sein. Hier erscheint die Bewegung im wesentlichen durch die Kohäsion der Flüssigkeit bedingt. Der Luftdruck wirkt nur derart, daß er die Kohäsion der Flüssigkeit vergrößert. Nun spielt die Kohäsion bei gewissen im luftleeren Raum noch fließenden Hebern sicher eine Rolle, hier aber kompliziert sie die Erscheinung unnötig, da diese auch ohne die Kohäsion eintreten muß. Der Vergleich mit einer über eine Rolle geführten Kette, deren längeres Ende das kürzere nach sich zieht, trägt auf dieser Stufe eher zur Verdunkelung des wahren Sachverhalts bei.

b) Eine andere Darstellung sieht gleichfalls das Gewicht der schwereren Flüssigkeitssäule als Ursache des Fließens an und weist dem Luftdruck nur die Aufgabe zu, daß er die Entstehung eines Vakuums im oberen Teil des Hebers verhindert, eine Deutung, die bedenklich an das *ne detur vacuum* der vortorricellischen Physik anklingt, jedenfalls aber mit einem virtuellen Vakuum operiert.

c) Eine dritte Darstellung berechnet den Druck, der an den Stellen *a* und *e* des Hebers herrscht (Fig. 5) und findet den einen gleich $A - h_1$, den anderen gleich $A - h_2$, wo *A* in Wassersäulenlänge ausgedrückt zu denken ist. Da $h_1 < h_2$, so folgt $A - h_1 > A - h_2$. Hiergegen ist zu

1) Man vgl. WEINHOLD, Z. U. XVII 152, 346, XVIII 153; STEINBRINCK Z. U. XVII 277, XVIII 24; über den Unterschied des hydrodynamischen von dem hydrostatischen Druck im Heber PENZOLD, Z. U. XVIII 156.

sagen, daß der tatsächliche Druck bei a wie bei e gleich dem Atmosphärendruck sein muß. Um dies einzusehen, braucht man sich nur zu vergegenwärtigen, daß der Druck am unteren Ende einer torricellischen Röhre ebenfalls $= A$ ist und von da nach oben hin kontinuierlich abnimmt (dies findet später Anwendung auf den Druck, der in einer im TORRICELLISCHEN Rohr über dem Quecksilber eingeschlossenen Luftsäule herrscht).

d) Die einfachste und zugleich zutreffendste Erklärung besteht darin, daß man die Drucke feststellt, denen eine Flüssigkeitsschicht im obersten Teil des Hebers von beiden Seiten her ausgesetzt ist. Man ziehe zur Erläuterung zunächst den unter Nr. 4 erwähnten Versuch des umgekehrten und mit Wasser gefüllten Zylinders heran. Ist dessen Höhe h , so ist der Druck am oberen Ende $A - h$. Für die oberste Stelle des Hebers ergeben sich ebenso die Drucke $A - h_1$ und $A - h_2$. Da der erste Wert größer als der zweite ist, so tritt eine Bewegung des Wassers von dem kürzeren nach dem längeren Schenkel hin ein, die einmal eingeleitet fort-dauert, so lange die Druckdifferenz bestehen bleibt. Eine genauere Untersuchung zeigt, daß dieselbe Druckdifferenz für jede Stelle des Heberrohrs besteht; z. B. für den Querschnitt d im lotrechten Abstände x von der höchsten Stelle des Hebers ist der Druck von oben $A - h_1 + x$, der von unten $A - h_2 + x$, die Differenz daher wieder $h_1 - h_2$.

Die angestellte Betrachtung gilt, wie nochmals hervorgehoben sein mag, nur für den Moment vor Eintritt des Fließens, in dem man den Finger lüftet, der das längere Rohr verschlossen hielt. Die Druckverhältnisse während des Fließens sind viel zu kompliziert, als daß sie sich elementar anfassen ließen.¹⁾

9. Bisher ist absichtlich von der Einführung des Begriffes Spannkraft abgesehen worden. Diese stellt vielmehr ein besonderes Problem dar, dessen getrennte Behandlung didaktisch von Wert sein dürfte. OTTO VON GUERICKE wurde gefragt: Woher kommt es, daß das Quecksilber in der torricellischen Röhre stehen bleibt, auch wenn Fenster und Turm fest verschlossen sind? GUERICKE half sich mit der Auskunft, daß man nicht alle Spalten und Ritzen verstopfen könne. Aber verschließt man den offenen Schenkel eines Heberbarometers luftdicht, oder stellt man den TORRICELLISCHEN Versuch in einem völlig geschlossenen Behälter an, so bleibt die Erscheinung ungeändert. Hierbei könnte frei-

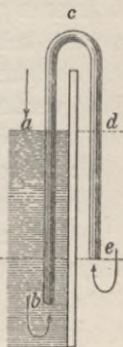


Fig. 5.

1) Interessante Abänderungen des Hebersversuchs gibt besonders REBENSTORFF in Z. U. an verschiedenen Stellen an; einen Heber, der sich beim Ein-senken von selbst füllt und zum Fließen kommt, und zu einer Denkaufgabe Anlaß gibt, hat E. NEUGEBAUER bekannt gemacht (Z. U. XXII 207). Eine lehr-reiche Heberform mit Hahnansatz an dem Verbindungsrohr bei MÜLLER (T. 123).

lich die selbständige Raumerfüllung der Luft (Undurchdringlichkeit) zur Erklärung ausreichen, da hierdurch das Herabsinken des Quecksilbers verhindert wird.

Man beobachtet aber ferner bei dem Versuch in Nr. 6 a, daß die Quecksilbersäule viel langsamer sinkt, als man nach der Menge der ausgepumpten Luft erwarten sollte. Wenn die verdünnte Luft, wie O. von GUERICKE sich dachte, aus gewöhnlicher Luft und Vakuum gemischt ist, so ist kein Grund abzusehen, weshalb das Quecksilber nicht soweit herabsinken sollte, als der von Luft freigewordene Raum es gestattet. Der verdünnten Luft muß also noch eine eigentümliche Widerstandskraft zukommen, vermöge deren sie auf die Oberfläche des Quecksilbers drückt und dieses in der Röhre schwebend erhält. Zur Prüfung dieser Vermutung dient folgender:

Versuch (PECQUET 1651): In das TORRICELLISCHE Vakuum wird eine kleine Menge Luft gebracht. Die Quecksilbersäule sinkt viel beträchtlicher, als nach dem geringen Gewicht der Luft zu erwarten wäre. Ein Gegenversuch mit Wasser zeigt, daß durch dieses die Quecksilbersäule nur um einen ganz geringen Betrag herabgedrückt wird (wobei der Dampfdruck noch außer Betracht bleiben kann).¹⁾

Hiernach ist der verdünnten Luft eine besondere Spannkraft zuzuschreiben. Frage: Besitzt die gewöhnliche Luft gleichfalls Spannkraft?

Versuch: Ein zugebundener schlaffer Gummiballon bläht sich im Rezipienten auf, wenn die Luft aus diesem ausgepumpt wird. — Die Erklärung ist darin zu suchen, daß die Luft an der Erdoberfläche durch den Druck der Atmosphäre zusammengedrückt ist und sich nach Wegnahme dieses Druckes ausdehnt. [Diese zuerst von PECQUET gegebene Erklärung war für die damalige Zeit etwas unerhört Neues.] — Parallelversuche: Man bringe unter den Rezipienten ein unter Wasser tauchendes geschlossenes Rohr, das neben Wasser noch eine Luftblase enthält, oder einen Heronsball mit umgebogenem Rohr (Spritzflasche); der runzlige Apfel; Holz unter Wasser im Rezipienten; Seifenschaum ebenda. —

Erst hier findet der Vorgang beim Auspumpen der Luft aus dem Rezipienten seine Erklärung. Die Verminderung der Spannkraft der Luft im Rezipienten läßt sich durch gleichzeitigen Anschluß eines Wassersteigrohres und eines offenen Quecksilbermanometers demonstrieren (SCHWALBE). — Abgekürztes Barometer. — Aus dem Satz über das Gleichgewicht der Kräfte folgt noch, daß die Spannkraft der Luft stets gleich dem darauf lastenden Drucke ist.

10. Frage: In welchem Zusammenhange stehen Spannkraft und Dichtigkeit der Luft? — Dieses Problem ist bereits oben (Nr. 9)

1) Will man den Einfluß des Wasserdampfs vermeiden, so kann man Schwefelsäure oder Öl nehmen.

aufgetreten. Es findet seine Lösung durch den Versuch von BOYLE (1662): An einem der bekannten Apparate wird das BOYLESche Gesetz a) für komprimierte Luft, b) für verdünnte Luft nachgewiesen. Der zweite Fall läßt sich auch mit einer graduierten, durch einen Hahn verschließbaren Röhre von 1 m Länge demonstrieren, die in einen hohen Standzylinder mit Quecksilber getaucht wird. Man realisiert dadurch in anderer Form den unter 9 nach PECQUET angegebenen Versuch.

Eine Bestätigung des Gesetzes kann durch Versuche an engen Röhren mit eingeschlossenem Quecksilberfaden nach MELDE (Z. U. I 168, XIII 337) gegeben werden; man vgl. auch WEINHOLD, Vorschule (4), 164.

Anwendung beim Manometer zur Messung hoher Drucke oder hochgradiger Luftverdünnung. Bathometer. — Erklärung des Stechhebers, des Blasebalges, der Saug- und Druckpumpe, des Atmens und Saugens. (Apparat von MEUTZNER, Z. U. V 305.)

11. Läßt sich auch in der Atmosphäre eine Abnahme der Dichtigkeit der Luft mit der Höhe nachweisen? — Hier ist der Versuch von OTTO VON GUERICKE anzuführen: Ein mit Luft von der Erdoberfläche gefüllter Rezipient wurde verschlossen auf die Höhe eines Turmes gebracht und dort geöffnet: man bemerkte, daß ein Teil der Luft entwich. Umgekehrt zeigte ein Rezipient, der von oben nach unten gebracht wurde, daß Luft eindrang. Die beiden Versuche sind von OTTO VON GUERICKE zum Beweise für das Vorhandensein des Luftdruckes an gestellt worden (*Exp. Magdb.* Lib. III, Kap. 30). Dasselbe zeigt ein Versuch mit dem Variometer von HEFNER-ALTENECK (Z. U. IX 123) beim Heben der Flasche (schon um 1 m) tritt eine Vergrößerung des Luftvolumens ein; dies ist ebenso wie der zweite Versuch GUERICKES ein direkter Beweis für die Abnahme der Luftdichtigkeit mit der Höhe, selbst innerhalb eines Zimmers.

12. Finden die für Flüssigkeiten geltenden Gesetze auch auf die Luft Anwendung? — Auf Grund der bisherigen Ermittlungen läßt sich die Luft als eine elastische Flüssigkeit bezeichnen, die aber im Unterschied von den eigentlichen Flüssigkeiten kein bestimmtes Volumen hat, deren Volumen vielmehr von dem herrschenden Druck abhängt. Im einzelnen ergeben sich folgende Übereinstimmungen und Unterschiede:

a) Die Verschiebbarkeit der Teilchen ist bei Luft ebenfalls vorhanden (Versuch 1).

b) Die allseitige Druckfortpflanzung gilt auch für die Luft. Doch ist hier deutlicher als beim Wasser zu erkennen, daß es sich dabei um einen Druckausgleich handelt, vermöge dessen eine höhere Spannung, die an einer Stelle hervorgerufen wird, sich sofort über die ganze Luftmasse verteilt. Von Temperaturänderungen wird natürlich hier abgesehen. — Versuch: Ein kleiner Kautschukballon ist durch Ansatzschläuche

und T-Röhren mit verschiedenen Gefäßen verbunden, die teils kartesiansche Taucher, teils Manometer enthalten. Ein Druck auf den Ballon zeigt an allen Stellen seine Wirkung (SCHWALBE, L. u. B. III 1).

c) Der Druck auf die Gefäßwände ist nicht abhängig von dem Gewicht der vorhandenen Luftsäule, sondern von der Spannkraft, deren Größe aber in einem geschlossenen Gefäß nicht konstant ist, sondern mit der Höhe abnimmt.

d) Das archimedische Prinzip ist ebenfalls für die Luft gültig. Ein in Luft befindlicher Körper verliert scheinbar an Gewicht soviel wie die von ihm verdrängte Luftmenge wiegt. Den hierfür gebräuchlichen Apparat hat zuerst OTTO VON GUERICKE unter dem Namen Baroskop beschrieben und zum Nachweis der Dichtigkeitsänderungen der atmosphärischen Luft angewandt (Lib. III, Kap. 20). Heute ist der Apparat als Dasy-meter bekannt. (Versuch.) Eine hübsche Variante hat REBENSTORFF (Z. U. XII 134) angegeben, eine neue Form des Baroskops H. SCHOENTJES (Z. U. XIV 166). — Auch um die Verschiedenheit des spezifischen Gewichtes verschiedener Gase zu bestimmen, kann man den Apparat benutzen. W. (3) 155, Fr. I 328.

Die letzte Anwendung führt darauf, die für die Luft erkannten Gesetze auf die übrigen gasförmigen Körper auszudehnen. Endlich schließt sich hier noch die Anwendung auf die Erklärung des Luftballons an.

Einer heute überwundenen Methodik gehört das Verfahren an, die Versuche mit der Luftpumpe in übersichtlich geordneten Gruppen im Zusammenhange vorzuführen, wozu dann auch Versuche aus der Wärmelehre und der Elektrizitätslehre gefügt wurden. Die Luftpumpe ist nicht als Mittelpunkt für alle möglichen Versuche, sondern durchaus als Hilfsapparat anzusehen, der an verschiedenen Stellen, stets nur da, wo es der Gang des Unterrichts erfordert, herangezogen werden darf.

MACH und ODSTRCIL schließen an die Versuche über die Spannkraft der Luft (Nr. 9) noch Versuche über die Spannkraft der Dämpfe und über deren Verwendung in der Dampfmaschine an. Dies wird angezeigt sein, wenn man (wie die österreichischen Lehrpläne fordern) der Mechanik die Wärmelehre hat vorausgehen lassen.

§ 12. Wärmelehre.

Für dieses Gebiet hat MACH die didaktisch maßgebenden Gesichtspunkte in einem ausgezeichneten kleinen Aufsatz von 1887 dargelegt¹⁾ und in dem Leitfaden von MACH-ODSTRCIL den Stoff nach denselben Gesichtspunkten zusammengestellt. Noch KIESSLING mußte in seiner Didaktik (1895) aussprechen; „Die Darstellung der Wärmelehre beginnt in den meisten Lehrbüchern mit

1) Über den Unterricht in der Wärmelehre, Z. U. I 3.

Betrachtungen über das Wesen der Wärme als molekulare Bewegung.“ Nichts vermöchte den seither stattgehabten Fortschritt der Didaktik zum gesund Sachlichen besser zu kennzeichnen, als der Umstand, daß derartiges heut so gut wie ausgeschlossen ist. Man ist darüber wohl einig, daß von der ersten Darstellung der Wärmeerscheinungen auf der Unterstufe jede theoretische Spekulation fernzuhalten ist.

Wichtig ist, worauf besonders MACH (a. a. O.) hinweist, daß schon frühzeitig die Begriffe Wärmegrad und Wärmemenge auseinander gehalten werden; mit Recht betont daher GRIMSEHL, daß man im Anfang, so lange noch mit den Temperaturen operiert wird, es vermeiden sollte, das Wort Wärme als gleichbedeutend mit Temperatur zu gebrauchen.

Ein systematischer Lehrgang würde erfordern, daß vom Thermometer erst nach Versuchen über die Ausdehnung der Körper gesprochen wird. Andererseits aber ist das Thermometer den Schülern aus dem täglichen Leben so bekannt, daß man nicht Anstand zu nehmen braucht, es gleich zu Anfang zu besprechen. Ob man dagegen den Begriff Wärmemenge gleich unmittelbar neben den Temperaturbegriff stellen soll¹⁾, erscheint mir heute zweifelhaft. Ratsamer ist es doch wohl, und auch dem geschichtlichen Gang mehr entsprechend, die Schüler erst mit dem Temperaturbegriff „warm werden zu lassen“, ehe man zu dem ergänzenden Begriff der Wärmemenge übergeht.

Im folgenden Lehrgang ist die Anordnung demgemäß getroffen. Die Demonstration von Temperaturveränderungen hat es mit der Schwierigkeit zu tun, daß der Gang an Thermometern gewöhnlicher Art nicht von einer größeren Zahl von Schülern und nicht aus einiger Entfernung beobachtet werden kann. Als Demonstrationsthermometer kommt an erster Stelle das von MÜLLER angegebene Schwefelsäurethermometer in Betracht (T. 138, Z. U. I 23).²⁾ Man wird sich auch in manchen Fällen mit der Ablesung eines gewöhnlichen Thermometers durch einen „Vertrauensmann“ begnügen können, sofern nicht Schülerversuche an solchen Stellen einsetzen. Um bloß Temperaturänderungen sichtbar zu machen, sind die Thermoskope verschiedener Art wohl-

1) So HÖFLER-MAISS und POSKE Unterstufe (1–3); vgl. KIESSLING, Did. 44.

2) Das große von WEINHOLD angegebene Demonstrationsinstrument ist auf ein sehr großes Auditorium berechnet und kommt für unsere Zwecke weniger in Betracht.

geeignet (ROSENBERG I 157 ff., 182). Dem Luftthermoskop als Universalinstrument kann ich ebensowenig wie MÜLLER (T. 141) das Wort reden. Für gewisse Zwecke, namentlich zu elementaren Versuchen über Wärmestrahlung ist das Instrument zu empfehlen.

Manche Gründe können auch dafür beigebracht werden, an den Anfang der Wärmelehre einen Abschnitt über Wärmequellen, Wärmeleitung und Strahlung zu stellen.¹⁾ Doch bedürfen diese bei etwas tieferem Eingehen hier und da mindestens des Temperaturbegriffs, darum ist es wohl besser, sie an einer späteren Stelle zu bringen.

Lehrgang.

1. Höhere und niedrigere Wärmezustände. Der Grad des Wärmezustandes heißt die Temperatur des Körpers. — Versuche über die Unsicherheit der Wärmeempfindung. — Bedürfnis nach einem Meßinstrument.

2. Das Thermometer. GRIMSEHL erklärt es für überflüssig, den Schülern die Fabrikation des Thermometers auseinanderzusetzen, soweit es sich um die Herstellung der gefüllten Glasröhre handelt. Aber soll man sich einen Gegenstand entgehen lassen, der die Schüler aufs lebhafteste zu interessieren pflegt? — Wenigstens die Füllung mit Quecksilber, die höchst lehrreiche Vorgänge umschließt, sollte den Schülern nicht vorenthalten werden. GRIMSEHL selbst empfiehlt für die praktischen Übungen die Bestimmung der Fundamentalpunkte und die Einteilung des Fundamentalabstandes.

Nicht vergessen werden darf die Angabe, wie die Gradstriche unter Null und über 100° hergestellt werden, sowie der Hinweis, daß es sich hier um eine willkürliche Skala handelt.

3. Ausdehnung fester Körper. Neben den bekannten Versuchen darf auch eine quantitative Bestimmung der Ausdehnung nicht fehlen, wofür jetzt einfache, leicht zu handhabende Vorrichtungen, auch für Schülerübungen geeignet, vorhanden sind (MERKELBACH, Z. U. V 232; MÜLLER, T. 143; NOACK, Sch.-Üb. 49). Daß sich ein Eisenstab von 1 m Länge zwischen 0° und 100° um etwa 1 mm ausdehnt, ist eine leicht zu behaltende Tatsache. Auch die Definition des Ausdehnungskoeffizienten überschreitet die Grenzen der Unterstufe nicht. Die Gleichung $l_t = l_0 (1 + \alpha t)$ aufzustellen und an einfachen Rechenbeispielen zu verwenden ist nur ratsam, wenn die Schüler in der Buchstabenrechnung schon einige Übung haben. Selbst dann fällt ihnen die Anpassung der Buchstabenformel an die Wirklichkeit oft noch schwer. Bei der Aufstellung der Gleichung für l_t darf nicht etwa geschlossen werden:

1) So das „Realienbuch des Berliner Lehrervereins“, Teil IV (Physik und Chemie).

beträgt der Längenzuwachs von 0° bis 1° $l\alpha$, so beträgt er für 0 bis t° t mal so viel; es ist kein Regeldetrischluß, sondern lediglich eine Erfahrungstatsache, daß dies innerhalb gewisser Grenzen mit großer Annäherung der Fall ist, daß also Quecksilber und das betreffende Metall sich proportional ausdehnen. Mit der Entwicklung der Formeln für Flächen- und Raumausdehnung aber verliert man mehr Zeit, als den Zielen des Physikunterrichts auf dieser Stufe dienlich ist. Braucht man den kubischen Ausdehnungskoeffizienten, so genügt die Mitteilung, daß dieser dreimal so groß wie der lineare ist. (So auch GRIMSEHL, L. f. R. 117.)

4. Ausdehnung flüssiger und gasförmiger Körper. Thermometerähnliche Gefäße mit Petroleum, Wasser usf. gefüllt dienen zur Veranschaulichung. Für die unregelmäßige Ausdehnung des Wassers ist nach ROSENBERG (I 160) ein mit dunkelgefärbtem Wasser gefülltes Gefäß mit langer Ansatzröhre zu benutzen, das Schwimmen des Wassers von 0° auf solchem von 4° zeigt man besonders (ebd. 161).

Im Zusammenhang hiermit ist auch das Aufsteigen von wärmerem also spezifisch leichterem Wasser in kälterem zu besprechen, die Strömungen beim Erhitzen von Wasser, die Vorgänge in den Warmwasserheizungen und die entsprechenden bei der Abkühlung der Gewässer durch Temperaturerniedrigung der Atmosphäre. Die auf das Zufrieren der Gewässer bezüglichen Betrachtungen finden erst bei der Wärmeleitung ihre angemessene Stelle.

Die Anomalie des Wassers bietet eine gute Gelegenheit, Erfahrungsregeln von wirklichen Gesetzen zu unterscheiden. Ein Gesetz läßt keine Ausnahmen zu. Daher ist der Satz „mit zunehmender Temperatur nimmt das Volumen der Körper zu“ nur als eine Erfahrungsregel, die im allgemeinen zutrifft, zu bezeichnen. (Daß auf einer höheren Stufe die Ausnahme sich nur als scheinbare, die Regel also als ein wirkliches Gesetz erweist, kommt hier nicht in Betracht.)

Bei der Ausdehnung gasförmiger Körper ist auch das Luftthermoskop und die Abhängigkeit seines Standes vom Luftdruck zu besprechen (Thermobaroskop). Hier auch Galileis Thermoskop (U. § 70) mit einem Blick auf die Geschichte des Thermometers.

Auch ist hier das Aufsteigen erwärmter Luft in kälterer Luft als eine Anwendung des archimedischen Prinzips zu besprechen, mit ersten Ausblicken auf die meteorologischen Verhältnisse.

5. Wärmemenge. Der Begriff gehört unbedingt auf die Unterstufe, damit das vieldeutige Wort „Wärme“ schon hier eine wenn auch nur vorläufige Klärung erfährt. Daß hier ein Problem vorliegt, ist den Schülern leicht nahe zu bringen. Beobachtungen im täglichen Leben lehren, daß eine größere Menge Wasser mehr Zeit braucht als eine kleinere, um auf dieselbe Temperatur erwärmt zu werden. Versuch nach GRIMSEHL: Man erwärme in einem Becherglase durch eine Bunsenflamme

1 kg Wasser 5 Minuten lang und beobachte die eingetretene Temperaturerhöhung (etwa 20°). Man erwärme danach $\frac{1}{2}$ kg Wasser, bis die Temperaturerhöhung ebenfalls 20° beträgt; die dazu erforderliche Zeit ist etwa halb so groß. Dagegen beträgt bei gleicher Dauer des Erhitzens die erzielte Temperaturerhöhung im zweiten Fall etwa 40° .

Wir können diese Vorgänge so deuten, als ob ein Wärmestoff aus der Flamme den Körpern zugeführt würde, dessen Menge proportional der Zeit wächst, und mit dessen Menge die erzielte Temperatur proportional ist. Wir nennen die Menge dieses gedachten Stoffes Wärmemenge.

Es hat keine Bedenken anzunehmen, daß die Bunsenflamme in gleichen Zeiten an den zu erwärmenden Körper gleiche Wärmemengen abgibt; auch ist nicht zu bezweifeln, daß 2 kg Wasser eine doppelt so große Wärmemenge erfordern, als 1 kg Wasser von der gleichen Temperatur, um von 0° an bis auf diese Temperatur erwärmt zu werden.

Aus dem obigen Versuch scheint aber auch hervorzugehen, daß zur Erwärmung um doppelt soviel Grade eine doppelt so große Wärmemenge erforderlich ist. Dies würde bedeuten, daß die zugeführte Wärmemenge der Temperaturzunahme proportional ist. Das ist nicht selbstverständlich. Wir prüfen dies näher durch einen Mischungsversuch: Mischen wir z. B. zwei gleich große Wassermengen von 20° und 40° , so müßte, wenn die eben ausgesprochene Vermutung richtig wäre, die Temperatur der Mischung 30° betragen. Nun muß bei der Mischung die wärmere Wassermenge ebensoviel Wärme abgeben, wie von der kälteren aufgenommen wird. Ist im vorliegenden Fall die Mischungstemperatur 30° , so bedeutet das: die vom kälteren Wasser aufgenommene Wärmemenge hat dessen Temperatur von 20° auf 30° erhöht, die vom wärmeren abgegebene hat dessen Temperatur von 40° auf 30° erniedrigt; da beide Wärmemengen einander gleich sein müssen, so ist zur Erwärmung von 20° auf 30° eine ebenso große Wärmemenge erforderlich wie zur Erwärmung von 30° auf 40° . Der Versuch bestätigt die Richtigkeit der Vermutung.¹⁾

Nummehr kann die Definition der Wärmeeinheit (Grammkalorie) gegeben werden. Die Berechnung eines weiteren Mischungsversuchs mit ungleichen Wassermengen unter Benutzung der Kalorie und die Ausführung des Versuchs schließen sich daran.²⁾ Das nicht ganz ge-

1) Auf die Konstanz der Produkte nach MACHS Vorschlag den Begriff der Wärmemenge zu gründen, halte ich auf dieser Stufe nicht für angebracht, die obige naiv mit dem Begriff des Wärmestoffs arbeitende Darstellung schließt sich auch enger an den historischen Gang der Entdeckungen BLACKS an. Vgl. MACH, Prinzipien der Wärmelehre S. 153 ff. Daß bei der obigen Betrachtung die Menge des Wärmestoffs als konstant vorausgesetzt ist, wird dem Lehrer nicht entgehen, für die Schüler ist die Annahme selbstverständlich.

2) Zur Technik der Versuche sehe man besonders ROSENBERG I 161.

naue Resultat gibt Anlaß, auf die Abgabe von Wärme an das Gefäß und von diesem an die Luft hinzuweisen. Die Schüler finden diese Fehlerquellen in der Regel selber.

Die Abgabe von Wärme an das Gefäß legt die Frage nahe, ob andre Körper die gleiche Wärmemenge erfordern wie Wasser, um bei gleicher Masse die gleiche Temperaturerhöhung zu erfahren.

6. Spezifische Wärme. Der grundlegende Versuch hierzu muß recht drastisch sein, damit nicht erst aus der Berechnung der Unterschied vom Wasser hervorgeht. So empfiehlt GRIMSEHL (L. f. R. 119): Der unter 5. beschriebene Versuch mit 1 kg Wasser wird so abgeändert, daß man die Hälfte des Wassers durch eine Bleidrahtspirale von $\frac{1}{2}$ kg Masse ersetzt. Man beobachtet in diesem Fall in 5 Minuten eine Temperaturerhöhung von $38,8^{\circ}$ (statt 20°). Daraus folgt, daß $\frac{1}{2}$ kg Blei zur Erwärmung eine erheblich geringere Wärmemenge braucht als $\frac{1}{2}$ kg Wasser. Die Rechnung ergibt dann für die spezifische Wärme des Bleis die Zahl 0,03.

Für Mischungsversuche im Kalorimeter verwendet MÜLLER (T. 148) halbzyklindrisch gebogene Platten aus Blei, Kupfer, Eisen von je 1 kg Gewicht. Lehrreich ist auch die Mischung von Quecksilber und Wasser, wobei ersteres vor der Mischung in siedendem Wasser auf 100° erhitzt wird (z. B. 400 g Quecksilber von 100° und 400 g Wasser von 10° ; Mischungstemperatur $12,6^{\circ}$, spezifische Wärme 0,03). Man stellt daneben zum Vergleich einen Mischversuch an, zu dem man statt des Quecksilbers eine gleiche Gewichtsmenge Wasser nimmt (also z. B. 400 g Wasser von 100° und 400 g Wasser von 10° , Mischungstemperatur 55°).

7. Wärmeleitung. Hierzu leitet die Bemerkung am Schluß von Nr. 5 über.¹⁾ Als „Freihandversuch“ einfachster Art dient die Erhitzung von Stäben (Kupfer, Eisen, Glas, Holz, Siegellack), die man mit dem einen Ende in der Hand hält, während man das andere in einer Flamme erhitzt. Daran können sich Versuche mit REBENSTORFFS Farbenthermoskop schließen.

Das Hauptergebnis dieser Versuche ist die Unterscheidung von guten und schlechten Wärmeleitern. Daß Wasser ein schlechter Wärmeleiter ist, zeigt man, indem man den oberen Teil des Wassers in einem Reagenzgläschen zum Sieden bringt, auf dessen Boden sich ein durch Bleidraht festgehaltenes Eisstückchen befindet. Es genügt auch (nach ROSENBERG I 164) den Versuch ohne Eisstückchen anzustellen, indem man durch einige Schüler feststellen läßt, daß der untere Teil des Gläschens kühl geblieben ist. Eine andere Variante des Versuchs bei MÜLLER (T. 162).

Hier ist auch die Stelle, wo das langsame Gefrieren der Gewässer nochmals zur Sprache zu bringen ist unter Hinweis, daß von 4° an bei

1) Auch ROSENBERG (Unterstufe) schließt Leitung und Strahlung der Wärme an dieser Stelle an; ebenso MACH-ODSTRCIL § 40.

weiterer Abkühlung keine Strömung im Wasser mehr einen weiteren Temperatúrausgleich herbeiführt, sondern weitere Wärmeverluste der unter der Eisschicht abgeschlossenen Wassermasse nur zufolge der Wärmeleitung des Wassers, also sehr langsam eintreten.

Für die schlechte Wärmeleitung von Gasen ist hier der Hinweis auf das Verhalten trockener lufthaltiger Stoffe hinreichend.

Zahlreiche Beispiele aus dem täglichen Leben tragen hier zur Belebung des Unterrichts bei und können zum guten Teil aus den Schülern herausgefragt werden.

8. Wärmestrahlung. Diese schließt sich ebenso wie die Leitung an Nr. 5 an. Die Wärme, die in der Nähe eines erhitzten Gefäßes gespürt wird, leitet über zur Strahlung eines Ofens und zur Sonnenstrahlung. Der Unterricht beschränkt sich auf einfache in den Lehrbüchern angegebene Versuche und Beobachtungen. Die Erwärmung durch Strahlung führt noch zu dem Begriff der Wärmeabsorption. Unterschied rauher und glatter, heller und dunkler Oberflächen.

9. Nach den Exkursen in den vorhergehenden beiden Nummern wenden wir uns zum Schmelzen fester Körper. Versuche über die Schmelztemperatur (Eis 0° , Paraffin 46°). Konstanz des Schmelzpunkts, Übereinstimmung mit dem Erstarrungspunkt (Gefrierpunkt).

Beim Schmelzen tritt meist eine Volumvergrößerung ein (festes Blei sinkt in geschmolzenem unter). Ausnahme das Wasser. Wie groß ist bei Eisbergen die unter Wasser befindliche Eismasse? — Sprengen von gußeisernen Bomben durch gefrierendes Wasser. (Der Gebrauch einer Kältemischung ist ohne nähere Erklärung zulässig.)

10. Schmelzwärme. Setzt man unter ein mit Eisstücken gefülltes Becherglas eine Bunsenflamme, so dauert es geraume Zeit, bis auch nur ein Teil des Eises geschmolzen ist, und die Mischung von Eis und Wasser behält trotz beständig zugeführter Wärmemenge die Temperatur 0° .¹⁾ Dies führt auf die Frage: Verschwindet hierbei wirklich Wärme und wie groß ist die verschwindende Wärme?

Für den Versuch empfiehlt es sich, möglichst einfache Verhältnisse zu wählen, damit das Ergebnis ohne viel Rechnung ersichtlich wird. GRIMSEHL (L. f. R.) schreibt vor, 1 kg Wasser von 100° mit 1 kg Eis von

1) MACH (Oberklassen, 169) führt folgenden historischen Versuch von JOSEPH BLACK (1757) an: Zwei gleich große Fläschchen, das eine mit Wasser von 0° , das andre mit Eis von 0° gefüllt, werden in ein Zimmer von 30° C gebracht. Das Wasser nimmt in einer Viertelstunde die Temperatur 4° an; die gleich große Eismasse ist erst in 5 Stunden (= 20 Viertelstunden) geschmolzen; die zur Schmelzung des Eises verbrauchte Wärme würde somit genügen, die gleiche Wassermenge um $20 \times 4^{\circ} = 80^{\circ}$ oder die 20fache Wassermenge um 4° zu erwärmen. Die Mitteilung eines solchen Versuchs eignet sich gut als Vorbereitung auf den eigentlichen in der Klasse auszuführenden Versuch.

0° zu mischen, man erhält 2 kg Wasser von 10°, das heiße Wasser hat also 90 Kilogrammkalorien abgegeben, diese haben zum Schmelzen des Eises und zur Erwärmung des Schmelzwassers auf 10° gedient, also sind 80 Kilogrammkalorien für das Schmelzen von 1 kg Eis verbraucht worden. — ROSENBERG nimmt 1 kg Wasser von 80° und 1 kg Eis von 0°, die Mischungstemperatur ist 0°.¹⁾

Die älteren Physiker sprechen von „latenter“ Schmelzwärme. Den Tatsachen entspricht es noch mehr zu sagen, daß beim Schmelzen von 1 g Eis 80 Kalorien verbraucht werden. — Wie dies zu verstehen ist, bleibt hier noch unerörtert (Nr. 15).

Versuche über freiwerdende Erstarrungswärme; Lösungswärme und Kältemischungen bleiben besser der Oberstufe vorbehalten, damit nicht durch Häufung von Versuchen die Klarheit der gewonnenen Einsicht wieder getrübt wird. Zu erinnern ist aber an das langsame Schmelzen des Eises im Frühjahr, was schon BLACK aufgefallen war, und an das langsame Gefrieren der Gewässer, das aus der Abgabe einer der Schmelzwärme gleichen Erstarrungswärme zu erklären ist.

11. Das Sieden. Die Vorgänge beim allmählichen Erwärmen des Wassers bis zum Sieden erfordern eine genaue Beobachtung und Beschreibung (U. § 73). Die Konstanz des Siedepunkts ist zuerst beim Wasser zu zeigen, wobei das Thermometer auch in die Dämpfe gehalten wird, die ebenfalls die Temperatur 100° haben. — Das Sieden von Äther und Alkohol wird in Reagenzgläsern vorgenommen, die in heißes Wasser gesenkt werden.

Die Frage, ob beim Verdampfen eine Verwandlung von Wasser in Luft stattfindet (was die ältere Physik glaubte), wird durch Einleiten des Dampfes in ein gekühltes Reagenzglas beantwortet: Wasserdampf geht durch Abkühlung wieder in flüssiges Wasser über, ist also nur eine andere Form des Wassers. Dabei ist zu merken, daß 1 l Wasser etwa 1700 l Wasserdampf entwickelt. Ein für die Unterstufe geeigneter Demonstrationsversuch hierzu bei MÜLLER (T. 155). Empfehlenswert ist auch die Destillation einer Salzlösung und die Trennung von Wasser und Alkohol durch Destillation. (MÜLLER 156).

12. Verdampfungswärme. Bei noch so starkem Erhitzen steigt die Temperatur des siedenden Wassers doch nicht über 100°, sondern nur die Menge des entwickelten Dampfes nimmt zu. Dies läßt vermuten, daß bei der Verwandlung von Wasser von 100° in Dampf von 100° ebenfalls Wärme verbraucht wird. Über [die ungefähre Menge dieser Wärme gibt folgender Versuch annähernd Aufschluß: Man beobachte die Zeit, die erforderlich ist, um eine mäßig große Menge Wasser

1) MÜLLER (151) empfiehlt das Eiskalorimeter von LAPLACE, das bei Verwendung siedenden Wassers den Vorzug bietet, keine Wägung des Eises und keine Temperaturmessung zu erfordern.

(am besten in einer Metallschale) bis zum Sieden zu erhitzen und auch die Zeit, die zum vollständigen Verdampfen des auf 100° erhitzten Wassers erforderlich ist. Man findet diese Zeit 6—7 mal so groß als die erste und kann danach die zum Verdampfen von 1 g Wasser von 100° erforderliche Wärmemenge auf ca. 500 Kalorien abschätzen. Die genaue Zahl ist 537. (Eine exakte Bestimmung gelingt besser aus der Kondensationswärme; der betreffende Versuch wird oft auf der Unterstufe angestellt, eignet sich aber doch wohl besser für die Oberstufe bzw. für die praktischen Übungen.)

Es liegt nahe, auch diese Wärme als „latente Wärme“ zu bezeichnen. Daß sie beim Kondensieren des Dampfes als „Kondensationswärme“ wieder zum Vorschein kommt, geht aus der Erfahrung hervor, daß man durch Einleiten von Wasserdampf in kaltes Wasser dieses bis 100° erhitzen kann. Anwendung der Kondensationswärme in den Dampfheizungen.

13. Dampfdruck. Die Versuche über die Spannkraft gesättigter Dämpfe, sowie der Nachweis, daß die Spannkraft des Wasserdampfes bei 100° gleich 1 Atm. ist, gehören auf die Oberstufe. Dagegen ist ein Versuch über die Zunahme des Druckes in einem geschlossenen Gefäß schon hier am Platze. Erhitzt man Wasser in einem mäßig fest verkorkten Rundkolben zum Sieden, so wird nach kurzer Zeit der Kork und mit ihm ein Teil des Wassers bis zur Decke des Zimmers geschleudert. Die dem Wasser bei diesem Versuch zugeführte Wärme wird zum größeren Teil nicht zur Dampfbildung, sondern zur Erhitzung des Wassers über 100° verwandt. Um dies nachzuweisen kann man den PAPINSCHEN Topf mit eingesetztem Thermometer benutzen.¹⁾ Hierbei kommt auch die praktische Verwendung von PAPINS Topf zur Sprache.

An den Dampfdruck schließt sich die Besprechung der Dampfmaschine, soweit dies für die Unterstufe angezeigt erscheint. Der PAPINSCHE Versuch über die Bewegung eines Kolbens durch den Wasserdampf wird hierbei die Einleitung bilden.

14. Verdunstung. An den Anfangsversuch über die allmähliche Erwärmung von Wasser (Nr. 9) schließt sich dieser Gegenstand ungewollungen an. (Versuche bei ROSENBERG I 179.) Die Hauptfrage ist hier: Wird für die Verdunstung ebenfalls Wärme verbraucht? Bekannte Beobachtungen und Versuche über Verdunstungskälte geben die Ant-

1) MACH beschreibt in MACH-ODSTRCIL und auch in „Prinzipien der Wärmelehre“ S. 177 einen von JAMES WATT herrührenden Versuch, bei dem die Menge des als Dampf entweichenden Wassers durch Wägen des Gefäßes bestimmt wird. Beträgt die anfängliche Wassermenge 540 g, sind diese auf 105° erhitzt, und entweichen bei Öffnung des Topfes 5 g Dampf, während die Temperatur auf 100° sinkt, so folgt daraus die Verdampfungswärme des Wassers = 540. Nur wird die Genauigkeit durch Mitführung von Wasser beeinträchtigt.

wort (ROSENBERG a. a. O.). Hierauf können die Versuche über Kondensieren folgen, etwa unter Anknüpfung an die Frage: Woher rührt der feuchte Beschlag, der sich zuweilen an der Innenseite der Fensterscheiben absetzt? — Anwendung auf die atmosphärischen Niederschläge (U. § 74).

15. Quellen der Wärme. Wärme und Arbeit. a) Die Sonne als Hauptquelle aller irdischen Wärme; b) chemische Prozesse, insbesondere Verbrennungen; c) mechanische Quellen der Wärme: Verwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme durch Vermittlung der Reibung. (Man soll aber nicht sagen, durch Reibung wird Wärme erzeugt, vgl. GRIMSEHL, D. 95.) d) Verwandlung der Bewegungsenergie in Wärme beim Fall aus größerer Höhe und beim Stoß. Hierdurch tritt die Wärmelehre in Verbindung mit dem Schluß der Mechanik (vgl. oben S. 125).

Da auch umgekehrt (in den Dampfmaschinen) Arbeit durch Wärme erzeugt wird, so kann man von einer Verwandelbarkeit der Arbeit in Wärme und umgekehrt sprechen und die Wärme als eine besondere Form der Energie ansehen. Alle diese Betrachtungen bleiben qualitativer Art. Es kann auch die Zahl für das mechanische Wärmeäquivalent angegeben werden, obwohl näheres über deren Bestimmung auf die Oberstufe gehört.

Schließlich läßt sich hier eine Andeutung einfügen, wie man sich die Rolle der scheinbar „latent“ werdenden Wärme beim Schmelzen und Verdampfen zu denken hat. Die Wärme leistet auch hier Arbeit, indem sie den Zusammenhang der kleinsten Teile der Körper lockert oder auch ganz aufhebt. Durch die Hypothese vom molekularen Bau der Materie werden also diese Vorgänge verständlich.

§ 13. Akustik.

Die Begrenzung des Stoffs der Akustik auf der Unterstufe ergibt sich daraus, daß ein näheres Eingehen auf die Wellenbewegung in der Luft ausgeschlossen ist. Es gibt zwar populäre Darstellungen, die diesen Vorgang namentlich unter Verwendung der Analogie mit den Wasserwellen genauer besprechen. Ich kann dieser notwendig unstrengen Behandlung des Stoffes nicht beipflichten, um so weniger, als man dadurch ein für die Oberstufe interessantes Problem vorwegnimmt. Bei der Nötigung, im Unterkursus nach Möglichkeit den Stoff zugunsten der Gründlichkeit zu kürzen, scheint mir hier am meisten eine Beschränkung angezeigt.

Die Auswahl des Stoffs wird sich also im wesentlichen mit der Vorführung der verschiedenen Arten der Erregung des Tons,

und mit einigen vorläufigen Mitteilungen über Ausbreitung und Wahrnehmung des Schalles begnügen.

Unzweckmäßig ist es auch, mit der in Lehrbüchern üblichen Unterscheidung von Schall, Ton, Geräusch und von Tonstärke, Tonhöhe und Klangfarbe zu beginnen, und darüber gar lange Erörterungen anzustellen. Man gehe vielmehr frisch an das Hauptproblem heran: Wie entsteht ein Ton?

Lehrgang.

1. Entstehung des Tones. Man beginnt mit dem Einfachsten: Ein angeschlagenes (möglichst dünnwandiges) Trinkglas tönt. Beim Berühren erlischt der Ton. Also muß eine Bewegung in der Glaswand den Ton verursacht haben. Man bringe ein Pendelchen (Siegellack- oder Glaskügelchen) an das tönende Glas. Es wird lebhaft abgestoßen. Man spanne eine dicke Stricknadel in einen Schraubstock und lasse sie schwingen, indem man sie nach und nach verkürzt. Die Schwingungen werden zusehends rascher und der Ton höher. Wir vermuten einen Zusammenhang zwischen der Schnelligkeit der Schwingungen und der Höhe des Tons. Wir prüfen dies noch an der Zahnradsirene von SAVART und stellen uns nun die Aufgabe:

2. Wie bestimmt man die Schwingungszahl einer Tonquelle? Eine genaue Bestimmung wird allerdings auf der Unterstufe kaum ausführbar sein, allenfalls in den praktischen Übungen.¹⁾ Man kann aber leicht eine Stimmgabel auf einer berußten Glasplatte schreiben lassen und erläutern, wie sich auf diesem Wege die Schwingungszahl ermitteln läßt. Zur Ausführung eignet sich besonders auch eine passend hergerichtete Phonographenwalze, deren Umdrehungen man zählt, oder der einfache Apparat von SCHÖTTE (Z. U. XXV 358). Daß das Verfahren auch auf schwingende Saiten anwendbar ist, läßt sich leicht dartun und wohl auch demonstrieren (MÜLLER 133).

3. Die Frage, nach welchem Gesetz die Tonhöhe mit der Schwingungszahl zusammenhängt, läßt sich am besten mit Hilfe der Scheibensirene oder der Sirene von CAGNIARD LATOUR beantworten. (Hier ist aber zunächst darzulegen, daß die Ursache des Tones, eine regelmäßige Folge von Luftstößen, im Prinzip nicht verschieden ist von der Tonerregung bei Stimmgabel und Saite.) An die Versuche mit der Sirene schließen sich die üblichen Auseinandersetzungen über die „relativen Schwingungszahlen“, Tonleitern, Konsonanz und Dissonanz, Akkorde, Grenzen der Hörbarkeit.

1) MÜLLER (134) bestimmt mit Hilfe einer elektrisch betriebenen Schwungmaschine die Schwingungszahl des Tones einer Scheibensirene mit sehr bedauerlicher Genauigkeit. Weniger zuverlässig ist die Sirene von CAGNIARD LATOUR.

4. Die Saiten, als die populärsten aller Schallerreger, erfordern eine besondere Behandlung. Seit Pythagoras weiß man, daß eine Saite bei Verkürzung auf $\frac{1}{2}$ ihrer Länge die Oktave, auf $\frac{2}{3}$ die Quinte, auf $\frac{3}{4}$ die Quarte gibt usf. Dies ist durch Versuch leicht zu zeigen. Unter Berücksichtigung von Nr. 3 folgt daraus, da die Schwingungszahlen des Grundtons und der genannten Töne sich wie $1 : 2 : \frac{3}{2} : \frac{4}{3}$ verhalten, daß die Schwingungszahlen den Saitenlängen umgekehrt proportional sind.

Was die Abhängigkeit von der Spannung betrifft, so genügt es zu zeigen, daß bei größerer Spannung der Ton höher wird, und daß Dicke und Stoff der Saite ebenfalls von Einfluß sind. Die Erzeugung von Obertönen durch Schwingen der Saite in aliquoten Abschnitten kann ebenfalls schon auf dieser Stufe kurz vorgeführt werden.

5. Stäbe und Platten. Hier genügen einige Versuche, um das Charakteristische dieser Schallquellen zu zeigen.

6. Lippenpfeifen. Zur Einführung bediene man sich abgestimmter Glasröhren, die mit einem Anblasespalt angeblasen werden. Es ist wichtig zu zeigen, daß beim Anfassen der Röhrenwände mit der Hand keine Bewegung gespürt und der Ton nicht (wie bei der Saite) gehemmt wird. Hiernach muß man vermuten, daß nicht die Röhrenwand Schwingungen ausführt, daß dies vielmehr nur die Luft im Innern der Pfeife vollbringt. (Durch Füllung der Röhre mit Leuchtgas oder Luft könnte man diese Vermutung bestätigen.) Wie die Bewegung der Luft geschieht, entzieht sich auf dieser Stufe näherer Besprechung. Es muß genügen, zu zeigen, daß wie bei den Saiten die Schwingungszahl der Länge der Pfeife umgekehrt proportional ist, was besser an den Glasröhren als an den Pfeifen geschieht, wo die Messung bei Verschiebung eines Kolbens nur mangelhafte Resultate gibt. Es ist ferner zu zeigen, daß der Ton einer gedeckten Pfeife um eine Oktave tiefer ist als der einer offenen. Was die Zungenpfeifen betrifft, so kann man es bei dem Vorzeigen und Anblasen einer solchen bewenden lassen.

7. Die Ausbreitung des Schalles. Dies Problem kann hier nur ganz propädeutisch behandelt werden. Wichtig ist, daß in der Regel die Luft als Vermittler des Schalles dient (Versuch mit der Glocke im Rezipienten der Luftpumpe). — Leitung durch feste und flüssige Körper. —

Wie soll man sich aber die Ausbreitung des Schalles durch die Luft vorstellen? Zunächst handelt es sich sicher um einen Bewegungszustand, der sich auf die Luft fortpflanzt. Dies erkennt man an der Erschütterung, die ein Schall oft auf weite Entfernung hervorruft. (Fensterscheiben zerspringen infolge einer Explosion; Versuch mit SCHELLBACHS künstlichem Trommelfell, einer am engeren Ende eines Papptrichters ausgespannten Membran, an der ein Holundermarkpendelchen hängt.) Daß es sich hierbei nicht um fortgeschleuderte Luft handelt, zeigt ein Versuch mit Rauchstoßapparat und sensitiver Flamme, wo

zwischen der Wirkung des fortgeschleuderten Luftwirbels und der des Schalles unterschieden werden muß.¹⁾ Die Analogie mit der Fortpflanzung eines Stoßes durch eine Reihe elastischer Kugeln kann zur vorläufigen Versinnlichung des Vorganges dienen. Ein Vergleich mit Wasserwellen und gar deren Vorführung scheint mir mehr der Verschwommenheit als der Klarheit zu dienen. Das Weitere gehört vielmehr ganz auf die Oberstufe. Daß sich aber in der Tat periodische Stöße durch die Luft fortpflanzen müssen, zeigen auch die Erscheinungen des Mitschwingens.

8. Mitschwingen. Versuch mit zwei gleichgestimmten Stimmgabeln. Erklärung durch Summation kleinster Anstöße (U. § 120). Verwandt ist die Resonanz, die in einer Tischplatte, oder im Resonanzkasten durch eine Stimmgabel hervorgerufen wird.

9. Schallgeschwindigkeit. Für die Ausbreitung einer Erschütterung von Teilchen zu Teilchen spricht auch die Tatsache, daß der Schall Zeit zur Ausbreitung braucht. — Beobachtungen aus dem täglichen Leben. Mitteilung des Wertes der Schallgeschwindigkeiten in Luft und Wasser. Zurückwerfung des Schalls und Echo. Analogie mit dem Licht.

10. Das Gehörorgan. An die Beschreibung des anatomischen Baus des Ohres schließt sich eine Besprechung des Hörens, das in physiologischer Hinsicht durch Analogie mit dem Mitschwingen verständlich wird.

§ 14. Optik.

Die Optik geht in zweifacher Hinsicht über die bisher behandelten Abschnitte der Physik hinaus. Einmal arbeitet sie von Anfang an mit einer Abstraktion, mit dem Begriff des Lichtstrahls. Was sich zuerst dem Beobachter darbietet, ist eine Flut von Licht, die auf das Auge einströmt. Erst das Experiment sondert aus dieser Flut, indem es ihr eine Wand mit feiner Öffnung entgegenstellt, einen dünnen Faden aus, einem feinen Wasserstrahl vergleichbar. Einen solchen Faden nennt man einen Lichtstrahl. Die gesamte Lichtflut kann aus solchen Strahlen zusammengesetzt gedacht werden. Dabei ist es gut, an das Abstraktionsvermögen nicht zu hohe Anforderungen zu stellen, derart, daß etwa wie auf der Oberstufe, nur die Merkmale Richtung und Geradlinigkeit beibehalten werden. Vielmehr kann ein schmaler Lichtstreifen im Raum als Versinnlichung eines Lichtstrahls mit demselben Recht dienen, wie ein Kreidestrich als Versinnlichung einer geraden Linie.

1) WEINHOLD, D. (3) 222; ROSENBERG I 294.

Zweitens tritt dem Schüler in der Optik zum erstenmal der Unterschied von Schein und Wirklichkeit deutlich vor das Bewußtsein; es ist gut, auf diesen Unterschied recht bestimmt hinzuweisen, damit das Zustandekommen des Scheins als ein bedeutsames Problem erfaßt wird. Bezüglich der Auswahl des Stoffes ist hier noch mehr als in anderen Abschnitten weise Beschränkung am Platze. Ich empfehle, es bei den einfachsten Erscheinungen der geometrischen Optik bewenden zu lassen. Die Farbenlehre ist als ein Musterbeispiel induktiver Methode zu schade, als daß darüber flüchtig dogmatisch hinweggegangen werden dürfte. Nur wo dem elementaren Kursus keine Oberstufe folgt, ist ein Abweichen hiervon gerechtfertigt.

Das Pensum wird demnach im wesentlichen auf geradlinige Ausbreitung des Lichts, Reflexion und Brechung zu beschränken sein, nebst den einfachsten Anwendungen auf das Sehen und die optischen Instrumente, die sich daran anschließen.

Lehrgang.

1. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes. Durch nichts zu ersetzen in seiner überzeugenden Einfachheit ist der Versuch, Sonnenlicht durch eine feine Öffnung in ein verdunkeltes Zimmer fallen zu lassen. Da in unseren Breiten die Sonne oft unzuverlässig ist, so kann der Versuch nicht immer sofort ausgeführt werden, sollte aber dann bei günstiger Gelegenheit nachgeholt werden. Als Ersatz dienen Versuche mit punktförmiger Lichtquelle (MÜLLER, T. 168, 169) oder engerem Diaphragma vor einer ausgedehnten Lichtquelle. Die Verwendung von Projektionsapparat und Linse muß bei diesem einleitenden Versuch durchaus vermieden werden. Bei diesem Anfangsversuch ist auch der Begriff des Lichtstrahles zu erläutern. Aus diesem Grunde ist der von MÜLLER (T. 173) angegebene Versuch nicht als Grundversuch geeignet, wohl aber als erste Anwendung der geradlinigen Ausbreitung ganz vorzüglich. Er besteht darin, daß man Licht von einer punktförmigen Lichtquelle durch ein quadratisches Diaphragma auf einen Schirm fallen läßt, den man nach und nach in 2-, 3-, 4-fache Entfernung rückt. Der Schirm wird nach MÜLLERS Vorschrift zweckmäßig mit einer quadratischen Teilung bedeckt.

Dieser Versuch hat überdies den Vorzug, ganz natürlich zu dem Problem der Abnahme der Lichtintensität mit der Entfernung hinzuleiten, das hier wenigstens berührt werden mag. Genaueres über Messung der Lichtstärke sollte der Oberstufe vorbehalten bleiben (obwohl man häufig in Lehrbüchern für die Unterstufe diesem Gegenstande begegnet). Dagegen ist die Abnahme der Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat

der Entfernung hier schon plausibel zu machen, ohne daß es auf genaue Messung ankommt. Daß dieselbe Lichtmenge bei doppelt so großem Abstand sich auf die vierfache Fläche verteilt, daher die Intensität nur $\frac{1}{4}$ so groß sein kann, stellt eine so fundamentale Beziehung dar, daß man daran nicht vorbeigehen sollte, obwohl dabei eine genaue Messung nicht in Frage kommt. Auch die Analogie von Lichtmenge und Wärmemenge, Beleuchtungsintensität und Wärmegrad ist hier bemerkenswert im Sinn einer Verknüpfung verschiedener Gebiete durch entsprechende Begriffssysteme. Wie die Beleuchtungsstärke, so schließt sich auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit in propädeutischer Form ungezwungen an die geradlinige Ausbreitung des Lichtes an. Es muß auch in diesem Falle genügen, die runde Zahl von 300 000 km mitzuteilen und zu veranschaulichen. Die Frage nach der Bestimmung der Zahl bleibt als Problem für die Oberstufe bestehen. Die Dauer des Lichtweges von der Sonne zur Erde, ein Ausblick auf die Fixsterne und die Ungleichzeitigkeit des von uns am Fixsternhimmel Wahrgenommenen schließen sich an — eine mächtige Anregung für die Phantasie und ein erstes Beispiel für die oben erwähnte Unterscheidung von Schein und Wirklichkeit. — Als Anwendung der geradlinigen Ausbreitung ist endlich die Lochkamera zu besprechen, die manchen Schülern von photographischen Apparaten her bekannt ist. Interessant ist die Erzeugung von Bildern der Kohlenspitzen einer Bogenlampe, indem man vor die Lampe eine dünne Blechplatte mit einer Anzahl sehr feiner Öffnungen setzt (MÜLLER, T. 174). Auch die Erzeugung eines Sonnenbildchens durch eine feine Öffnung in einem Schirm auch ohne Kamera ist sehr lehrreich.

2. Schatten. Durch die vorhergehenden Versuche über Beleuchtungsstärke ist schon nahegelegt, statt der quadratischen Öffnung eine quadratische Platte in den Weg der von einer punktförmigen Lichtquelle kommenden Strahlen zu setzen. Kern und Halbschatten werden mittels einer Milchglaskugel gezeigt, in der sich eine kräftige Lichtquelle (Nernstlampe) befindet.

Die Anwendung auf Sonnen- und Mondfinsternisse gibt von neuem einen Ausblick auf kosmische Verhältnisse, die bei diesen Betrachtungen immer den Hintergrund bilden sollten.

3. Reflexion. Hier ist der Grundversuch womöglich wieder mit Sonnenlicht auszuführen (ROSENBERG, I 316). Zum genaueren Nachweis des Reflexionsgesetzes dient am besten die optische Scheibe in einer ihrer zahlreichen Ausführungen. Für die Erläuterung der Einfallsebene ist ein Modell aus Holzstäben und Fäden in der Regel nicht überflüssig (MÜLLER, T. 176).

4. Ebener Spiegel. Vor aller mathematischen Behandlung ist die Erscheinung selber ins Auge zu fassen. Denn diese stellt uns vor das Problem: Woher rührt der Schein eines hinter dem Spiegel befindlichen Gegenstandes?

Statt eines flüchtigen Blickes in den Spiegel ist hier die genaue messende Untersuchung der Erscheinung die einzig angemessene. Sehr geeignet hierfür ist der Versuch, den ROSENBERG (I 318) beschreibt. Eine unbelegte Glastafel wird senkrecht aufgestellt und der Abstand des Bildes einer Kerze vom Spiegel an einem Maßstab gemessen. Hübsche Varianten ebenda.¹⁾ Die Spannung der Schüler auf die Erklärung der auffallenden Erscheinung kann gar nicht genug gesteigert werden, wenn die nachfolgende einfache mathematische Betrachtung recht gewürdigt werden soll.

Die Erklärung birgt übrigens mehr Schwierigkeit in sich, als die sehr elementare geometrische Figur erkennen läßt. Erstlich wird dabei vorausgesetzt, daß man sich das gesamte zusammenhängende Licht, das von der Lichtquelle (dem Gegenstande) auströmt, aus Strahlen zusammengesetzt denkt; zweitens aber erfordert der Begriff des Scheinbildes oder virtuellen Bildes hier schon ein vorläufiges Eingehen auf die Funktion des Auges beim Sehakt. Es muß begriffen sein, daß das Auge die wunderbare Fähigkeit hat, nicht nur uns die Lichtwahrnehmung zu vermitteln, sondern auch die Lokalisierung des Ausgangspunktes der Strahlen im Wahrnehmungsraum zu ermöglichen. Erst hierdurch wird verständlich, daß wir den Ursprung der gespiegelten Strahlen dahin verlegen, von wo sie herzukommen scheinen, oder wo sie bei der Rückwärtsverlängerung zusammenlaufen.

Ist dies aber begriffen, so macht die Konstruktion des Bildes eines Gegenstandes keine Schwierigkeit mehr, ebensowenig, daß rechts und links vertauscht sind, daß die Bilder in einem Wasserspiegel auf dem Kopf zu stehen scheinen u. dgl. m. Besondere Erwähnung verdient der Fall, wenn der leuchtende Punkt soweit seitwärts vom Spiegel liegt, daß die Spiegelnormale nicht mehr die Spiegelfläche selbst trifft. — Bei den Winkelspiegeln kommt hierzu noch die Denkfrage: Wie ist es möglich, daß ein Spiegelbild, das selbst nur Schein ist, doch in einem zweiten Spiegel wiederum ein Spiegelbild zu erzeugen vermag? —

Einige Bemerkungen über diffuse Reflexion (Versuch mit glattem und zerknittertem Stanniol oder Silberfolie) sollten hier nicht fehlen, um späterhin die Rolle, die beleuchtete Körper als Lichtaussender spielen (z. B. die Münze unter Wasser beim Brechungsversuch) verständlich zu machen.

5. Hohlspiegel. Man kann im Zweifel sein, ob diese auf die Unterstufe gehören. Ihre methodische Behandlung ist indessen so leicht, daß man sie unbedenklich dieser Stufe zuweisen kann. Bei beschränkter

1) MACH-ODSTRCIL fügen hier die Vexierfrage hinzu: Warum genügt es nicht, zu sagen, das Spiegelbild liegt soweit hinter dem Spiegel, wie der Gegenstand vor dem Spiegel? (Es muß hinzukommen, daß die Punkte des Bildes auf den verlängerten Normalen liegen.)

Zeit, wie an den preußischen Schulen, würde ich indessen eher davon abraten. Hier sind die Linsengesetze für das Verständnis des Sehens wichtiger. Man darf indes keinesfalls mit einer mathematischen Konstruktion beginnen. Das beste ist auch hier, erst die Erscheinungen sprechen zu lassen, also a) die Vereinigung paralleler Strahlen (Sonnenstrahlen!) im Brennpunkt, b) das reelle umgekehrte Bild eines Gegenstandes (Kerzenflamme) auf einem durchscheinenden Schirm, wobei die funktionelle Abhängigkeit der Lage und Größe des Bildes bei allmählicher Veränderung der Lage des Gegenstandes sich aufdrängt, und c) das virtuelle vergrößerte Bild des Beschauers zu zeigen.

Nachdem hierdurch wieder das Erklärungsbedürfnis gereizt ist, tut man gut, das Verständnis durch einen gekrümmten Spiegel, der aus schmalen Streifen ebener Spiegel zusammengesetzt ist, vorzubereiten. Einen solchen hat SZYMANSKI (Z. U. II 64) angegeben, ähnlich J. KRAUS und K. FUCHS (Z. U. VII 296), man vgl. ROSENBERG I 320, 327, wo eine Reihe schöner methodisch geordneter Versuche beschrieben ist. Danach erst wird man den Strahlengang in Zeichnungen festlegen, zunächst für parallele Strahlen und für Strahlen, die von einem Punkt jenseits des Brennpunktes ausgehen. Hat man den Ort des Bildes von leuchtenden Punkten konstruiert, so ergibt sich für einen leuchtenden Gegenstand das Bild leicht daraus, daß für jeden außerhalb der Hauptachse liegenden Punkt eine durch den Mittelpunkt des Spiegels gehende Gerade als Achse angesehen werden kann. In der Unterrichtsstunde lassen sich die Zeichnungen schwer auch nur einigermaßen korrekt von der Mehrzahl der Schüler herstellen, man tut besser sich auf Erläuterung der fertigen Figuren zu beschränken.

Das wesentlich Neue bei diesen Erscheinungen ist das Auftreten eines reellen Bildes, das auch als frei in der Luft schwebend durch einen besonderen Versuch nachgewiesen werden muß und bekanntermaßen stets überraschend wirkt. Man zeige dann noch weiter mit Hilfe eines in verschiedene Entfernung gebrachten Schirmes, daß Strahlen, die vom Brennpunkt aus gehen, als paralleles Bündel reflektiert werden, Strahlen von einem Punkt innerhalb der Brennweite als divergentes Bündel.

An den zweiten dieser Versuche schließt sich die leicht durch Zeichnung zu erläuternde Folgerung, daß ein leuchtender Punkt innerhalb der Brennweite ein virtuelles Bild ergibt. Das Zustandekommen des vergrößerten aufrechten Bildes eines Gegenstandes wird am besten an einer großen fertigen Zeichnung erläutert.

Von Konvexspiegeln kann an den biegsamen Streifen mit Planspiegeln gezeigt werden, daß auftreffende Strahlen divergent reflektiert werden, demnach nur virtuelle Bilder möglich sind.

6. Brechung des Lichtes. Von Beobachtungen in der Natur und im täglichen Leben ist auch hier auszugehen. Der im Wasser geknickt

erscheinende Stab führt zu dem Versuch mit der unter Wasser befindlichen Münze, da hierdurch die Erscheinung am Stabe gleichsam für eine Stelle des Stabs, das auf den Boden aufstoßende Ende, isoliert wird. (Fig. 6.) Die von M ausgehenden Strahlen scheinen von M_1 herzukommen, müssen also an der Grenze von Wasser und Licht eine Knickung erfahren.¹⁾ Dies wird durch NEUMANN'S Lichtbrechungsrinne (Z. U. VII 29; VIII 357, ROSENBERG I 334) ganz ausgezeichnet direkt demonstriert.²⁾

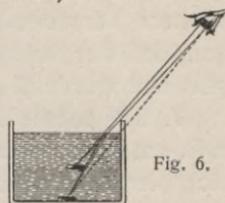


Fig. 6.

Man kann erwarten, daß auch umgekehrt beim Eintritt eines Lichtstrahles in Wasser eine solche Brechung stattfindet. Dies zeigt sehr schön der Versuch von KEPLER, den man zunächst mit einer parallelepipedischen Wasserwanne, oder auch gleich mit einem Glaswürfel anstellen kann (ROSENBERG I 333).³⁾

Zur Messung der Ablenkung des aus einem Medium in ein anderes tretenden Strahls dient am bequemsten die optische Scheibe. Man wird sich vor der Klasse mit rohen Messungen begnügen müssen, schärfere Messungen sind im Schülerpraktikum ausführbar. (Stecknadelversuche, zuerst wohl bei MACH-ODSTRCIL 1887 empfohlen.) Es ist aber ein Irrtum zu glauben, daß der Schüler aus noch so genauen Messungen „das Gesetzmäßige bei der Brechung des Lichtstrahls selbst herausfinden kann“ (BLÜMEL, Z. U. II 162). Hier trifft vielmehr MÜLLER (T. 182) das Richtige mit den Worten: „Aus den nackten Beobachtungsdaten das unbekannte Brechungsgesetz zu finden, ist eine Aufgabe, deren Lösung nur durch eine Offenbarung des Genius ... eingegeben werden konnte.“ Es wird also immer nur eine nachträgliche Bestätigung der Sinusformel durch die Versuchszahlen gegeben werden können.

Auf einer Stufe, wo man den Sinusbegriff noch nicht voraussetzen kann, wird doch die gesetzmäßige Beziehung nicht weggelassen werden dürfen. Man formuliert dann das Gesetz etwa so: Man trage auf den einfallenden und den gebrochenen Strahl von der Trennungsfäche aus gleiche Stücke ab und projiziere diese Stücke auf die Trennungsfäche, dann haben die Projektionen bei allen Einfallswinkeln dasselbe Verhältnis. Dies Verhältnis nennt man Brechungsverhältnis; es ist je nach der

1) Daß das Bild der Münze beim Betrachten mit beiden Augen weder zum Beschauer hin, noch vom Beschauer weg verschoben, sondern nur gehoben erscheint, hat GÖTTING, Z. U. IX 235 gezeigt.

2) Weniger durchsichtig ist der Apparat von BLÜMEL, Z. U. II 162, der das Prinzip des ältesten Lichtbrechungsapparats von Ptolemäus verwendet und sich mehr für messende Schülerversuche eignet.

3) MACH-ODSTRCIL geben noch an, daß man die Schattengrenze im Würfel auf der Unterlage markieren und dann das Auge an die Stelle der Kerze bringen solle; man sieht dann die gezeichnete Schattengrenze mit der außerhalb des Würfels angegebenen in gerader Linie.

Natur der Medien verschieden, z. B. für Luft und Wasser $4/3$, für Luft und Glas $3/2$. Eine einfache Konstruktion des gebrochenen Lichtstrahls sollte sich hier, wenn irgend zugänglich, anschließen (U. § 133). Weitere Versuche mit dem Halbzylinder an der optischen Scheibe zeigen, daß der Strahlengang umkehrbar ist, worauf schon im Beginn hingedeutet wurde.¹⁾

7. Die totale Reflexion könnte man wieder an Beobachtungen, z. B. am Glaswürfel bei KEPLERS Versuch, anknüpfen, doch empfiehlt sich hier noch mehr jene andere Form der Verknüpfung, die in der gedanklichen Verfolgung eines gesetzmäßigen Vorgangs, hier des Übergangs von Licht aus Wasser in Luft, durch den ganzen Bereich der quantitativen Möglichkeit besteht, also in der funktionalen Betrachtungsart. Man entdeckt dann gleichsam die totale Reflexion von der theoretischen Seite her. Man denke Strahlen von einem Punkt unter Wasser auf die Grenzfläche gegen Luft auffallend und konstruiere den zugehörigen Strahl in der Luft. Es zeigt sich, daß bei einer gewissen Größe des Einfallswinkels die Projektion des austretenden Strahls so lang wie der Kreisradius wird, der Strahl also parallel der Grenzfläche austreten muß. Was geschieht aber, wenn der Winkel im Wasser noch größer wird? — Die Antwort darauf gibt der Versuch, am schönsten in der von STAHLBERG (Z. U. XV 65), KEMNA (Z. U. XV 156), STROMAN (Z. U. XVIII 74), KOLBE (Z. U. XIX 1) und GRIMSEHL (XX 215) angegebenen Form. Es folgen die bekannten Anwendungen. —

8. Planparallele Platte und Prisma. Die Verschiebung des Lichtweges in planparallelen Platten läßt sich sowohl objektiv als subjektiv zeigen (ROSENBERG I 338). Man beginnt am besten mit der subjektiven Beobachtung, fügt hieran die Erklärung durch Zeichnung und demonstriert dann erst den in der Zeichnung dargestellten Weg des Lichtstrahls durch den objektiven Versuch. Beim Prisma läßt sich die Farbenzerstreuung nicht ignorieren, wenn man auch jedes weitere Eingehen darauf bis zur Oberstufe zu verschieben vorzieht.

Man verteile eine Anzahl Prismen, die ja sehr billig zu haben sind, in der Klasse und lasse nach geraden Begrenzungen heller Flächen (Fensterkreuze) visieren. Es wird nicht allen Schülern gelingen, die Hebung der Grenzlinien in der Richtung nach der brechenden Kante zu konstatieren. Man stelle daher gleichzeitig ein Prisma so auf, daß durch einen Schirm mit Schauöffnung nach einem erhellten Spalt gesehen werden kann.²⁾ Nun erst kann ein eigentliches Experiment über den

1) Für die Brechung zwischen Luft und Wasser ist besonders gut geeignet die TYNDALLSche Trommel in der Konstruktion von STROMAN, Z. U. XVIII 71, XIX 160; man beachte auch den Apparat von STAHLBERG, Z. U. XV 65 und XVI 33.

2) ROSENBERGS Vorschlag (I 340), den Spalt durch eine Natriumflamme zu erhellen, scheint mir das Phänomen für die Schüler dieser Stufe mehr zu komplizieren als zu vereinfachen.

Strahlengang im Prisma angestellt werden. (ROSENBERG I 340, Fig. 297, gibt hierzu praktische Winke.) Ein Prisma von geringer Dispersion ist der optischen Scheibe noch vorzuziehen.

Für die Unterstufe genügt die Tatsache der Ablenkung des Strahls in der von der brechenden Kante abgewendeten Richtung. Inbetreff der Dispersion mag die historische Bemerkung ausreichen (U. § 135): „Der große englische Physiker NEWTON hat nachgewiesen, daß das Sonnenlicht durch das Prisma in farbige Bestandteile — rot, orange, gelb, grün, blau, violett — zerlegt wird“. Weiteres bleibt der Oberstufe vorbehalten.¹⁾

9. Linsen. Man beginnt wieder wie bei den Hohlspiegeln mit den charakteristischen Versuchen an Sammellinsen: a) Vereinigung paralleler Strahlen (Sonnenstrahlen) im Brennpunkt, b) Erzeugung eines reellen Bildes, besonders auffällig und fesselnd das umgekehrte verkleinerte Bild der vor dem Fenster befindlichen Gegenstände, c) Vergrößerung eines durch eine Linse betrachteten Objekts.

Zur Erklärung der Erscheinungen kann man nach GRIMSEHL eine aus Prismen zusammengesetzte Linse benutzen (Z. U. XX 215). Für nicht ganz in geometrischer Anschauung Ungeübte genügt wohl die Zeichnung des Lichtstrahlenweges an verschiedenen Stellen der Linse, wobei die Linse auch aus einer Reihe von Prismen zusammengesetzt zu denken ist (so schon bei MACH-ODSTRICIL); der annähernd homozentrische Charakter der gebrochenen Strahlen kann nur durch Berufung auf das Experiment festgestellt werden, da die Aufstellung der „Linsenformel“ auf dieser Stufe ausgeschlossen ist. Eine vorzügliche Demonstration hierfür besteht darin, durch ein mit Spalten versehenes Diaphragma das Licht in eine Reihe getrennter Strahlenbündel zu zerlegen und deren Gang durch Rauch oder Salmiaknebel sichtbar zu machen (MÜLLER, T. 189). Die Konstruktion der Bilder wird wie bei den Hohlspiegeln durch Zeichnung zu geben sein; die Lage des Bildpunktes zu einem außerhalb der Achse liegenden leuchtenden Punkte ist ebenfalls durch den Versuch zu ermitteln. Auch hier dürfte das Hantieren mit freien in passende Stative gesetzten Linsen dem Gebrauch der optischen Bank vorzuziehen sein. Sind zuvor die Hohlspiegel besprochen worden, so empfiehlt es sich, die Analogie von Sammellinsen und Hohlspiegeln näher zu verfolgen. Auf die divergent austretenden Strahlen und den Gebrauch der Konkavlinse als Vergrößerungsglas einzugehen ist erst nach der Beschreibung des Auges zu empfehlen. Von den Konkavlinen genügt ähnlich wie bei Konkavspiegeln der Nachweis, daß sie die Wirkung haben, die

1) Wo man, wie in Österreich, der Unterstufe mehr Zeit widmen kann, mag man die Grunderscheinungen der Dispersion vorführen und sogar noch eine elementare Erklärung des Regenbogens hinzufügen, obschon mir diese für die Unterstufe reichlich schwer erscheint.

Divergenz der Strahlen zu vergrößern, und daher keine reellen Bilder erzeugen. Von Anwendungen der Sammellinsen sind zunächst nur photographischer Apparat und Zauberlaterne zu besprechen; auch wohl einige Demonstrationen am Projektionsapparat anzuschließen.

10. Auge und optische Instrumente. Neben einer guten Durchschnitszeichnung des Auges ist der Gebrauch eines Modells nicht abzulehnen, da das Raumschauungsvermögen der Schüler auf dieser Stufe zumeist nicht sehr entwickelt ist. MÜLLER (T. 200) macht darauf aufmerksam, daß der gewöhnliche Vergleich mit einer photographischen Kamera wenig zutreffend und ein sogenanntes optisches Auge nach dem Prinzip der Kamera eher ein Hindernis als eine Stütze des Verständnisses sei, da nicht die Kristalllinse, sondern die wassergefüllte Hornhautkalotte in erster Linie an der Erzeugung des Netzhautbildes beteiligt sei. MÜLLER empfiehlt deshalb das optische Auge nach KÜHNE (von MAX KOHL) bzw. eine von ihm nach demselben Prinzip konstruierte vereinfachte Wasserkamera.

Für die Akkommodation besonders im Hinblick auf Kurz- und Weitsichtigkeit und den Gebrauch der Brillengläser stellt man am besten, statt der käuflichen fertigen Modelle, aus einigen Konvex- und Konkavlinen nebst „Pfeilzylinder“ als Lichtquelle und kleinem Schirm selbst die geeigneten Kombinationen zusammen (ROSENBERG I 345).

An die Besprechung von Sehwinkel und scheinbarer Größe schließt sich die Erklärung der Lupe an, durch die das Bild des sehr nahen Gegenstandes bei unverändertem Sehwinkel in die Weite des deutlichen Sehens (den Nahpunkt) gerückt wird, und somit größer erscheint, als wenn der Gegenstand selbst ohne Zwischenschiebung der Lupe in den Nahepunkt gestellt würde.¹⁾

Für die optischen Instrumente dürfte auf dieser Stufe die Zusammenstellung der betreffenden Linsenkombinationen und somit der experimentelle Nachweis des Zustandekommens vergrößerter Bilder genügen.

§ 15. Magnetismus.

Dies Kapitel ist vor den früheren ausgezeichnet durch das besonders starke Hervortreten hypothetischer Vorstellungen, die sich bei genauerem Zusehen als Fiktionen erweisen. Man wird vorübergehend die Hypothese der magnetischen Fluida erwähnen und vielleicht auch verwenden, um sie bald durch die Hypothese der Molekularmagnete zu ersetzen. Man soll aber darüber keinen Zweifel lassen, daß es sich auch im zweiten Falle nur um ein

1) Über Weite des deutlichen Sehens und Nahepunkt vgl. man DVORAK, Z. U. XXI 373 und weiter unten Abschnitt III § 37.

Bild handelt; stoßen doch schon dem denkenden Schüler Schwierigkeiten nicht geringer Art auf, wenn er der Hypothese weiter nachgeht und z. B. die magnetischen Pole eines Magnetstabes aus der Annahme von Molekularmagneten zu erklären sucht.

Man wird also nicht etwa sagen dürfen, man nimmt an, daß jedes Masseteilchen des Eisens ein winziger Magnet ist – als ob es sich um eine anerkannte wissenschaftliche Theorie handelte; sondern etwa: man kann sich vorläufig einmal vorstellen, man kann sich die Sache so denken, als ob ein Magnet aus solchen Molekularmagneten zusammengesetzt sei.

Für die Beschäftigung der Schüler außerhalb des Unterrichts bietet dies Kapitel mannigfache Anregung. Erwähnt sei nur die Festlegung des magnetischen Kraftfeldes von Magneten unter Benutzung einer kleinen Bussole (HAHN, Hdb. IX Aufg. 3).

Die Analogie der Erde mit einem großen Magneten liegt so nahe, daß man sie nicht so streng von der Hand weisen sollte, wie GRIMSEHL es tut (D. 100). Hat doch der Begründer der Lehre vom Magnetismus, der große WILLIAM GILBERT, seinen Zeitgenossen diese Analogie durch eine magnetisierte Eisenkugel, eine „terrella“ begreiflich zu machen gesucht. Darum mag man auch den Globus aus Holz oder Pappe, der im Innern einen Stahlmagneten birgt, und auf dem man eine Inklinationsnadel reisen läßt, gelten lassen, obwohl ich dem Gebrauch eines solchen Veranschaulichungsmittels nicht gerade das Wort reden will.

Im übrigen bildet dies Kapitel ein besonders günstiges Beispiel induktiver Untersuchung. Ich habe deshalb gern von einer Lehrprobe Gebrauch gemacht, die mir von einem bewährten Meister der Unterrichtsmethodik auf meinen Wunsch zur Verfügung gestellt ist, und die, obschon aus älterer Zeit stammend, doch noch heut in vieler Hinsicht vorbildlich sein kann. Sie gehört dem Kursus einer Untersekunda an.

Daß auf der Unterstufe die Kraftlinien über das hinaus, was diese Lehrprobe bietet, noch keine weitere Rolle zu spielen haben, ist auch heut noch meine Überzeugung, obwohl der Verfasser eines verbreiteten Lehrbuchs in dieser Hinsicht weitergehen zu können glaubt.

Lehrprobe.¹⁾

I.

L. Unter diesen Geräten sind einige, die den meisten von euch bekannt sind.

S. Ich sehe einen Kompaß²⁾ und einige Magnete.

L. Was ist dir über den Kompaß bekannt?

S. Der Kompaß ist eine in einem Kästchen eingeschlossene leichte Nadel, die auf einer Spitze leicht drehbar schwebt, und unter der sich eine Windrose befindet.

L. Und was weißt du von seiner Wirkungsweise?

S. Die Nadel weist stets nach Norden und deshalb kann man den Kompaß zur Orientierung auf dem Meere benutzen.

L. Kann man denn jede um ihren Mittelpunkt in wagrechter Ebene leicht drehbare Zeigernadel als Kompaßnadel benutzen und welches Ende weist eigentlich nach Norden?

S. Es muß eine Magnetnadel sein und ihr blaues Ende zeigt nach Norden.

L. Es ist demnach wohl kein Zufall, daß hier Kompaß und Magnete gleichzeitig aufgestellt sind. Kennt ihr eine weitere Beziehung zwischen beiden?

S. Wenn man dem Kompaß einen Magnetstab nähert, so gerät die Nadel in lebhaftere Bewegung und beruhigt sich erst wieder, wenn jener entfernt wird.

L. Also scheinen Magnete einander zu beeinflussen. Kennt ihr noch weitere Eigenschaften der Magnete?

S. Ja, ein Magnet zieht Eisenstückchen an und hält sie fest, und die Kompaßnadel wird auch durch genäherte Eisenstücke aus ihrer Lage abgelenkt.

L. Wir haben da einige bekannte Erfahrungstatsachen zusammengestellt und sehen uns damit ebenso vielen Rätseln gegenüber. Könnt ihr mir einige Probleme namhaft machen, die sich uns angesichts der genannten Erscheinungen aufdrängen?

S. Wieso weist das eine Ende der Kompaßnadel stets nach Norden?

L. Gewiß! Das ist wohl die nächstliegende Frage, aber auch eine recht schwierige. Es gibt aber auch noch andere, deren Beantwortung vielleicht leichter ist.

S. Es wäre genauer zu untersuchen, worin die Einwirkung eines Magneten oder eines Eisenstückes auf eine Kompaßnadel besteht.

L. Und weiter.

S. Gibt es noch andere Stoffe außer Eisen, die von einem Magnet angezogen werden?

L. Vielleicht gibt es aber auch noch tieferliegende Probleme. Was ist denn wohl das Auffallendste an den genannten Erscheinungen?

S. Daß sie durch alle Stoffe hindurchgehen.

1) Von Prof. K. NOACK, nach stenographischen Aufzeichnungen von Lehramtskandidaten.

2) Die richtigere Bezeichnung ist Bussole, da beim Kompaß Nadel und Windrose fest miteinander verbunden sind.

L. Wieso?

S. Der genäherte Magnetstab beunruhigt z. B. die Magnetnadel durch das Gehäuse hindurch.

L. Gut. Damit kommen wir der Hauptfrage näher; ihr könnt wohl noch einen Schritt weiter gehen. Was fällt uns denn besonders merkwürdig auf, wenn wir die Wirkung des Magnets auf die Kompaßnadel ins Auge fassen?

S. Daß die Wirkung schon aus beträchtlicher Entfernung stattfindet und daß keine nachweisbare Verbindung zwischen beiden besteht.

L. Bei welchem Spielzeug habt ihr das schon mit lebhaftem Erstaunen gesehen?

S. Der Blechfisch, der auf einem Teller mit Wasser schwimmt, nähert sich dem vorgehaltenen Magnetstäbchen.

L. Schön, damit haben wir vorläufig einmal genug Fragen, die der Beantwortung harren. Wir wollen mit der Untersuchung beginnen, wie ein Magnet auf einen anderen einwirkt. Um diese Frage in größerem Maßstab, für alle deutlich sichtbar, zu prüfen, müssen wir einen unserer Magnetstäbe beweglich machen; wie könnte das geschehen?

S. Wir können den Magnetstab an einem Faden aufhängen.

L. Dazu eignet sich sehr gut ein solches Papierschiffchen, das mit einem Bündel Seidenfäden an einem Gestell aufgehängt ist. Ich lege den Magnetstab so hinein, daß er wagrecht liegt, und lasse ihn los, was geschieht?

S. Er schwankt hin und her und die Schwankungen werden immer kleiner.

L. Wie kommt es, daß die Schwankungen so rasch aufhören?

S. Am Schiffchen ist eine große Papierfahne angebracht, durch die die Schwankungen gehemmt werden. Jetzt steht der Magnet fast still.

L. Wie kannst du diese Ruhelage des aufgehängten und in wagrechter Ebene leicht beweglichen Magnetstabes genau beschreiben?

S. Der Magnetstab weist beinahe in die Richtung der Mittagslinie.

L. Wie kannst du das wissen?

S. Auf dem Tisch befindet sich ein weißer Ölfarbetrichter, den wir früher nach der Schattenlage des Fensterkreuzes mittags um 12^h festgestellt haben. Der Magnet steht fast parallel über diesem Strich.

L. Ich will das Ende des Stabes, das nach Norden weist, durch ein übergestreiftes Papierfändchen kennzeichnen, ist es wahrscheinlich, daß das andere Stabende die gleiche Eigentümlichkeit zeigt?

S. Nein, denn nur das blaue Ende einer Kompaßnadel weist nach Norden.

L. Wir wollen aber doch der Frage nachgehen; wie sollen wir das prüfen?

S. Wir drehen den Magnetstab um 180° herum, so daß die Papierfahne nach Süden weist, und lassen ihn dann los. (Geschieht.)

L. Was beobachteten wir jetzt?

S. Der Magnet setzt sich ganz langsam in Bewegung, jetzt wird die Bewegung schneller, aber er dreht sich ganz herum.

L. Doch nicht! Wir wollen es abwarten.

S. Er kehrt um und macht wie vorhin sehr große Schwingungen, die aber rasch abnehmen. Allmählich nimmt er wieder die alte Lage an.

L. Welchen Satz können wir also auf Grund dieser Beobachtung aussprechen?

S. Ein Magnetstab, der so aufgehängt ist, daß er sich in wagrechter Ebene frei bewegen kann, nimmt nahezu nord-südliche Lage an, wobei ein bestimmtes Ende stets nach Norden weist; bringt man ihn in andere Lage, so wendet sich dieses Ende nach einigen Schwingungen immer wieder nach Norden.

L. Wir wollen es deshalb kurz Nordende oder Nordpol nennen. Damit haben wir ein Verfahren kennen gelernt, mit dessen Hilfe wir bei einem Magnetstab jederzeit rasch und leicht das Nordende bestimmen können. Wir wenden es auf diesen zweiten Magnetstab an und bezeichnen wieder sein Nordende mit einer Papierfahne.

Jetzt verfügen wir in dem aufgehängten Magnetstab über eine weithin sichtbare Kompaßnadel und können die Einwirkung studieren, die die andere auf sie ausübt. Was geschieht, wenn ich den Magnetstab mit seinem Nordende dem Nordpol der Kompaßnadel nähere?

S. Das Nordende des Kompasses weicht zurück.

L. Ob sich das Südende wohl ebenso verhält? Prüfe die Frage (geschieht).

S. Nein, das Südende nähert sich dem genäherten Nordpol.

L. Welche Gegenprobe bietet sich uns noch dar?

S. Wir nähern den Südpol des Magnetes zuerst dem Südende, dann dem Nordende des beweglichen Magnetes und sehen dieselbe Erscheinung, der Südpol stößt den Südpol ab, zieht aber den Nordpol an.

L. Wenn wir die Nordpole kurz als gleichnamig bezeichnen und ebenso die Südpole unter sich, wie können wir alsdann das Ergebnis unserer Versuche formulieren?

S. Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

L. Ich will nichts einwenden gegen die landläufigen Bezeichnungen „sich anziehen“ und „abstoßen“, obwohl sie nicht ganz zutreffend sein können, denn es besteht doch keinerlei sichtbare Verbindung zwischen den Polen, wie etwa zwischen dem Zugtier und dem Wagen.

Wir sehen also aus diesen Versuchen, daß ein sehr wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Enden eines Magnetstabes besteht, der sich einmal in der Einstellung des beweglichen Stabes in Nord-südrichtung äußert, wobei ein bestimmtes Ende stets nach Norden weist, und zweitens in der gegenseitigen Abstoßung und Anziehung. Nun wurde aber eine Kompaßnadel auch durch ein genähertes Eisenstück beeinflusst. Wie sollen wir diese Erscheinung genauer prüfen?

S. In der gleichen Weise, wir nähern wie früher dem aufgehängten Magnetstab von der Seite einen Eisenstab und sehen, daß jedes seiner Enden sowohl den Nordpol wie den Südpol anzieht.

L. Danach müßten wir sagen: Das Eisen zieht den Magnet an, während doch die sprichwörtlich gewordene Redensart umgekehrt lautet.

S. Es wird wahrscheinlich auch so richtig sein.

L. Wie meinst du das?

S. Die Anziehung wird wohl gegenseitig sein; wir könnten das vielleicht prüfen, wenn wir den Eisenstab ins Schiffchen legen und ihm den Magnetstab nähern.

L. Wohl! Das können wir gleich entscheiden. (Geschieht.) Eure Vermutung erweist sich als richtig und wir lernen daraus, daß auch bei diesen Kräften eine Beziehung gilt, die wir schon bei anderer Gelegenheit kennen gelernt haben.

S. Jedem Zug entspricht ein gleicher Gegenzug und jedem Druck ein gleicher Gegendruck.

L. Mit Hilfe des Umstandes, daß ein Magnetstab Eisen stets anzieht, könnten wir nun vielleicht die Frage näher prüfen, von welchen Stellen des Magnetes diese Kraft eigentlich ausgeht. Wie könnte das geschehen?

S. Wir könnten prüfen, ob ein Stückchen Eisen von allen Punkten des Magnetstabes angezogen wird und ob es überall haftet.

L. Den Vorschlag wollen wir ausführen. (Geschieht.) Wir sehen also, daß das Stäbchen an den Enden recht fest haftet und daß dies gegen die Mitte hin in abnehmendem Maße der Fall ist. Und wie steht die Sache in der Mitte des Stabes selbst?

S. Da herrscht gar keine Anziehung, das Eisenstäbchen haftet nicht.

L. Ganz richtig! Dementsprechend redet man von den beiden Polen eines Magnetes als den Stellen, wo dieses Haften in stärkstem Maße stattfindet, und von der sie trennenden Indifferenzzone, wo überhaupt kein Haften stattfindet. Bei unseren geraden Magnetstäben liegt diese Stelle meistens in der Mitte; die gerade Verbindungslinie der Pole nennt man die magnetische Achse. Ich möchte aber noch eine andere Form dieses Versuches vorschlagen, die den Vorzug hat, daß sie uns das Verhalten der verschiedenen Punkte eines Magnetstabes auf einen einzigen Blick zeigt, und aus der wir bei aufmerksamer Betrachtung eine neue Erscheinung kennen lernen werden.

Ich habe in dieser flachen Schale eine große Menge kleine eiserne Drahtstifte; ich lege den Magnetstab flach in die Schale und hebe ihn dann vorsichtig heraus.

S. Es bleiben, wie zu erwarten war, überall Drahtstifte hängen, nur nicht an der Indifferenzzone; nach den Enden hin nimmt die Menge mächtig zu.

L. Und welches Neue können wir dabei beobachten?

S. Die Drahtstifte hängen nicht nur am Magnet, sondern an den Polen hängen sie auch aneinander, an einzelnen Stellen bis zu vier oder fünf Stück eins am anderen.

L. Welchen Schluß würden wir aus dieser Erscheinung wohl ziehen müssen?

S. Daß die Eisenstifte selbst Magnete geworden sind.

L. Gut; doch wird es notwendig sein, diese Vermutung durch einen geeigneten Versuch auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Ich befestige zu diesem Zweck an einem Stativ unseren Eisenstab in senkrechter Lage und nähere seinem unteren Ende die Schale mit Drahtstiften; ihr seht, daß der Stab keine magnetische Wirkung äußert. Jetzt befestige ich den Magnetstab dicht über dem Eisenstab ebenfalls in senkrechter Lage, aber ohne daß er ihn berührt. Was sehen wir jetzt bei Annäherung der Drahtstifte von unten?

S. Es wird eine ganze Menge der Drahtstifte festgehalten; aber wenn der Magnet entfernt wird, fallen sie wieder ab.

L. Wie würde man diese Beobachtung formulieren können?

S. Ein Eisenstab wird selbst magnetisch, so lange er sich in der Nähe eines Magnetstabes befindet.

L. Die Untersuchung ist aber noch nicht erschöpfend, wir müssen unsere Kenntnisse über den magnetischen Eisenstab noch erweitern.

S. Wir wissen noch nicht, ob der Stab zwei Pole hat, oder nur einen.

L. Wie denkst du dir das?

S. Da wir den Stab dem Nordpol des Magnetes genähert haben, so kann er vielleicht von diesem die magnetische Eigenschaft entlehnt haben.

L. Wie sollen wir das prüfen?

S. Wir können mit einer Kompaßnadel die verschiedenen Stellen des Eisenstabes untersuchen und feststellen, ob Anziehung oder Abstoßung des Nordendes stattfindet.

L. Mit einem gewöhnlichen Kompaß kann man das schlecht prüfen, wenigstens am oberen Ende des Eisenstabes, weil dieses dem starken Nordpol des Magnets zu nahe liegt; mit einer kleinen Probenadel im Reagensglas, mit der wir sehr nahe an die zu untersuchende Stelle herankommen können, läßt sich die Prüfung besser ausführen. Was sehen wir nun?

S. Der Eisenstab hat oben nahe dem erregenden Nordpol einen Südpol¹⁾, in der Mitte eine Indifferenzzone und unten einen Nordpol. Er ist also ein vollständiger Magnet geworden, allerdings nur solange, als er in der Nähe des erregenden Magnetstabes ist.

L. Man nennt diese Erscheinung „magnetische Influenz“. Sie erklärt die Tatsache der Anziehung des Eisens durch einen Magnetstab. Wieso?

S. Da ein magnetischer Nordpol im Eisen an nächster Stelle einen Südpol hervorruft, so muß Anziehung stattfinden, wie zwischen ungleichnamigen Magnetpolen.

L. Aus welchem Material sind denn solche Magnetstäbe angefertigt?

S. Sie bestehen aus Stahl.

L. Ist denn Stahl nicht auch Eisen?

1) Man kann dies auch durch die in Unterstufe § 82 skizzierte Anordnung nachweisen, indem man dem einen Pol eines Stabmagneten eine Magnetnadel gegenüberstellt und dieser dann von der Seite einen Eisenstab nähert.

S. Doch, es ist aber eine besondere Sorte Eisen mit größerem Kohlenstoffgehalt, als beim Schmiedeeisen.

L. Nun, und welche Vermutung liegt da wohl nahe?

S. Daß auch ein Stab aus Stahl, an Stelle des Eisenstabes gebracht, ein Magnet wird; es wäre vielleicht möglich, daß der Stahlstab auch nach Entfernung des erregenden Magnetes magnetisch bliebe. Wir können ja den letzten Versuch mit Stahl wiederholen und prüfen, ob der Stab auch nach Entfernung des erregenden Magnetes noch magnetische Pole hat.

L. Das wollen wir gleich prüfen und zwar mit einer Stricknadel. (Geschieht.) Wie steht es nun mit dieser Stricknadel?

S. Ich nähere ihr oberes Ende dem Südpol des Kompasses und sehe an der Abstoßung, daß es ein Südpol geworden ist, und unten ist's umgekehrt.

L. Wir erkennen also, daß auch im Stahl die magnetische Influenz stattfindet; aber der Stahl behält die magnetischen Eigenschaften im Gegensatz zum Schmiedeeisen. Man sagt daher, der Stahlstab wird ein „permanent“ Magnet, das Schmiedeeisen dagegen nur ein „temporärer“. Vielleicht ist euch noch ein anderer Unterschied aufgefallen?

S. Die Stricknadel wurde viel schwächer magnetisch als das Eisen.

L. Woran liegt das wohl?

S. Sie ist viel dünner als der früher benutzte Eisenstab.

L. Dann wollen wir den Versuch wiederholen mit einem Eisendraht von derselben Länge und Dicke wie die Stricknadel. Ihr seht, er trägt dies Eisenstückchen, wenn ihm der erregende Magnet auf angemessene Entfernung genähert wird. Die Stricknadel dagegen trägt es unter den gleichen Verhältnissen nicht.

S. Dann muß das verschiedene Verhalten im Material begründet sein; der Stahl nimmt die magnetische Eigenschaft schwerer an, als das Schmiedeeisen, hält sie aber dann fest.

L. Man kann übrigens die Stricknadel weit kräftiger magnetisieren, als es in unserem Fall durch die bloße Annäherung geschah, wenn man das Verfahren des Doppelstriches anwendet. (Geschieht.) So sind die ersten künstlichen Stahlmagnete, Stäbe und Hufeisen, durch Streichen mit einem sogenannten natürlichen Magnet hergestellt worden. Solche natürliche Magnete sind gewisse Eisenerze (Magnetisenstein), die an einigen Orten der Erde gefunden werden. Woher sie ihre magnetischen Eigenschaften haben, wird uns vielleicht später klar werden.

Wenn wir sehen, wie eine solche Stricknadel beim fortgesetzten Streichen mit einem guten Magnetstabe bis zu einer gewissen Grenze immer stärker magnetisch wird, so haben wir ganz unwillkürlich den Eindruck, daß hier ein Übergang von Stab auf Nadel stattfindet. Das könnte aber vielleicht nachweisbar sein.

S. Wenn vielleicht ein Stoff übergegangen wäre, so müßte die Nadel an Gewicht zugenommen haben, der Magnetstab dagegen müßte leichter geworden sein.

L. Mit dieser großen Zeigerwage, die wir schon als sehr empfindlich kennen, läßt sich die aufgeworfene Frage leicht prüfen. Was wiegt die unmagnetische Nadel?

S. Der Zeiger steht auf 8,25; also wiegt die Nadel 8,25 g.

L. Nachdem ich sie durch Streichen so stark wie möglich magnetisiert habe, prüfe ich sie, ihr seht, daß sie einen ziemlich großen Drahtstift trägt. Nun wiege sie wieder.

S. Die Wage zeigt genau die gleiche Einstellung. Es ist also keineswegs ein Stoff in wägbarer Menge übergegangen.

L. In derselben Weise könnten wir den Magnetstab prüfen; auch die feinsten Wägungen haben nicht die kleinste Gewichtszunahme gezeigt. Aber damit ist doch die Frage eines etwaigen Überganges nicht abgetan.

S. Es könnte ja etwas Unwägbares vom Magnet auf die Stricknadel übergegangen sein.

L. Und wie ließe sich das vielleicht nachweisen?

S. Die Kraft des Magnetstabes müßte abgenommen haben. Das könnten wir leicht prüfen. Jetzt lenkt der Magnet bei dieser Stellung die Kompaßnadel um 43° ab. Ich magnetisiere durch Streichen eine Stricknadel, bringe ihn in dieselbe Stellung und finde wieder dieselbe Ablenkung. Die Kraft des Magnetes hat also nicht in bemerkbarer Weise abgenommen.

L. Wie steht es also mit der Hypothese des Überganges?

S. Es läßt sich in keiner Weise etwas derartiges nachweisen.

L. Wir haben neulich gesehen, daß zwischen Nordpol und Südpol ein wesentlicher Unterschied im Verhalten besteht, ersterer weist bei einem beweglich aufgehängten Stabe stets nach Norden, und ferner stößt er einen anderen gleichnamigen Nordpol ab, während er einen Südpol anzieht. Trotzdem können wir daraufhin nicht behaupten, daß Nord- und Südpol entgegengesetzter Art sind, etwa wie + und - Elektrizität. Wie haben wir seinerzeit diese Frage bei den beiden Elektrizitäten entschieden?

S. Wir luden zwei gleichempfindliche Elektroskope bis zum gleichen Ausschlag, das eine +, das andere -. Wenn wir dann zwischen beiden eine leitende Brücke an isolierender Handhabe herstellten, heben sich die beiden entgegengesetzt gleichen Ladungen zu 0 auf.

L. Kann man dieses Verfahren auch zur Prüfung unserer Frage benutzen?

S. Nein, denn man kann die magnetischen Eigenschaften des Nordpols und des Südpols nicht auf einen und denselben dritten Körper übertragen, da sie am Stahl haften.

L. Man kann aber vielleicht die magnetische Eigenschaft des Nordpols und die davon verschiedene des Südpols sehr nahe auf denselben Punkt einwirken lassen und prüfen, ob der eine die Wirkung der anderen aufhebt. Wie könnte man das wohl machen?

S. Wenn man zwei gleichgroße und gleichstarke Magnete umgekehrt aufeinander in dasselbe Papierschiffchen legte, so könnte man leicht feststellen, ob sie sich immer noch nord-südlich einstellen.

L. Das wäre doch nur ein Beweis für vollkommene Gleichheit der Magnete. Wir wollen es anders machen; auf diese Säule lege ich einen dieser Magnete und hänge an seinen bezeichneten Nordpol ein Eisenstückchen, das er noch gerade sicher zu tragen vermag; alsdann lege ich den anderen Magnetstab vorsichtig in umgekehrter Lage darauf, Nordpol auf Südpol, Südpol auf Nordpol. Nun gebt acht, was geschieht in dem Augenblick, wo letztere beiden Enden sich berühren.

S. Das Eisenstückchen fällt ab und auch kleine Stückchen haften nicht mehr.

L. Daraus schließen wir, daß die Pole eines Magnetes nicht nur verschiedener Art, sondern daß sie entgegengesetzter Art sind. Daher bezeichnet man willkürlich den Nordpol als + Pol, den Südpol als - Pol.

Könnte man den soeben ausgeführten Versuch nicht auch dann anstellen, wenn man nur einen Magnetstab zur Verfügung hat.

S. Man könnte vielleicht den Stab in der Indifferenzzone durchfeilen und die Hälften auseinander legen.

L. Bei diesem Vorschlag gehst du also von der Annahme aus, daß die eine Hälfte nur nordmagnetisch, die andere ausschließlich süd magnetisch wäre. Wir können den Versuch leicht ausführen und die Frage entscheiden.

Ich nehme eine durch Glühen und Ablöschen im Wasser glashart gemachte Stricknadel und magnetisiere sie durch Streichen.¹⁾ Alsdann bestimme ich das Nordende und bezeichne es durch ein aufgestecktes Papierfährchen. Jetzt zerbreche ich die Nadel in der Mitte, was infolge ihrer Härte leicht auszuführen ist. Die beiden Bruchstellen müßten jetzt nach der ausgesprochenen Vermutung, da sie in der Indifferenzzone lagen, unmagnetisch sein. Was lehrt die Probe?

S. Die Nordhälfte hat an der Bruchstelle einen Südpol, die Südhälfte einen Nordpol; es scheint demnach, daß man die Pole nicht voneinander trennen und isolieren kann.

L. Wenn man die beiden Hälften wieder aneinander fügt, und die Bruchstelle mit einem Streifen gummierten Papieres umwickelt, so ergibt die Prüfung, daß der reparierte Magnet in der Mitte wieder seine Indifferenzzone hat; das kann uns ja auch nicht weiter überraschen. Warum wohl nicht?

S. Die hier zusammenstoßenden entgegengesetzten Pole heben sich in ihrer Wirkung auf.

L. Wir setzen nun das Verfahren des Zerbrechens so lange fort, als die kleinen Bruchteile noch gehandhabt werden können, und finden stets das gleiche Resultat. Wenn man in dieser Weise weiter schließt, kann man auf die Vermutung kommen, daß schließlich jedes einzelne Molekül ein vollständiger Magnet ist. Darauf gründet sich die von Ampère aufgestellte Molekularhypothese des Magnetismus. Im magnetischen Eisen und Stahl sind diese Molekularmagnete ungeordnet und üben deshalb keine Wirkung nach außen

1) Statt der Stricknadel kann man auch eine gestreckte und gehärtete Uhrfeder nehmen, auf der sich die Pole leicht mit Fettstift (Dermographischer Stift von A. W. Faber) markieren lassen.

aus, nähert man einen starken Magnet, so wird wohl welcher Vorgang stattfinden?

S. Die Molekularmagnete drehen sich in solche Stellung, daß sie dem genäherten Nordpol ihre Südpole zukehren, sie werden also geordnet und wirken dann in ihrer Gesamtheit nach außen als Magnet.

L. Und wie erklärt sich wohl der von uns beobachtete Unterschied zwischen Eisen und Stahl?

S. Der Stahl ist viel härter und spröder als das Schmiedeeisen, seine Moleküle haften fester aneinander und sind nicht so leicht beweglich, wie die des Schmiedeeisens, deshalb ordnen sie sich schwerer, wenn ein Magnetstab genähert wird oder beim Streichen, sie bleiben aber auch in größerer Zahl geordnet als beim Eisen, wenn der influenzierende Stab wieder entfernt wird.

L. Gut, das läßt sich hören. Wenn es also ein Mittel gäbe, die Molekularbeweglichkeit zu steigern, so müßte sich der Stahl in seinem Verhalten dem Schmiedeeisen nähern. Kennt ihr vielleicht ein solches Mittel?

S. Ja, gewiß! Durch Erwärmen kann man die Beweglichkeit der Moleküle leicht erhöhen. Wir brauchen also bloß eine magnetisierte Stricknadel zu erwärmen und dürften erwarten, daß sie ihren Magnetismus verliert.

L. Machen wir die Probe auf diese Vermutung. Ihr erkennt, daß die Stricknadel recht stark magnetisch ist; ich erwärme sie im Bunsenbrenner bis zur Rotglut und lasse erkalten. Prüfe sie jetzt wieder!

S. Sie trägt das Eisenstückchen nicht mehr; auch kleinere Stückchen nicht. Demnach hat sie wirklich ihren Magnetismus verloren und verhielt sich im glühenden Zustand wie Schmiedeeisen.

L. Also wieder ein Beweis für die Molekularhypothese. Wir können uns zur Bestätigung dieser Vorstellung ein Modell herstellen, das uns die Möglichkeit eines derartigen Verhaltens zeigt. Eine Glasröhre, die mit Stahlfeilspänen gefüllt ist, nähere ich erst mit dem einen Ende, dann mit dem andern nacheinander den Polen einer Kompaßnadel. Mit welchem Erfolg?

S. Es findet stets eine Anziehung statt, also verhält sich die Röhre unmagnetisch wie ein Stab von Eisen. Es ist aber vielleicht möglich, die Röhre zu magnetisieren, da sie doch mit Stahlspänen gefüllt ist.

L. Das wäre denkbar, machen wir die Probe. (Geschieht.)

S. Jetzt ist die Röhre ein Magnetstab geworden, denn ihr eines Ende zieht den Südpol der Kompaßnadel an, stößt dagegen den Nordpol ab. Es muß also jedes Eisenteilchen ein Magnet geworden sein und alle Nordpole sind nach derselben Seite gerichtet.

L. Wenn diese Vorstellung richtig ist, so müßte die magnetische Eigenschaft der Röhre leicht wieder vernichtet werden können. Wie etwa?

S. Bloß durch Schütteln der Röhre, denn dadurch kommen die geordneten Magnete wieder in Unordnung. (Geschieht.)

L. Noch eine andere Probe auf die Richtigkeit dieser Vorstellung des Ord- nens können wir vornehmen, könnte man nicht vielleicht eine durch Streichen

magnetisierte Stricknadel auf dieselbe Art wieder unmagnetisch machen, oder gar ummagnetisieren? Ich habe diese Stricknadel durch Streichen stark magnetisch gemacht und den Nordpol gezeichnet. Prüfe die Stärke der Nadel.

S. Sie lenkt aus einer Entfernung von 20 cm die Kompaßnadel um 10° ab, wenn man sie in senkrechter Lage von der Seite nähert.

L. Ich streiche sie jetzt in umgekehrter Weise, zunächst nur einmal, prüfe sie wieder.

S. Sie lenkt aus der gleichen Entfernung die Nadel kaum noch ab, ist also fast unmagnetisch.

L. Und nachdem ich sie viermal gestrichen habe?

S. Lenkt sie die Nadel nach der entgegengesetzten Seite um etwa 10° ab.

L. Was ist also offenbar in der Stricknadel vorgegangen?

S. Die Molekularmagnete, die durch das erstmalige Streichen in bestimmter Weise geordnet worden waren, sind das zweitemal bei entgegengesetztem Streichen umgedreht und umgekehrt geordnet worden.

L. Diese Untersuchungen über den Vorgang des Magnetisierens ergänzen und vervollständigen in willkommener Weise ein früher erhaltenes Resultat über das Wesen des Magnetismus.

S. Wir sehen, daß der Magnetismus kein Stoff ist, sondern ein eigentümlicher Zustand, der im Eisen und Stahl durch Ordnen der Molekularmagnete hervorgerufen werden kann.

II.

L. Es war früher schon behauptet worden, die magnetische Kraft wirke durch alle Stoffe durch, das war wohl etwas voreilig, denn wir können diese Behauptung nur auf einige Stoffe beziehen, auf welche wohl?

S. Auf Messing, Holz und Glas, aus denen die Wände unserer Bußolen hergestellt sind.

L. Wir wollen aber doch auch noch einige andere Stoffe nach dieser Richtung hin prüfen. Dazu ist sehr geeignet diese empfindliche Anordnung hier; beschreibe sie uns.

S. An einem hölzernen Stativ ist in senkrechter Lage einer unserer Magnete befestigt, Nordpol unten. Darunter schwebt von ihm angezogen eine Nadel, die durch ein Hollundermarkkügeln hindurchgesteckt ist, um sie besser sichtbar zu machen. Ein durch die Nadelöse gezogener Faden ist mit seinem anderen Ende am Stativfuß befestigt und seine Länge so reguliert, daß die Nadelspitze 1 cm vom Magnet absteht.¹⁾

L. Gut! Ihr seht jetzt wohl schon ein, wie man die Vorrichtung zur Prüfung unserer Frage benutzen kann. Hier sind Scheiben von Glas, Messing, Pappe, Holz, Zink, Kupfer, Eisen und Nickel. X kann die Versuche ausführen. (Geschieht.) Was lernen wir daraus?

1) Man vgl. Z. U. XXIV 31.

S. Die magnetische Wirkung durchdringt alle diese Stoffe, nur Eisen und Nickel nicht.

L. Steht die Erscheinung beim Eisen nicht im Widerspruch zu der Beobachtung, die wir als Influenz bezeichnet haben?

S. Ja, denn das Eisenblech wird durch Influenz magnetisch, an seiner Oberfläche hat es einen Südpol, an seiner unteren einen Nordpol.

L. Dann müßte es aber die Nähnadel erst recht festhalten.

S. Die Pole der Blechscheibe sind sehr ausgedehnt und deshalb wohl an jedem Punkt sehr schwach.

L. Gut, das läßt sich hören. Vielleicht gibt es aber noch einen zweiten Grund für die Erscheinung.

S. Die beiden Pole des Bleches liegen einander sehr nahe, so daß die Anziehung, die der eine auf die Nadel ausübt, durch die Abstoßung des anderen aufgehoben wird.

L. Und wie steht es nun mit dem Nickelblech? Und was können wir aus seinem Verhalten schließen?

S. Das Nickelblech zeigt dieselbe Erscheinung wie das Eisenblech, nur schwächer; es ist also zu vermuten, daß es sich gegen einen Magnetstab verhält wie Eisen.

L. Wie meinst du das?

S. Ein Stück Nickelmetall müßte vom Magnetstab angezogen werden und es müßte durch Influenz magnetisch werden.

L. Das können wir leicht an diesem Nickelstab prüfen. (Geschieht.) Aber das hätten wir bequemer haben können. Viele von euch besitzen einen Magnet, mancher hat ihn in Anbetracht unserer augenblicklichen Beschäftigung in der Tasche, und dicht dabei auch das Objekt unserer Untersuchung.

S. Ein Zehnpfennigstück besteht auch aus Nickel, es wird aber von meinem Magnet nicht angezogen und festgehalten — vielleicht ist er zu schwach.

L. Versuche es mit unserem starken Magnet.

S. Es geht auch nicht.

L. Die Schuld des Mißerfolges liegt also wohl nicht am Magnet, sondern an der Münze; wer kann sich den Grund denken?

S. Unser Nickelgeld besteht nicht aus reinem Nickel, sondern das Metall ist mit Kupfer legiert.

L. Es gibt also verschiedene magnetische Metalle, von denen Eisen das stärkste und wichtigste ist.

Nachdem wir jetzt nach verschiedenen Richtungen hin die wichtigsten Eigenschaften der Magnete studiert haben, können wir uns der schon früher aufgestellten Frage zuwenden, wie sich wohl die Wirkungen eines Magnetstabes im Raume ausbreiten.

Ich habe auf diese Holzsäule in wagrechter Lage einen starken Magnetstab hingelegt, so daß er möglichst allseitig zugänglich ist. An einem Faden ist

eine kurze Magnetnadel aufgehängt, so daß sie sich fast unbehindert nach jeder Richtung drehen kann. Wie kann ich diese „magnetische Sonde“ zur Lösung der gestellten Aufgabe benutzen?

S. Ich führe die Sonde an alle Punkte in der Umgebung des Magneten, wo ich seine Wirkung untersuchen möchte. Ich finde, daß die Nadel an jeder Stelle eine ganz bestimmte Lage zum Magnetstab annimmt.

L. Warum müssen wir uns bei dieser Untersuchung auf die nächste Nachbarschaft des starken Magneten beschränken und dürfen uns nicht allzuweit von ihm entfernen?

S. Weil in größerer Entfernung die Sonde nordsüdliche Lage einnimmt.

L. Die magnetische Wirkung erstreckt sich also nach allen Seiten, und äußert sich zunächst dadurch, daß eine kleine Magnetnadel an jedem Punkt der Umgebung eine ganz bestimmte Lage annimmt. Aber können wir aus dem Verhalten der Nadel nicht auch einen Schluß auf die Stärke der Wirkung ziehen?

S. Gewiß, die Nadel schwingt erst einigemale hin und her, bevor sie zur Ruhe kommt. Diese Schwingungen sind sehr rasch in der Nähe der Pole und in größerer Entfernung werden sie immer langsamer.

L. Und welchen Schluß kann man daraus auf die Stärke der Wirkung ziehen?

S. Je rascher sich die Schwingungen vollziehen, um so stärker ist die magnetische Wirkung.

L. Wie kannst du das wissen?

S. Bei anderen Schwingungen haben wir Ähnliches gefunden; eine flache, an einem Ende eingeklemmte Stahlfeder schwingt z. B. um so rascher, je kürzer sie ist; aber je kürzer sie ist, um so größer ist die Federkonstante.

L. Wir können diese Versuche noch nach einer anderen Richtung hin erweitern. Ich bringe einen Eisenstab, der in dem drehbaren Arm eines Holzstatives in wagrecht Lage befestigt ist, in verschiedener Entfernung in den umgebenden Raum und zwar in die Lage, die eine Kompaßnadel an der Stelle hat. Wir wissen schon, was geschieht.

S. Der Stab ist solange magnetisch, als er unter dem Einfluß des Magnetstabes steht.

L. Und können wir uns vielleicht ein Urteil bilden über die Stärke seiner Erregung an den verschiedenen Orten?

S. Ja, mit Hilfe kleiner Eisenstückchen, z. B. von Drahtstiften verschiedener Größe können wir seine Tragkraft prüfen. Ich finde, daß der Eisenstab in nächster Nähe des Magnetes stärker erregt wird, als in größerem Abstand.

L. Ich drehe jetzt den Eisenstab, ohne die Lage seines Mittelpunktes zu ändern, in wagrecht Ebene um einen rechten Winkel, so daß er auf der zuerst angenommenen Richtung der Kompaßnadel senkrecht steht. Prüfe ihn jetzt wieder.

S. Er ist nicht mehr magnetisch.

L. Wenn wir alle diese Erfahrungen zusammenhalten, so kommen wir zu

dem Eindruck, daß in dem ganzen Raum rings um den Magnetstab ein eigentümlicher Zustand herrscht, der sich darin äußert, daß Eisen je nach Entfernung und Lage ein mehr oder minder starker Magnet wird, und daß ferner an jedem einzelnen Punkt auf eine magnetische Sonde oder Kompaßnadel eine nach Größe und Richtung verschiedene Kraft wirkt.

Entfernt man den Magnet, so verschwindet sofort dieser Zustand des Raumes; seine alleinige Ursache ist demnach der Magnet gewesen.

Man nennt den Raum rings um einen Magneten, in dem dieser eigentümliche Zustand herrscht, nach Faradays Vorschlag, den wir ja als den Verfasser von „Naturgeschichte einer Kerze“ schon kennen, das Feld des Magneten. Faraday hat auch ein ausgezeichnetes Mittel angegeben, die Beschaffenheit eines solchen Feldes über ein größeres Gebiet gleichzeitig sichtbar zu machen.

Ich stelle in der Mitte dieses Gestelles mit vier Säulen einen unserer Magnete senkrecht auf und lege auf die Säulen ein Zeichenrähmchen; der Nordpol des Magneten befindet sich dicht unter der Papierebene. Dann bestreue ich mit einem Siebchen die Papierfläche mit feinen Eisenfeilspänen. Was seht ihr jetzt?

S. Die Feilspäne ordnen sich zu Strahlen an, die alle von dem Pol ausgehen; in der Nähe des Poles sind sie dicht gedrängt, in größerer Entfernung werden sie spärlicher.

L. Mit einem kleinen Kompaß kann man sich leicht überzeugen, was für eine Bedeutung an irgendeiner Stelle die Richtung eines solchen Strahles hat. Einige von euch können das mit diesen kleinen Kompassen prüfen.

S. Der Strahl gibt die Richtung an, in die sich die Kompaßnadel einstellt.

L. Nach Faradays Vorschlag nennt man diese Strahlen von Feilspänen magnetische Kraftlinien oder Feldlinien; ihre Richtung ist an jeder Stelle die Richtung der Kompaßnadel und ihre Dichtigkeit gibt uns ein Bild von der Stärke der Erregung an der betreffenden Stelle. Könnt ihr mir vielleicht erklären, wie eine solche Feldlinie von Eisenfeilspänen zustande kommt?

S. Jedes Eisenteilchen wird an der Stelle, wo es liegt, ein Magnet und zwar so, daß seine Achse die Lage einnimmt, die eine kleine Kompaßnadel an dem Punkte annehmen würde; das nächste Teilchen macht es ebenso, und da zwei Teilchen mit ungleichnamigen Polen benachbart sind, so heften sie sich aneinander. So entstehen lauter einzelne Ketten.

L. Wir haben an diesem Feldlinienbild sehr deutlich und übersichtlich sehen können, wie sich die magnetische Wirkung rings um das Stabende herum verteilt. Die vollkommene Symmetrie ringsum bietet uns nach unseren seitherigen Erfahrungen weiter keine Überraschung.

Könnten wir nicht vielleicht weitere Aufklärungen von einem anderen Feldlinienbilde erwarten?

S. Wenn wir den Stab wagrecht dicht unter die Papierfläche brächten, würde jedenfalls das Bild ganz anders ausfallen müssen, weil dann beide Pole wirksam sind und ihre Wirkung abbilden können.

L. Den Vorschlag wollen wir gleich ausführen. Was seht ihr jetzt?

S. Die meisten Kraftlinien sind gekrümmt und laufen von einem Pol zum anderen; nur von den Enden des Stabes gehen einige gerade Strahlen in der Stabrichtung aus.

L. Prüfe das Gesetz des Linienverlaufes, wie wir es im ersten Falle gemacht hatten, mit dem Taschekompaß.

S. Jede Feldlinie zeigt in jedem Punkte die Richtung an, in die sich die Kompaßnadel einstellt.

L. Und was lehrt uns die Dichtigkeit der Verteilung der Linien?

S. Wir sehen auch an diesem Bilde, daß die Linien an den Stellen am dichtesten liegen, wo wir die Erregung am stärksten gefunden hatten, nämlich nahe den Polen.

L. Versucht doch aus diesem Feldlinienbilde abzulesen, was wir in einer der letzten Stunden über die Pole des Magneten und über die Indifferenzzone erfahren haben.

S. Man sieht sehr deutlich, daß die Stärke der Anziehung von den Stabenden nach der Mitte zu abnimmt; von der Indifferenzzone werden fast keine Feilspäne angezogen.

L. Wir wollen doch vergleichsweise auch das Feldlinienbild einer magnetisierten Stricknadel darstellen. In welcher Beziehung unterscheidet sich dieses Bild vom vorigen?

S. Die Pole haben sich auf ganz kleine Gebiete nahe den Stabenden zusammengezogen, während die Indifferenzzone insofern bei der Stricknadel weit ausgedehnter ist, als bei dem Magnetstab.

L. Wenn man sich die Kraftlinien, die von den Enden der Stricknadel ausgehen, nach rückwärts verlängert denkt, so laufen sie an jedem Ende nach einem ganz eng begrenzten Bezirk, fast nach einem Punkte hin, zusammen; in diesem Punkte haben wir demnach die Pole zu sehen. Ist das bei dem großen Magnetstab anders?

S. Jawohl, hier sind die Pole keineswegs Punkte, sondern sie verbreiten sich über ausgedehnte Gebiete.

L. Auf Grund dieser Versuche können wir uns jetzt eine recht deutliche Vorstellung von der Beschaffenheit des Feldes an seinen verschiedenen Punkten machen, aber wir sehen doch immer nur, wie sich an jeder Stelle der eigentümliche Zustand des Feldes äußert, es bleibt dagegen zunächst völlig im Dunkeln, wie diese eigentümliche Erregung zustande kommt, worin sie besteht. Wir müssen auf die Beantwortung dieser Frage einstweilen verzichten. Statt dessen können wir die erworbenen Kenntnisse verwenden, um ein anderes Problem in Angriff zu nehmen, das früher erwähnt worden war. Ich meine die Frage nach der Ursache der Nordweisung der Kompaßnadel. Wir haben schon anfangs unserer Untersuchung gefunden, daß die Kompaßnadel nicht genau nach Norden zeigt, sondern daß sie etwas westlich abweicht.

Sorgfältige Messung an vielen Orten der Erdoberfläche haben uns eine genaue Kenntnis dieser für Seefahrer außerordentlich wichtigen Deklination

der Magnetnadel verschafft. Die hier aufgehängte Karte enthält die Resultate dieser Messungen. Diejenigen Orte, wo dieselbe Deklination z. B. von 10° herrscht, sind durch Linien verbunden, die Isogonen heißen. Beschreibe den Verlauf dieser Isogonen.

S. Die Isogonen gehen von einem Punkte im Norden des amerikanischen Kontinentes aus, der 20° vom geographischen Nordpol abliegt, verlaufen im allgemeinen in beiläufig südlicher Richtung und vereinigen sich im Gegenpunkte des Ausgangspunktes, der im Viktorialand liegt.

L. Welche Vermutung drängt sich uns beim Anblick dieser Karte auf?

S. Daß die Erdkugel von einem magnetischen Feld umgeben ist, daß demnach ihr Inneres magnetisch zu sein scheint?

L. Willst du damit sagen, daß du die Isogonen für Feldlinien des Erdfeldes hältst?

S. Nein, wenn wir diese Kraftlinien des Erdfeldes finden wollten, müßten wir anders verfahren.

L. Wie denn etwa?

S. Wir brauchten nur einen Kompaß zu nehmen und der Richtung seiner Nadel nachzugehen.

L. Ein solches Verfahren wäre aber doch nicht ganz korrekt. Wir müßten doch eigentlich eine Kompaßnadel nehmen, die nicht nur in wagrechter Ebene, sondern allseitig drehbar ist; so haben wir es auch früher gemacht, als wir die allseitig bewegliche Sonde zur Untersuchung des Feldes eines großen Magnetstabes benutzten.

Ich habe hier eine derartige Vorrichtung; was sehen wir an ihr?

S. Der Rahmen, in dem die Nadel um eine wagrechte Achse drehbar spielt, stellt sich so ein, daß die Nadel nach Norden weist, dabei senkt sich aber das Nordende stark nach unten.

L. Muß letzteres unbedingt eine Wirkung des magnetischen Feldes sein?

S. Es könnte sein, daß das Nordende der Nadel schwerer ist als das Südende; diesen Einwand kann man aber leicht dadurch prüfen, daß man die Nadel ummagnetisiert. (Geschieht.) Da auch jetzt wieder das Nordende sinkt, handelt es sich um eine Wirkung des magnetischen Erdfeldes.

L. Man nennt den Winkel, um den die Magnetnadel sich von der Horizontalen entfernt, die „Inklination“. Auf der Nordhalbkugel senkt sich das Nordende, auf der Südhalbkugel das Südende einer passend aufgehängten Magnetnadel, einer sogenannten Inklinationsnadel. In unseren Gegenden beträgt die nördliche Inklination etwa 65° . Man hat auch die Inklination für viele Orte der Erdoberfläche bestimmt und die Werte in Karten eingetragen. Ihr seht hier eine solche, in der die Orte gleicher Inklination durch Linien, die Isoklinen, verbunden sind. Beschreibe den Verlauf dieser Isoklinen und gib etwaige Folgerungen an, die sich daraus ableiten lassen.

S. Die Isoklinen laufen im großen und ganzen parallel dem Äquator; die Größe der Inklination wächst vom Äquator nach den Polen; an zwei Stellen,

in Boothia Felix und Viktorialand, ist sie 90° , dort steht die Inklinationsnadel senkrecht, unter diesen Punkten dürften wohl die magnetischen Pole der Erde liegen. Es sind offenbar dieselben Punkte, in denen sich, wie wir sahen, die Isogonen schneiden.

L. Wir haben das Vorhandensein eines Feldes rings um einen Magnetstab auch noch an einem anderen Merkmal erkannt.

S. Ein Eisenstab wird im magnetischen Feld magnetisch, wenn er die Richtung der Kraftlinien hat; es ist demnach zu vermuten, daß er im Erdfeld das gleiche Verhalten zeigt.

L. Wie sollen wir also den Eisenstab halten, damit ein etwa vorhandener Einfluß des Erdfeldes sich recht kräftig und deutlich zeigt?

S. Der Stab muß in die Richtung der Kraftlinie gehalten werden; wir müssen ihm also die Lage geben, die eine Inklinationsnadel annimmt, und dann müssen wir ihn der Erde möglichst nahebringen.

L. Auf die Erfüllung der letzten Bedingung wird es wohl kaum ankommen; warum nicht?

S. Bei der kolossalen Ausdehnung der Erde werden einige Meter näher oder ferner nichts ausmachen.

L. Hatten wir nicht bei der Schwere etwas ganz Ähnliches gesehen?

S. Gewiß, das Gewicht eines Körpers ist an der Erdoberfläche daselbe wie in geringer Höhe; erst bei sehr bedeutenden Erhebungen spürt man eine Abnahme.

L. Nun wollen wir zu unserem Versuch schreiten. Welche Lage habe ich diesem langen Eisenstab jetzt gegeben?

S. Er hat ostwestliche Lage, steht also senkrecht zu den Feldlinien und erfährt demnach keine Influenz. Mit der Sonde geprüft, zeigen beide Enden Anziehung, also ist der Stab unmagnetisch.

L. Nun drehe ich ihn zuerst in wagrechter Ebene, bis er um etwa 10° von der Mittagslinie nach Nordwesten abweicht, dann neige ich sein Nordende um etwa 65° unter die wagrechte Ebene. Prüfe ihn jetzt wieder.

S. Sein oberes, also südliches Ende zieht den Nordpol der Nadel an, ist also ein Südpol.

L. Nur gemacht! Das ist noch kein durchschlagender Beweis.

S. Wir müssen suchen Abstoßungen zu beobachten. In der Tat wird der Südpol der Nadel vom oberen Ende des Stabes abgestoßen und ebenso wird der Nordpol der Nadel vom unteren, nördlichen Stabende abgestoßen.

L. Da es sich nur um sehr schwache Wirkungen handelt, die möglicherweise von etwas remanentem Magnetismus des Eisenstabes herrühren könnten, so wollen wir der größeren-Sicherheit halber den Versuch bei umgekehrter Lage des Stabes wiederholen. Prüfe ihn jetzt wieder.

S. Das Resultat ist ganz daselbe, unten Nordpol, oben Südpol.

L. Welchen magnetischen Pol müßten wir nach allen diesen Versuchen der nördlichen Erdhälfte zuschreiben?

S. Bei Boothia Felix müßte ein Südpol, in Viktorialand ein Nordpol anzunehmen sein.

L. Als wir bei einer früheren Gelegenheit das Feld eines Magnetstabes mit der Sonde prüften, waren wir uns klar darüber, daß wir uns auf die Punkte in nächster Nähe des Stabes beschränken mußten. Wir können den Grund dafür jetzt in anderer präziserer Weise formulieren.

S. Bei diesem Versuche sind eigentlich zwei Felder vorhanden, die beide die Magnetnadel beeinflussen. Wir mußten unsere Versuche auf solche Punkte beschränken, wo das Stabfeld das Erdfeld erheblich übertrifft.

L. Man spricht in solchen Fällen von der Superposition zweier Magnetfelder, und man darf nach unserer Kenntnis der Verhältnisse annehmen, daß die Magnetnadel jedem Felde genau so folgt, als wenn das andere nicht da wäre. An jedem Punkte setzen sich die beiden Wirkungen zu einer mittleren zusammen.

§ 16. Elektrostatik.

Vor noch nicht zu langer Zeit glaubte man selbst in den amtlichen Lehrplänen die Elektrizitätslehre an den Anfang des Physikkursus stellen zu sollen, da sie rein experimentell, rein induktiv zu behandeln sei, und demgemäß die geringsten Schwierigkeiten mache. Nur ein nicht ernsthaft zu nehmender Unterricht konnte diesem Ideal entsprechen. Richtig urteilt bereits KIESSLING in seiner Didaktik von 1895: „Auf keinem Gebiet physikalischer Erscheinungen ist es so schwierig, im Unterricht klare und bestimmte Grundvorstellungen zu erzielen, wie bei den elektrischen Erscheinungen.“ Und er spricht sich darüber noch weiter so aus:

„Dies hat seinen Grund einerseits darin, daß man überhaupt von der Ursache dieser Erscheinungen nur sehr wenig, eigentlich so gut wie nichts Bestimmtes weiß; denn da uns ein spezifisch elektrisches Sinnesorgan fehlt, so hat man es nicht mit spezifisch elektrischen, unvermittelt zum Bewußtsein gelangenden Vorgängen, sondern nur mit sekundären Wirkungen zu tun, die erst durch mehr oder minder zusammengesetzte Vorgänge vermittelt werden. Man versetze sich nur auf den Standpunkt des Schülers, der zum erstenmal elektrische Erscheinungen sieht. Abgesehen von allen Lichterscheinungen erblickt derselbe nur Bewegungen, welche genau so vor sich gehen wie bei Zugkräften, die von Gewichten oder gespannten elastischen Schnüren ausgeübt werden; es ist daher für diesen Standpunkt keine leichte Aufgabe, durch fortgesetzte Abstraktionsprozesse sich zu klaren Vorstellungen von den Eigenschaften des wirkenden unsichtbaren Agens durch-

zuarbeiten. . . . Andererseits wird das Verständnis durch die bislang übliche Form der Darstellung erschwert, bei welcher von vornherein in die ganze Ausdrucksweise hypothetische Vorstellungen hineingetragen werden. . . . Es werden alle diejenigen Bezeichnungen auszuschließen sein, welche verschiedensinnig oder unbestimmt sind. Vor allen Dingen ist dies der Ausdruck Elektrizität selbst, da derselbe sowohl für den hypothetischen imponderablen Träger der elektrischen Erscheinungen, als auch für eine demselben innewohnende Eigenschaft oder eine von demselben ausgehende Kraft gebraucht wird. . . . Jedenfalls aber darf die Vorstellung jener elektrischen Fluida stöflichen Charakters als Träger der elektrischen Erscheinungen dem Unterricht nicht mehr zugrunde gelegt werden, und dementsprechend sind viele unter dem Einfluß der Überzeugung von der Richtigkeit der Zweifluidatheorie entstandene Redewendungen zu vermeiden. Hingegen werden die auf Grund direkt wahrnehmbarer Tatsachen definierbaren Begriffe: elektrischer Zustand, elektrische Ladung, Ladungsmenge, Ladungsgrad oder Ladungskraft, Ladungsdichtigkeit, Ladungsspannung, Entladung, Entladungsarbeit und wenige andere ausreichen, um alle Fundamentalerscheinungen genau zu beschreiben, und auch die gegenseitige Abhängigkeit der Erscheinungen verständlich darzustellen“ (KIESSLING, D. 59).

An diesen Darlegungen wäre mancherlei zurechtzurücken, aber sicher hat der Verfasser recht, wenn er die großen begrifflichen Schwierigkeiten hervorhebt, die mit diesem Unterricht auch schon auf der elementaren Stufe verbunden sind.

Eine besondere Rolle haben die elektrischen Fluida im Unterricht gespielt. Es gab eine Zeit, in der man sie als Realitäten behandelte. So pflegte der ausgezeichnete SCHELLBACH bei Besprechung der elektrischen Influenz seinen Schülern unbedenklich zu sagen: „Ihr müßt euch vorstellen, daß in dieser Messingkugel unzählige Millionen Liter (!) ungeschiedener Elektrizität enthalten sind.“ Dann kam eine Zeit, in der man es mit dem Begriff der Realität so ernst nahm, daß alle solche Fiktionen aus dem Unterricht verbannt wurden; dieser Richtung gehörte KIESSLING an. Heut denkt man darüber wohl nachsichtiger. Man hat eingesehen, daß man der Realität vielfach nicht anders als durch Bilder und Gleichnisse beikommen kann, und geht diesen deshalb auch im Unterricht nicht aus dem Wege. Aber man behandelt sie als das, was sie sind, als Hilfsmittel für das Denken, wie

sie ja auch Hilfsmittel für die Forschung gewesen sind. Allerdings bereiten die elektrischen Fluida der Vorstellung noch größere Schwierigkeit als die Molekularmagnete, da es sich bei diesen um eine fest an den Teilchen der Materie haftende Eigenschaft, dort um ein scheinbar selbständig an und in der Materie hin- und herflutendes Agens handelt. Aber andererseits sind Begriffe wie Ladungsmenge, Ladungsdichte, Entladung gar nicht ohne eine Art von Substanzbegriff anschaulich vorzustellen, daher möge man diesen ruhig als einen Hilfsbegriff gelten lassen. So urteilt auch MÜLLER (T. 231): „Diese Hypothese . . . wird im ersten Unterricht beibehalten werden, auch wenn das Rätsel der Elektrizität einmal eine andere Lösung finden sollte. Sich nur auf das Tatsächliche versteifen oder nur von Energien zu sprechen, ist mindestens unpädagogisch.“

Bei der Anordnung des Stoffes in der Elektrostatik hat man den Vorteil, daß man sich ziemlich genau an die historische Entwicklung halten kann. GRIMSEHL (D. 100) verlangt, daß man sich nicht zu lange bei den einleitenden Versuchen aufhalten und alles Überflüssige fortlassen soll. Aber auf gar zu wenig Stunden kann man dieses Gebiet doch nicht gut einschränken, das in bezug auf allmähliche Erweiterung der Kenntnisse auf induktivem Wege einen so ausgezeichneten Unterrichtsstoff darbietet. Die Bestrebungen, die Elektrostatik mehr oder weniger aus dem Unterricht auszuschalten zugunsten der technisch interessanteren Kapitel der strömenden Elektrizität, muß ich ebenso entschieden wie ROSENBERG (I 204) ablehnen. Die Fundamente unseres Wissens von der strömenden Elektrizität liegen nun einmal auf dem Gebiet der Elektrostatik, und wer nicht alles Sinnes für das Werden wissenschaftlicher Begriffe bar ist, wird den Schülern die Einsicht in das Werden auf dem interessantesten Gebiete der Physik nicht verkümmern wollen.

Einigen althergebrachten Inventarstücken der Elektrostatik, namentlich dem Elektrophor und dem Isolierschemel hat GRIMSEHL das Todesurteil gesprochen¹⁾; ich kann dem ebensowenig wie ROSENBERG beistimmen und komme darauf im Folgenden zurück. Andererseits scheint mir der Gebrauch der Influenzelektrismaschine auf der Unterstufe nicht so verwerflich, wensschon bei der Erklärung noch manches im Dunkeln bleiben muß. Können

1) Der physikalische Unterricht auf der Unterstufe in „Die Lehrmittel der deutschen Schule“ 1904 Nr. 1–8.

wir denn die galvanischen Elemente auf der Unterstufe erklären? Kaum auf der Oberstufe.

Bedenken erhebt GRIMSEHL auch gegen die Verwendung des Elektroskops vor der Besprechung der Influenz, und gegen den Gebrauch der Reibungselektriermaschine vor der Erklärung der Spitzenwirkung. Diese Bedenken wären berechtigt, wenn es sich im Physikunterricht um Übermittlung eines logisch geordneten Systems nach Art der Mathematik handelte. Aber wir wollen ja nicht das fertige System, sondern den Gang der Forschung in unserem Unterricht widerspiegeln. Dazu gehört auch, daß man Probleme auf sich beruhen läßt, die in dem Zeitpunkt, wo sie zum erstenmal auftreten, noch nicht zur Lösung reif sind. Ich habe gefunden, daß das Spreizen der Blättchen des Elektroskops beim Annähern eines elektrischen Körpers die Schüler nicht sowohl irritiert, als ihre Wißbegierde erregt. Man sage ihnen nur einfach, dies ist eine Nebenerscheinung, die wir später genauer betrachten werden. Ebenso bei der Elektriermaschine: Man hat gefunden, daß ein mit Spitzen versehener Konduktor die Eigenschaft hat, die elektrische Ladung an den Glasscheiben aufzunehmen. Wie das kommt, werden wir später betrachten. Eine solche vorwegnehmende Markierung von Problemen gehört als wesentliches Bestandteil zu einem Physikunterricht in unserem Sinne, es wird dadurch gleichsam wie mit einem Scheinwerfer ein Licht auf den weiterhin zu begehenden Weg geworfen, der Unterricht verliert den Charakter der bloß äußerlichen Aneinanderreihung und gewinnt an innerem Zusammenhang. Ich gebe zu, daß die Mehrzahl der vorwiegend mathematisch vorgebildeten Fachkollegen sich an diese Betrachtungsweise erst gewöhnen muß, ja daß sie ihnen unstreng erscheinen wird; aber gerade an Stellen wie diese wird deutlich, daß Physik eben nicht als Mathematik, sondern daß sie als Naturwissenschaft zu behandeln ist.

Lehrgang.

Versuche mit Bernstein. Frage: Werden auch andere Körper durch Reiben elektrisch? —

1. Unterschied von elektrischen und nichtelektrischen Körpern im Sinne GILBERTS, d. i. von Körpern, die durch Reiben elektrisch werden und solchen die es nicht werden. Begriff des elektrischen Zustandes. Dieser äußert sich in der Anziehung auch nichtelektrischer Körper und in darauffolgender Abstoßung. (Daß die An-

ziehung gegenseitig ist, wird mit Hilfe der WEINHOLDSchen bifilaren Aufhängung unter Benutzung eines Holzstabes gezeigt.

2. Führt man den Grundversuch der Anziehung und Abstoßung mit einer am Seidenfaden hängenden Hollundermarkkugel aus, so drängt sich die Frage auf: Ist die Kugel selber in ihrem Zustand verändert? Der Versuch zeigt, daß sie Korkpulver anzieht, wohl auch wieder abstößt. Daraus folgt die Übertragbarkeit des elektrischen Zustandes („Mitteilung“) und der Begriff der elektrischen Ladung.

3. Die Abstoßung kleiner Körperchen nach der Berührung, wie auch der hängenden Hollundermarkkugel leitet ferner zur Erkenntnis der Abstoßung elektrisierter Körper aufeinander, allerdings zunächst nur soweit es sich um Körper handelt, die von demselben Körper aus durch Mitteilung elektrisch geworden sind (das allgemeine Problem wird zurückgestellt bis Nr. 6). — Anwendung auf das Elektroskop.¹⁾

4. Die Beobachtung einer am Leinenfaden aufgehängten Kugel führt zur Entdeckung der Leitung (GRAY 1729): Unterschied von Leitern und Nichtleitern (guten und schlechten Leitern). Prüfung am Elektroskop. Verwendung der schlechten Leiter als Isolatoren (der Seidenfaden!). Die Hand als Leiter. OTTO VON GUERICKE hat zuerst den elektrischen Funken beobachtet, als er seine Hand einer geriebenen Schwefelkugel näherte. An die Erscheinung des Funkens knüpft sich die Hypothese eines elektrischen Fluidums, das von dem geriebenen Körper durch die Hand zur Erde abströmt.

5. Wir bemerken, daß die früher als nichtelektrisch bezeichneten Körper sämtlich gute Leiter sind. Dies führt zu der Frage: Werden etwa die guten Leiter nur deswegen durch Reibung nichtelektrisch, weil ihre Ladung durch die Hand abgeleitet wird? — Versuche mit Metallen, die an isolierenden Glasstäben befestigt sind. Man hat auf solche Art nachgewiesen, daß alle Stoffe durch Reiben elektrisch werden.

6. Nunmehr wird die Frage wieder aufgenommen, ob alle elektrisierten Körper einander abstoßen. Man benutzt dabei am besten die WEINHOLDSche bifilare Aufhängung. Aus Versuchen mit Hartgummi, Schwefel, Siegellack, trockenem Papier scheint hervorzugehen, daß alle elektrisierten Körper einander abstoßen. Auch Glas und geriebenes Metall zeigen dasselbe. Hier mag eine Warnung vor allzu schneller Induktion am Platze sein. Man lasse erst den falschen Schluß ziehen: Alle elektrischen Körper stoßen einander ab, und prüfe ihn dann an Glas und Hartgummi. Weitere Versuche führen zum Unterschiede zweier Klassen von Körpern, solcher die sich wie Glas und solcher die sich wie Hartgummi verhalten. Man definiere nun: mit Glas gleichartig heißen

1) Für die ersten Versuche eignen sich am meisten die Papierelektroskope von KOLBE oder die nach einem ähnlichen Prinzip konstruierten (ROSENBERG I 210).

solche Körper, die sich, wenn sie elektrisch gemacht sind, gegen Glas ebenso wie Glas selber (also abstoßend) verhalten; und mit Hartgummi gleichartig solche, die sich, wenn sie elektrisch gemacht sind, gegen Hartgummi ebenso wie Hartgummi selber (also ebenfalls abstoßend) verhalten. Dann läßt sich das Ergebnis aller angestellten Versuche in den Satz zusammenfassen: Gleichartig elektrische Körper stoßen einander ab, ungleichartig elektrische ziehen einander an.¹⁾

Hier sind auch die alten Bezeichnungen glaselektrisch und harzelektrisch anzugeben (Du Fay 1733).

7. Es liegt hier die Frage nahe, da die Ladungen von Glas und Hartgummi entgegengesetzt wirken, ob sie, auf denselben Körper übertragen, einander aufheben. Führt man (nach MÜLLER) einem geladenen Elektroskop mittels Probekugel kleine Mengen der entgegengesetzten Art der Ladung zu, so nimmt die Divergenz ruckweise bis zum Zusammenfallen ab. Ladet man nun zwei gleiche Elektroskope mit entgegengesetzten Ladungen, bis der Ausschlag bei beiden gleich groß ist, so fallen beim Verbinden durch einen (isolierten) Draht die Blättchen beider zusammen.

Definiert man also: Zwei gleiche Elektroskope haben gleich große Ladungen, wenn ihre Blättchen gleich stark spreizen, so folgt nunmehr der Satz: Gleich große aber ungleichnamige Ladungen heben einander auf. Analogie mit positiven und negativen Größen, die sich auch weiter noch zeigt, wenn man die beiden Elektroskope verschieden stark ladet. Einführung der Bezeichnungen positiv und negativ elektrisch. Begriff der größeren und kleineren Ladungsmengen.

8. Da das Reiben der Körper gegeneinander ein gegenseitiges ist, so fragt sich, ob das Reibzeug nicht auch elektrisch wird. Eine Reihe geeigneter Versuche zeigt die Richtigkeit des Gesetzes: Zwei miteinander geriebene Körper aus verschiedenem Stoff werden stets entgegengesetzt elektrisch. Bei den Versuchen ist es oft nötig, ziemlich schwache Ladungen der geriebenen Körper nachzuweisen. Man kann dazu die (durch Versuch festgestellte) Eigenschaft eines geladenen Elektroskops benutzen, daß die Blättchen bei Annäherung eines gleichartig elektrischen Körpers weiter spreizen. Die Erklärung dieser Erscheinung wird wieder als Problem auf später zurückgestellt. (So auch KOLBE, I 15). Das wirksamste Mittel, dieses Gesetz zu demonstrieren, bietet die Reibungselektroskopmaschine, die deshalb an dieser Stelle schon ihren Platz finden kann. In betreff der vollständigen Erklärung s. oben

1) Streng genommen ist der erste Teil dieses Satzes eine Definition des Begriffs gleichartig elektrisch; diese Definition geht jedoch selber erst aus dem Erfahrungsmaterial hervor und hilft zu dessen Gruppierung; darum darf das Ganze als Erfahrungsergebnis (wenn man will als Gesetz) bezeichnet werden. Unzulässig ist es, hierbei von gleichnamigen und ungleichnamigen „Elektrizitäten“ zu sprechen.

S. 181 und nachher Nr. 12. An der Maschine läßt sich auch am leichtesten und schärfsten zeigen, daß die beiden bei der Reibung entstehenden Ladungsmengen gleich groß sind; verbindet man Konduktor und Reibzeug, so läßt sich auch nach längerem Drehen auf keinem der beiden eine Ladung nachweisen.

Daß ein und derselbe Stoff je nach dem Reibzeug + oder - elektrisch werden kann, zeigt man z. B. an einer isolierten Zinkplatte, die an Flanell gerieben -, an Hartgummi + wird.¹⁾

9. Ladungsgrad und Ladungsmenge. Bei den bisherigen Versuchen ist schon aufgefallen, daß die Stärke der elektrischen Ladung, die ein Körper annehmen kann, sehr verschieden ist. Wir suchen nun die Begriffe in dieser Hinsicht zu klären und erinnern uns, daß in der Wärmelehre zwischen Wärmegrad und Wärmemenge genau unterschieden werden mußte. Ist vielleicht auf elektrischem Gebiet ähnliches der Fall? Welches Instrument kann mit dem Thermometer verglichen werden? Welcher Vorrichtung bedarf das Elektroskop, damit es als Meßinstrument dienen kann? -

Wir können uns leicht überzeugen, daß der Grad des elektrischen Zustands am Elektroskop erkannt werden kann. Wir brauchen nur einen isolierten Leiter verschieden stark zu laden und ihm jedesmal das Elektroskop bis zur Berührung zu nähern. Zweckmäßiger ist es (aus später erst einzusehenden Gründen) das Elektroskop durch einen Draht mit dem Leiter zu verbinden. Wir setzen fest: Der Grad des elektrischen Zustandes eines Körpers, sein „Ladungsgrad“, wird gemessen durch den Ausschlag eines mit ihm leitend verbundenen Elektroskops. Den Grad des elektrischen Zustandes nennt man auch Potential. (Will man das Potential genau messen, so bedarf man hierzu eines nach bestimmten Maßen geeichten Elektroskops. Ein solches geeichte Elektroskop heißt ein Elektrometer. Die Einheiten nach denen es geeicht ist, heißen Volt (Demonstration von BRAUNS Elektrometer).

Man verbinde nun zwei verschiedenen große Leiter (z. B. isolierte Metallkugeln) mit zwei gleichen Elektroskopen und lade sie mit einem geriebenen Glasstab. Man muß den Stab am größeren Leiter öfter abstreichen als am kleineren, wenn beide denselben Ladungsgrad annehmen sollen. Man schließt daraus: Verschieden große Körper erfordern verschieden große Ladungsmengen, um auf gleichen Ladungsgrad gebracht zu werden (Analogie mit der Wärme!). Die Ladungsmenge nennt man auch Elektrizitätsmenge. Man sagt, der größere Konduktor habe eine größere Kapazität als der kleinere (Vergleich mit Flüssigkeitsbehältern).

Wir verfolgen die Analogie mit der Wärme nun noch weiter, und

1) Über die sog. Spannungsreihe vgl. man besonders B. KOLBE, Elektrizitätslehre I.

erinnern uns, daß Wärme stets vom Körper höherer zum Körper niedrigerer Temperatur übergeht. Einen entsprechenden Versuch können wir auch mit elektrischen Körpern anstellen: Man verbinde zwei gleich große Leiter mit zwei gleichen Elektroskopen und lade sie auf verschiedenen hohen Ladungsgrad. Man findet, wenn man die beiden Leiter durch einen isolierten Metallstab verbindet: Die elektrische Ladung geht stets vom Körper höheren zum Körper niedrigeren Ladungsgrades über. Dies läßt sich noch erweitern auf den Übergang von positiv zu negativ geladenen Körpern. Man kann die positiven Ladungsgrade mit Temperaturen über Null, die negativen mit Temperaturen unter Null vergleichen.

10. Sitz der Ladung an der Oberfläche. Bei der Erwärmung der Körper war die Kapazität der Masse der Körper (bei gleichem Stoff) proportional (zehn Liter Wasser erforderten zur Erwärmung um 1° zehnmal so viel Wärme wie 1 Liter).

Man hat nun entdeckt, daß es sich damit bei der Elektrizität anders verhält. Der französische Forscher COULOMB hat (1786) gefunden, daß Hohlkugeln und Vollkugeln bei gleicher Größe gleich viel Ladung erfordern und daß es dabei auf das Material, aus dem sie bestehen, nicht ankommt. Die auffallende Erscheinung hat man sich daraus zu erklären versucht, daß die elektrische Ladung sich nur auf der Oberfläche des elektrisierten Körpers befindet. (Versuch von FARADAY mit dem Drahtkäfig.) Zur Demonstration dieses wichtigen Gesetzes dienen die Halbkugeln über einer Vollkugel und FARADAYS Eiseimerversuch, etwa mit einer Kakaobüchse angestellt (U. § 92). —

Man pflegt nun den Übergang zur Spitzenausströmung zu machen, indem man zunächst die Dichtigkeit an verschiedenen gekrümmten Stellen der Oberfläche untersucht. Ich glaube jedoch, daß es besser ist auf der Unterstufe von diesen Versuchen ganz abzusehen, da Dichte und Ladungsgrad schwierig auseinander zu halten sind. Daß aus Spitzen ein leichter Übergang in die Luft stattfindet, läßt sich auch ohnedies verständlich machen, durch die Hypothese, daß die elektrische Ladung aus zahlreichen getrennten Teilchen besteht, die aufeinander ebenso Abstoßungskräfte ausüben, wie gleichartige elektrische Ladungen. (Aus dieser Hypothese erklärt sich auch, besser erst hier als in Nr. 9, die Ausbreitung einer Ladung von einem geladenen auf einen nicht geladenen Körper.) Die Bezeichnung Elektronen halte ich an dieser Stelle noch nicht für angebracht.

Die Versuche lassen sich wirksam erst mit der Elektrisiermaschine ausführen (dies ein weiterer Grund, diese Maschine zu benutzen, ehe die Saugwirkung der Spitzen erklärt ist). An dem Übergang sind wesentlich die Staub- und Wasserteilchen der Luft beteiligt. Der elektrische Wind und das Flugrad sind bekannte Anwendungen.

11. Elektrisierung durch Verteilung. Der RIESSsche Verteilungszylinder mit mehreren Doppelpendeln, der zum eisernen Bestand der Lehrbücher gehörte, ist jetzt mit Recht zum alten Eisen geworfen. Die damit anzustellenden Versuche befriedigten wenig, da die Prüfung der Kügelchen mit einem elektrisierten Stab notwendig neue Influenzwirkungen hervorbrachte, die die nachzuweisenden Wirkungen leicht verdeckten, wenn man nicht sehr vorsichtig zu Werke ging, und auch im letzteren Fall leicht den Eindruck erweckten, als werde das Resultat nur künstlich herausexperimentiert. Auch begibt man sich, wenn man nach älterer Manier mit der Tür ins Haus fällt, einer schönen Gelegenheit von einem sich ganz natürlich darbietenden Problem aus zu Erkenntnissen vorzudringen. Ich empfehle vielmehr einen Gang wie den folgenden.¹⁾

a) Beim Gebrauch des Elektroskops ist uns wiederholt aufgefallen, daß die Blättchen schon bei der Annäherung eines elektrisierten Körpers an den Knopf spreizen und beim Entfernen wieder zusammenfallen. Man könnte sich denken, daß eine im Knopf hervorgerufene elektrische Ladung nach den Blättchen hin abgestoßen wird und beim Entfernen des elektrisierten Stabes in den Knopf zurückgeht. Dann müßte es möglich sein, der in den Blättchen vorhandenen Ladung den Rückweg in den Knopf abzuschneiden, indem man diesen während des Versuchs vom Elektroskop trennt. Hält man anstelle des Knopfes eine größere mit isolierendem Stiel versehene Probekugel an den Stab des Elektroskops und verfährt mit ihr wie eben angegeben, so behalten die Blättchen in der Tat eine Ladung, die sich der des genäherten Körpers gleichartig erweist. Bringen wir die Kugel wieder zur Berührung mit dem Elektroskop, so fallen die Blättchen zusammen. Dies ist nach dem früher Ermittelten nur so zu denken, daß die Kugel eine entgegengesetzte Ladung besaß wie die Blättchen. Dies läßt sich an einem zweiten Elektroskop leicht prüfen. Wir haben also die wunderbare Tatsache entdeckt, daß beim Annähern eines elektrisierten Körpers im Elektroskop zwei entgegengesetzte elektrische Ladungen entstehen.

b) Wir vermuten nun, daß dasselbe in jedem Leiter stattfinden wird, wenn wir ihm einen elektrisierten Körper nähern. Wir rücken an den Knopf des Elektroskops einen isolierten Metallzylinder und nähern diesem den geriebenen Glasstab (U. Fig. 197).

c) Wir wiederholen den Versuch ohne Elektroskop mit zwei Metallzylindern und finden sie entgegengesetzt elektrisch. Beim Annähern beider aneinander springt ein Fünkchen über und beide sind wieder unelektrisch.²⁾

1) Ein anderer Gang bei B. KOLBE, Elektrizitätslehre I.

2) Ähnlich verläuft der Versuch bei Benutzung der sehr empfehlenswerten WEINHOLDschen Kugelkonduktoren (WEINHOLD, Dem. (4) Fig. 403, ROSENBERG I 220).

Aus diesen Versuchen ergibt sich das Gesetz der Influenzwirkung, wobei auch die Gleichheit der beiden durch Influenz hervorgerufenen Ladungen nicht außer acht zu lassen ist. Die Influenzerscheinungen führen zu weiterer Ausgestaltung der Hypothese der elektrischen Fluida: Wir nehmen an, daß sich an jeder Stelle eines nach außen hin unelektrisch erscheinenden Körpers positive und negative Ladungen von gleicher, übrigens beliebig groß zu denkender Menge befinden. Diese Ladungen werden durch Annäherung eines elektrischen Körpers voneinander getrennt. Man muß ferner annehmen (wie schon früher einmal, in Nr. 10 angedeutet), daß das Gesetz der Anziehung und Abstoßung elektrischer Körper auch von den Ladungen selber gilt, dann wird es verständlich, daß die durch Influenz erzeugten Ladungen sich in dem Leiter verschieben, derart, daß die ungleichnamige Ladung in das dem elektrischen Körper zunächst gelegenen Ende, die gleichnamige in das entferntere Ende des Leiters geht.

Von hier fällt auch Licht auf die Erzeugung entgegengesetzt gleicher Ladungen beim Reiben zweier Körper aneinander. Endlich wird auch der Arbeitsaufwand beim Reiben zweier Körper (besonders bei der Elektrisiermaschine) dadurch verständlich, daß zum Trennen der elektrischen Ladungen Arbeit erforderlich ist. Und andererseits kann ein geladener Konduktor als ein Energiebehälter angesehen werden. Zum Nachweis der aufgespeicherten Energie kann z. B. das heute zuweilen verachtete elektrische Glockenspiel dienen.

12. Anwendungen der Influenz. Hier findet die bekannte Erklärung der „Mitteilung“ durch „Verteilung“ ihre Stelle, ebenso wird hier das merkwürdige Verhalten des geladenen Elektroskops bei Annäherung eines elektrischen Körpers sowie auch eines unelektrischen aufgeklärt.

Auch die Demonstration des Elektrophors gehört hierher, den man auch hat zum „alten Eisen“ werfen wollen¹⁾, doch treten sowohl MÜLLER als ROSENBERG für seine Beibehaltung ein, und ich kann mich ihnen nur anschließen, zumal er auch die bequemste und billigste Elektrizitätsquelle zum Selbstexperimentieren für Schüler ist. Die übliche Erklärung ist freilich unvollständig, aber schwerlich falsch, da sich die beiden Influenzladungen des Deckels, auf die es hauptsächlich ankommt, getrennt nachweisen lassen. Daß noch Fragen ungelöst bleiben, teilt der Elektrophor mit vielen anderen physikalischen Apparaten, namentlich auch der Leidener Flasche, die man doch nicht umgehen kann. Auf die Eigenschaften der „Form“ braucht man nicht einzugehen; Schwierigkeit macht den Schülern auch, daß die Ladung des Kuchens und die im Deckel influenzierte sich trotz der großen Nähe nicht ausgleichen. Aber die Schüler wissen schon, wie schwer oft ein geriebener Hartgummistab seine Ladung abgibt; und im

1) GRIMSEHL, Lehrm. d. d. Schule, 1904 Nr. 1; NORREBERG, Z. U. XVII 46.

übrigen können sie nicht oft genug darauf hingewiesen werden, daß überall noch ungelöste Probleme übrig bleiben. Die anzustellenden Versuche beschreibt ROSENBERG eingehend (I 228) und weist auch darauf hin, daß der Elektrophor ein Beispiel dafür liefert, daß mechanische Arbeit in elektrische Energie verwandelt wird.¹⁾ Als einfachstes und durchsichtigstes Mittel hierfür möchte ich allerdings nicht den Elektrophor, sondern die Elektrisiermaschine (Nr. 11) ansehen. — Von weiteren Anwendungen der Influenz kommt noch die Saugwirkung der Spitzen in Betracht, deren Erklärung nun keine Schwierigkeit mehr macht. (Den Blitzableiter behandelt man wohl am besten erst im Zusammenhang mit dem Gewitter und mit der atmosphärischen Elektrizität.)

13. Leidener Flasche. Als Ausgangsversuch²⁾ dient hier zweckmäßig der historische Versuch von v. KLEIST über die Elektrisierung des Wassers in einem Glasgefäß (U. § 95). Es empfiehlt sich, den leicht anzustellenden Versuch wirklich auszuführen. Der weiteren Betrachtung wird die spätere Form der Flasche, wie sie heut üblich ist, zugrunde gelegt, zunächst aber der kräftige Entladungsfunke vorgeführt.

Daß die Flasche viel mehr Ladung aufnimmt, als ein Konduktor gleicher Größe, zeigt man an der inneren Belegung einer zerlegbaren Flasche. Versuch 1: Stellt man die Belegung auf eine isolierende Unterlage, und führt ihr längere Zeit Ladung vom Konduktor einer Elektrisiermaschine zu, so erhält man beim Annähern des Fingers doch nur schwache Fünkchen. Wie ist die Erscheinung zu erklären, daß die Belegung in der Zusammenstellung der Leidener Flasche eine viel größere Ladung aufzunehmen vermag? — Die Überlegung führt zunächst zur Vermutung, daß hier die Influenz mitspielt. Dann müßten sich auf der äußeren Belegung die beiden Influenzelektrizitäten nachweisen lassen. Versuch 2: Man lade die Leidener Flasche, nachdem man sie auf eine isolierende Unterlage gestellt hat. In der Tat läßt sich die Influenzelektrizität zweiter Art durch Ableitung zu einem Elektroskop leicht nachweisen. — Man bemerkt aber mit Überraschung, daß auch bei dieser Anordnung die Flasche sich nicht stark laden läßt. Was kann der Grund dafür sein! Offenbar die Isolierung. Versuch 3. Man lade die Flasche auf isolierender Unterlage, leite aber die äußere Belegung zur Erde ab. Die Ansammlung einer größeren Ladungsmenge auf der inneren Belegung erklärt sich nun auf bekannte Weise aus ihrer Bindung durch die Influenzelektrizität erster Art. Daß die „freie“ Ladung der inneren

1) Man vgl. auch BOHN, Z. U. XV 27.

2) Eine andere Überleitung empfiehlt GRIMSEHL (Lehrm. d. d. Sch. 1904 Nr. 1), nämlich die Abhängigkeit des Elektroskopausschlags von der Annäherung eines unelektrischen leitenden Körpers an den mit dem Elektroskop verbundenen, wobei der genäherte Körper zuerst isoliert gelassen, dann aber mit der Erde verbunden wird.

Belegung nur sehr langsam wächst, zeigt man durch Verbindung mit einem Elektroskop oder noch besser durch einen Versuch mit dem auf ein Elektroskop gesetzten Plattenkondensator, wobei man die obere Platte zur Erde ableitet, der unteren dagegen nach und nach (mit einer Probekugel) Ladung zuführt. Erst wenn man die obere Platte abhebt, zeigt das Elektroskop einen starken Ausschlag. Hierdurch wird zugleich der für später wichtige Gebrauch des Plattenkondensators erläutert.

Die FRANKLINSche Tafel, die man häufig noch heranzieht, ist bei diesem Untersuchungsgang überflüssig. Auch von dem Nachweis, daß bei einer zerlegbaren Flasche die Ladungen sich auf der Oberfläche des Dielektrikums befinden, sieht man besser ab, wenn man nicht schon hier auf das Problem des Dielektrikums hinweisen will. Bietet indes die Oberstufe dafür nicht hinreichend Zeit, so tut man gut, etwas näher hierauf, wie auch auf die Kapazitätsänderung beim Kondensator einzugehen. Man verbindet dazu die untere Platte des Kondensators mit einem getrennt aufgestellten (BRAUNschen) Elektroskop, ladet die Platte und zeigt den Rückgang des Ausschlags beim Aufsetzen der oberen Platte. Es bedarf also der Zuführung einer größeren Ladungsmenge, um wieder den früheren Ausschlag des Elektroskops hervorzurufen, d. h. die Kapazität der unteren Platte ist durch die Annäherung der oberen vergrößert worden. Man zeigt ferner die Verschiedenheit in der Verringerung des Ausschlags, je nachdem man Luft, Glas oder Glimmer als Zwischenschicht wählt (MÜLLER, T. 236).

14. Anwendungen der Leidener Flasche. Von den früher üblichen zahlreichen Versuchen mit der Leidener Flasche ist nur eine kleine Auswahl ratsam. Dazu gehört die physiologische Wirkung durch eine Kette von Schülern und das Durchbohren von Papier und Glas (letzteres am leichtesten zwischen zwei Metalldrähten in einem Petroleumbad). Auch wird man eine Zündwirkung zeigen, wofür ein Gemenge von Schwefelantimon und chlorsaurem Kalium besonders geeignet ist (ROSENBERG I 242). Schließlich ist auch die Magnetisierung von Stahlnadeln auszuführen, da sie eine der Analogien zwischen Reibungs- und Berührungselektrizität darstellt.

Daß der bei der Entladung auftretende Funke nicht aus „Elektrizität“ besteht, sondern durch die erhitzten Luft- und Metallteilchen gebildet ist, wird zu bemerken nicht überflüssig sein.

Die Influenzelektrifiziermaschine auf der Unterstufe gegen den Schluß der Elektrostatik, etwa hinter der Leidener Flasche, einzuführen halte ich für unbedenklich, da sie den Schülern vielfach schon als eine Quelle reichlicher Elektrizitätsmengen bekannt ist. Bei der Erklärung wird man sich im wesentlichen auf die Influenzwirkungen beschränken, die von den geladenen Belegungen auf die ihnen gegenüber stehenden Spitzenkämme ausgeübt werden. Mit Hilfe der Influenz-

maschine lassen sich die Anwendungen der Leidener Flasche sehr bequem zeigen. Der Umstand, daß nach diesen glänzenden Erscheinungen die Wirkungen der „galvanischen“ Elektrizität so unscheinbar sind und doch beides von gleicher Art ist, mag den Schülern immerhin Kopferbrechen machen. Man mache nicht den Versuch, die Schwierigkeit schon im Beginn des Galvanismus zu heben, sondern lasse die Frage als ein ungelöstes Problem offen, bis die Versuche mit hochgespannten Strömen die Lösung bringen.

15. Die atmosphärische Elektrizität. Hier ist das wichtigste die (schon von GUERICKE vermutete) Identität des Blitzes mit einem elektrischen Funken. Der Versuch von BENJAMIN FRANKLIN (1752) wird einen großen Eindruck auf die Gemüter machen. In Betracht kommt besonders noch, daß die Wirkungen des Blitzes dieselben sind wie die des elektrischen Funkens. Bezüglich des Blitzableiters herrschen noch vielfach unrichtige Vorstellungen. Von einem „Ausgleich“ der durch Influenz erregten Ladung des Gebäudes mit der Ladung der Wolke kann nicht gut gesprochen werden angesichts der übermächtigen Ladung der Wolke, eher noch von einer Zerstreuung der durch Influenz erregten Ladung in die Luft und demnach einer Verminderung der Gefahr des Einschlagens. Das wesentliche an der Wirkung des Blitzableiters bleibt doch, daß er im Fall des Einschlagens den Blitz gefahrlos zur Erde ableitet.

§ 17. Galvanismus.

Während in der Elektrostatik eine enge Anlehnung an den historischen Gang der Forschung angezeigt war, wird man beim Galvanismus hiervon größtenteils absehen müssen. Die Voltaschen Fundamentalversuche über die elektrische Differenz von Metallen gegeneinander, die Unterscheidung von Leitern erster und zweiter Klasse, das Arbeiten mit inkonstanten Elementen – all das eignet sich nicht zur Einführung in das Gebiet. Die Mittel der modernen Technik, Akkumulatoren und Starkstrom, sind den Kindern bereits so geläufig, daß es unangebracht wäre, mit der Benützung dieser Mittel zu warten, bis das „System“ es gestattet. Auch die begriffliche Klärung der elektrischen Größen ist erst spät erfolgt, aber die Schüler hören im Leben frühzeitig schon von Volt und Ampère. Soll man ihnen, weil die wissenschaftliche Definition dieser Einheiten der Oberstufe angehört – und oft auch auf dieser nicht erschöpfend gegeben werden kann – auf der Unterstufe von diesen Begriffen überhaupt nicht sprechen? Sicher bedarf es hier einer beständigen Anpassung an die rasch veränderlichen Verhältnisse der Forschung und der Technik. Festzuhalten ist aber,

daß es nicht auf oberflächliche Vertrautheit mit den technischen Leistungen der Neuzeit, sondern auf ein Verständnis von Grundlagen ankommt, auf denen diese Leistungen beruhen.

Allgemeine Übereinstimmung herrscht darüber, daß man zu Beginn die Vorstellung vom elektrischen Strom durch Versuche über den Ausgleich statischer Ladungen verschieden hohen Potentials vorbereiten soll.¹⁾ Auch die Analogie, die ein Wasserstrom zwischen verschieden hohen Niveaus darbietet, darf nicht unbeachtet bleiben. Für die entsprechenden Versuche mit dem galvanischen Strom werden vielfach noch Voltaelemente (Kupfer und Zink in verdünnter Schwefelsäure) empfohlen. Der elektrochemische Vorgang in diesen ist den Schülern noch ebenso schwerverständlich wie der in den konstanten Elementen. Ich empfehle, in erster Reihe Akkumulatoren zu benutzen (so auch MÜLLER, T. 247); an deren Stelle kommen, wo solche nicht zu haben sind, von konstanten Elementen hauptsächlich die Chromsäureelemente in Betracht; entweder als Tauchelemente oder nach Art der Bunsenelemente mit Benutzung von Tonzellen (Kohle in Chromsäurelösung, Zink in verdünnter Schwefelsäure).²⁾

Der Lehrgang wird sich etwas verschieden gestalten, je nachdem man für die Demonstrationen ein Galvanometer auf elektromagnetischer Basis oder ein Hitzdrahtinstrument (nach GRIMSEHLS Vorschlag) benutzen will; oder endlich ein Drehspulgalvanometer, wie es ROSENBERG (I 268) empfiehlt; indes dürfte letzteres doch wohl mehr für die Oberstufe angemessen sein, da seine Erklärung bestenfalls erst gegen den Schluß des Unterkurses erfolgen kann.

Der Unterricht wird hier nicht von Problem zu Problem fortschreiten können, da die sich aufdrängenden Probleme zumeist nicht kurzer Hand zu lösen sind; es kommt hier vielmehr hauptsächlich auf recht übersichtliche Gruppierung des Stoffes an, also insbesondere auf eine getrennte Behandlung der Wirkungen des Stroms, woran sich dann späterhin Probleme mannigfaltigster Art anschließen können.

1) POSKE, Z. U. III 161.

2) GRIMSEHL empfiehlt (Lehrm. d. d. Sch. 1904 Nr. 4) das DANIELLSche Element in der KRÜGERSchen Form: Auf eine kreisrunde Bleiblechplatte mit in der Mitte eingesetztem Bleistab bringt man Kupfervitriolkristalle, darüber verdünnte Schwefelsäure, und hängt in diese einen Zinkblechzylinder.

Lehrgang.

1. Für die Demonstration des Ausgleichs zwischen zwei Leitern verschieden hohen Potentials eignet sich schon ganz vorzüglich die Reibungselektroskopmaschine, wenn man die Konduktoren durch eine von mehreren Funkenstrecken unterbrochene Leitung verbindet. Noch deutlicher wird der Versuch, wenn man zwei besondere isolierte Konduktoren (WEINHOLDSche Konduktoren) an die Pole einer Influenzmaschine anschließt und durch eine halbleitende Schnur oder einen Holzstab miteinander verbindet, oder endlich einen der beiden Pole der Influenzmaschine durch einen Holzstab zur Erde ableitet, wobei die abströmende Leitung durch ein Glockenspiel bemerkbar gemacht werden kann.

Die Abnahme des Potentials längs der Leitung durch Pendelelektroskope zu zeigen, wird mehrfach empfohlen, ist aber auf der Unterstufe nicht unbedingt erforderlich, da man auf die Spannungsänderungen auf einem Leiter doch zumeist nicht eingehen wird.

Man fügt dagegen am besten schon hier einen einfachen Versuch hinzu, der die Analogie mit strömendem Wasser vor Augen stellt. Es reicht aus, zwei unten tubulierte Glasgefäße durch Gummischläuche und Glasröhren zu verbinden, zu verschiedener Höhe mit Wasser zu füllen und durch Öffnen eines Quetschhahns den Wasserstrom in Gang zu setzen. Läßt man ferner in das eine Gefäß beständig Wasser zuströmen und das andere Ende frei in einer Wanne endigen, so hat man ein Bild der an den einen Pol der Influenzmaschine angeschlossenen Ableitung zur Erde.

Hier schon Versuche anzuschließen, die die Abhängigkeit der durchströmenden Wassermenge von Niveaudifferenz und Querschnitt dartun, halte ich für überflüssig, so lange das OHMSche Gesetz noch in weiter Ferne steht; ebenso die Ausführung analoger Versuche mit Luftströmen. Wohl aber kann die Messung der Stromstärke hier schon durch die in 1 Sekunde durch den Querschnitt der Leitung fließende Wassermenge erläutert werden.

2. Man beeile sich nun zu den galvanischen Elementen zu kommen, die den Schülern als Stromquellen zum größten Teil längst bekannt sind. Aus historischen Gründen mag man die Potentialdifferenz am Voltaelement zeigen; notwendig ist aber, daß dies auch an einem der später zur Verwendung kommenden Elemente geschieht, am besten am Akkumulator. Die Versuchsanordnung ist bekannt (MÜLLER, T. 251, ROSENBERG I 250). Man verbindet den + Pol mit der unteren, den - Pol mit der oberen Platte des Kondensators und dann umgekehrt. Man zeigt auch sofort, daß der Ausschlag des Elektrometers mit der Zahl der Akkumulatoren wächst. Eine besondere Wasserbatterie (ROSENBERG I 250) hierfür einzurichten, erscheint überflüssig und entspricht auch nicht ganz den Forderungen einer guten Methodik, da man mit dieser

Batterie doch nicht die weiteren Versuche über die Eigenschaften des Stromes anstellen kann. Auch hat es wenig Wert, den Zuwachs der Potentialdifferenz mit der Zahl der Elemente durch eine eigene Schematik (ROSENBERG, L. U. § 93) verständlich machen zu wollen. Alles Nähere hierüber gehört besser auf die Oberstufe. Der Geist des Schülers ist von der bloßen Tatsache befriedigt, da ihm aus dem Leben die größere Wirksamkeit von mehreren Elementen zumeist bekannt ist.

Dagegen ist es wohl angebracht, wo Starkstromanschluß vorhanden ist, zu zeigen, daß dessen Potentialdifferenz die eines Elements oder einer Akkumulatorenbatterie ganz bedeutend übertrifft. Hier ist die Stelle, das Wort Spannung als kürzere Bezeichnung für Potentialdifferenz einzuführen. (Wo man dies Wort als gleichbedeutend mit Potential gebraucht findet, ist die Potentialdifferenz gegen die Erde gemeint). Man sollte sich auch nicht scheuen, hier schon die Einheit zu nennen, nach der die Potentialdifferenz oder die Spannung gemessen wird, nämlich das Volt. Dies gewinnt eine gewisse Anschaulichkeit durch die Angabe, daß 1 Akkumulator 2 Volt, der Starkstrom 220 Volt Spannung hat. Man zeige im Anschluß hieran auch einige der gebräuchlichsten sonstigen galvanischen Elemente (U. § 100).

3. Daß nun in dem Verbindungsdraht der freien Pole eines Elements oder einer Batterie ein Strom fließen muß, ist nach den in Nr. 1 vorangegangenen Versuchen klar. Die erste Frage ist, wie kann man das Vorhandensein dieses Stromes erkennen? An die Wirkungen des Entladungsfunkens in der Elektrostatik schließen sich am nächsten die Wärme- und Lichtwirkungen an. Ein kurzes Stück dünnen Eisendrahts bringt man schon mit einem Element zum Glühen; die Erwärmung eines längeren Leiterstückes zeigt man mit ausgespanntem Lamettafaden, über den ein Papierstreifen gehängt ist (Übergang zum Hitzdrahtinstrument). Stärkere Wirkungen bringt eine Batterie von sechs Akkumulatoren hervor, mit der man einen Platindraht von 0,5 mm Dicke und 15 cm Länge zum Weißglühen bringt. MÜLLER, der diese Vorschrift gibt, bemerkt dazu, daß derselbe Draht durch den Schlag einer Leidener Batterie von 1 qm Belegung nicht so warm wird, daß ein angeklebtes Wachs-kügelchen abfällt. Andererseits hat der kräftige Entladungsfunk der Leidener Batterie beim galvanischen Strom vorderhand kein Gegenstück. Durch diese Tatsache wird der Unterschied beider Arten von Vorgängen ganz sinnfällig. Man braucht ihn nicht zu vertuschen, indem man es etwa ängstlich vermeidet, in der Elektrostatik allzu glänzende Entladungsercheinungen zu zeigen; der Unterschied drängt sich dem denkenden Schüler doch sehr entschieden auf. Das Problem läßt sich hier nicht gut durch Versuche lösen; wohl aber kann man mitteilen, daß beim galvanischen Strom die Potentialdifferenz zwar gering, aber genauen Messungen zufolge die bewegte Elektrizitätsmenge ungeheuer groß ist. Hier

ist nunmehr nochmals die Analogie mit dem Wasserstrom am Platze: einerseits geringe Wassermenge bei sehr großem Gefälle, andererseits sehr große Wassermenge bei geringem Gefälle.

An die Betrachtung der Wärmewirkungen wird sich die Demonstration von Glühlampen und Bogenlampen anschließen können, ohne daß zunächst auf die Abhängigkeit von Spannung und Stromstärke eingegangen wird. Nur daß die Glühlampen für verschiedene Voltanzahl eingerichtet sind, und die Bogenlampen erst von 30 bis 35 Volt an einen Lichtbogen erzeugen.

4. Chemische Wirkungen des Stroms. Auch wo kein chemischer Kursus vorausgegangen ist, wird man diese Wirkungen nicht übergehen können, zumal sich auf sie die einfachste, dem Schüler der Unterstufe am leichtesten verständliche Einführung der Stromeinheit gründet. Als Fundamentalversuch ist hier die Zersetzung von verdünnter Schwefelsäure anzusehen – die aber nicht als Wasserzersetzung bezeichnet werden darf. Für den Versuch wird zumeist der HOFMANNsche Apparat empfohlen, der in neuerer Zeit mannigfache Verbesserungen erfahren hat. Auch der ältere einfache Apparat, bei dem zwei abnehmbare zylindrische Glasglocken über die Platinelektroden gehängt sind, ist bei praktischer Konstruktion nicht zu unterschätzen, da man die beiden Gase sehr bequem getrennt vorzeigen und ihre Eigenschaften demonstrieren kann.

Um die Einheit der Stromstärke zu veranschaulichen, braucht man noch ein Voltmeter, das die beiden Gase vereinigt aufzufangen gestattet. Eine zweckmäßige Form hat B. KOLBE (Z. U. X 75) beschrieben. Schaltet man mehr Draht in die Leitung ein, so wird die ausgeschiedene Knallgasmenge geringer. Man kann schon hier auf das Problem des Zusammenhangs von Stromstärke und Widerstand hinweisen. Man versäume auch nicht, das Gasgemenge in Seifenwasser aufzufangen und als Knallgas zu demonstrieren.

Nach Versuchen mit einem solchen Voltmeter wird die Einheit der Stromstärke oder 1 Ampère definiert als diejenige, bei der 10,44 ccm Knallgas in der Minute erzeugt werden.

Von anderen chemischen Wirkungen des Stroms ist auf dieser Stufe noch die Elektrolyse von Kupfersulfat vorzuführen, einmal zwischen Platinelektroden, dann auch zwischen Kupferelektroden, wobei die Auflösung der Anode zu beachten ist, während die Kathode sich mit frischem metallischem Kupfer bedeckt (Galvanoplastik).

Hier ist nun auch die Stelle, wo die Akkumulatoren näher besprochen werden können. Zwischen den Platten befindet sich verdünnte Schwefelsäure, die Blei in Form von Bleisulfat aufgelöst enthält. Beim Durchgang des Ladestroms scheidet sich an der Kathode frisches Blei aus, an der Anode bildet sich Bleisuperoxyd. Beim Entladen löst sich das Blei der

Kathode ebenso wie das Bleisuperoxyd der Anode wieder in der Schwefelsäure auf. Der chemische Vorgang der Auflösung ist die Ursache des Stroms. Chemische Energie wird in Stromenergie umgesetzt. Laden und Entladen der Akumulatoren sind also besondere Fälle der Energieverwandlung. Auch bei anderen galvanischen Elementen ist ein chemischer Vorgang, in der Regel die Auflösung von Zink, die Ursache des Stroms.¹⁾ (Über den Unterschied konstanter und inkonstanter Ketten wird erst auf der Oberstufe näheres zu sagen sein.)

5. Magnetische Wirkungen des Stroms. I. Während bisher nur Wirkungen im Stromkreise betrachtet wurden, kommen nun die Wirkungen außerhalb des Stromkreises zur Behandlung. Man knüpft hier historisch an die Entdeckung durch OERSTED an und demonstriert die Wirkung mit Hilfe eines Akkumulators; die Abhängigkeit der Stromwirkung von der Größe des eingeschalteten Widerstandes ist beiläufig zu zeigen und als Problem für später hervorzuheben. Man verachte auch nicht solche Hilfsmittel wie die Markierung der Stromrichtung durch einen am Leitungsdraht angebrachten Pfeil (ROSENBERG II 611) und stelle die Magnetnadel für beide Stromrichtungen sowohl unterhalb als oberhalb des Leitungsdrahtes auf. Der magnetische Meridian sei nicht bloß durch die Magnetnadel, sondern durch eine Linie auf dem Tische (Papierstreifen) bezeichnet. Die AMPÈRESche Formel macht den Schülern, namentlich bei Veranschaulichung durch ein „Badepüppchen“ (*«le petit bonhomme d'Ampère»*) großes Vergnügen. Doch vermeidet man wohl besser diese Nebenwirkung, die leicht von der Hauptsache ablenkt, und bedient sich lieber der Rechte-Hand-Regel, die auch für die Anwendungen viel „Handliches“ hat.

Bei genügender Zeit kann man auch die Stärke der Wirkung an einem Magnetstab, der an einer Wage (horizontal oder vertikal) aufgehängt ist, prüfen. (Vgl. MÖLLER T. 256.) Wichtig ist jedoch, die Wirkung eines rechteckigen Rahmens sowie die Wirkung einer mehrfachen Wickelung (Multiplikatorwickelung) zu zeigen, nebst der Anwendung auf das vielgebrauchte Vertikalgalvanoskop. Eine praktische, mit Öldämpfung versehene Form des Instruments beschreibt MÖLLER (T. 265). Die Umkehrung der Wirkung, nämlich die Ablenkung einer Drahtspule durch einen Magneten, könnte zwar hier angefügt werden, doch empfiehlt es

1) Will man hierfür die Erfahrung an Elementen bei der Hausklingelanlage nicht als ausreichend ansehen, so empfiehlt sich als einfachster Versuch, daß man ein Paar Streifen aus amalgamiertem Zinkblech und Kupferblech von 2–3 mm Breite und 70–80 mm Länge in verdünnte Schwefelsäure taucht und durch Zusammenbiegen der oben herausragenden Ende kurz schließt, während man ein zweites ebensolches Element ungeschlossen stehen läßt: Das Zink ist im ersten Element nach etwa 20 Minuten vollständig aufgelöst (GRIMSEHL, Lehrm. d. d. Sch. 1904, Nr. 8).

sich in methodischer Hinsicht, die Betrachtung der Stromwirkungen zunächst nicht zu unterbrechen.

6. Magnetische Wirkungen des Stroms. II. Elektromagnete sind den Schülern wohl durchweg, mindestens von der elektrischen Klingel bekannt. Man benutzt für den ersten Versuch einen Stab aus weichem Eisen und eine aus wenigen Windungen dicken Drahts gebildete flache Spule, an der sich die Richtung des Stroms leicht erkennen läßt. Die Art der entstehenden Pole kann man aus der Theorie der Molekularmagnete mit Hilfe der Rechte-Hand-Regel vorhersagen. Man lasse merken: Südpol und Strom im Sinne des Uhrzeigers, Nordpol und Strom nicht im Sinne des Uhrzeigers.

Hieran schließt sich die Demonstration eines Hufeisen-Elektromagneten und dessen Tragkraft, sowie auch die Entdeckung des remanenten Magnetismus. Es folgen dann die Anwendungen: Morsetelegraph und elektrische Klingel. [Früher wurde auch der Elektromotor hier besprochen (so BUDDE-KIESSLING § 546), doch ist die ältere Betrachtungsweise, wonach die Pole des Feldmagneten auf die im Eisen des Ankers erzeugten Pole anziehend oder abstoßend wirkten, nicht zutreffend; man muß die Besprechung bis zur Wirkung von Magneten auf Stromleiter verschieben.]

7. OHMSches Gesetz. Das wiederholt uns entgegengetretene Problem des Zusammenhanges von Stromstärke und Widerstand kann nun in Angriff genommen werden. Als Strommesser brauche man ein Amperemeter nach dem elektromagnetischen Prinzip mit geringem Spulenwiderstand, schon aus dem Grunde, damit die quantitative Bestimmung der Stromstärke den Schülern recht geläufig wird. Andere Instrumente, namentlich solche mit Nebenschlußwiderständen, scheinen mir für den vorliegenden Zweck, wo alles recht durchsichtig sein sollte, nicht so gut geeignet.¹⁾

Das Amperemeter kann mit Hilfe eines Voltameters (Nr. 4) auf seine Richtigkeit wenigstens näherungsweise geprüft werden, indem man beide zusammen mit einem Regulierwiderstand in den Stromkreis einer Akkumulatorbatterie einschaltet. Abweichungen von der genauen Übereinstimmung sind durch Hinweis auf Temperatur, Druck und ev. Feuchtigkeit zu begründen.

a) Man schalte in den Stromkreis zum Amperemeter einen zwischen zwei HOLTZschen Fußklemmen ausgespannten dünnen Kupferdraht und einen Regulierwiderstand, der so gestellt wird, daß das Amperemeter den Maximalausschlag (2 Amp.) anzeigt. Man zeige zunächst, daß mit der Verlängerung des eingeschalteten Drahts (etwa am Regulierwiderstand) die Stromstärke abnimmt.

1) GRIMSEHL benutzt für die einführenden Versuche ein Hitzdrahtinstrument, das den Vorzug hat, daß dabei nur die im Anfang bereits gezeigte Wärmewirkung des Stromes Anwendung findet. Erinnert sei auch an das Differentialgalvanometer von SZYMANSKI, Z. U. V 177.

b) Man schalte nun gleichlange und gleichdicke Drähte verschiedener Metalle (etwa Silber, Kupfer, Eisen, Manganin) nacheinander zwischen die Fußklemmen und reguliere den Strom so, daß beim bestleitenden Metall der Ausschlag den größten zulässigen Wert annimmt. (Stromschlüssel!) Nachdem die Verminderung der Stromstärke durch die schlechter leitenden Metalle gezeigt, verkürze man die Drähte, bis der Ausschlag bei allen gleich groß ist. Man gewinnt so eine Veranschaulichung der spezifischen Widerstände. Bei Verkürzung des Eisendrahts auf $\frac{1}{6}$ der Länge des Kupferdrahts ergibt sich z. B., daß der Widerstand des Eisendrahts 6 mal so groß als der des Kupferdrahts ist. Eine Glasröhre mit Kupferelektroden, in die man Kupfersulfatlösung gibt, kann zur Demonstration des Flüssigkeitswiderstandes dienen.¹⁾ Hierbei ist dann auch über den inneren Widerstand eines Elements das Nötige zu bemerken. Für einen Versuch hierzu verwendet man am besten ein Element mit verschiebbaren Platten.

c) Den Einfluß der Drahtdicke zeigt man mit Manganin- oder Neusilberdrähten von gleicher Länge und 0,5 mm bzw. 1 mm-Durchmesser. Vier Drähte der ersteren Art parallel gelegt haben denselben Widerstand wie ein Draht der zweiten Art. Hierbei ist darauf hinzuweisen, daß der Widerstand nicht von der Oberfläche, sondern von dem Querschnitt des Leiters abhängig ist.²⁾ Aus den Versuchen wird der Schluß gezogen, daß der Widerstand mit wachsender Länge wächst, mit wachsendem Querschnitt abnimmt und überdies von der spezifischen Natur des Leiters abhängt.

Nummehr kann die Einheit des Widerstandes, 1 Ohm, definiert werden durch eine Quecksilbersäule von 1,063 m Länge und 1 mm² Querschnitt (bei 0° C). Es ist nicht unzweckmäßig, das Ohm außer durch einen Normaldraht von diesem Widerstande auch durch eine in eine Glasröhre eingeschlossene Quecksilbersäule zu veranschaulichen.

Auf Grund der Definition von 1 Ampère und 1 Ohm ist auch 1 Volt definierbar als diejenige Spannung eines Elements, die in einem Stromkreise von 1 Ohm Gesamtwiderstand die Stromstärke 1 Ampère hervorbringt.³⁾ (Als Beispiel kann hier das Voltaelement angeführt werden.) Verständlich wird nunmehr auch die Formel des OHMSchen Gesetzes

$$I = \frac{E}{R}$$

1) Vgl. auch ROSENBERG I 272.

2) Vgl. SZYMANSKI, Z. U. V 177.

3) Dieser Weg scheint mir zweckmäßiger als der andere von GRIMSEHL eingeschlagene, daß man 1 Volt durch die Spannung eines Voltaelements definiert und dann durch Volt und Ohm die Definition von 1 Ampère gemäß dem OHMSchen Gesetze gibt. Denn jene Definition des Volt ist nur eine ungefähre und zufällige (weil das Voltaelement zufällig diese Spannung hat), während die elektrochemische Definition der Stromstärke zwar auch empirisch, aber doch exakt ist.

sein, die zum Schluß mitgeteilt werden kann, obschon die weitere Behandlung der Oberstufe zufällt: Einige einfache Rechnungsbeispiele (GRIMSEHL, Lehrb. § 148) lassen sich hier noch anschließen.

8. Wirkung von Magneten auf Stromleiter. Bei Magneten und weichem Eisen ist die Wechselseitigkeit der Wirkung nachgewiesen worden, ebenso bei elektrisierten und nichtelektrisierten Körpern. Gleiches gilt von zwei Magnetpolen, oder von zwei elektrisierten Körpern in bezug aufeinander. Es liegt nun die Frage nahe, ob die Wirkung eines Stromleiters auf einen Magneten auch umkehrbar ist, d. h. ob ein Magnet auch auf einen Stromleiter bewegend wirkt. Den sonst wohl dafür geeigneten Versuch mit Hufeisenmagnet und zwischen den Schenkeln befindlichem beweglichen Leiter sollte man lieber der Oberstufe zwecks Erläuterung des Kraftlinieneinflusses vorbehalten. Dagegen kann zur Demonstration nach MÜLLERS Vorschlag (T. 257) das AMPÈRESche Gestell dienen; an die Wirkung auf ein lineares Leiterstück (Teil eines Drahtrechtecks) kann sich naturgemäß die Wirkung auf eine Drahtspule (Solenoid) anschließen, wobei sich ergibt, daß das Solenoid sich ebenso verhält wie ein Elektromagnet, und daß die Pole in gleicher Weise wie bei diesen bestimmt sind (S im Sinn des Uhrzeigers, N gegen den Sinn des Uhrzeigers). Auch ein von MÜLLER (ebd.) beschriebener Versuch, der die Einwirkung eines Magnetpols auf eine bifilar aufgehängte stromdurchflossene Spule zeigt, paßt hierher. Diese Wirkung eines Magneten auf eine Spule ist auch für die Erläuterung des Elektromotors von Wert.

Daß der Elektromotor auf der Unterstufe ohne vorgängige Besprechung der Induktionsgesetze behandelt werden kann, geben auch MÜLLER (T. 324) und GRIMSEHL (Lehrb. § 150) zu. Auf der Oberstufe sind diese Maschinen noch einmal im Lichte des Kraftlinienbegriffs und der Energieübertragung zu betrachten.

Von den verschiedenen Ankerwickelungen scheint die des GRAMMESchen Ringes für die Unterstufe am geeignetsten zu sein, zumal gerade kleine Modelle solcher Motoren vielfach in den Händen der Schüler zu sein pflegen. Nur beschränke man sich bei der Erklärung auf die Wirkung zwischen Feldmagneten und Ankerwicklung gemäß der in Nr. 8 für Solenoide angegebenen Regel. Die früher übliche Zerlegung des Eisenringes in zwei Halbringe mit einander zugekehrten gleichnamigen Polen gibt den Sachverhalt nicht zutreffend wieder und ist zu verwerfen.

Zur Erläuterung der Wickelung des Grammeringes und insbesondere der Wirksamkeit der Schleiffedern ist es gut, sich ein Modell herzustellen, indem man auf einen Holz- oder Eisenring eine Spule aus Klingeldraht in acht Abteilungen aufwickelt, deren Enden paarweise zusammengedreht und nach außen gerichtet sind. An einem solchen Modell in Verbindung mit einer guten schematischen Abbildung (z. B. von STERNSTEIN) kann man den Vorgang dann leicht verständlich machen.

9. Magnetinduktion. Ebenso wie bei der magnetischen Wirkung I (Ablenkung einer Magnetnadel) erhebt sich auch bei der magnetischen Wirkung II (Erregung von Magnetismus) die Frage, ob diese Wirkung umkehrbar sei. Der große FARADAY hat sich bekanntlich lange mit dem Problem getragen, ob es nicht möglich sei, elektrischen Strom mit Hilfe eines Magneten zu erzeugen, bis ihm endlich die Lösung gelang. (Er kam dazu auf einem Umwege, nachdem er zuerst gefunden hatte, daß die Erregung von Magnetismus in einem geschlossenen Ring aus weichem Eisen einen Strom in einem anderen Leiter hervorrief, der auf denselben Eisenring aufgewickelt war.) Die Versuche sind am zweckmäßigsten mit Spule und Magnetstab anzustellen. Ein Vertikalgalvanoskop genügt, namentlich wenn man darauf achtet, daß die Widerstände von Spule und Galvanoskopwicklung ungefähr gleich sind. Daß die Bewegung der Spule gegen den ruhenden Magneten denselben Effekt hat, bedarf kaum des besonderen Nachweises.

Die Richtung des induzierten Stroms kann gemäß dem LENZschen Gesetz bestimmt werden: der Pol eines mit der Spule äquivalenten Elektromagneten ist stets von der Art, daß zwischen ihm und dem Pol des Magneten eine Wirkung stattfindet, die der stattfindenden Bewegung entgegengerichtet ist, also Abstoßung, wenn sich die Spule dem Pol des Magneten nähert, Anziehung, wenn sie sich von ihm entfernt.

Diese Versuche reichen hin, um die Vorgänge im Ringanker einer Gleichstrommaschine verständlich zu machen, ohne daß man dabei die Kraftlinien zu Hilfe nimmt. Die dem Nordpol des Feldmagneten sich nähernde Spule hat auf der Vorderseite einen Nordpol, auf der Hinterseite einen Südpol, beim Entfernen auf der Hinterseite einen Südpol, auf der Vorderseite einen Nordpol, d. h. der induzierte Strom hat während des ganzen Vorübergangs an dem Pole gleiche Richtung und ändert diese erst bei Annäherung an den anderen Pol. Die Rolle des Ankermagneten bleibt außerhalb des Bereichs der Erörterung, abgesehen etwa von der Bemerkung, daß dadurch die Wirkung verstärkt wird.

Auf andere Ankerwickelungen wird schon aus Mangel an Zeit nicht eingegangen werden können. Das SIEMENSSche Dynamoprinzip dagegen wird ohne Schwierigkeit verständlich zu machen sein.

10. Elektroinduktion. FARADAY hat auch entdeckt, daß eine stromdurchflossene Drahtspule in einer zweiten Spule einen ähnlichen Induktionsstrom hervorruft wie ein Magnet. Zu unterscheiden ist: a) Näherung und Entfernung der Primärspule, b) Schließen und Öffnen des Primärstroms, c) Verstärkung und Schwächung des Primärstroms.

Als Anwendungen schließen sich an: der Induktionsapparat (DUBOIS-REYMONDS Schlittenapparat) und das Telephon; bei letzterem ist es in mehrfacher Hinsicht von Wichtigkeit, auch die ursprüngliche Erfindung GRAHAM BELLS von 1875 zu besprechen, die das älteste und eleganteste

Verfahren der elektrischen Kraftübertragung darstellt; dann auch natürlich das Mikrophon und dessen Verwendung im Fernsprehdienst. Aber auch beim Gebrauch des Mikrophons ist bekanntlich die Elektroinduktion nicht ausgeschlossen, da jeder Fernsprechapparat eine kleine Induktionsspule enthält. Auf den Funkeninduktor und die Lichterscheinungen in GEISSLERSchen Röhren braucht man auf der Unterstufe nicht einzugehen. Will man Röntgenbilder zeigen, so kann dies mit der Influenzmaschine geschehen. Eine Vorwegnahme von Versuchen, die kaum auf der Oberstufe zu einigem Verständnis zu bringen sind, nur der Knall- und Lichteffekte wegen, halte ich nicht für gerechtfertigt.

Dritter Teil.

Die Oberstufe.

§ 18. Einleitung.

Während auf der Unterstufe vorwiegend der Tatsachenhunger des jugendlichen Geistes zu stillen ist, tritt auf der Oberstufe der Gedanke des systematischen Zusammenhangs in den Vordergrund. Etwas von dem faustischen Erkenntnisdrange – wie alles sich zum Ganzen webt, eins in dem andern wirkt und lebt – regt sich in jedem jungen Menschen, sobald er die Grenzen der Pubertät überschritten hat. Diesem Bedürfnis zusammenhängender Erkenntnis muß der Unterricht auf der Oberstufe gerecht werden. Das kann auf mehrfache Art geschehen. Einmal so, daß gewisse größere in sich geschlossene Abschnitte – didaktische Einheiten – zum Gegenstande des Unterrichts gemacht werden; dann aber auch so, daß die Wechselwirkungen der Naturkräfte, wie man früher sagte, oder die Verwandlungen der Energie, wie man es heute nennt, den Leitfaden abgeben, der die getrennten Gebiete der Physik miteinander verknüpft. Endlich durch Einordnung des ganzen Materials in ein logisch gegliedertes System. Es wird sich schwer vermeiden lassen, daß die verschiedenen Gebiete der Physik auf verschiedene Klassenstufen verteilt werden. Dann liegt die Gefahr nahe, daß der Eindruck erweckt wird, als stelle das gesamte physikalische Pensum „nichts als ein Aggregat zusammenhangloser Einzellehren“ dar, von dem das Wort aus dem „Faust“ gilt: „Dann hat er die Teile in seiner Hand, fehlt leider nur das geistige Band.“ Nicht selten hört man von Männern, die dem Gymnasialunterricht längst entwachsen sind, die Klage aussprechen, daß sie solcherart in ihren Erwartungen vom Physikunterricht getäuscht worden seien.

Nun wäre es aber ganz und gar nicht angebracht, wenn man der Schwierigkeit dadurch Herr zu werden versuchte, daß man auf der Oberstufe eine möglichst systematische Darstellung nach

Art der Mathematik bevorzugte. Auch auf dieser Stufe muß der Grundsatz der beständigen Problemstellung, der dem Prinzip systematischer Lehrdarstellung geradezu entgegengesetzt ist, maßgebend bleiben. Aber die Problemstellung kann sich einesteils über größere Zusammenhänge erstrecken, und andererseits kann man Sorge tragen, daß die behandelten Probleme sich wiederum zu einer „höheren Einheit“ zusammenschließen. Das Lehrbuch mag schließlich die wohlgegliederte systematische Zusammenfassung des Stoffes nach logischen Gesichtspunkten darbieten. Für die Auflösung des Lehrstoffs der Oberstufe in abgeschlossene Einzeluntersuchungen ist namentlich K. NOACK (Z. U. IV 165) eingetreten. Er bemerkt aber auch, daß diese Untersuchungen vielfach ineinander übergreifen werden, daher von einem Auseinanderfallen des Lehrgangs keineswegs die Rede sein könne, vielmehr würden sich stets Gelegenheiten in Fülle bieten, wechselseitige Beziehungen herzustellen, verwandte Abschnitte des elementaren Kursus zu wiederholen, die erworbenen Kenntnisse und Erfahrungen unter höheren Gesichtspunkten zu betrachten. Immerhin bleibt namentlich angesichts der neueren Bestrebungen, einer eklektischen Behandlung des Stoffes den Vorzug zu geben, die Gefahr des Auseinanderfallens bestehen. Ihr gegenüber kann der Lehrer nicht energisch genug den Gedanken des einheitlichen Zusammenhangs für sich selber im Bewußtsein behalten und ihn auch in der Art der Darstellung des Stoffes immer von neuem betonen. —

Für die präzise Auffassung physikalischer Zusammenhänge sind die funktionalen Größenbeziehungen von grundlegender Bedeutung. Wenn auch auf der Unterstufe schon das Quantitative in den Erscheinungen, besonders sofern es der Messung mit einfachen Mitteln zugänglich war, eine gewisse Rolle spielte, so erreicht es doch auf der Oberstufe erst seinen vollen Wert. Ja man könnte geradezu bei der Überleitung zum Unterricht der oberen Klassen darauf hinweisen, „daß die vorwissenschaftliche Beschäftigung mit physischen Erscheinungen gerade nach der Seite der quantitativen Merkmale das meiste an Genauigkeit und Vollständigkeit zu wünschen, und somit für eine eigentlich wissenschaftliche Beschreibung und Erklärung der Tatsachen das meiste zu tun übrig lasse“ (HÖFLER, Z. U. VI 118). Das Quantitative wird nun auch nicht mehr vorwiegend in numerischen Größenbestimmungen, sondern in allgemeinen mathematischen Maßbeziehungen zu suchen sein.

Über den Umfang freilich, den solche mathematischen Betrachtungen innerhalb des Physikunterrichts einzunehmen haben, ist viel geschrieben worden. Angesichts des Mißbrauchs, der in diesem Punkte früher mit der Mathematik getrieben worden ist, erscheint die dagegen eingetretene Reaktion wohl am Platze, die ihren kürzesten Ausdruck in dem Grundsatz I der Meraner Lehrpläne findet: „Die Physik ist im Unterricht nicht als mathematische Wissenschaft, sondern als Naturwissenschaft zu behandeln.“ Hierzu ist weiterhin noch die Erläuterung gegeben: „das Mathematische ist in der Physik auf grundlegende Entwicklungen zu beschränken; Ableitungen und Anwendungen dagegen, deren Durchführung im wesentlichen nur noch mathematische Mittel erfordert, sind soviel als möglich in die Mathematikstunden zu verlegen. So gehört die Ableitung der Formeln für den schiefen Wurf in die Physik, die darauf fußenden weiteren Berechnungen aber in die Mathematik.“¹⁾

Über „die Mathematik in den physikalischen Lehrbüchern“ hat H. E. TIMERDING eine sehr lehrreiche Studie veröffentlicht, aus deren Inhalt einige Hauptgedanken hier Platz finden mögen. Besonders wichtig ist die Bemerkung, daß eine mathematische Darstellung entweder exakt oder gar nicht gegeben werden solle; es sei besser, „überall da, wo eine korrekte Ableitung nicht möglich ist, lieber die wirklichen Verhältnisse als rein tatsächlich so einfach und anschaulich wie möglich zu beschreiben, statt durch eine trügerische Deduktion die Vorstellungen des Lernenden zu verwirren“. Dies gilt besonders auch im Hinblick auf die Infinitesimalrechnung. Es gibt Dinge in der Schulphysik, die sich ohne die Infinitesimalrechnung gar nicht exakt behandeln lassen, demnach kann nur die Einführung mindestens der Grundbegriffe dieses Verfahrens gewisse Schwierigkeiten heben, vor die sich heute der Physikunterricht gestellt sieht. Je nach der Schulgattung und dem mathematischen Lehrplan wird sich der Physikunterricht auf jene Grundbegriffe unmittelbar stützen, oder sich begnügen müssen als tatsächlich richtig anzugeben, was sich streng nur auf infinitesimalem Wege ableiten läßt, und es dann dem mathematischen Unterricht überlassen, die in der Physik vorgekommenen infinitesimalen Begriffe zu klären und die fehlenden Ableitungen nachzutragen. Es kann kein Zweifel darüber bestehen,

1) GUTZMER, Die Tätigkeit usw. S. 124.

daß der erste Weg den Vorzug verdient. Doch wird er vorzugsweise an Realanstalten gangbar sein, während die Gymnasien sich vielfach werden an den zweiten halten müssen. Gleichwohl wird dahin zu streben sein, daß auch der mathematische Lehrplan der Gymnasien sich dem hier hervortretenden Bedürfnis nach Möglichkeit anpaßt. Erschwerend fällt allerdings ins Gewicht, daß schon der Anfang der Mechanik bei der Definition der Geschwindigkeit einigermaßen geklärte infinitesimale Vorstellungen erfordert, deren Erörterung der Physikunterricht auch an den Gymnasien keineswegs umgehen darf. Auf Einzelheiten der Schrift von TIERDING wird bei den besonderen Problemen zurückzukommen sein.

Über den Wert, den die mathematische Behandlung des physikalischen Lehrstoffs hat, stimmen die Meinungen nicht durchweg überein. Unanfechtbar aber wird der schöne Ausspruch GALILEIS bleiben, daß die mathematischen Symbole die Charaktere sind, in denen das Buch der Natur geschrieben ist. Darum ist es andererseits zu weit gegangen, wenn behauptet wird, daß der Schüler durch eine mathematische Ableitung niemals einen Einblick in die Natur gewinnen könne (GRIMSEHL, D. 24). Schon der Hinweis auf GALILEIS fundamentale Ableitung des Wegzeitgesetzes dürfte genügen, diese Behauptung zu widerlegen. Aber Zustimmung verdient andererseits auch die Warnung, daß man nicht die Entwicklung der Formel und die Formel selbst als das Endziel des Unterrichts ansehen dürfe. Die Formel selbst ist ein kurzer Ausdruck für den Zusammenhang der bei einem Naturvorgang in Wechselbeziehung tretenden Faktoren. „In der Schule ist noch lange nicht alles getan, wenn die Formel entwickelt ist, sondern die sich aus der Formel ergebende Bildung der physikalischen Begriffe muß durchgeführt und erreicht werden. Der Schüler muß die Formel gewissermaßen physikalisch fühlen und verstehen“ (GRIMSEHL, a. a. O.).

Jeder physikalische Vorgang beruht darauf, daß eine Größe von einer oder mehreren anderen Größen abhängig ist. Diese Abhängigkeit hat in der Physik durchweg den Charakter des funktionalen Zusammenhangs. Wenn neuerdings für die Mathematik eine stärkere Betonung des „funktionalen Denkens“ gefordert wird, so findet diese Art des Denkens in der Physik ihre Stütze und zugleich ihre bedeutsamste Anwendung. Es ist daher durchaus im Sinne einer einheitlichen Methodik, wenn verlangt wird, daß beide Unterrichtsgebiete in dieser Beziehung Hand in Hand gehen. Auch die graphische Darstellung gewinnt von diesem

Gesichtspunkt aus erhöhte Bedeutung und verdient im Physikunterricht die angelegentlichste Pflege.

Über den Umfang dessen, was an mathematischen Kenntnissen für den Physikunterricht erforderlich ist, wird je nach der Schulgattung verschieden geurteilt werden müssen. Eine Zusammenstellung des mathematischen Handwerkzeugs, das der Physikunterricht auf der Schule bei reichlicher Abmessung erfordert, hat A. HÖFLER in dem mathematischen Anhang zu seiner Physik (S. 697–773) gegeben.

A. Die Mechanik.

§ 19. Allgemeines.

Die Mechanik gilt seit lange als der Teil der Physik, der in systematischer Hinsicht am vollkommensten ausgebildet worden ist. Es liegt daher nahe, daß auch in den Lehrbüchern die streng systematische Anordnung des Stoffes bevorzugt wird. Damit soll aber keineswegs ein gleicher Gang für den Unterricht selbst gutgeheißen werden. Gerade hier wird man vielmehr am meisten Anlaß haben, von der systematischen Anordnung abzuweichen, sobald man auch auf der Oberstufe das Prinzip der Auflösung des Stoffs in Probleme und Problemreihen zu verwirklichen sucht.

Es ist ein namentlich von HÖFLER in seiner „Physik“ wie auch in seiner „Naturlehre“ streng durchgeführter Grundsatz, den phoronomischen Teil der Mechanik völlig von dem dynamischen zu trennen und diesem voranzustellen. Für das Lehrbuch ist es auch sicher von Wert, daß hier eine klare Scheidung sichtbar wird. Für den Unterricht ist dies weniger angemessen, da dadurch oft zusammengehörige Probleme auseinandergerissen werden. Es wird sich also zwar die erste didaktische Einheit um die gleichmäßig beschleunigte Bewegung gruppieren (O. § 7–8), dann aber sofort die Erörterung des Kraftbegriffs (§ 12–14) sich anschließen müssen. Eine zweite didaktische Einheit wird die Zusammensetzung und Zerlegung der Bewegungen und der Kräfte (§ 9, 15–16) bilden können, eine dritte die Kreisbewegung nebst Zentripetal- und Zentrifugalkraft (§ 10 u. 18), eine vierte die harmonische Bewegung und das Pendel (§ 11 u. 17). Dann mögen als weitere Einheiten die Behandlung von Arbeit und Energie (§ 19 bis 21), endlich die Mechanik starrer Systeme (§ 22–23) folgen. Einen besonderen Abschnitt bildet dann wieder die Behandlung

der Schwingungen, während die Wellenbewegung am besten eng mit der Akustik verbunden wird (s. S. 295).

Es entspricht einer Tradition, der auch HÖFLER gefolgt ist, daß die KEPLERSchen Gesetze und das NEWTONSche Gravitationsgesetz innerhalb des Kursus der Mechanik behandelt werden. Sicherlich bedeutet ja die „Himmelsmechanik“ die Krönung des Gebäudes der irdischen Mechanik. Aber mir will scheinen, daß die Einfügung jener Himmelsmechanik den induktiven Aufbau des Systems der irdischen Mechanik und seinen einheitlichen von Punkten zu starren Systemen fortschreitenden Zusammenhang nur stört. Die Erweiterung der irdischen Gesetze auf das Weltall bedeutet einen so grandiosen Schritt in der physikalisch-mechanischen Auffassung der Welt, daß es mir nicht in den Sinn will, diesen wichtigen Gegenstand in eines unter vielen Kapiteln des physikalischen Pensums unterzubringen. Dazu kommt noch folgendes: Um die Bedeutung der NEWTONSchen Entdeckung zu verstehen und voll zu würdigen, bedarf es so vieler Vorbereitungen aus dem Gebiet der Astronomie, daß diese sich schwerlich beiläufig im Rahmen der ohnehin stark mit Unterrichtsstoff belasteten Mechanik bringen lassen. Und auch NEWTON selbst hat in seinen Prinzipien bei der Erläuterung seiner drei Hauptgesetze vorwiegend irdische Beispiele herangezogen. Ich halte es also für gerechtfertigt, die astronomischen Anwendungen und Erweiterungen aus der Einführung in die Mechanik, wie die Oberstufe sie fordert, auszuschließen und dem Kursus der Astronomie vorzubehalten, der ja ohnehin nach den Preußischen Lehrplänen, wie auch im Meraner Lehrplan der Naturforschergesellschaft, den Abschluß des physikalischen Unterrichts bildet. Dies braucht nicht zu hindern, daß schon im Kursus der Mechanik gelegentlich ein Ausblick auf kosmische Anwendungen, namentlich auf die Beziehung zwischen dem Fall eines Körpers an der Erdoberfläche und der Zentripetalbeschleunigung des Mondes gegen die Erde gegeben wird. —

Unter den allgemeinen Fragen, die sich in der Mechanik aufdrängen, ist die der verschiedenen Maßsysteme eine der wichtigsten. Was den Gebrauch der beiden hauptsächlichsten Maßsysteme anlangt, so kommt in der Maschinenteknik überwiegend noch das terrestrische, in der wissenschaftlichen Physik das C.G.S.-System (absolute System) zur Anwendung. In unterrichtlicher Hinsicht hat jenes den Vorzug, sich enger an die Maße des ge-

wöhnlichen Lebens und auch an die hier vorherrschenden Größenordnungen anzuschließen, dieses dagegen ist besonders wichtig wegen seines engen Zusammenhanges mit den absoluten magnetischen und elektrischen Einheiten. Aus dieser Gegenüberstellung geht schon hervor, daß eine Nötigung zur Benutzung der absoluten Einheiten innerhalb des Bereichs der Mechanik nicht besteht.¹⁾ Die neueren Aufgabensammlungen (so die von JOHANNESON besorgte vierte Auflage von W. BUDDE) haben auch zumeist in der Mechanik die technischen Maße beibehalten. Auch die Lehrbücher sind nicht konsequent in der Durchführung des absoluten Maßsystems, und können es nicht sein. So wird der Elastizitätsmodul nach kg/mm^2 gemessen, nicht bloß in Schulbüchern, sondern auch z. B. in LANDOLT-BÖRNSTEINS Tabellenwerk. Bedenkt man aber, daß auf der Unterstufe die Benutzung von 1 kg als Gewichtseinheit gar nicht umgangen werden kann, so stellt sich die Frage so: Nicht ob eins oder das andere Maßsystem, sondern ob ein oder zwei Maßsysteme zu benutzen sind. Auf dem Gebiet der Elektrizität wird überdies wesentlich mit den praktischen Einheiten gearbeitet. Neuere Autoren empfehlen sogar, die absoluten Maße ganz aus dem Unterricht zu verbannen.²⁾ Unter den Gründen, die für die Bevorzugung des absoluten Maßsystem angeführt werden, pflegt die Unveränderlichkeit der Masse gegenüber der Veränderlichkeit des Gewichts an erster Stelle zu stehen. Dieser Grund ist indessen nicht durchschlagend, da man die Gewichtseinheit durch Beschränkung auf den 45. Breitengrad oder auf einen bestimmten Ort präzisieren kann, ebenso wie die Masseneinheit erst durch die Temperaturbestimmung 4°C . ihre volle Bestimmtheit erhält. Schwerer wiegend ist der Umstand, daß die Masse in der Tat eine wirkliche beharrende Naturkonstante darstellt, während die Kraft eine räumlich und zeitlich veränderliche Größe ist.

Alle solche Erwägungen können indessen nicht mehr nach sich ziehen, als daß das absolute System jedenfalls im Unterricht eine Stelle finden muß. Sein Gebrauch kann aber wesentlich auf die

1) Für die Einführung des absoluten Maßsystems haben sich ausgesprochen: OBERBECK, Z. V. 247 und HÖFLER, Z. XI 70; dagegen LEHMANN, Z. X 77. GRIMSEHL empfiehlt auf der Oberstufe möglichst bald das Dyn einzuführen.

2) So F. EMDE, E. T. Z., Vortrag vom 26. April 1904, und MIE in seinem ausgezeichneten großen Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus (1910), wo es heißt: „Man kann das absolute Maßsystem vollständig entbehren und trotzdem an Klarheit gewinnen.“ So auch neuerdings wieder O. LEHMANN in der Vorrede zur 7. Auflage von FRICKS physikalischer Technik.

Fälle beschränkt werden, in denen Kraft und Masse nebeneinander vorkommen. Sorgt man im übrigen durch eine reinliche Bezeichnungsweise (kgg oder kg* für Kilogrammgewicht) dafür, daß keine Verwechslung eintreten kann, so sind auch die Verwirrungen nicht zu fürchten, die früher in den Lehrbüchern herrschten, wo Gewichte bald als Kräfte, bald als Massen auftraten. Der Gebrauch beider Systeme nebeneinander hat auch eine nicht geringe bildende Kraft, indem er das Unterscheidungsvermögen für Begriffe schärft und dem bloß gedankenlosen Anwenden der Formeln entgegenwirkt. Eine rein äußerliche Unterscheidung wird sich schon dadurch erzielen lassen, daß man Massen stets mit der Benennung Gramm (g), Gewichte stets mit der Benennung Kilogrammgewicht (Kgg) schreibt. —

Eine andere prinzipielle Frage betrifft die Stellung des Energieprinzips im Unterricht. Da es dem Sinn der hier vertretenen Didaktik entspricht, nicht ein fertiges System zu bieten, sondern Begriffe und Zusammenhänge erst im Unterricht nach und nach induktiv zu erarbeiten und zu verallgemeinern, so müssen wir es als ganz unzulässig bezeichnen, daß man die Physik mit dem Energiebegriff beginnt, um darauf dann das ganze Lehrgebäude aufzubauen. Wir unterschreiben durchaus das strenge Urteil MÜLLERS (T. 76): „das ist weder historisch noch logisch gerechtfertigt, vor allem aber so unpädagogisch wie möglich.“ Dies gilt namentlich auch gegenüber der Forderung von W. OSTWALD¹⁾, daß der Arbeitsbegriff dem Unterricht in der Mechanik zugrunde gelegt werden müsse. Eine ausführliche Erörterung und Zurückweisung dieser Forderung hat der Verfasser (Z. U. XV 236) veröffentlicht.

Im Anschluß hieran sei auch noch die Frage des induktiven oder deduktiven Verfahrens berührt. Man hat zeitweilig den Unterschied der beiden Stufen des Unterrichts darin finden wollen, daß erstere induktiv, letztere vorwiegend deduktiv zu verfahren habe. Diese Festsetzung beruht auf einer Geringschätzung des induktiven und gleichzeitig einer Überschätzung des deduktiven (mathematischen) Verfahrens. Bei dem Sinn, den wir mit dem Worte induktiv verbinden, ist es selbstverständlich, daß das induktive Verfahren auch auf der Oberstufe einen breiten Raum einnimmt. Der Erkenntnisweg geht auch hier von den Einzelpro-

1) Ztschr. f. d. mathem. u. naturw. Unterr. Jahrg. 33 (1902), 1, vgl. auch ebd. 34 S. 24.

blemen zu den allgemeinen Erkenntnissen. Erst sekundär spielt das deduktive Verfahren überall da eine Rolle, wo eine kompliziertere Erscheinung auf eine einfachere oder mehrere einfachere zurückgeführt werden soll; aber auch hier ist die analytische Aufsuchung eben dieser einfachen Fälle, aus denen sich die Erscheinung hernach deduzieren läßt, das Wesentliche an der Untersuchung. (Man denke z. B. an das physische Pendel.) –

Angesichts der weit verbreiteten Neigung, dieses Kapitel mehr oder weniger abstrakt im Stil der „Kreide- und Schwammphysik“ zu behandeln, ist die Erinnerung gewiß am Platze, daß auch in der Mechanik möglichst keine Stunde ohne ein Experiment, und sei es der einfachsten Art, verlaufen möge.

§ 20. 1. Stück: Wurf und freier Fall.

1. HÖFLER beginnt in seinem wohldurchdachten Lehrgang der Mechanik mit der Bewegung auf der schiefen Ebene und mit dem freien Fall, um so eine breite Erfahrungsunterlage für die dann erst folgende Definition von Geschwindigkeit und Beschleunigung zu gewinnen. Dies entspricht völlig einer auf die Aufstellung eines Systems der Mechanik gerichteten Betrachtungsweise, die von Anfang an die Beziehung zur Erfahrung festhalten will, es liegt aber doch etwas Künstliches darin, daß dem Schüler eine Betrachtung aufgedrängt wird, deren voller Sinn und Zweck ihm noch verschlossen bleibt.

Für eine Problemphysik, wie ich sie im Auge habe, scheint mir daher eine andere Einführung noch angemessener. Man stelle das Problem des Wurfes, und zwar in seiner einfachsten Form als horizontaler Wurf, an den Anfang: *Was für eine Kurve beschreibt ein in horizontaler Richtung geworfener Körper?* Dies entspricht durchaus jener großen historischen Fragestellung, die den Eingang zur ganzen neueren Physik bildet. Wie wir durch WOHLWILLS Forschungen¹⁾ wissen, ist für GALILEI eben dies Problem der Anstoß gewesen, sich mit den Fallgesetzen zu beschäftigen. Die Vermutung, daß die Bahn des geworfenen Körpers eine Parabel sei, gab die entscheidende Anregung.²⁾ Als Ziel der

1) WOHLWILL, GALILEI und sein Kampf für die KOPERNIKANISCHE Lehre, Hamburg 1909, S. 145.

2) Man vgl. auch den Anfang des 3. Tages der GALILEISCHEN Discorsi (OSTWALDS Klass. Nr. 24, S. 3): „Über einen sehr alten Gegenstand bringen wir eine ganz neue Wissenschaft. Nichts ist wohl älter in der Natur als die Bewegung, und es sind darüber von den Philosophen Bände . . . geschrieben

Untersuchung möge daher von Anfang an der Nachweis der Parabelgestalt der Wurfkurve bezeichnet werden. Einfache Freihandversuche oder ein wagerecht ausfließender Wasserstrahl dienen zur ersten Veranschaulichung des Problems. Eine vorläufige Analyse (mit Hilfe der auf der Unterstufe erworbenen Kenntnisse von Beharrung und Bewegungszerlegung) läßt erkennen, daß in der Wurfbewegung die gleiche Annäherung an die Erde enthalten ist, wie beim freien Fall. Dies erkennt man schon aus dem einfachen Freihandversuch, bei dem man von zwei schweren Körpern den einen lotrecht fallen läßt, den andern in wagerechter Richtung fortschleudert (MÜLLER, T. 63); auch die Apparate von LÖWY (beschrieben in WEINHOLDS Dem.⁴ 77) oder von HARTL (Z. U. XVII 226) können zu dem gleichen Zweck dienen.

Um die Gestalt der Kurve zu ermitteln, müßte man daher feststellen, nach welchem Gesetz ein freifallender Körper sich der Erde nähert. Diese Feststellung erscheint wegen der großen und rasch zunehmenden Geschwindigkeit nicht leicht ausführbar. GALILEI hat den sinnreichen Gedanken gehabt, das Gesetz zunächst für die Abwärtsbewegung auf einer geneigten Bahn aufzusuchen. Man wird nicht versäumen dürfen, einige Angaben über GALILEIS Versuche zu machen und auf die historische Bedeutung dieser Versuche hinzuweisen.¹⁾ Daran mögen sich dann die anfangs erwähnten Versuche auf der schiefen Bahn anschließen, die zur Auffindung des Wegzeitgesetzes $s = at^2$ führen.²⁾

worden. Dennoch habe ich Eigentümlichkeiten der Bewegung in großer Zahl, und sehr wissenswerte, bisher aber nicht beobachtete und noch nicht bewiesene, entdeckt. Einige leichtere Sätze werden wohl erwähnt, wie z. B. daß die natürliche Bewegung fallender schwerer Körper eine beständig beschleunigte sei. Nach welchem Gesetz aber diese Beschleunigung stattfindet, ist bisher nicht ausgesprochen worden; denn soviel ich weiß, hat niemand bewiesen, daß die in gleichen Zeiten zurückgelegten Strecken sich zueinander verhalten wie die ungeraden Zahlen. Man hat beobachtet, daß Wurfgeschosse eine gewisse Kurve beschreiben, daß letztere aber eine Parabel sei, hat niemand gelehrt . . .

1) GALILEI, Untersuchungen, Ostw. Kl. Nr. 24, S. 25.

2) Über den Vorzug der GALILEISCHEN Fallrinne vor der Fallmaschine haben sich namentlich W. KÖNIG (Z. U. VII 4), P. VOLKMANN (Z. U. VII 161) und A. HÖFLER (Z. U. VII 281) ausgesprochen. Unter den verschiedenen Formen der Fallrinne empfiehlt sich besonders die von W. KÖNIG (a. a. O.) angegebene, sowie FR. MÜLLERS schiefe Ebene aus Spiegelglas (T. 59). Eine sehr wirksame Form hat R. KOTTENBACH diesen Versuchen gegeben (Pr. Abh. St. Ob.-Realsch. Troppau 1902). Er zieht durch das ganze Zimmer einen mäßig dicken Stahldraht (0,8 mm), der bei hinreichender Spannung widerstandsfähig genug ist, um eine kleine Rolle zu tragen, an die mittels Gabel ein Ge-

2. Der Übergang von den Versuchen auf der Fallrinne zu dem freien Fall ist mit eigentümlichen Schwierigkeiten behaftet, deren GALILEI selbst auf einem sehr kunstvollem Wege und doch nur unvollkommen Herr geworden ist. Es knüpft sich hier einmal das Problem der Kraftzerlegung (S. 233), dann aber auch das Problem der Energieverteilung zwischen der translatorischen und der drehenden Bewegung an. Für die jetzige Betrachtung genügt der Hinweis, daß man durch allmähliche Vergrößerung des Neigungswinkels der Bahn die Bewegung in den freien Fall überführen kann, nachdem man durch besondere Versuche gezeigt hat, daß das quadratische Wegzeitgesetz $s = at^2$ seiner Form nach von der Größe des Neigungswinkels unabhängig ist, und daß sich dabei nur die Konstante a ändert. Es empfiehlt sich aber auch, das Wegzeitgesetz für den freien Fall durch eine der genaueren, für die Oberstufe bestimmten Methoden zu demonstrieren.¹⁾ Hierbei ist auch der Nachweis von Wert, daß das Wegzeitgesetz nicht nur für ganze Sekunden gilt, sondern auch dann, wenn ein beliebiger Bruchteil der Sekunde als Einheit gewählt wird, oder wenn t nicht durch eine ganze Zahl dargestellt ist. Für die Fallstrecke in der 1. Sekunde (a) mag einstweilen der angenäherte Wert von 5 m mitgeteilt werden, indem Genaueres über die bisher noch nicht eingeführte Größe g für später vorbehalten wird; wenn man nicht vorzieht, schon hier eine der eben erwähnten Methoden auch zur Bestimmung der Konstante a selbst zu benutzen.

Mit dem experimentellen Nachweis des Fallgesetzes ist auch das Problem der Wurfkurve seiner Lösung nahegebracht. Es kommen hierfür unter Berufung auf die Unterstufe das Behar-

wicht gehängt ist. Parallel zum Draht ist ein Faden gespannt, der die Zeitmarken trägt. Bei passender Neigung des Drahtes kann man auf 8 m Länge Fallzeiten bis zu 13 Sek. erhalten. Doch sind die Resultate wegen des Durchgangs schwerlich sehr genau. Ähnlich CREW (*Elements of Physics* 1899), der ein aus zwei hintereinanderlaufenden Rollen zusammengesetztes Wägelchen benutzt.

1) Neben den rohen Versuchen der Unterstufe kommen hier namentlich die Methoden in Betracht, die das Wachstum des Weges mit dem Quadrat der Zeit graphisch vor Augen stellen. So LIPPICH (RABS) in PFAUNDLERS Lehrbuch (10) I, 117; REICHEL, Z. U. V 229 u. VI 197; NEUMANN'S Fallschiene, Z. U. XI 179 und der Fallapparat von MÜLLER (T. 61), bei dem eine Holzleiste an einer elektromagnetisch schwingenden Schreibstimmgabel vorbeifällt; ferner ELSÄSSER, Z. U. XIII 193; K. T. FISCHER (Neuere Versuche usw.). Die direkte Messung der Zeit mit dem Chronoskop geht über die Grenzen des Schulversuchs hinaus, so interessant sie auch für die Schüler sein dürfte.

rungsgesetz und die Zusammensetzung der Bewegungen in Betracht, und zwar braucht die Geltung des ersteren hier entsprechend dem historischen Gang nur für die horizontale Richtung vorausgesetzt zu werden. Der Begriff der Geschwindigkeit bei gleichförmiger Bewegung ist ebenfalls als von der Unterstufe her bekannt anzusehen. Die mathematische Darstellung der Wurfbewegungen ist dann einfach; aus den beiden Gleichungen $x = ct$ und $y = at^2$ folgt $x^2 = c^2/a \cdot y$.¹⁾

Die Behandlung des schiefen Wurfes wird ebenso wie die des senkrechten aus leicht ersichtlichen Gründen an eine spätere Stelle verschoben.

Ein Schüler könnte einwenden, daß man ja die Gestalt der Wurfbewegung auf die eben angegebene Art direkt hätte ermitteln können, ohne erst den Umweg über die Untersuchung des senkrechten Falles der Körper zu machen. Er wird aber auch begreifen, daß man durch diese Untersuchung eine tiefere Einsicht in die Entstehung der Kurve und demnach in den Grund der Parabelgestalt gewonnen hat.

Ist solcherart das Denken erst auf den wissenschaftlichen Weg gelenkt, so wird auch Verständnis dafür vorhanden sein, daß sich GALILEI bei dem empirisch gefundenen Fallgesetz nicht beruhigt hat, sondern sich die weitere Frage vorlegte: *Nach welchem Gesetz nimmt die Geschwindigkeit eines freifallenden Körpers zu?* Oder in bestimmterer Fassung: *Welches Gesetz muß man für die Zunahme der Geschwindigkeit annehmen, damit das experimentell gefundene Wegzeitgesetz $s = at^2$ sich ergibt?* Wie GALILEI entdeckt hat, erfüllt das Gesetz $v = bt$ (wo $b = 2a$) diese Forderung (vgl. Nr. 4).

Welcher Sinn aber ist mit dem Begriff der Geschwindigkeit bei einer immer schneller vor sich gehenden Bewegung zu verbinden? Die Antwort hierauf bedarf einer eingehenden Erörterung dieses fundamentalen Begriffs.

1) Zum Nachweis der Parabelgestalt dient HÖFLERS Apparat (Z. U. IX 62), der einen Wasserstrahl benutzt (eine ähnliche Vorrichtung bei MÜLLER, T. 64), oder der Apparat von FRICK (FRICK-LEHMANN I 2, 1228), bei dem eine Kugel aus einer gebogenen Rinne in wagerechter Richtung herausrollt und sich vor einer vertikalen Wand mit aufgezeichneter Wurfbewegung vorbeibewegt. Sehr schön läßt sich die quadratische Zunahme der lotrechten Abstände mit GRIMSEHLS Federpistole (Z. U. XVI 135) demonstrieren, indem man in wachsender Entfernung vom Geschütz einen vertikalen Maßstab aufstellt und den jedesmaligen Treffpunkt des Geschosses markiert. Die Übertragung in eine Zeichnung ist leicht ausführbar (GRIMSEHL, L. 42).

3. Eine Definition der Geschwindigkeit zu geben, ist nicht erforderlich, denn „in der Physik bedeutet Geschwindigkeit genau dasselbe wie im gewöhnlichen Leben“. Falsch ist es auch zu sagen: der Quotient s/t ist die Geschwindigkeit. Vielmehr bezeichnet das Wort Geschwindigkeit einen Zustand des bewegten Körpers, der durch das Verhältnis s/t nur seine genaue quantitative Bestimmung erfährt.¹⁾

Diese Messung gilt zunächst nur für das Gedankengebilde einer gleichförmigen Geschwindigkeit. Bei der Anwendung auf Fälle aus der Wirklichkeit liefert dieser Quotient nur die Größe der mittleren Geschwindigkeit. Besondere Beachtung im Unterricht erfordert auch der Fall, daß t eine gebrochene Zahl, z. B. $\frac{1}{10}$ Sek., bedeutet. Von hier aus ist erst der Übergang zu der Betrachtung der augenblicklichen Geschwindigkeit ausführbar.

Es ist gar keine Frage, daß die exakte Bestimmung des Begriffs der augenblicklichen Geschwindigkeit bei einer veränderlichen Bewegung nur mit Hilfe des Differentialquotienten ds/dt möglich ist.²⁾ Völlig streng im modernen Sinn ist nur eine Fassung, die dem punktuellen Charakter des Grenzbegriffes Rechnung trägt. Dementsprechend gibt HÖFLER als „erste Dosis“ infinitesimaler Behandlungsweise für die augenblickliche Geschwindigkeit die Formulierung

$$v = \frac{s' - s}{t' - t} \text{ für } t = t',$$

was vollständiger lauten sollte

$$v = \lim \frac{s' - s}{t' - t} \text{ für } t = t'.$$

Zum Verständnis dieser Fassung ist aber nötig, daß in der Mathematik der hier zu vollziehende Grenzübergang eingehend behandelt worden ist, so daß die genaue Beziehung des Geschwindigkeitsbegriffs auf einen Zeitpunkt ebenso einleuchtend ist, wie die punktuelle Bedeutung des Begriffs der Tangentenrichtung in der Geometrie.³⁾ Es ist daher davon abzuraten, daß man diese strenge Fassung in der Physik ad. hoc einzuführen sucht, wenn die mathematische Vorbildung der

1) So lehrt schon COURNOT (nach TIMERDING, a. a. O. S. 44), daß die Geschwindigkeit eine Art Intensität der Bewegung sei. Man vgl. auch POSKE Z. U. III, 161.

2) Vgl. A. HÖFLER, Bd. I dieser Handbücher S. 367 ff.; TIMERDING a. a. O. S. 40 ff.

3) Ich habe mich in meinem Lehrbuch (O. § 3 und 5) an HÖFLER angeschlossen, möchte aber die dort angegebenen Ausdrücke nur für Lehranstalten empfehlen, wo Infinitesimalrechnung getrieben wird. Auch die von GRIMSEHL (Lehrb. § 20) angegebene Ableitung, die mit einem zunächst unbestimmt gelassenen Mittelwert der Geschwindigkeit operiert, ist zwar in mathematischer Hinsicht interessant, aber für den Physikunterricht bei weiten nicht einfach genug.

Schüler noch nicht so weit vorgeschritten ist. Die Anwendung der obigen Grenzdefinition erscheint zwar einfach, besonders wenn s eine ganze rationale Funktion von t ist, aber sie ist doch nicht mehr als ein Rechenkunststück, da für $t' = t$ der ganze Ausdruck physikalisch genommen keinen Sinn mehr hat und auf die leider auch im mathematischen Unterricht noch nicht ausgemerzte Verwendung des mysteriösen Quotienten $0/0$ hinausläuft.

Man wird vielmehr gut tun, sich dann an die Fassung des Begriffs nach LAGRANGE zu halten¹⁾, wonach unter der augenblicklichen Geschwindigkeit die einer gleichförmigen Bewegung verstanden wird, „die in der unmittelbaren Umgebung eines bestimmten Zeitpunktes der gegebenen Bewegung näher kommt, als jede andere gleichförmige Bewegung“. Wenn wir so weiterführen, würden wir in einer Stunde da und da sein — diesem Gedanken des täglichen Lebens entspricht die LAGRANGESCHE Fassung, wie nicht minder auch dem experimentellen Verfahren, vermöge dessen wir die Geschwindigkeit eines ungleichförmig bewegten Körpers in einem bestimmten Zeitpunkt ermitteln (S. 215).

Man wird also bei der Schreibweise $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ stehen bleiben dürfen und auch in der Wortumschreibung den approximativen Charakter dieses Ausdrucks zu betonen haben. Geschwindigkeit ist hiernach der Grenzwert, dem sich das Verhältnis $\Delta s / \Delta t$ nähert, wenn beide Größen verschwindend klein genommen werden. Diese Fassung genügt sowohl für das Verständnis der experimentellen Bestimmung der Momentangeschwindigkeit als auch für die graphische Ableitung des Weges $s = g/2 t^2$ bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung. Logisch unzulänglich dagegen wäre es, wenn man die Größe der Geschwindigkeit in einem Zeitpunkt durch den Weg definieren wollte, den der Körper in der nächsten Sekunde zurücklegen würde, wenn er sich von dem betreffenden Zeitpunkt an gleichförmig weiter bewegte, da nicht gesagt ist, mit welcher Geschwindigkeit diese Bewegung erfolgen soll. Noch unzulässiger ist es, das dynamische Moment der Trägheit in diese rein kinematischen Betrachtungen hineinzuziehen.

4. Die Ableitung des Wegzeitgesetzes $s = at^2$ aus dem Gesetz für die Geschwindigkeit $v = bt$ ist von GALILEI auf graphischem Wege ausgeführt worden (O. § 4, 2). Dieser Weg ist auch, wo nur elementarmathematische Kenntnisse zur Verfügung stehen, dem arithmetischen, durch Grenzeinschließung vorgehenden, in älteren Physikbüchern üblich gewesenen vorzuziehen. Der Wert der infinitesimalen Betrachtung aber zeigt sich hier ganz augenscheinlich, indem unmittelbar durch Integration aus der Gleichung

1) TIMERDING, a. a. O. S. 41.

$v = bt$ die andere $s = \frac{b}{2}t^2$ folgt. Gleichwohl wird man gut tun, auch in diesem Falle die klassische Darstellung GALILEIS, da sie nichts anderes als eine graphische Integration ist, nicht zu übergehen, um so mehr, als die graphischen Methoden heute schon fast allgemein auf unsern höheren Schulen Aufnahme gefunden haben. Bei Erörterung des so aufgefundenen funktionalen Zusammenhangs wird auch zu beachten sein, daß die Beobachtung stets nur einzelne Werte liefert, die der Funktionalbeziehung genügen, während die Gleichung $v = bt$ von vornherein als für jeden Wert von t gültig vorausgesetzt wird. (Die tiefere Begründung für diese Annahme ergibt sich erst später aus dem Wirken der konstanten Kraft der Schwere.) Die Demonstration GALILEIS gilt ersichtlich für jede Bewegung, die einem Wegzeitgesetz von der Form $s = at^2$ folgt, also für die Bewegung auf schiefer Bahn ebenso wie für den freien Fall. Man lasse aber auch von Anbeginn keinen Zweifel darüber, daß es sich hier nicht um induktive Ableitungen, sondern um eine Gedankenschöpfung handelt, die den Zweck hat, ein Begriffssystem zur genaueren Erfassung der Wirklichkeit zu liefern, oder nach HÖFLERS Ausdruck, die Wirklichkeit mit einem Begriffssystem zu unterfahren. Nur so wird man auch dem Inhalt der GALILEISCHEN Entdeckungen in dem berühmten 3. Buch der Discorsi gerecht werden.

Die experimentelle Prüfung des Gesetzes $v = bt$ für die Endpunkte aufeinanderfolgender Sekunden läßt sich unmittelbar an der Fallrinne durch Übergang des bewegten Körpers auf eine wagerechte Bahn ausführen. Das schönste Mittel, die Momentangeschwindigkeit an einem beliebigen Punkte einer derartigen Bewegung zu demonstrieren, liefert jedoch die ATWOODSche (SCHOBERSche)¹⁾ Fallmaschine, deren Benutzung speziell für diesen Zweck hier auch durchaus angebracht ist, während die Herleitung der Gesetze des freien Falles an ihr methodischen Bedenken begegnet. Natürlich ist auch hier zunächst das Wegzeitgesetz $s = at^2$ zu demonstrieren. Die Ermittlung der Momentangeschwindigkeiten durch Abheben des Übergewichts macht stets großen Eindruck auf die Schüler, da hier das Flüchtigste, das Momentane, durch die Kunst des Experiments der Messung zugänglich gemacht ist.²⁾

1) SCHOBER; Entwurf einer Theorie der Überwucht, 1751, vgl. K. SCHREBER, Z. U. XIII 201.

2) In methodischer Hinsicht wertvoll ist der Gebrauch der Fallmaschine bereits an dieser Stelle insofern, als hier zum erstenmal das Problem von

Bedient man sich zum Nachweis der Fallgesetze der durch eine Stimmgabel erzeugten Wellenlinie, so zeigt sich auch an dieser ohne weiteres, daß z. B. die Länge der hundertsten Welle genau doppelt so groß ist wie die der fünfzigsten (FR. MÜLLER, T. 61).

5. Jetzt erst ist es an der Zeit, den Begriff der Beschleunigung einzuführen, für den entsprechende Überlegungen gelten, wie die oben für die Geschwindigkeit angestellten. Wie die Geschwindigkeit ein Maß für das Wachstum des Weges, so ist die Beschleunigung ein Maß für das Wachstum der Geschwindigkeit. Der allgemeine mathematische Ausdruck wird daher in der strengen Form durch $\lim \frac{v' - v}{t' - t}$ für $t' = t$ dargestellt, in der Näherungsform dagegen durch $\Delta v / \Delta t$. In dem Fall $v = bt$ ergibt sich hieraus für beliebige Intervalle

$$\frac{v' - v}{t' - t} = \frac{bt' - bt}{t' - t} = b,$$

d. h. die Größe b selber, die Endgeschwindigkeit der ersten Sekunde, stellt die Beschleunigung dar. Dasselbe zeigt auch die graphische Darstellung. Daß die Dimension der Beschleunigung = cm/sec^2 , dagegen die der Endgeschwindigkeit cm/sec ist, mag an dieser Stelle hervorgehoben werden.

Ist die Beschleunigung konstant, so heißt die Bewegung eine gleichförmig beschleunigte. Von dieser Art ist der freie Fall.

Nun erst werde auch für die Beschleunigung beim freien Fall die Bezeichnung g eingeführt, so daß die beiden GALILEISCHEN Gesetze die Form annehmen

$$\text{I. } v = gt$$

$$\text{II. } s = \frac{1}{2}gt^2.$$

Es ist nicht überflüssig, zu bemerken, daß diese Gesetze auch für jede andere gleichförmig beschleunigte Bewegung gelten, wenn man nur statt des bestimmten Wertes g wieder die allgemeine Bezeichnung b einführt.

Im Anschluß hieran wird es angebracht sein, eine direkte Bestimmung von g mittels des freien Falles vorzunehmen.¹⁾

Kraft, Masse und Beschleunigung in den Gesichtskreis der Schüler rückt. Es ist gut, auf dies Problem schon hier hinzuweisen, um daran später (Stück 2) anknüpfen zu können. Auch dient die Fallmaschine dann für die weiteren Untersuchungen.

1) Hierzu ist namentlich der Fallversuch mit geeichter Stimmgabel ($n = 435$) geeignet. Erwähnt sei noch der Apparat von KOTTENBACH (Z. U. XVIII 79; ROSENBERGER II 9), sowie der an diesen anknüpfende Apparat von

6. Eine wichtige, von GALILEI selbst aufgeworfene Frage ist, ob die Fallbeschleunigung für alle Körper gleich groß ist. Der Augenschein spricht bekanntlich dagegen, aber schon GALILEI hat der irrigen Ansicht des ARISTOTELES gegenüber, daß die schwereren Körper im Verhältnis ihres Gewichts schneller fielen, die entscheidende Überlegung angestellt, daß die Fallgeschwindigkeit zweier Körper von je 1 Pfund Gewicht sich nicht ändern könne, wenn sie beide zu einem Körper von 2 Pfund Gewicht verbunden würden.¹⁾ Und er hat auch den Einfluß des Luftwiderstandes richtig eingeschätzt (Freihandversuch mit Münze und darauf gelegtem Papierscheibchen). Daß GALILEI bereits vorhergesagt hat, im luftleeren Raum („außerhalb der Atmosphäre“) würden alle Körper gleich schnell fallen, gehört zu den bemerkenswertesten Antizipationen in der Geschichte der Wissenschaft. Auch auf den genaueren Nachweis durch Pendelversuche (NEWTON, BESSEL) sollte hier schon hingedeutet werden.

Auf den Einfluß des Luftwiderstandes einzugehen, wird besonders von MÜLLER (T. 62) sehr warm empfohlen. Da erst bei größeren Höhen dieser Einfluß stärker zur Geltung kommt, Fallversuche aus solchen Höhen aber nicht gut ausführbar sind, so verdient vielleicht folgendes Verfahren, das ich befreundeter Seite verdanke, Beachtung. Bei den Fallversuchen von REICH im Dreibrüderschacht zu Freiberg 1831 betrug die Fallhöhe 158,5 m, die beobachtete Fallzeit für eine Zinnkugel vom Durchm. 35,5 mm 6,01 Sek., für eine Elfenbeinkugel von 36,6 mm Durchm. 6,79 Sek., die theoretische Fallzeit dagegen 5,684 Sek. Ein anderes Beispiel liefert die Wurfbewegung (s. unten). Bei dieser Gelegenheit ist von neuem der Hinweis am Platze, daß die Fallgesetze nicht bloß einen idealen (gedachten) Fall darstellen, sondern einen der Wirklichkeit angehörenden Fundamentalvorgang, der allerdings durch das Hinzutreten anderer Umstände modifiziert wird.

7. Von den GALILEISCHEN Fallgesetzen aus erhalten nun auch die Bewegungen auf der schiefen Ebene erst ihre volle Aufklärung, was für spätere Betrachtungen wichtig ist. Während die

BAHRDT (Z. U. XXIV 205). Man sehe auch die Versuche von ZERBST und GEHNE (Z. U. XXVI 51, 279) und für die Messung der Geschwindigkeiten beim freien Fall ELSÄSSER, Z. U. XXV 214. Vgl. auch S. 211, Anm. 3.

1) Dieselbe Überlegung findet sich schon bei BENEDETTI, dem Vorläufer GALILEIS, die Berufung auf das entsprechende Experiment schon bei PHILOPONUS im 6. Jahrh. (Z. U. XIX 184).

Zerlegung der Bewegungen schon auf der Unterstufe behandelt ist, ergibt sich hier zum ersten Male die Nötigung, auch Beschleunigungen zu zerlegen. Die Rechtfertigung hierfür ergibt sich aus der Möglichkeit, Beschleunigungen zusammzusetzen (O. § 9). Zerlegt man die dem frei fallenden Körper zukommende Beschleunigung g in die Komponenten $g \sin \alpha$ und $g \cos \alpha$ längs und normal zur schiefen Ebene, so kommt für die Bewegung nur die erstere in Betracht. Ist nun die Länge der schiefen Ebene l , ihre Höhe h , so ergibt sich zu der Fallstrecke l die Endgeschwindigkeit $v = \sqrt{2 g \sin \alpha \cdot l}$, da aber $\sin \alpha = \frac{h}{l}$, so folgt $v = \sqrt{2 g h}$, d. h. die Endgeschwindigkeit ist ebenso groß wie die Geschwindigkeit beim freien Fall durch die Höhe h . Dies ist ebenfalls eine Entdeckung, die schon GALILEI, wenschon auf umständlicherem Wege gemacht hat¹⁾, hierbei ist indessen wiederum abgesehen von der Reibung und von der beim rollenden Körper für die Drehung verbrauchten Energie. Diese Umstände verhindern auch, daß man aus den Versuchen an der schiefen Ebene ohne weiteres einen Schluß auf die Größe von g ziehen kann.

Läßt man den Körper mit der erlangten Endgeschwindigkeit auf einer zweiten schiefen Ebene von gleicher Neigung α in die Höhe laufen, so zeigt sich, wie GALILEI zuerst bemerkt hat, daß die Geschwindigkeit in demselben Maße abnimmt, wie sie vorher zugenommen hat, derart daß gleichen Höhen auf beiden schiefen Ebenen gleiche Geschwindigkeiten entsprechen; der Körper wird daher bis zur selben Höhe emporsteigen, wie die, von der er herabgefallen ist. Dies gilt auch noch, wie leicht zu zeigen, für eine schiefe Ebene von beliebiger anderer Neigung α' , sowie für eine Folge von verschieden geneigten schiefen Ebenenstücken und schließlich für die Bewegung eines Fadenpendels, wie ebenfalls GALILEI zuerst erkannte. Schon hier kann GALILEIS Hemmungspendel (O. § 20) vorgeführt werden. Bei diesem kommt sowohl die Reibung (nahezu), als auch der Energieverlust durch die Rotation in Wegfall.²⁾

1) Die Betrachtung des Falls durch die Sehne eines Kreises, eine so wichtige Rolle sie bei GALILEI gespielt hat, scheint mir für den Unterricht nicht erforderlich zu sein.

2) Es mag auch nicht unangebracht sein darauf hinzuweisen, daß die schiefe Ebene eine Art Verzweigungsstelle für verschiedene Probleme bildet. Es knüpft sich daran, wie oben angedeutet, unmittelbar das Pendelproblem (S. 259), ferner aber auch das Reibungsproblem (S. 235), und überdies noch das Problem der Arbeitserhaltung an den einfachen Maschinen, das zur allgemeinen Erörterung des Arbeitsbegriffes (S. 117) führt.

8. Nunmehr können die Gesetze des lotrechten Wurfs abwärts und aufwärts zur Behandlung kommen, da bei ihnen auch das GALILEISCHE Gesetz $v = gt$ anzuwenden ist.

Die Ableitung der Gesetze für den lotrechten Wurf ist nicht eine bloße mathematische Aufgabe, sondern es treten dabei wichtige physikalische Erkenntnisse auf. Zuvörderst ist der senkrechte Wurf abwärts nach Analogie des freien Falls zu behandeln, indem man die Anfangsgeschwindigkeit c durch Fall aus entsprechend größerer Höhe erreicht denkt. Dann verläuft die Wurfbe-
wegung wie der freie Fall, indem die Geschwindigkeit pro Sekunde um g wächst, so daß nach t Sek. $v = c + gt$ wird. Dies ist ein erstes Beispiel für die Superposition der Geschwindigkeiten, die für den senkrechten Wurf aufwärts zu der Gleichung $v = c - gt$ führt. Die Richtigkeit dieser Gleichung wird durch die daraus sich ergebenden Folgerungen bestätigt.

Ferner ist in beiden Fällen nunmehr die Anfangsgeschwindigkeit c als beharrend erkannt, sofern sie nicht durch das Hinzutreten der Fallbeschleunigung abgeändert wird. Es ist also das Beharrungsgesetz auch für die vertikale Richtung als gültig anzusehen. Man unterlasse nicht, auf diese erste Erweiterung des GALILEISCHEN Beharrungsgesetzes hinzuweisen. In diesem neuen Lichte erscheint nun auch der freie Fall selbst als eine beständige Superposition, insofern die Geschwindigkeit aus einem jeweilig beharrenden und einem in jedem Zeitteilchen neu hinzukommenden Bestandteil zusammengesetzt gedacht werden kann.

9. Die Gesetze des wagerechten und des schiefen Wurfs ergeben sich nun als reife Frucht der gesamten vorausgegangenen Untersuchung: beim wagerechten Wurf, der für GALILEI das Ausgangsproblem bildete, kommt außer den Fallgesetzen nur die schon von GALILEI erkannte Beharrung in horizontaler Richtung in Betracht. Beim schiefen Wurf hat GALILEI nur tastend und hypothetisch die Gültigkeit des Beharrungsgesetzes auch in schräger Richtung angenommen. Für die Herleitung der Wurfgleichungen kommt dazu noch der Satz vom Parallelogramm der Bewegungen, für die Ermittlung der Geschwindigkeit in einem beliebigen Punkt der Bahn ist bereits das Parallelogramm der Geschwindigkeiten erforderlich. Die Diskussion der Wurfgleichungen führt bekanntlich zu interessanten Ergebnissen, die hier nicht angeführt zu werden brauchen. Doch gehört nur das Wichtigste, wie die Berechnung von Wurfweite und Wurfhöhe und der Ein-

fluß des Neigungswinkels in die Physikstunde, alles Weitere in die Mathematik. Zur Demonstration der Wurfgesetze ist nächst dem Wasserstrahl namentlich GRIMSEHLS Federpistole (Z. U. XVI 135) geeignet.

Die Gültigkeit des Beharrungsgesetzes für die schräge Richtung wird durch die Übereinstimmung der Ergebnisse der Rechnung mit der Erfahrung wenigstens bei kleinen Geschwindigkeiten bestätigt, bei großen Geschwindigkeiten finden wegen des Luftwiderstandes beträchtliche Abweichungen statt. MÜLLER (T. 65) hat hierfür interessante Daten nach KRUPPSchen Schießversuchen mitgeteilt; die Zeichnung einer ballistischen Kurve bei MÜLLER empfiehlt ROSENBERG in großem Maßstabe als Wandtafel auszuführen.

Zum Schluß der ganzen Betrachtung sei wiederum ein Wort GALILEIS (a. a. O. S. 107) angeführt: „Erstaunlich und entzückend ist die Macht zwingender Beweise, wie es allein die mathematischen sind. Ich kannte schon nach Aussage der Bombenwerfer die Tatsache, daß von allen Kanonen- oder Mörserschüssen die unter einem halben Rechten abgeschossene Kugel am weitesten fliege. ... Aber das Verständnis des inneren Zusammenhanges wiegt unendlich viel mehr als die einfache Versicherung anderer, und selbst mehr als der häufig wiederholte Versuch.“

§ 21. 2. Stück: Kraft und Masse.

1. Grundbestimmungen. Wir haben uns bisher von der Ursache des freien Falls der Körper keine Rechenschaft gegeben. Bedenken wir aber, daß ein schwerer Körper, der an einem Faden hängt, auf diesen einen Zug ausübt, und daß er beim Durchschneiden des Fadens zu Boden fällt, so ist die Annahme berechtigt, daß beidemal die gleiche Ursache wirksam ist.¹⁾ Diese Ursache wird als Anziehungskraft der Erde oder als Schwere bezeichnet. Das Gedankenbild, das wir uns von dem Vorgang des freien Falles entwerfen können, ist nun dieses, daß die beständige Wirkung der Schwere eine beständige Zunahme der Geschwindigkeit hervorruft; der konstanten Größe der Schwere (auf die wir aus der Konstanz des am Faden oder an einer Spiralfeder ausgeübten Zuges schließen) entspricht der konstante

1) Es sei hier an eine der *regulae philosophandi* von NEWTON erinnert: man solle nicht mehr Ursachen annehmen, als zur Erklärung der Erscheinungen notwendig seien (*causas non esse praeter necessitatem multiplicandas*).

Betrag der Geschwindigkeitszunahme pro Sekunde, d. h. der Beschleunigung. Die Bedeutung der hiermit gewonnenen Einsicht liegt darin, daß damit das 1. GALILEISCHE Fallgesetz kausal begründet oder erklärt ist.

Die Mechanik erweitert das erhaltene Ergebnis sofort zu dem Satze: Wenn auf einen Körper eine konstante Kraft wirkt, so erfährt er eine konstante Beschleunigung; und noch allgemeiner: Jede auf einen frei beweglichen Körper wirkende Kraft ruft an diesem eine Beschleunigung hervor. Hiermit ist der Begriff der Kraft aus seiner statischen Bedeutung als Zug oder Druck auf das Gebiet der „Dynamik“ übertragen. Die Kraft erscheint nunmehr als „Beschleunigung bestimmender Umstand“ (MACH).

Was sich uns als Problem aufdrängt, ist nun dies: *Nach welchem Gesetz hängt die Kraft, die wir uns zunächst nur im statischen Maß gemessen zu denken haben, mit der Beschleunigung zusammen?*

Eine vorläufige Antwort geben uns Erfahrungen, die wir bereits gemacht haben. Lassen wir einen Körper auf einer schiefen Ebene abwärts rollen, so ist die Beschleunigung geringer als beim freien Fall; es wirkt hier eben nur eine Komponente der Schwere. (Darauf, daß die Kraftzerlegung von der Unterstufe her bekannt ist, darf man sich bei solchen Erläuterungen unbedenklich stützen.) Je größer die Neigung der Bahn, desto größer die Komponente der Schwere, und desto größer auch die Beschleunigung. Die tägliche Erfahrung zeigt aber, daß die bewegende Wirkung einer Kraft noch von einem anderen Umstand abhängig ist. Wird ein Wagen auf wagerechter Bahn von einem Pferde gezogen, so ist die Bewegung um so langsamer, je schwerer der Wagen ist. Wir verwandeln den Vorgang in einen physikalischen Versuch: Auf einer wagerechten Schienenbahn werde ein kleiner Wagen an einem Faden, der über eine Rolle am Ende der Bahn geführt ist, durch ein Gewichtstück gezogen. Die Bewegung ist ebenfalls um so langsamer, je mehr der Wagen belastet ist. Was hier der bewegenden Kraft Widerstand leistet, kann nicht das Gewicht des Wagens sein, denn dieses wird durch die wagerechte Unterlage völlig aufgehoben. Das, was in diesem Fall der bewegenden Kraft Widerstand leistet, nennen wir die Masse des Körpers.

Da alle schweren Körper einer auf sie einwirkenden Kraft einen solchen Widerstand entgegensetzen, so muß ihnen allen Masse

zugeschrieben werden. Man wird zwei Massen gleich nennen, wenn sie durch gleiche Kräfte gleiche Beschleunigungen erfahren. Es läßt sich hiernach auch leicht einsehen, daß gleichschwere Körper gleiche Masse haben. Wir erinnern uns dazu des Erfahrungssatzes, daß alle Körper (im leeren Raum) gleich schnell fallen. Nun wirkt z. B. auf 1 Grammstück aus Blei und 1 Grammstück aus Eisen eine gleiche Kraft, nämlich ihr eigenes Gewicht von 1 Gramm, und da die beiden Metallstücke die gleiche Beschleunigung erlangen, so müssen ihre Massen einander gleich sein. Man hat also an einem Bleistück von 1 Gramm das Gewicht (1 gg) und die Masse (Gramm-Masse) zu unterscheiden.

Das oben vorgelegte Problem erweitert sich nunmehr zu dem folgenden: *Wie hängt die Beschleunigung eines Körpers mit der auf ihn wirkenden Kraft und mit seiner Masse zusammen?* Nach den vorläufigen Ermittlungen liegt die Vermutung der Proportionalität am nächsten. Es kommt also auf die zwei Nachweise an: 1. Daß die Beschleunigung bei gleicher Masse der Kraft proportional ist, und 2. daß die Beschleunigung bei gleicher Kraft der Masse umgekehrt proportional ist.

Für die anzustellenden Versuche empfiehlt HÖFLER¹⁾ die wagerechte Schienenbahn, die mit der ATWOODSchen Fallmaschine verbunden ist. ROSENBERG (II 13) benutzt lieber die Fallmaschine allein. Beide Verfahrensweisen haben Vorzüge und Nachteile. Ich schließe mich auf Grund längerer Erfahrungen mit der wagerechten Schienenbahn nach reiflicher Erwägung doch mehr an ROSENBERGS Urteil an. Bei den auf Schienen rollenden „Wägelchen“ HÖFLERS kann man nicht sicher auf einigermaßen konstante Reibung rechnen, die Zusammenfügung der Schienen und die Neigung des Holzes, sich zu verziehen, beeinträchtigen leicht die Genauigkeit der Versuche in unliebsamer Weise. Die Neigung der Schienenbahn behufs Kompensation der Reibung ist auch der Durchsichtigkeit des Versuchs hinderlich.²⁾ Bei dem Gebrauch der Fallmaschine für sich macht ja die Überlegung, daß die beiden gleich schweren Massen dem Einfluß der Schwere entzogen sind, eine gewisse Schwierigkeit, die aber für einen Schüler der Oberstufe nicht unüberwindlich ist; der

1) Z. U. VII 276 und P. 51; auch POSKE, O. § 12.

2) Eine eingehende Analyse der verschiedenen Methoden zur Demonstration des dynamischen Grundgesetzes hat O. TROJE (Pr. Abh. Königsberg i. Pr. 1908) veröffentlicht. Auch er erklärt, daß die exaktesten Ergebnisse bei leichtester Handhabung heutzutage noch die ATWOODSche Fallmaschine liefert, obwohl es nicht ausgeschlossen sei, daß der noch verhältnismäßig junge Schienenapparat eine derartige Modifikation erhält, daß er mit dem älteren Apparat konkurrieren kann.

einfache Versuch über das Beharren der Bewegung nach einem kleinen Anstoß bringt darüber Klarheit. Ein anderer Übelstand, das Trägheitsmoment der Rolle, spielt auch bei HÖFLERS Schienenbahn mit und wird dort durch Verwendung einer sehr kleinen Rolle gegenüber den sonstigen störenden Einflüssen belanglos. Dasselbe könnte man aber auch an der Fallmaschine vorsehen (nach ZAHLBRUCKNER, Rosbg. 191), wenn nicht andererseits gerade die Verwendung des Rades eine neue fundamentale Problemstellung, eben die des Trägheitsmoments, eröffnete. ROSENBERG empfiehlt, „daß der Lehrer diese Größe durch einen Vorversuch ermittelt und den Schülern einfach mitteilt, welche Mehrbelastung der von der Masse des Rades herrührenden Verzögerung entspricht.“ Gibt man dem Rade nach WEINHOLDS Vorschlag die Gestalt einer undurchbrochenen Scheibe, so läßt sich später die gemachte Angabe durch Berechnung des Trägheitsmomentes prüfen.

Ein sehr einfaches Verfahren zur Elimination des Trägheitsmoments hat E. GIESELER (Z. U. XVIII 148) angegeben: Man bestimme das Übergewicht, das etwa die Fallbeschleunigung 6 cm/sec^2 hervorruft, es sei gleich $2,5 \text{ g}$. Darauf lege man zu den beiden trägen Massen je ein Zulagegewicht von $162,5 \text{ g}$ und bestimme ein weiteres Übergewicht so, daß die Beschleunigung wieder 6 cm/sec^2 beträgt. Es betrage 2 g . Man kann dann sagen, daß die ersten $2,5 \text{ g}$ den beiden ersten Massen + der Rolle die Beschleunigung 6 cm/sec^2 geben, während die zugelegten 2 g der Masse $2 \times 162,5 \text{ g}$ die gleiche Beschleunigung erteilen. Daraus ergibt sich

$$g = \frac{6 \cdot (325 + 2)}{2} = 981 \text{ cm/sec}^2.$$

Für den Gebrauch der bloßen Fallmaschine spricht auch der einfachere Aufbau und die bequemere Hantierung. Von der elektrischen Auslösung des Fallgewichts ist man neuerdings abgekommen. Die Gründe dafür bei HÖFLER, Z. U. VII 235. Über die Einzelheiten der Versuche vergleiche man WEINHOLD (3) 67, ROSENBERG, II 13 ff. und MÜLLER, T. 57. Letzterer hat auch darauf aufmerksam gemacht, daß man die Veränderung in der Größe der Fadenspannung je nach dem Steigen oder Sinken des Gewichts durch eingeschaltete Federwagen nachweisen kann.

Ein anderes überaus sinnreiches und fein durchgearbeitetes Verfahren hat MÜLLER (T. 53 und Z. U. XIV 72) angegeben. Er läßt an seinem „Krinolinenapparat“ durch das fallende Gewicht einen mehr oder weniger belasteten Ring in drehende Bewegung setzen. ROSENBERG meint, daß man gegen dieses Vorgehen auf die rotierende Bewegung kaum ein ernstes Bedenken erheben könne. Ich glaube aber doch, daß man den an sich schwierigen Gegenstand nicht unnötig komplizieren sollte und daß man daher besser tut, MÜLLERS Apparat nicht zum „Universalapparat“ zu stempeln, sondern ihn vielmehr für die Behandlung der Drehbewegungs- und Schwingungsprobleme, wofür er vorzüglich ge-

eignet ist, vorzubehalten. Auch die aus didaktischen Gründen wünschenswerte spätere scharfe Gegenüberstellung der Kraftwirkungen bei translatorischer und bei Rotationsbewegung (S. 271) kommt nicht genügend zur Klarheit, wenn man von Anfang an beides zusammenbringt. Andererseits liefert der Apparat das Gesetz $k = mb$ mit solcher Schärfe, daß man die hierauf bezüglichen Versuche zu Beginn der Betrachtung des Trägheitsmoments gut als repetitorische Versuche wird vorführen können.¹⁾

2. Der Massenbegriff. Der Begriff der Masse wird erst durch die vorstehenden Betrachtungen in ein deutlicheres Licht gerückt. Masse ist nicht „Widerstand“, wie man häufig liest, auch nicht „Trägheitswiderstand“, sondern das Widerstehende, das „Widerstand leistende“. Wollte man diesen „animistischen“ Begriff vermeiden, so müßte man umständlicher sagen: Masse ist die Eigenschaft der Materie, vermöge welcher verschiedene Körper unter der Einwirkung einer und derselben Kraft verschieden große Beschleunigungen erfahren. —

Es darf nicht unbesprochen bleiben, daß Versuche vorliegen, die Masse in ganz anderer Weise zu definieren. Am bekanntesten ist MACHS Definition, wonach die Massen zweier Körper sich umgekehrt wie die Beschleunigungen verhalten, die sie sich gegenseitig erteilen. Das ließe sich hören, wenn hierunter die Beschleunigungen zu verstehen wären, die die beiden Massen einander vermöge der gegenseitigen Gravitationswirkung erteilen.²⁾ Aber MACH hat selbst eingesehen, daß hiermit für den Unterricht nicht viel anzufangen ist, und hat deshalb einen Zentrifugalversuch zu Hilfe genommen, um seinen Massenbegriff zu erläutern (MACH, *Naturl. f. d. Oberkl.* § 50): „Auf einem senkrecht durch die Achse eines Rotationsapparats gezogenen glatten Draht sind zwei durch einen Faden verbundene Körper *A* und *B* leicht beweglich angebracht. Die Zentrifugalbeschleunigung, welche jeder dieser Körper bei der Rotation erfährt, ist dann proportional der Entfernung derselben von der Achse.“ Diese „Beschleunigungen werden dann durch den gleichen Zug und Gegenzug des Fadens eben aufgehoben. Die Körper *A* und *B* erteilen sich also in diesem Falle selbst entgegengesetzte Beschleunigungen, welche sich wie die Abstände von der Achse verhalten.“ MACH hat das Mißliche dieser Demonstration gelegentlich selbst zugestanden. In der Tat kommen ja die Zentrifugalkräfte nicht den Massen an sich als Massen zu, sondern die Massen werden zu Trägern dieser Kräfte vermöge der Rotationsbewegung, in die der sie tragende Stab versetzt ist.

1) Über eine andersartige Einführung in die Grundbegriffe der Mechanik von K. BRUNO vgl. man den Bericht in Z. U. XIX 299; über einen Vorschlag von H. KLEINPETER, die Statik an den Anfang der Mechanik auf der Oberstufe zu stellen, die Berichte Z. U. XVI 362 und XVII 300.

2) MACH, *Mechanik* (4) 226 ff.

Die Kraft wird nicht von ihnen ausgeübt, sondern ist ihnen durch die Rotation eingeprägt. Und wenn selbst diese Art der Massenbestimmung auf wissenschaftlichem Gebiet Anklang gefunden hätte, so wäre doch diese Grundlegung, die alle Schwierigkeiten des Reaktionsprinzips und der Zentrifugalkraft in sich schließt, viel zu verwickelt und demnach unbrauchbar für den Unterricht.

Eine andere Art der Einführung der Masse wird von GRIMSEHL bevorzugt (Z. U. XVI 125; L. § 35). Er läßt in seinem Doppelgeschütz die Kraft der Pulvergase gleichzeitig auf zwei Massen wirken und findet ihre Wurfweite gleich oder ungleich, je nachdem die Massen gleich oder ungleich sind. Dies hat den Vorteil, daß die Kraft nicht wie bei der Fallmaschine an eine mit in Betracht zu ziehende Masse gebunden ist. Indessen gelingt bei den bewegten Körpern die Unterscheidung von Kraft und Masse doch nicht so scharf, wie man dem Verfasser zufolge glauben sollte. Der Schüler kann immer noch fragen, da doch die Produkte von Gewicht und Geschwindigkeit einander gleich sind, warum setze ich nicht den „Bewegungswiderstand“ dem Gewichte gleich? Dazu kommt, daß das Produkt mv , so einfach es aussieht, doch als das Resultat einer veränderlichen Kraft angesehen werden muß, während an der Fallmaschine eine konstante Kraft längere Zeit hindurch wirkt. Der Begriff der Kraft ist hier mit dem des „Impulses“ zu eng verkoppelt, als daß ein reinliches Herauspräparieren des elementaren Kraftbegriffs möglich wäre.

Eine Art von Umkehrung des GRIMSEHLSchen Verfahrens stellt ein bereits 1889 veröffentlichter Beitrag von O. REICHEL (Z. U. II 265) zur Ableitung der Grundlagen der Dynamik dar. Der Verfasser gründet die Massenvergleiche auf den unelastischen Stoß. Zwei gleiche oder verschiedene Stoßkörper aus Buchenholz, an den Stirnflächen mit Klebwachs versehen, sind bifilar an Doppelfäden von 1 m Länge aufgehängt und stoßen aus gleichen oder verschiedenen Höhen herabfallend gegeneinander. Es ergibt sich, daß stets Ruhe eintritt, wenn die Produkte aus Masse und Geschwindigkeit einander gleich sind. Wir haben es hier augenscheinlich mit einem Fundamentalversuch der Dynamik zu tun, der zur experimentellen Bestimmung des Verhältnisses zweier Massen dienen kann, aber die theoretische Grundlage des Massenbegriffs nicht genügend klärt; denn eine Zurückführung der Bewegungsgröße auf die Kraft wird hier so wenig ausführbar sein, wie bei GRIMSEHLS Versuch. Die Beziehung von Kraft und Masse bleibt also bei diesem Versuch unerledigt und bedarf doch noch der Demonstration an der Atwoodschen Fallmaschine. Es dürfte daher wohl vorzuziehen sein, daß man von vorn herein die Fallmaschine anwendet.

3. Dynamische Grundgleichung; absolutes Maßsystem. Das Ergebnis der beiden oben (S. 222) angegebenen Versuche kann in die Form gebracht werden:

1. Die auf einen Körper ausgeübte Kraft ist der an ihm hervorgerufenen Beschleunigung proportional.
2. Die Kraft, die auf einen Körper ausgeübt werden muß, um ihm eine bestimmte Beschleunigung zu erteilen, ist seiner Masse proportional.

Beide Sätze lassen sich zusammenfassen in die Gleichung

$$k = c \cdot mb,$$

wo c eine Proportionalitätskonstante bedeutet.¹⁾

Nach Festsetzung der Einheiten des CGS-Systems für Beschleunigung, Masse und Kraft ergibt sich hieraus die Grundgleichung in der Form

$$k = mb.$$

Die hierdurch definierte Krafteinheit wird 1 Dyn²⁾ genannt. Als spezieller Fall der dynamischen Grundgleichung ergibt sich noch, wenn das Gewicht einer Masse auf diese Masse selbst wirkt (also beim freien Fall)

$$p = mg.$$

Hierin ist $g = 981 \text{ cm/sec}^2$. Setzt man noch $m = 1$ Gramm, so wird $p = 981 \text{ Dyn}$, d. h. 1 Grammgewicht = 981 Dyn, also $1 \text{ mgg} \sim 1 \text{ Dyn}$.

Zur Veranschaulichung der Größe von 1 Dyn hat MACH ein hübsches Mittel angegeben.³⁾ Man denke sich an einem Faden von 981 cm Länge ein Kügelchen von 1 Gramm Gewicht ange-

1) Will man den Weg durch die Proportionalitätskonstante vermeiden, so kann man auch so schließen:

Um der Masse 1 die Beschleunigung 1 zu erteilen, ist eine Kraft $k = 1$ erforderlich.

Um der Masse 1 die Beschleunigung b zu erteilen, ist die Kraft $k = b$ erforderlich.

Um der Masse m die Beschleunigung b zu erteilen, ist die Kraft $k = mb$ erforderlich.

Bei der Wahl dieses Weges begibt man sich aber der Möglichkeit, die Gleichung $k = mb$ unmittelbar auch auf das terrestrische System anzuwenden; man muß vielmehr hierfür dann noch eine ähnliche Betrachtung anstellen.

2) PFAUNDLER sagt Dyne, angeblich aus etymologischen Gründen, doch gibt es kein griechisches Wort $\delta\upsilon\upsilon\eta$, und als Abkürzung von $\delta\upsilon\alpha\upsilon\mu\iota\kappa$ kann Dyn ebenso gut gelten wie Dyne; letzteres ist auch wegen des Gleichklangs mit Düne nicht recht passend. Die Franzosen sagen allerdings *une dyne*, was aber für uns nicht maßgebend sein muß. Da wir alle neueren Maße als sächlich behandeln (das cm, das Erg, das Ohm usw.), so brauchen wir auch beim Dyn keine Ausnahme zu machen.

3) Auf demselben Prinzip beruht der Pendeldynmesser von MÜLLER (T. 223, Z. U. XXIII 17).

hängt und das Kugelchen um 1 cm aus seiner Ruhelage entfernt. Dann ist die Komponente der Schwere, die es in die Ruhelage zurückzieht, gleich 1 Dyn.

Über das Verhältnis des terrestrischen Systems zum absoluten sind in § 18 einige Bemerkungen gemacht. Auch wenn man dies System nicht in Anwendung bringt, so ist es doch lehrreich, hier die Masseneinheit zu bestimmen. Ist die Kräfteinheit 1 kgg, die Beschleunigungseinheit 1 m/sec^2 , so ist die Masseneinheit diejenige Masse, die durch die Kräfteinheit die Beschleunigung 1 m/sec^2 erfährt. Nun erfährt die Masse von 1 kg doch die Kraft 1 kgg die Beschleunigung $9,81 \text{ m/sec}^2$, also würde die Masse von 9,81 kg durch dieselbe Kraft die Beschleunigung 1 m/sec^2 erfahren. Diese Masse von 9,81 kg ist demnach im terrestrischen System als Masseneinheit aufzustellen. Es gelten dann ebenfalls die Gleichungen $k = mb$ und $p = mg$; die Maßzahl der Masse m ist aber hier nur $\frac{1}{9,81}$ von der Zahl der kg, wie auch die Gleichung $p = mg$ unmittelbar lehrt, da $m = p/g$ wird.

Um den Vorzug des absoluten Systems vor dem terrestrischen darzutun, wäre auf die Veränderlichkeit der Schwere mit der Breite des Beobachtungsorts, auch auf die Verschiedenheit der Schwere an den Oberflächen verschiedener Himmelskörper hinzuweisen, während die Masse als konstant anzusehen ist. Das Eingehen auf die Ursachen jener Veränderlichkeit gehört an spätere Stellen (vgl. S. 254).

Übergang zu veränderlichen Kräften. Während bei den bisherigen Untersuchungen mit einer konstanten Kraft gearbeitet wurde, sind nunmehr veränderliche Kräfte in Betracht zu ziehen. Es ist nach Beispielen für solche zu fragen: Kraft einer gespannten Feder, Pulvergase in einem Geschützrohr (O. § 12). Das Weitere in dem Kapitel über Arbeit und Energie (§ 23).

§ 22. *Exkurs über die Grundgesetze der Mechanik.*

An die Darlegung von Beharrungsgesetz und Kraftgesetz in den vorhergehenden Abschnitten schließt sich die Zusammenfassung der Prinzipien der Mechanik am besten in der Form der NEWTONSchen Bewegungsgesetze („Axiomata sive leges motus“) an.¹⁾ Bezüglich des Charakters dieser „Axiome“ sei zunächst auf die Bemerkung von THOMSON-

1) Der Wortlaut z. B. bei POSKE O. § 14.

TAIT¹⁾ verwiesen: „Physikalische Axiome haben nur für diejenigen die Natur von Axiomen, die eine hinreichende Kenntnis der Wirkung physikalischer Ursachen besitzen, um instande zu sein, die notwendige Wahrheit jener Sätze auf der Stelle einzusehen . . . Man hat die NEWTONSchen Gesetze als auf Überzeugungen beruhend anzusehen, die aus Beobachtungen und Versuchen geschöpft sind; sie sind keineswegs Gegenstand intuitiver Erkenntnis.“ Diese Bemerkung, im wesentlichen zutreffend, bedarf doch einiger Zurechtrückungen.

I. Bezüglich des Beharrungsgesetzes ist der Streit, ob es apriorischen oder empirischen Ursprunges sei, heute wohl zugunsten der letzteren Auffassung entschieden. Was den Weg der Auffindung betrifft, so ist E. MACH der Meinung, GALILEI habe dies Gesetz aus seinen Beobachtungen an der schiefen Ebene erschlossen; da ein Körper sich auf absteigender Bahn mit wachsender Geschwindigkeit, auf aufsteigender mit abnehmender Geschwindigkeit bewege, so müsse er auf horizontaler Bahn mit gleichbleibender Geschwindigkeit weitergehen²⁾, sofern man nur von Reibung und Luftwiderstand absehe. Indessen dies letztere ist es ja gerade, was aller früheren Auffassung zuwiderläuft und was durch solchen Scheinschluß unmöglich ausgemacht werden kann. Ich glaube vielmehr, daß GALILEI an der betreffenden Stelle nur zum Lehrzweck, um das Gesetz plausibel zu machen, sich jener Darstellung bedient hat.³⁾ Die Entdeckung dürfte auf eine Intuition zurückgehen, wenschon von anderer Art, als diejenige, die THOMSON und TAIT oben ablehnen. GALILEI hat sich schon früh, anknüpfend an die Rotation der Körper und namentlich an die stets gleichbleibende Rotation der Erde, die Überzeugung gebildet, daß die Bewegung an sich unzerstörbar und unveränderlich sei, sofern nicht, sei es durch Widerstände, sei es durch Annäherung an die Erde oder Entfernung von ihr, Umstände auftreten, die die Bewegung ändern. Der Entdeckung lag ein Gefühl von der Unzerstörbarkeit der Bewegung zu grunde, also wirklich eine Art von Intuition, vermöge welcher er durch alle zufälligen Störungen hindurch das Wesen des Bewegungsvorganges erschaute: Nicht ein Ergebnis induktiver Methode, sondern ein „*mente conceptum*“ (eine Idee, in dem oben S. 27 gekennzeichneten Sinne) ist das Beharrungsgesetz in seiner ursprünglichen Form gewesen. Erst mit dieser Auffassung wird man der ganzen Größe der GALILEISchen Leistung gerecht. Der so gekennzeichnete Ursprung schließt nicht aus, daß man zu Lehrzwecken ein Annäherungsverfahren anwendet, das in der Annahme immer geringer werdender Bewegungshindernisse besteht. Nur soll man sich darüber nicht täu-

1) Lehrbuch der theoretischen Physik, Deutsch von H. HELMHOLTZ und G. WERTHEIM, I § 243.

2) MACH, Mechanik (4) 140.

3) So sieht auch VILATI (Scritti, vgl. Z. U. XXV 122) die Sache an.

schen, daß es unmöglich ist, auf diesem Wege die Richtigkeit des Beharrungsgesetzes streng zu erweisen. Die Beharrung bleibt ein Idealbegriff, dessen Gültigkeit für die Erfahrung allerdings durch die umfassendste Bewährung, die man sich denken kann, sichergestellt ist.

Zufolge einer von mir 1884 veröffentlichten Untersuchung¹⁾ ist das Beharrungsgesetz als eine Maxime anzusehen, die an der Hand der Erfahrung gewonnen ist, aber einmal aufgestellt als Norm für jede künftige Erfahrung verwendet wird. Daß dies möglich ist, hat seinen Grund darin, daß in dem Beharrungsgesetz eine Naturtatsache bloßgelegt ist, die als solche zu erkennen dem divinatorischen Genius GALILEIS vorbehalten war. Auch THOMSON und TAIT sehen das Beharrungsgesetz nicht als eine bloße Übereinkunft, sondern als eine große Naturwahrheit an.

Man verwischt vollends die Grenze zwischen Erkenntnis und Hypothese, wenn man diese Erkenntnis eine Hypothese nennt. Richtig ist nur soviel, daß die Erweiterung des zunächst nur für horizontale Bewegungen erkannten Gesetzes auf Bewegungen in beliebiger Richtung zunächst versuchsweise geschah, und daß in dieser Beziehung eine Hypothese sich erst allmählich (bei NEWTON) zu einer Grundeinsicht entwickelt hat.

II. In der Galileischen Fassung des Beharrungsgesetzes kommt der Kraftbegriff nicht vor, wohl aber in der NEWTONSchen. Es scheint demnach für den oberflächlichen Blick bei NEWTON eine Zirkelbestimmung vorzuliegen, wie öfter bemerkt worden ist.²⁾ Man darf aber deswegen doch nicht das Beharrungsgesetz als eine bloße Konsequenz der Kraftdefinition ansehen, vielmehr ist letztere erst durch das erstere ermöglicht worden.

Formuliert man das Beharrungsgesetz auf folgende Art: „Wirkt auf einen Massenpunkt keine Kraft, so hat er keine Beschleunigung“, dann folgt, als damit sachlich identisch, daraus der andere Satz: „Hat ein Massenpunkt Beschleunigung, so wirken auf ihn Kräfte.“ Der zweite Satz ist mit dem ersten logisch äquivalent.³⁾ Aber es ist damit noch nicht festgelegt, daß die Kraft der Beschleunigung proportional ist. Und wollte man dies per definitionem festsetzen, so wäre immer noch die Abhängigkeit der Kraft von der Masse auf rein erfahrungsmäßigem Wege zu ermitteln.

Man tut aber gut, sich an den klaren Wortlaut zu NEWTONS Lex. II zu halten: *Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.* Unter vis im-

1) Der empirische Ursprung und die Allgemeingültigkeit des Beharrungsgesetzes, Vierteljahrsschr. f. wissenschaftl. Philosophie (VIII) 1884.

2) Vgl. POSKE, Die Zentrifugalkraft, S. 30 ff. Wie man dem durch eine andere Fassung des Beharrungsgesetzes entgegen könnte, ist ebd. S. 32 angegeben.

3) HÖFLER, Physik § 15 und Log. Anhang Nr. 38.

pressa ist hier der Druck zu verstehen, der von außen auf den Körper ausgeübt wird, unter *mutatio motus* die Änderung der Bewegungsgröße, also Masse mal Beschleunigung. Indem NEWTON die Kraft durch den Druck definiert, stellt er die Beziehung zwischen Kraft, Masse und Beschleunigung als einen Erfahrungssatz hin, ebenso wie es oben von uns geschehen ist.¹⁾ Tritt man der Frage vom historischen Gesichtspunkt näher, so zeigt sich, daß der Kraftbegriff schon vom Altertum her in seiner statischen Form, als Druck oder Zug überliefert ist, wie auch schon der Ausdruck *vis impressa* deutlich erkennen läßt. Der entscheidende Schritt NEWTONS bestand darin, die so definierte Kraft mit der durch sie unter Umständen hervorgerufenen Beschleunigung in Beziehung zu setzen.

Daß nun in der neueren Physik die Gleichung $k = mb$ auch die Rolle einer Definition spielt, liegt im Wesen des wissenschaftlichen Systems. Jede Erkenntnis besteht in der Schaffung eines neuen wissenschaftlichen Begriffs und läuft in eine Definition dieses Begriffs aus. (Man denke an die Begriffe Dielektrizitätskonstante, Stromstärke, Brechungsquotient u. a.) Was im System schließlich als Definition erscheint, ist ursprünglich empirische Erkenntnis gewesen. So kann auch die erfahrungsmäßige Beziehung $k = mb$ als kinetische Kraftdefinition dienen. Denn so oft bei einer Bewegung Masse und Beschleunigung bekannt sind, ist dadurch auch die Größe von k bestimmt. Hierdurch schlichtet sich wohl der lange geführte Streit, ob es sich bei dem Kraftgesetz um ein Erfahrungsgesetz oder um eine Definition handelt. Wenn wir im Unterricht zeigen wollen, „wie Erkenntnis gewonnen wird“, so werden wir zweifellos der empirischen Auffassung vor der systematischen den Vorzug geben müssen.²⁾

III. Das Gesetz der Gleichheit von Aktion und Reaktion lautet bei NEWTON: „Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.“ In dem Gesetz sind mehrere völlig verschiedene Fälle enthalten³⁾:

a) eine simultane Wechselwirkung, wie bei einer gespannten elasti-

1) Man vgl. auch P. VOLKMANN, Grundzüge, S. 369: „Während die Definitio IV die *vis impressa* nur als eine *actio* definiert, welche den Bewegungszustand . . . ändert, . . . enthält Lex II quantitative Angaben, wie Größe und Richtung der *vis impressa* bzw. der *actio* gerechnet werden soll“ usw.

2) Die im Text erörterte Frage, wie der empirische Ursprung physikalischer Grundbegriffe mit ihrem zugleich definitorischen Charakter zusammenhängt, bezieht sich auf das Grundproblem der Wissenschaft überhaupt, das in KANTScher Formulierung lauten würde: „Wie ist Wissenschaft überhaupt möglich.“ Zur Lösung dieses Problems in neuerer Zeit vergleiche man namentlich H. DINGLER, Die Grundlagen der Naturphilosophie, Leipzig 1913.

3) Vgl. auch HÖFLER, Physik, § 15.

schen Feder, bei der Anziehung von Magnet und Eisen, von Erde und fallendem Stein.

b) eine sukzessive Wirkung und Gegenwirkung, derart, daß erstere die letztere erst hervorruft; so [vermeintlich] wenn man an einem in der Mauer befestigten Seil zieht, wenn man einen Stein an einem Seil fortzieht, wenn ein Gewichtstück auf eine Tischplatte drückt u. dgl. m.

c) Die Wirkung zweier bewegter Körper aufeinander beim unelastischen und elastischen Stoß.

Daß diese Fälle sehr verschieden zu beurteilen sind, wird sich bei näherer Betrachtung ergeben.¹⁾ Zu den Fällen unter a) ist zu bemerken: Werden zwei Massen durch eine elastische Feder bewegt, oder etwa durch eine gedehnte elastische Schnur zueinandergezogen, so wirken nicht eigentlich die Massen aufeinander, sondern auf beide wirkt die Kraft des elastischen Verbindungsstückes und zwar ist diese Kraft eine zweiseitige; unter der Einwirkung dieser Kraft nehmen die Körper *A* und *B* gemäß dem Gesetz $k = mb$ Geschwindigkeiten an, die ihren Massen umgekehrt proportional sind. Bei der Gravitation ist aller Wahrscheinlichkeit nach ebenfalls ein Mechanismus zwischen den sich anziehenden Massen wirksam, wie dies schon für die magnetischen und elektrischen Kräfte erkannt ist. In allen diesen Fällen ist die Kraft eine zweiseitige, durch einen Doppelvektor darstellbare. Auch Beispiele wie der Rückstoß beim Abfeuern einer Kanone gehören zu den Fällen zweiseitiger Kraftwirkung (wofür der Versuch mit GRIMSEHLS Doppelgeschütz, vgl. S. 225, eine schöne Erläuterung liefert).

Die Fälle unter b) sind sämtlich von der Art, daß sie der Annahme einer besonderen Reaktionskraft nicht bedürfen, da es sich bei ihnen um die Wirkung einer (einseitigen) Kraft auf eine Masse handelt, die durch das 2. Gesetz NEWTONS völlig zureichend bestimmt, das will sagen, durch die Begriffe Kraft, Masse und Beschleunigung zutreffend beschrieben ist. Nur um die Bewegungsübertragung verständlicher zu machen, kann man in die Beschreibung des Vorganges noch die Spannung hineinnehmen, die in dem übertragenden Seil oder an der Angriffsstelle der Kraft auftritt. Diese Spannung ist ihrer Natur nach wieder eine zweiseitige und dadurch läßt sich in die Vorgänge eine Art von Aktion und Reaktion hineinragen, die eine Einordnung unter das 3. Gesetz rechtfertigen könnte. Nur ist dabei festzuhalten, daß nicht der angegriffene Körper die Reaktion ausübt, sondern daß Aktion wie Reaktion der als Vermittlung dienenden Spannung zukommen. Dies trifft auch zu für den Druck eines Gewichtstückes auf eine Tischplatte, der eigentlich vielmehr unter die Fälle a) gehört, da die Kräfte, mit denen das Gewichtstück und die Erde aufeinanderwirken, entgegengesetzt gleich sind, aber in den Grenzschichten von Gewichtstück und Tischplatte treten

1) Vgl. POSKE, Zentrifugalkraft, S. 38 ff.

Spannungen auf, die wiederum zweiseitig sind, und an denen man Aktion und Reaktion unterscheiden kann. Daß letztere allein in Betracht kämen, wie gewöhnlich gesagt wird, ist unzutreffend.

In dem Falle c), beim unelastischen Stoß, spielt diese Spannung nun eine wesentlichere Rolle, wie ich an anderer Stelle gezeigt habe.¹⁾

Allen betrachteten Fällen gemeinsam ist das Auftreten einer zweiseitigen Spannung, die sich als Zugspannung oder Druckspannung äußern kann. MAXWELL hat hierauf zuerst hingewiesen und darauf eine präzisere Fassung des 3. Gesetzes begründet.²⁾ Er sagt: „Sobald wir uns die Vorstellung von dieser zweiseitigen Spannung (*stress*) gebildet haben . . ., sehen wir, daß das dritte Bewegungsgesetz gleichbedeutend ist mit der Aufstellung: daß jede Kraft von der Beschaffenheit dieser zweiseitigen Spannung ist, daß eine solche nur zwischen zwei materiellen Teilen besteht, und daß ihre Wirkungen auf diese materiellen Teile (gemessen durch die in einer gegebenen Zeit erzeugten Bewegungsmomente) gleich und entgegengesetzt sind.“

Hiermit dürfte in der Tat der Kern des 3. Bewegungsgesetzes enthüllt sein. Es geht daraus hervor, daß es vielfach ganz irrtümlich angewandt worden ist, wie namentlich die allgemein verbreitete Lehrbuchdarstellung der Zentrifugalkraft zeigt. Andererseits ist die NEWTONsche Fassung von der Gleichheit der Aktion und Reaktion nicht von den Kräften, sondern von den Wirkungen gemeint, die von NEWTON geradezu als die Bewegungsgrößen bezeichnet werden. Deren Gleichheit folgt ohne Schwierigkeit in allen den Fällen, in denen die zweiseitige Spannung als bewegungändernde Kraft auftritt, insbesondere beim Stoß. Ersichtlich bietet das Gesetz Schwierigkeiten besonderer Art, wenn man es im Unterricht behandeln will. Man kommt allerdings, abgesehen von der Wechselseitigkeit der Wirkungen im Fall a), kaum in die Lage, sich dieses Gesetzes zu bedienen. Geht man darauf aber überhaupt ein, so sollte man es nicht bei einer geheimnisvollen „Reaktionskraft“ bewenden lassen, sondern der Sache gemäß den gegebenen Andeutungen, auf den Grund gehen. Von den Versuchen, die zur Demonstration des Gesetzes empfohlen zu werden pflegen, sei besonders ein von K. T. FISCHER³⁾ angegebener Versuch erwähnt. Ein auf einer kreisförmigen Schienenbahn laufender, durch eine Feder angetriebener Wagen setzt die Schienenbahn in der seiner eigenen entgegengesetzten Richtung in Bewegung. Hier handelt es sich aber doch eigentlich um eine Bewegungsübertragung von einem Körper auf einen andern durch Vermittlung der Reibung, die hier ähnlich wie eine Zahnradverbindung wirkt. Die beste Er-

1) Der unelastische Stoß und das dritte NEWTONsche Bewegungsgesetz, Archiv der Mathematik und Physik (3) 19, S. 89.

2) MAXWELL, Matter and Motion, deutsch von FLEISCHL, Art. 55.

3) Neuere Versuche, S. 18; auch bei GRIMSEHL, L₂ § 39 angeführt.

läuterung liefert immer noch eine gespannte Spiralfeder, an deren beiden Enden verschieden große Massen befestigt sind¹⁾, oder GRIMSEHLS Doppelgeschütz. Dazu treten auf anderen Gebieten der Physik besonders die elektrische, magnetische und elektromagnetische Fernwirkung.

IV. Die Zusammensetzung und Zerlegung der Kräfte. Bei NEWTON ist das Prinzip der Zusammensetzung der Kräfte unmittelbar an die drei Grundgesetze der Bewegung als Zusatz angeschlossen. Auch ist NEWTON der erste, der den Satz in seiner allgemeinen Form deutlich ausspricht, in demselben Jahr (1687) geschah dies auch durch VARIGNON, doch wurde dessen Werk erst nach seinem Tode (1725) veröffentlicht.²⁾

Der Satz vom Kräfteparallelogramm tritt in der Geschichte durchaus als ein Erfahrungssatz auf. Die zugrunde liegende Erfahrung betrifft die Unabhängigkeit zweier Bewegungen, denen ein Körper gleichzeitig unterworfen ist. Aus der Zusammensetzung von Bewegungen, die durch zwei Kräfte hervorgebracht werden, ergibt sich sofort der Parallelogrammsatz; dabei hat man von der Zusammensetzung der Wege überzugehen zur Zusammensetzung der Geschwindigkeiten und zu der der Beschleunigungen (O. § 15).

HÖFLER hat das Prinzip im Anschluß an NEWTON wie folgt formuliert: „Die durch eine Kraft an einem Massenpunkte hervorgerufene Beschleunigung ist unabhängig von dem jeweilig schon vorhandenen Bewegungszustande des Punktes.“ Er setzt dies Prinzip als „Unabhängigkeitsprinzip“ an Stelle von NEWTONS Gesetz II.³⁾ Obwohl ich selbst diesem Vorgehen in der Bearbeitung der Oberstufe gefolgt bin, möchte ich doch an dieser Stelle schon aus historischen Gründen befürworten, daß man sich an NEWTONS Fassung anschließt, und das hier in Betracht kommende Prinzip als besonderes „Unabhängigkeitsprinzip“ aufstellt.⁴⁾ — Zu beachten ist noch HÖFLERS Bemerkung: „Man darf den Ausdruck ‚Zusammensetzen der Kräfte‘ nicht so auffassen, daß aus mehreren Kräften wirklich eine wird, sondern nur so, daß, wenn statt der mehreren wirklich vorhandenen Kräfte nur die Resultierende da wäre, sie dasselbe leisten würde, was die ersteren zusammengenommen wirklich leisten.“

Diese Bemerkung ist besonders wichtig, wenn wir uns jetzt zur Zerlegung der Kräfte wenden. NEWTON spricht bereits davon⁵⁾, daß eine Kraft AD sich in die beliebigen schiefen Kräfte AB und AC zerlegen lasse. Dies kann aber physikalisch nur den Sinn haben, daß

1) HÖFLER, Physik, S. 47.

2) MACH, Mechanik (4), 39.

3) HÖFLER, Physik, § 15.

4) Die allgemeine Bedeutung dieses Prinzips der „Superposition“ hat besonders P. VOLKMANN (Grundzüge, S. 150 ff.) hervorgehoben und genauer erörtert.

5) NEWTON-WOLFERS S. 33.

die eine Kraft AD sich durch die beiden Kräfte AB und AC ersetzen ließe, wenn diese beiden wirklich da wären. Es kann nicht bedeuten, daß man sich die Kraft AD ohne weiteres durch die Kräfte AB und AC ersetzt denken kann; denn beim Zusammensetzen der letzteren treten Spannungen auf, die beim Wirken der einen Kraft AD nicht vorhanden sind. Das hier ziemlich allgemein herrschende Mißverständnis hat zu irrthümlichen Darstellungen mancherlei Art Anlaß gegeben, so namentlich beim Zentrifugalpendel (vgl. S. 256).

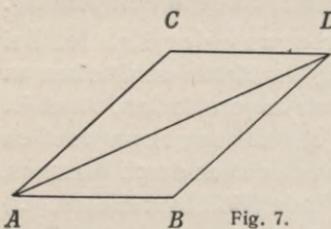


Fig. 7.

Eine physikalische Zerlegung einer Kraft in zwei Komponenten ist vielmehr nur dann gerechtfertigt, wenn die Richtung der möglichen Bewegung von der Richtung der Kraft verschieden ist. In diesem Fall ist stets die Zerlegung in zwei zueinander senkrechte Komponenten angezeigt.¹⁾

Ich gebe noch an einem bekannten Beispiel eine Erläuterung hierzu. An einem über zwei Rollen geführten Seil (Fig. 8) hänge die Last Q und sei durch die Gewichte $P_1 P_2$ im Gleichgewicht gehalten.

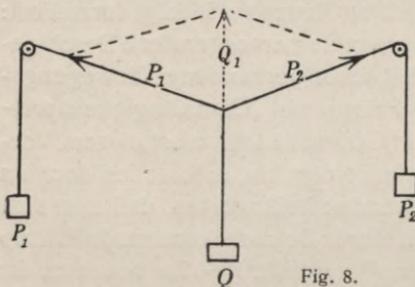


Fig. 8.

Dann hat man nicht nötig, die Kraft Q in zwei Kräfte zerlegt zu denken, sondern umgekehrt: Die Kräfte P_1 und P_2 geben, in dem Aufhängepunkt von Q zusammenwirkend, eine Resultierende Q' , die der Last Q das Gleichgewicht hält. Denkt man das Seil einfach an beiden Enden festgemacht, so werden

die Gewichte $P_1 P_2$ durch die im Seil auftretenden Spannungen ersetzt.

Auch an dieser Stelle sei endlich darauf aufmerksam gemacht, daß die Kraftzerlegung das ursprüngliche Naturphänomen darstellt, insofern sich die Zusammensetzung der Kräfte auf eine Zerlegung der beiden Komponenten zurückführen läßt, derart, daß die zusammenwirkenden Bestandteile der Kräfte von den einander entgegengesetzten und sich daher aufhebenden gesondert erscheinen (vgl. oben S. 110).

1) Es ist das große Verdienst von GRIMSEHL, auf diesen Umstand deutlich hingewiesen zu haben. Man vgl. seinen Aufsatz Z. U. XVII 257 und die Darstellung des „Projektionssatzes“ der Mechanik im Lehrbuch (2) § 48, — ferner POSKE, Zentrifugalkraft, S. 67.

§ 23. 3. Stück: Arbeit und Energie.

1. Die Bedeutung dieses Abschnittes in methodologischer Hinsicht liegt namentlich darin, daß hier eine wiederholte Begriffserweiterung, von ähnlicher Art wie die in der Mathematik stattfindenden, auszuführen ist. Hierauf mit Nachdruck aufmerksam zu machen ist eine der wichtigsten hier obliegenden Aufgaben. Über den Arbeitsbegriff ist das Vorbereitende bereits auf der Unterstufe behandelt worden, doch ist dort der Begriff auf die gegen die Schwere zu leistende Arbeit beschränkt geblieben.

Die Erfahrungen und Ergebnisse der vorhergehenden beiden Abschnitte führen nun zu folgenden neuen Fragestellungen. Nach dem zweiten Gesetz NEWTONS bringt eine Kraft, die auf einen Körper wirkt, an diesem eine Beschleunigung hervor; der Körper muß also eine beschleunigte Bewegung annehmen, d. h. seine Geschwindigkeit muß fortwährend wachsen. Unsrer Erfahrung bestätigt diese Folgerung aber nicht durchweg. Ein Wagen, der von einem Pferde gezogen wird, führt eine mehr oder minder gleichförmige Bewegung aus, ebenso ein von einer Lokomotive gezogener Eisenbahnzug u. dgl. m.

Aus dem Beharrungsgesetz folgt, daß der einmal in Bewegung gesetzte Wagen von selbst weiterlaufen würde, wenn die Reibung nicht seine Bewegung beständig verzögerte. Die beständig neu aufzuwendende Kraft ist also zur Überwindung der Reibung erforderlich. *Wie kann man die Reibung messen? Inwiefern kann man hier von geleisteter Arbeit sprechen?*

Für die Messung der Reibung genügen auch hier die auf der Unterstufe schon ausgeführten Versuche. Ein kleiner mehr oder weniger belasteter Wagen wird auf einer horizontalen Bahn mit der Hand, unter Zwischenschaltung einer Federwage, in langsame möglichst gleichförmige Bewegung versetzt. Die Größe der zu überwindenden Reibungskraft wird in Grammen bzw. Dyn gemessen.¹⁾

Der Versuch wird etwas genauer, wenn man den Wagen durch ein Gewicht ziehen läßt, das an einem über eine Rolle geführten Faden hängt. Hier dient das fallende Gewicht zur Überwindung der Reibung. Nun ist klar, daß durch das fallende Gewicht ver-

1) Genauere Untersuchungen über die Reibung wären etwa in den Schülerübungen am Platze, vgl. HAHN, H. 6, 2. Teil, Aufg. 16–19. Gute Anweisungen auch bei MÜLLER, T, S. 92–98.

mittelst einer Rolle ein ebenso großes Gewicht um eine gleiche Strecke in die Höhe gehoben, also eine gewisse Arbeit geleistet werden könnte. Man kann daher auch bei dem vorliegenden Versuch, bei dem es sich nicht um Hebung eines Gewichts handelt, von einer geleisteten Arbeit sprechen. Man definiert dann die Arbeit durch das Produkt von Widerstand und Weg. (Erste Erweiterung des Arbeitsbegriffs).

Zu der früher schon gegebenen Begriffsbestimmung des Meterkilogramms ist nun hier die des Erg hinzuzufügen und der angestellte Versuch sofort in Erg auszuwerten.

2. Der neue Arbeitsbegriff ist auch auf den Fall anwendbar, daß der zu überwindende Widerstand veränderlich ist. (Beispiel: Ein Wagen, der sich nacheinander auf Schienen, Asphalt, Steinpflaster usf. bewegt). Den einfachsten Fall eines variablen Widerstandes bietet eine elastische Feder dar, deren Widerstand proportional der Längenänderung wächst (Unterstufe). Man befestige eine Federwage an der Wand und ziehe an ihr in horizontaler Richtung, bis sie auf einen bestimmten Betrag der Spannung k ausgezogen ist. Zur Berechnung der aufgewendeten Arbeit führt das graphische Verfahren (O. § 19) oder eine Integration.¹⁾ Dasselbe gilt für eine zusammengedrückte elastische Feder.

3. Welcher Unterschied besteht aber zwischen der Arbeit gegen die Reibung und der Arbeit an einer elastischen Feder? – Die erstere ist (scheinbar) verloren, die zweite kann wiedergewonnen werden (Federpistole). Auch die zum Heben eines Gewichts verbrauchte Arbeit kann von neuem benutzt werden, indem man das vorher gehobene Gewicht herabsinken und dadurch ein anderes Gewicht heben läßt. Begriff der potentiellen Arbeit oder Energie der Lage (zweite Erweiterung des Arbeitsbegriffs).

4. Die Frage nach dem Verbleib der aufgewendeten Arbeit läßt sich nun auch bei einem fallenden schweren Körper stellen. *Was wird aus der zur Hebung eines Gewichtstückes aufgewendeten Arbeit, wenn dieses von der erlangten Höhe h wieder herabfällt?* Da das fallende Gewicht eine gewisse Geschwindigkeit erlangt,

1) Ist k_0 die Kraft bei Verlängerung um 1 cm, so ist $k = k_0 s$ die Kraft bei s cm und demnach die Arbeit

$$A = \int k_0 s ds = \frac{1}{2} k_0 s^2.$$

Eine Analogie zu dem obigen Versuch bietet eine schwere am Boden liegende Kette, die an dem einen Ende emporgehoben wird, bis das andere Ende eben den Boden verläßt (PFAUNDLER, Ph. d. t. Lebens S. 67).

so ist anzunehmen, daß die verloren gegangene Energie der Lage zur Erzeugung dieser Geschwindigkeit verbraucht ist. In welchem mathematischen Zusammenhang aber jene Arbeit mit dieser Geschwindigkeit steht, ergibt sich mit Hilfe der Fallformeln.

Ist s die Fallstrecke, so ist $v = \sqrt{2gs}$ die erlangte Geschwindigkeit, also umgekehrt $s = \frac{v^2}{2g}$ und

$$A = Ps = \frac{Pv^2}{2g}.$$

Da aber $P/g = m$, so folgt schließlich

$$A = Ps = \frac{mv^2}{2}.$$

Man berechne diese Größen für $P = 1 \text{ kg}^*$, $s = 1 \text{ m}$. Es ergibt sich $v = 4,427 \text{ m/sec}$ und

$$A = 1 \text{ mkg}, \quad \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{9,81} \cdot \frac{4,427^2}{2} = 1 \text{ mkg}$$

oder im absoluten Maßsystem

$$A = 981 \cdot 10^5 \text{ Erg}, \quad \frac{mv^2}{2} = \frac{1000 \cdot 442,7^2}{2} = 981 \cdot 10^5 \text{ Erg}.$$

Die der Arbeit äquivalente Größe $\frac{mv^2}{2}$ heißt Bewegungsenergie oder Wucht.¹⁾ (Dritte Erweiterung des Arbeitsbegriffes.) Spricht man nun davon, daß die vorher aufgewendete Arbeit jetzt in der bewegten Masse als Bewegungsenergie enthalten sei, so darf man nicht übersehen, daß darin eine Substanialisierung des Arbeits- bzw. Energiebegriffs liegt.

5. Bei dem Fall eines Gewichtstückes geht die gewonnene Bewegungsenergie sofort wieder verloren, wenn der Körper auf den Boden aufschlägt. *Kann man nicht Vorkehrungen treffen, daß die Geschwindigkeit und also auch die Bewegungsenergie nicht verloren geht?* Hier ist zunächst der Versuch mit einer Stahlkugel am Platze, die von einer elastischen Bodenplatte fast bis zur früheren Höhe wieder emporspringt. Hierbei wird Bewegungsenergie rückwärts wieder in potentielle Energie umgewandelt.

Nach dem früher bei der schiefen Ebene (S. 218) Gesagten könnte man ferner eine Kugel längs einer schiefen Ebene herabrollen und auf einer zweiten aufwärtsrollen lassen. Besser ist es, den Versuch in einer Rinne von der Gestalt eines Kreisbogens, noch vollkommener, ihn mit einem Fadenpendel aus-

1) Der frühere gebräuchliche Ausdruck „lebendige Kraft“ wird aus nahelegenden Gründen besser vermieden.

zuführen. Auch hierbei ergibt sich eine Umsetzung der Bewegungsenergie in Arbeit, indem der Körper wieder zur alten Höhe emporsteigt.¹⁾ (GALILEIS Hemmungspendel, O. § 20).

Es mag sich hier auch sofort die Berechnung der Höhe anschließen, bis zu der ein mit der Geschwindigkeit v lotrecht emporgeworfener Körper aufsteigt. Aus den Gleichungen für den lotrechten Wurf folgt $h = v^2/2g$; daraus ergibt sich weiter für die verbrauchte Bewegungsenergie

$$\frac{mv^2}{2} = mgh = Ph,$$

d. h. die verbrauchte Bewegungsenergie ist gleich einer geleisteten Arbeit im Betrage Ph .

6. Für die Erweiterung auf beliebige konstante Kräfte und auf veränderliche Kräfte vergleiche man O. § 20, Nr. 4 und 5. Ein schöner experimenteller Nachweis für die Verwandlung von Arbeit in Bewegungsenergie kann mit GRIMSEHLS Federpistole gegeben werden.²⁾ Die Versuche fallen nicht immer sehr befriedigend aus, liefern aber doch, wenn man eine größere Anzahl anstellt, leidlich brauchbare Mittelwerte. Für die umgekehrte Verwandlung von Bewegungsenergie in Arbeit hat MAEY eine Fallschiene³⁾ angegeben, die in didaktischer und mechanischer Hinsicht einfach genug, in der Handhabung jedoch manchen Störungen ausgesetzt ist und nur bei sehr sorgfältiger Vorbereitung leidlich gute Resultate liefert. Ein vortreffliches allerdings nicht quantitativ auswertbares Beispiel für die Wucht eines fallenden Körpers beschreibt MÜLLER (T. 91). Eine Federwage von 25 kg Tragfähigkeit wird sehr fest aufgehängt, und an ihr mit einem dünnen Klaviersaitendraht von 60 cm Länge ein Gewichtstück von $\frac{1}{2}$ kg angehängt. Hebt man dieses bis an die Federwage hoch und läßt es dann fallen, so wird ein Korkindex am Zeiger bis zur Marke 15 kg ausgezogen. (Ein nicht unbedeutender Bruchteil der Energie wird hierbei in Wärme umgewandelt.)

Für den Unterschied von „totem“ Gewicht (*peso morto* der älteren Physik) und Bewegungsenergie (lebendige Kraft) ist auch

1) FR. MÜLLER empfiehlt (T. 75) eine mindestens 200 g schwere Bleikugel an einem 1 m langen Faden dicht vor der Schultafel schwingen zu lassen. Noch besser zeigt diese Beziehung der „Krinolinenapparat“ von MÜLLER.

2) POSKE, O. § 21, GRIMSEHL, Lehrbuch (2) § 44, vgl. auch Z. U. XVI 135. — Eine Parallelaufgabe für einen gespannten Bogen behandelt PFAUNDLER Ph. S. 76.

3) Z. U. XV, 268; XXI, 153; GRIMSEHL ebd. XX, 161.

die Berechnung einfacher Aufgaben über das Eindringen eines Nagels in ein Brett durch einen Hammerschlag, das Eintreiben eines Pfahls durch einen Rammbär¹⁾, das Eindringen einer Flintenkugel in einen Baumstamm²⁾ lehrreich.

7. Wir greifen nun noch einmal auf das Problem in Nr. 1 zurück. Es erfordert nicht bloß Arbeit, den Wagen entgegen der Reibung in gleichförmiger Bewegung zu erhalten, sondern auch, ihn aus der Ruhe in diese gleichförmige Bewegung zu versetzen. Die hierzu erforderliche Arbeit ist gemessen durch $\frac{mv^2}{2}$.

Für einen Eisenbahnzug von 196 000 kg, der auf einer Strecke von 200 m die Geschwindigkeit 10 m/sec annehmen soll, ist diese Arbeit

$$\frac{196\,000 \cdot 10^2}{2 \cdot 9,81} = 1\,000\,000 \text{ mkg,}$$

die Arbeit gegen die Reibung (Reibungskoeffizient 1/200) ist

$$\frac{196\,000}{200} \cdot 200 = 196\,000 \text{ mkg,}$$

die Gesamtarbeit demnach 1 196 000 mkg (PFAUNDLER).

An dieses Beispiel schließt sich zweckmäßig sogleich die Erläuterung des Begriffs der Leistung (des Effekts) an.

Die Definitionen von 1 PS = 75 mkg pro Sek., 1 Watt = 1 Joule pro Sek. sind leicht verständlich. Hat im obigen Beispiel die Lokomotive 40 Pferdekkräfte = 3000 mkg/sec, so beträgt die Zeit des Anlaufens $1\,196\,000/3000$ Sek. = 399 Sek. = 6 Min. 39 Sek.

8. Erst nach diesen verschiedentlichen Darlegungen wird es verständlich sein, wenn nunmehr die Energie definiert wird als die Fähigkeit Arbeit zu leisten. Es wird sich nun daran schließen können die Erweiterung der Energie der Lage zur potentiellen Energie überhaupt, und der Energie der Bewegung zur aktuellen Energie (O. § 20, 7). Ein Ausblick auf die Verwandelbarkeit der Energie und auf den Satz der Erhaltung der Energie wird hier am rechten Platze sein, dazu Geschichtliches über ROBERT MAYER, HELMHOLTZ, JOULE.

Abweichend vom strengen System wird auch hier schon die Verwandlung von mechanischer Energie in Wärme und das Wärmeäquivalent der mechanischen Arbeit behandelt werden können. Es findet damit erst das in Nr. 1 mit eingeschlossene Problem seine

1) Eine elementare Behandlung unter Berücksichtigung des durch den Stoß bewirkten Energieverlustes bei PFAUNDLER, Ph. d. t. L. S. 81.

2) Auf einer Ausstellung zu Berlin (Damuka, 1907) waren Baumstämme ausgestellt, in die Flintenkugeln längs der Achse mehrere Meter weit einge-
drungen waren.

befriedigende Lösung: Was wird aus der zur Überwindung der Reibung verbrauchten Arbeit? Und ebenso das in Nr. 5 aufgetretene: Was wird aus der beim Auftreffen eines fallenden Körpers auf den Boden verloren gehenden Energie?

Zur annähernden Demonstration der quantitativen Beziehung zwischen Arbeit und Wärme scheint mir der von GRIMSEHL angegebene Apparat¹⁾ am meisten geeignet. Ein fallendes Gewicht erwärmt durch Reibung einen kupfernen Hohlkonus, der zugleich als Gefäß eines Luftthermometers dient und an einem Alkoholmanometer die an ihm auftretende Temperaturerhöhung anzeigt.

GRIMSEHLS Versuch ist auch wegen der verschiedenen dabei auszuführenden Manipulationen und Einzelbestimmungen für Schülerübungen sehr geeignet. Es empfiehlt sich, den Versuch von geschickten Schülern vorher einüben und dann in der Klasse vorführen zu lassen. Neben dem etwa durch Zufälligkeiten störend beeinflussten Ergebnis des Klassenversuchs können dann auch die Mittelwerte der bei den Schülerübungen erhaltenen Zahlen mitgeteilt werden. (Vgl. auch S. 284).

Ich kann der Meinung von K. ROSENBERG (II 125) nicht beipflichten, daß eine solche experimentelle Bestimmung des Wärmeäquivalentes in der Schule entbehrlich sei. Andererseits stimme ich ihm in der Wertschätzung der genialen Berechnung durch ROBERT MAYER durchaus bei und möchte diese in der Wärmelehre auf keinen Fall missen.

Der im Vorstehenden zusammengestellte Lehrstoff scheint mir für die erste Behandlung des Gegenstands auf der Oberstufe zu genügen, namentlich wenn, den Meraner Plänen entsprechend, die Mechanik bereits in der Obersekunda behandelt wird. Ein Eingehen auf die Arbeitsleistung in dem Fall, daß die Kraft schief zur Bewegungsrichtung wirkt, und auf die Arbeit im Kraftfeld wird besser einer späteren Stufe vorbehalten. Diese Dinge dürften sich zweckmäßiger an die Behandlung des Gravitationspotentials angliedern, die aus früher dargelegten Gründen im Zusammenhange mit der Himmelsmechanik der obersten Stufe zuzuweisen sein wird.

Dagegen ist im Anschluß an das Obige ein Rückblick wohl am Platze auf das, was auf der Unterstufe über die „einfachen Maschinen“ gesagt worden ist. Dort war festgestellt worden, daß bei jeder Arbeitsleistung an diesen Maschinen die „verlorene“ Arbeit gleich der „gewonnenen“ Arbeit ist. Man kann sich nun vorstellen, daß an einem sinkenden Gewicht durch die Schwere Arbeit geleistet wird, und kann

1) Z. U. XVI, 290, GRIMSEHL, Lehrbuch (2), 358. Weiteres in § 30.

diese Arbeit als positiv bezeichnen, insofern die Bewegung in derselben Richtung erfolgt, in der die Kraft wirkt; andererseits kann man die Arbeit, die an einem in die Höhe gehenden Gewicht gegen die Schwere geleistet wird, als negative Arbeit bezeichnen. Dann läßt sich die Gleichgewichtsbedingung der einfachen Maschinen auch auf die Form bringen, daß bei einer kleinen mit dem Bau der Maschine verträglichen Verschiebung die von der Schwere geleistete Gesamtarbeit gleich Null sein muß. Man gelangt so für ein allerdings zunächst beschränktes Anwendungsgebiet zu dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen. Diese Anwendung des Arbeitsbegriffes auf die Statik ist ganz fundamental und zeigt aufs deutlichste, daß die Statik nur als ein Spezialfall der Dynamik aufzufassen ist. Andererseits stimme ich Fr. C. G. MÜLLER darin bei, daß es „mindestens unpädagogisch“ ist, den Arbeitsbegriff an die Spitze der Statik zu stellen und etwa auch den Parallelogrammsatz aus dem Arbeitsprinzip zu entwickeln.

§ 24. 4. Stück: Die Kräfte am drehbaren Körper.

1. An den Anfang des Systems der Physik pflegt man die Mechanik des Massenpunktes zu stellen, indem man die Fiktion macht, daß die bewegten Körper sich in dem Fall einer translatorischen Bewegung wie Massenpunkte verhalten. Ich habe die Bezeichnung Massenpunkt bisher vermieden, obwohl sie in Lehrbüchern üblich ist und ich selbst sie im Anschluß an HÖFLER verwandt habe.¹⁾ Es scheint mir aber doch nicht recht angebracht, da von Punkten zu sprechen, wo beständig Versuche mit und an Körpern ausgeführt werden; die Abstraktion, die mit einer derartigen Bezeichnungsweise verbunden ist, liegt dem Anfänger doch gar zu fern. Die Sachlage wird eine wesentlich andere, wenn es sich um Körper handelt, die um eine Achse drehbar sind. Der Schüler begreift leicht, daß hier eine andere Betrachtungsweise Platz greifen muß.

Das hier zu behandelnde Gebiet ist von jeher in deduktiver Form dargestellt worden. In den Lehrbüchern herrscht die von VARIGNON herrührende Art der Zusammensetzung der Kräfte, die sich auf das Kräfteparallelogramm stützt. Es war das Bestreben VARIGNONS, die Statik auf diesen Satz deduktiv aufzubauen. Für den Unterricht ist dieses Verfahren, ganz abgesehen von speziellen Bedenken, vom Übel, da es den Stoff allzusehr in die Schranken eines deduktiven Systems zwingt. Die „Physik als

1) HÖFLER, P. § 1; POSKE, O. § 2–21.

Naturwissenschaft“ kommt dabei zu kurz, und vollends ist eine Problemerkörterung in induktivem Sinne so gut wie ausgeschlossen.

Das Problem, an das wir anknüpfen wollen, ist das Problem des Hebels — ein Problem, so uralt wie die Physik selbst. Schon ARISTOTELES hat in den „mechanischen Problemen“ die Frage aufgeworfen, woher es komme, daß ein kleines Gewicht am längeren Hebelarm ein großes am kürzeren bewegen könne; denn „ungereimt erscheine es, daß eine große Last durch eine kleine Kraft bewegt wird“. ARCHIMEDES und seine Nachfolger bis auf HUYGENS haben sich um dieses Problem bemüht. Genaueres hierüber und über die Mängel der älteren Beweisversuche findet man bei MACH.¹⁾ Die deduktive Ableitung bei VARIGNON geht davon aus, daß zuerst parallele Kräfte an einem freien System zusammengesetzt werden. Die Künstlichkeit dieses Verfahrens ist öfter bemerkt worden.²⁾ Mit großer Schärfe haben sich auch GRIMSEHL, FR. C. G. MÜLLER und KEFERSTEIN gegen die Vernachlässigung der tatsächlichen Verhältnisse bei der Ableitung des Hebelgesetzes gewandt.³⁾ Namentlich der Letztgenannte betont sehr entschieden: „Was uns im physikalischen Unterricht auch der Oberklassen in erster Linie nottut, ist nicht so sehr die mathematische Formulierung von Gesetzen, als vielmehr die Schulung des Wirklichkeitssinnes, der Fähigkeit, ohne irgendwelche Voreingenommenheit an die Prüfung der Dinge heranzugehen und zunächst nicht mehr in das Gesehene hineinzulegen, als es unserer Wahrnehmung darbietet.“

Für die Behandlung des Gegenstandes hat GRIMSEHL schätzenswerte Beiträge geliefert durch seine Betrachtungen über die Bewegung auf gezwungener Bahn und seine Versuche über den durch Kräfte hervorgerufenen Druck und Zug an einem drehbaren Körper. Der Grundfehler der älteren Darstellungen bestand darin, daß sie von einem „freien“ System ausgingen, obschon für Versuche stets nur Systeme mit zwangsläufiger Bewegung zugänglich sind; und daß sie von Druck und Zug in den Körpern ganz abstrahierten, obwohl diese bei der Bewegungsübertragung an zwangsläufig bewegten Körpern die wesentlichste Rolle spielen. Gegenüber dem Einwand, daß man in der Mechanik ja mit verein-

1) Mechanik (4) S. 9ff.

2) POSKE, Das Hebelgesetz usw. Z. U. XV 5 u. a.

3) GRIMSEHL, Unterr.-Bl. 1903, Heft 2; MÜLLER, Z. U. XV 9; KEFERSTEIN, Z. U. XVI 268.

fachenden Annahmen arbeiten müsse, stellt KEFERSTEIN (a. a. O.) mit Recht den Grundsatz auf: „Unter mehreren Auffassungen eines Naturvorgangs ist bei annähernd gleicher Durchsichtigkeit stets diejenige zu bevorzugen, die den wirklichen Vorgängen am nächsten kommt.“

Unter den Fachlehrern der Physik dürfte heute Übereinstimmung darüber bestehen, daß man nicht mit einer abstrakten schematischen Figur (der VARIGNONSchen Kräftezusammensetzung), sondern mit einem Versuch beginnen muß. Hierzu eignet sich besonders gut die Drehmomentenscheibe.¹⁾ Diese Scheibe stellt den allgemeineren Fall des Hebels, nämlich das Modell eines um eine Achse drehbaren Körpers, dar, und es empfiehlt sich, die Gesetze zunächst an dieser Scheibe zu studieren.

An der Scheibe läßt sich bei lotrecht hängenden Gewichten der Drehmomentensatz, also die Verallgemeinerung des Hebelgesetzes, demonstrieren, zugleich aber auch die Verschiebbarkeit des Angriffspunkts in der Richtung der Kraft, ohne daß dadurch deren Wirkung geändert wird. Das zweite läßt sich durch eine bekannte Betrachtung leicht begreiflich machen (POSKE, O. § 22, 5). Dem Drehmomentensatz selber aber ist durch eine genauere Analyse des Vorgangs näherzukommen.

Wir betrachten zu dem Zweck zunächst die Wirkung einer an der Drehmomentenscheibe angreifenden Kraft. Steht diese auf dem nach dem Angriffspunkt gezogenen Radius senkrecht, so wird sie mit ihrer ganzen Größe als Drehkraft wirken können; steht sie dagegen schief – und dies ist der allgemeinere Fall – so ist eine Zerlegung vorzunehmen, die eine Komponente in Richtung des Radius, eine andere senkrecht dazu liefert. Die letztere wirkt als Drehkraft, die erstere ruft eine Spannung (Druck oder Zug) in der Richtung des Radius hervor (POSKE, O. § 23, 2).

An dieser Stelle ist der schöne Apparat von GRIMSEHL am Platze, durch den die Zug- und Druckspannung sinnfällig demonstriert wird.²⁾

*An die Ableitung des Begriffs der Drehkraft schließt sich der Satz, daß zwei Kräfte bezüglich der Drehwirkung durcheinander ersetzbar sind, wenn ihre Momente gleich und von gleichem

1) WEINHOLD, Dem. (4) 87; HANDL (1885) bei FRICK-LEHMANN I 679; HARTL, Z. U. XIV 321; vgl. ROSENBERG II 26.

2) Z. U. XVI 260; POSKE, O. § 23.

Drehungssinn sind¹⁾ (O. § 23, 4); an diesen der Satz, daß Gleichgewicht besteht, wenn die Momente gleich und von entgegengesetztem Drehungssinn sind.

Als spezieller Fall ergibt sich endlich der Satz von der Ersetzbarkeit der Kräfte am Hebel und vom Gleichgewicht am Hebel. Ist der Momentensatz für den Fall gültig, daß die Kräfte an zwei Punkten eines Durchmessers der Drehmomentenscheibe angreifen, so muß er auch noch bestehen bleiben, wenn man die Scheibe auf eine Hebelstange reduziert, die jenen Durchmesser in sich aufnimmt.

2. Es läßt sich nicht verkennen, daß auch bei der obigen Darstellungsweise noch etwas zu wünschen übrig bleibt, insofern das bei nicht parallelen Kräften an der Drehmomentenscheibe völlig durchsichtige Kräftepiel nicht mehr so klar zutage liegt, wenn es sich um parallele Kräfte an einer Hebelstange handelt. Das Zusammenwirken der Kräfte an einem „materiellen“ Hebel findet man bei MACH²⁾ behandelt, wo als Schema ein System von drei elastisch verbundenen Punkten m_1 , m_2 , M benutzt ist, von denen M eine sehr große Masse gegenüber m_1 und m_2 darstellt. Fr. C. G. MÜLLER hat das große Verdienst, für das dem Unterricht bis dahin unzugängliche Problem eine schulmäßige, ganz elementare Lösung gefunden zu haben.³⁾ Unter den beiden von ihm angegebenen Darstellungsarten scheint mir die ältere (Z. U. XV 6) den Vorzug zu verdienen, die spätere ist in vielem Betracht noch scharfsinniger erdacht, doch ist der Aufbau (in technischer wie in theoretischer Hinsicht) nach meinem Dafürhalten zu fein und zu kompliziert. Für die Unterstufe möchte ich, entgegen MÜLLERS Meinung, keine von beiden Darstellungen empfehlen.

Das Hebelmodell MÜLLERS zeigt Fig. 9. Es besteht aus einem dünnen Holzstäbchen BC , das vermittelt eines Fadens BAC an einer Fadenschlinge PA aufgehängt ist. An den Enden von BC hängen Gewichtstücke D und G , die ein beliebiges Verhältnis, etwa 1 : 2 haben. Hängt man dies Modell mit den Gewichten freischwebend auf, so teilt ein in A angebrachter Senkel AK den Stab BC stets im umgekehrten Verhältnis der beiden Gewichte. Den Grund hierfür erkennt man wie folgt⁴⁾: Man ersetze (Fig. 10) die Spannung des Fadens BA durch eine Kraft BF ,

1) Eine von der meinigen etwas verschiedene Darstellung des Momentensatzes gibt GRIMSEHL, Lehrbuch (2) § 55.

2) MACH, Mechanik (4) S. 299 ff.

3) MÜLLER, Z. U. XV 9 und Technik S. 34, sowie Z. U. XXV 11.

4) MÜLLER verfährt anders, er zerlegt die Kraft BD in zwei Komponenten längs BA und BC , entsprechend die Kraft CG ; ich kann das aus anderweit dargelegten Gründen nicht für gerechtfertigt halten, obwohl eine wiederholte Zerlegung nach dem Projektionssatz schließlich auch zu diesen Komponenten führt.

die so groß sein muß, daß sie zusammen mit der Kraft BD eine Resultierende BE längs BC liefert. Ebenso ersetze man die Spannung des Fadens CA durch eine Kraft CI von der Größe, daß sie zusammen mit

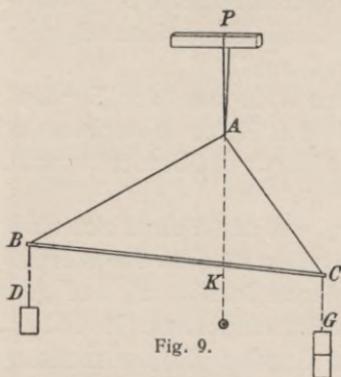


Fig. 9.

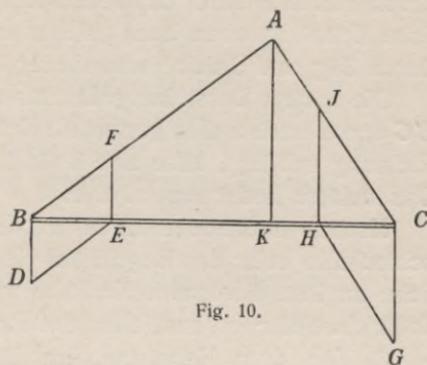


Fig. 10.

CG eine Resultierende CH längs CB liefert. Im Fall des Gleichgewichts müssen die Kräfte BE und CH entgegengesetzt gleich sein. Zieht man nun AK parallel zu BD und CG , so ergibt sich leicht aus ähnlichen Dreiecken

$$\begin{aligned} BE : EF &= BK : AK, \\ CH : HI &= CK : AK, \\ \hline HI : EF &= BK : CK \text{ oder} \\ CG : BD &= BK : CK. \end{aligned}$$

Der geometrische Sinn dieses Resultats ist, daß an der Seite der größeren Kraft CG der Faden AC steiler sein muß als auf der anderen Seite der Faden AB , damit die Resultierende CH wieder ebenso groß wird wie BE . Man erfährt somit durch Versuch und Rechnung, daß in BC eine Schubspannung, in den Fäden AB und AC eine Zugspannung entsteht.

Sehr geschickt vollzieht MÖLLER nun den Übergang zum eigentlichen Hebel, indem er (Fig. 11) die Linie AK durch ein schmales Holzbrettchen versteift und den Punkt A als Drehpunkt festmacht, oder endlich auch den Drehpunkt irgendwo zwischen A und K oder in K selbst annimmt. Das Gleichgewicht wird dadurch nicht gestört, denn man sieht leicht, daß die an A angreifenden Fadenspannungen sich in zwei paar Komponenten zerlegen lassen, von denen die zu AK senkrechten sich aufheben, die längs AK fallenden aber sich zu einer Gesamtkraft gleich

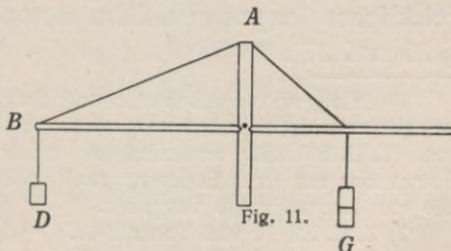


Fig. 11.

der Summe der beiden Gewichte addieren, deren Wirkung durch den festen Drehpunkt aufgehoben wird. Man kann sich schließlich den Punkt *A* beliebig nahe an *K* herangerückt und die Fäden *AB* und *AC* durch dünne „Fäden“ des festen Materials ersetzt denken. Der gewöhnliche Hebel ist eben auch „nichts anderes als ein körperliches System durch Zug und Druck verbundener Massenteilchen“.¹⁾

Die spätere Darstellung MÜLLERS ersetzt den Widerstand der „Spreize“ *BC* durch nach außen gerichtete Kräfte, indem er Fäden in horizontaler Richtung anbringt, über eine Rolle führt und durch ein Gewicht spannt. Das weitere findet man a. a. O.

MÜLLER macht auch darauf aufmerksam²⁾, daß das Wellrad sich nicht schlechthin unter den Begriff des Hebels einreihen läßt, da das Wesentliche an ihm die innere Kraftübertragung durch Torsion ist, und gibt dafür ein einfaches, aus Fäden und Streben zusammengesetztes Modell an.

3. Von dem Hebelproblem führt ein direkter Zusammenhang über das Problem des um eine Achse drehbaren Körpers zu den Kraftwirkungen am frei beweglichen Körper oder am freien starren System, wie es in der Kunstsprache heißt.

Ich habe anschließend an eine von GRIMSEHL³⁾ vorgeschlagene Betrachtungsweise einen Weg angegeben (O. § 24), wie man insbesondere die Zusammensetzung paralleler Kräfte am frei beweglichen Körper aus den Gleichgewichtsbedingungen für den um eine Achse drehbaren Körper ableiten kann. Einen Versuch dazu ermöglicht ein Hebelmodell, das mit dem Drehpunkt an einem Faden aufgehängt und durch ein Gegengewicht äquilibriert ist (O. [3] Fig. 58); auch die Aufhängung an einer Federwaage ist zu empfehlen.

Von hier aus gelangt man ohne Schwierigkeit zu den Gesetzen über den Schwerpunkt⁴⁾, über die Gleichgewichtslagen schwerer Körper und über die Hebelwaage. Von Wichtigkeit ist auch hier, daß die theoretische Betrachtung mit reichlichem experimentellem Material verknüpft wird (MÜLLER, T., § 26 und 27).

1) Eine gute Veranschaulichung der Zug- und Schubspannungen an dem betrachteten Hebelmodell wird sich auch mit Hilfe des GRIMSEHLschen Apparats (Z. U. XVI 260) erreichen lassen, wenn man die zusammenschiebbare Spiralfeder mit ihren Enden an zwei auf Zug beanspruchte Spiralfedern hängt, die von einem Punkte ausgehen.

2) Z. U. XV 11 und Technik 42.

3) GRIMSEHL in Zeitschr. f. d. mathem. u. naturw. Unterr. 1903, Heft 2; dazu KEFERSTEIN, Z. U. XVI 273.

4) Über die Berechnung des Schwerpunkts vgl. man H. TIMERDING, Die Mathematik usw. S. 54.

Wie weit man auf die Theorie der Kräftepaare eingehen kann, hängt von der verfügbaren Zeit ab und wird je nach der Schulgattung im einen oder anderen Sinn zu entscheiden sein. Hier ist die experimentelle Veranschaulichung überaus nötig. Hingewiesen sei auf TÖPLERS allerdings teuren Universalapparat (Z. U. I 137) und auf GRIMSEHLS experimentelle Demonstration (Z. U. XVII 321). Auf die Geeignetheit des SEGNERschen Wasserrads für denselben Zweck hat wohl zuerst KEFERSTEIN aufmerksam gemacht (a. a. O. 322), eine einfache Vorrichtung gibt auch MÜLLER (T. 41) an.

§ 25. 5. Stück: Die Zentrifugalkraft oder Fliehkraft.

1. In der „Oberstufe der Naturlehre“ habe ich anschließend an HÖFLER den phoronomischen Teil der hierher gehörigen Erscheinungen von dem dynamischen getrennt. Dies brachte den Übelstand mit sich, daß von einer bloß vorgestellten freien Kreisbewegung (für die die Mondbewegung nur ein angenähertes Analogon aus der Erfahrung bietet) ausgegangen werden mußte, und daß zunächst die Zentripetalbeschleunigung mit Hilfe des Parallelogramms der Geschwindigkeiten berechnet wurde. Dies letztere Verfahren ist als pädagogisch weniger empfehlenswert bezeichnet worden¹⁾, da es nicht mit den sinnfälligen Grundgrößen Weg und Zeit konstruiere und rechne, sondern mit den abstrakteren der Geschwindigkeit und der Beschleunigung, und obendrein mit einer bloß fingierten Seitengeschwindigkeit. Nun läßt sich zwar gegen die Exaktheit dieses Verfahrens nichts Durchschlagendes einwenden, doch muß zugegeben werden, daß es an das Abstraktionsvermögen der Schüler, namentlich wenn es schon in O II ausgeführt wird, nicht geringe Anforderungen stellt.

Aber auch im Sinn einer Problemphysik, wie sie hier vertreten wird, liegt es nicht, einen so künstlichen systematischen Aufbau vorzunehmen, statt unmittelbar an das sich darbietende Problem selbst heranzugehen. Es soll daher im folgenden ein Lehrgang eingeschlagen werden, der völlig von dem in meiner Oberstufe Gebotenen, aber ebenso sehr auch von dem in allen anderen Lehrbüchern enthaltenen abweicht. Doch seien zunächst noch einige allgemeine Bemerkungen im Anschluß an meine Schrift über die Zentrifugalkraft vorausgeschickt.²⁾

1) Fr. MÜLLER, Z. U. XXIV 211.

2) F. POSKE, Die Zentrifugalkraft, Abh. z. Did. u. Phil. d. Natw. II, Heft 3.

2. Man findet in den Lehrbüchern für den elementaren Unterricht¹⁾ öfters folgende Darstellung: Einen an einem Faden gehaltenen und herumgeschwungenen Stein zwingt man dadurch zur Kreisbewegung, daß man mit der Hand beständig eine Zugkraft auf ihn ausübe, die ihn von der geradlinigen Bewegung ablenke. Diese von der Hand ausgeübte Zugkraft sei die Zentripetalkraft oder Zentralkraft; dagegen sei die Fliehkraft oder Zentrifugalkraft nichts als der durch die Trägheit des Steins verursachte Widerstand oder die Reaktion gegen die Zentripetalkraft.

Hiergegen ist zu sagen, daß der Zug der Hand an dem Faden ganz belanglos für die Erscheinung ist; er dient nur dazu, die durch die Schwere (und die Reibung) hervorgerufenen Störungen aufzuheben.²⁾ Der Vorgang spielt sich, abgesehen von störenden Einwirkungen, genau so ab, wenn man an einem völlig festen Zentrum einen Faden befestigt, der am freien Ende einen Körper, etwa eine Kugel trägt, und wenn man diesem einen einmaligen Stoß in tangentialer Richtung gibt. Der Körper beschreibt dann eine Kreisbahn in stationärer Bewegung, ohne daß es noch erneuter Anstöße bedürfte. In dieser Form wird der Vorgang auch den exakteren Darstellungen zugrunde gelegt.

In diesen³⁾ wird dann folgendermaßen argumentiert: Da der im Kreise geschwungene Körper beständig von der geraden Linie abweicht, so muß (gemäß dem Beharrungsgesetz) eine fortwährende ihn aus der geraden Bahn ablenkende Kraft, also eine Zentripetalkraft, vorhanden sein. Diese Kraft ist die Spannung des Fadens; sie äußert sich andererseits auch als Zug an der Achse oder an dem festen Mittelpunkt des Kreises und heißt in diesem Falle Zentrifugalkraft. Zumeist wird der hier auftretende Gegensatz von Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft noch bestimmter auf das Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung zurückgeführt. Die Zentrifugalkraft erscheint dann als die Reaktion, die vom bewegten Punkte entgegen der auf ihn wirkenden Zentripetalkraft ausgeübt wird.

Nun lehrt aber die unbefangene Betrachtung, daß zwar eine Fadenspannung vorhanden ist, daß aber der bewegte Körper selbst diese Spannung verursacht, indem er beständig auf den Faden einen Zug ausübt. Demnach kann nicht umgekehrt die Spannung die Ursache des von dem Körper ausgeübten zentrifugalen Zuges sein. Und ferner ist zu be-

1) Z. B. auch in GRIMSEHLS Lehrbuch für Realschulen S. 53, und ähnlich im Lehrbuch der Physik § 68.

2) In meiner Schrift habe ich (S. 64) genauer auseinandergesetzt, was es mit diesem – nicht konstanten sondern periodischen Zug der Hand am Faden für eine Bewandnis hat.

3) Man vgl. MAXWELL, Substanz und Bewegung, S. 106; MACH, Die Mechanik, 4. Aufl., S. 160; BOLTZMANN, Vorlesungen über die Prinzipien der Mechanik I S. 97 u. v. a.

denken, daß die Spannung des Fadens selbst nur ein Zwischenglied bedeutet. Ein an einem Faden hängender schwerer Körper wird nicht durch die Spannung des Fadens gehalten, sondern durch den Widerstand des Aufhängungspunktes.

So wird auch der im Kreise laufende Körper nicht eigentlich durch die Spannung des Fadens, sondern durch die Festigkeit des Mittelpunktes (bzw. der Achse) in die Kreisbahn gezwungen. Vollends die Heranziehung des Gesetzes von der Aktion und Reaktion trägt nur dazu bei, den Sachverhalt noch mehr zu verdunkeln. Versucht man, den Schülern den Vorgang auf solcher Grundlage zu erklären, so erkennt man bald, daß man in eine Scholastik verstrickt ist, die vor dem unbefangenen Denken nicht Stand hält.

Wie sehr die hier angefochtene Darstellungsart durch das „System“ beeinflusst ist, erhellt besonders, wenn man die älteste Behandlung des Gegenstandes bei HUYGENS¹⁾ ins Auge faßt.

HUYGENS setzt in einer klassisch zu nennenden Betrachtung²⁾ auseinander, daß ein materieller Punkt am Umfange eines rotierenden Rades, wenn er abfliegt, sich in gleichförmig beschleunigter Bewegung von dem Rade entfernt, und daß die Bahn des Punktes relativ zum Rade eine Kreisevolvente ist, deren Anfangselement in der Richtung der Verlängerung des Radius liegt. Kann der Punkt diese Bewegung in Wirklichkeit nicht ausführen, so übt er einen zentrifugalen Zug auf den Körper des Rades oder genauer auf den ihn mit dem Zentrum verbindenden Radius aus, gerade ebenso, wie ein aufgehängter schwerer Körper auf den Faden wirkt, der ihn verhindert, der Beschleunigung durch die Schwere zu folgen. Es schließt sich hieran eine einfache Berechnung der Größe der Zentrifugalkraft. Man sieht aber, wie weit HUYGENS davon entfernt ist, die Zentrifugalkraft als eine „scheinbare“ oder „uneigentliche“ oder nur „so genannte“ Kraft zu betrachten.

Zu derselben Auffassung kommen auch EULER und POISSON³⁾, indem sie einen materiellen Punkt betrachten, der gezwungen ist, sich auf einer vorgeschriebenen Kreisbahn zu bewegen. Hier wird ausdrücklich der gegen die Bahn ausgeübte Druck als Zentrifugalkraft bezeichnet. In meiner Oberstufe (§ 18) bin ich dem von POISSON eingeschlagenen Verfahren gefolgt. Im folgenden (wie auch jetzt in meinem Unterricht) schließe ich mich dagegen an die Betrachtungsweise von HUYGENS an, der ich schon in meiner Schrift eine moderne Form zu geben versucht habe.⁴⁾

1) CHR. HUYGENS, Nachgelassene Abhandlungen, S. 35ff. (OSTWALDS Klassiker Nr. 138).

2) Vgl. meine Schrift, S. 59.

3) Ebenda S. 22ff.

4) Zur Kritik der älteren Ableitungen für die Zentripetal- und Zentrifugalkraft vergleiche man meine Schrift (S. 8), sowie HÖFLER, Z. U. II 277.

3. Das Problem: *Ein Stein werde an einem Faden im Kreise herumgeschwungen. Woher rührt der Zug, den man an der haltenden Hand verspürt? Von welchen Umständen ist diese Kraft abhängig? Wie kann man ihre Größe berechnen?*

Das Gesetz für die Zentrifugalkraft aus Versuchen abzuleiten (wie es beim Hebel geschieht) ist nicht angängig, da selbst die experimentelle Bestätigung des Gesetzes nicht einfach ist und nur annähernd gelingt. Auch abgesehen hiervon tut man besser, dem historischen Weg zu folgen; hat doch HUYGENS die Gesetze durch mathematische Betrachtung ermittelt, lange ehe man an den genauen experimentellen Nachweis denken konnte. Dagegen empfiehlt es sich nach dem Vorschlag von FR. C. G. MÖLLER mit einem recht auffallenden Freihandversuch zu beginnen.¹⁾ Man hänge ein Gewichtstück von $\frac{1}{2}$ kg an eine 25 kg-Federwage mit Korkindex und schleudere sie so schnell als möglich mit gestrecktem Arm im Kreise herum. Man findet hiernach den Korkindex etwa bis zum Teilstrich 10 kg vorgeschoben und schließt daraus, daß während des Herumschwingens eine Kraft wirksam war, die zwanzigmal so groß ist wie das Gewicht des Körpers.²⁾ Erinnerung werde ferner an das Abschleudern von Erd- oder Schlammteilchen am Umfange eines rasch rotierenden Rades u. dgl. m. (Anknüpfung an die Unterstufe).

Behufs mathematischer Behandlung des Problems werde es zuvörderst in folgender Form präzisiert: Ein Massenpunkt sei (durch eine feste Verbindung mit dem Zentrum) gezwungen, sich mit konstanter Geschwindigkeit v in einer kreisförmigen Bahn zu bewegen. Wir betrachten³⁾ den Massenpunkt, während er sich an einer bestimmten Stelle der Bahn, z. B. in A (Fig. 12) befindet. Der bewegte Punkt würde sich, wenn er mit dem Zentrum M nicht fest verbunden wäre, gemäß dem Beharrungsgesetz in der Richtung der Tangente weiter bewegen und in der kleinen Zeit τ den Weg

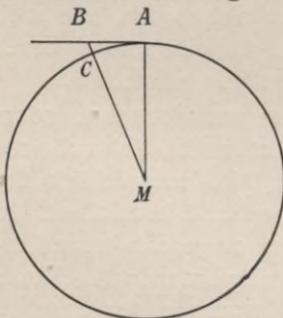


Fig. 12.

1) MÖLLER, T. S. 65; ROSENBERG II 33.

2) Der von MÖLLER ebenfalls vorgeschlagene Versuch mit dem Zentrifugalpendel scheint mir an dieser Stelle noch nicht geeignet, zumal die dabei benutzte Zerlegung der Schwere unzutreffend ist. Vgl. unten S. 257.

3) So auch in meiner Schrift S. 62.

$AB = v\tau$ zurücklegen. Zieht man nun BM , so bedeutet das Stück BC die Strecke, um die sich der Punkt von der Peripherie des Kreises entfernt haben würde. Wird $AM = r$ gesetzt, so ergibt sich

$$BC = BM - CM = \sqrt{r^2 + v^2\tau^2} - r = \frac{v^2\tau^2}{2r}.$$

Hieraus ist zunächst ersichtlich, daß der Weg BC dem Quadrat der Zeit proportional ist, daß der Massenpunkt also sich mit gleichförmig beschleunigter Bewegung von der Kreisperipherie entfernen würde. Der Vergleich mit der Formel für den freien Fall lehrt sofort, daß die Beschleunigung $b = \frac{v^2}{r}$ ist. Der Massenpunkt strebt also mit dieser Beschleunigung sich von der Peripherie des Kreises zu entfernen, übt demnach auf seine feste Verbindung mit dem Zentrum einen Zug aus, der mit dem Zug eines an einem Faden hängenden Gewichtes vergleichbar ist. Ist der Massenpunkt gezwungen, sich längs einer kreisförmigen Wand zu bewegen, so übt er auf diese einen ebenso großen Druck aus.

Das Neue und Charakteristische an der HUYGENSSchen Betrachtungsart, an die wir uns hier angeschlossen haben, besteht darin, daß eine nur gedachte und sozusagen virtuelle Bewegung zugrunde gelegt wird, die gleichwohl dadurch dem Verständnis nahe gerückt ist, daß sie in Analogie zu dem Fall eines schweren Körpers bzw. zu dem von diesem ausgeübten Druck oder Zug gesetzt ist. Ich stehe nicht an, die geniale Betrachtung von HUYGENS dicht neben die fundamentalen Entdeckungen GALILEIS zu stellen, und lege besonders Gewicht darauf, daß ganz unmittelbar die Zentrifugalbeschleunigung, nicht die erst aus dieser abgeleitete Zentripetalbeschleunigung berechnet wird. Es kommt in der Tat darauf an, gegenüber den Verdunkelungen, die der wahre Sachverhalt durch die Lehrbuchsdarstellungen – einer vermeintlichen Konsequenz des Systems zuliebe – erfahren hat, den ganz realen Charakter der Zentrifugalwirkung in helles Licht zu stellen.

Es bedarf keiner Ausführung, daß sich an die Formel für die Zentrifugalbeschleunigung sofort die für die Zentrifugalkraft anschließt, wie auch ferner die Umformungen

$$mv^2/r = m w^2 r = m \cdot 4\pi^2 r/T^2.$$

4. Eine ähnliche Ableitung, wie die eben mitgeteilte, geben WEBER und WELLSTEIN¹⁾, doch formulieren sie die Aufgabe so, daß sie nach der

1) Bd. III § 20.

Beschleunigung fragen, die dem Punkte erteilt werden muß, damit er die Kreisbahn nicht verläßt, bestimmen also die Zentripetalbeschleunigung, auch bedürfen sie noch der (im Obigen nicht erforderlichen) nicht ganz strengen Annahme, daß $AC = AB$ ist, und postulieren überdies den Charakter der Bewegung als einer gleichförmig beschleunigten, indem sie sagen: „Die zu berechnende Beschleunigung können wir jedenfalls über die kleine Strecke BC hin als konstant ansehen, so daß wir die Gesetze des freien Falls hier anwenden können.“ Die Entwicklung ist dann folgende: Ist φ der Winkel, um den sich in der kleinen Zeit τ der Radiusvektor gedreht hat, so ist

$$BC = r \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right) = r \frac{1 - \cos \varphi}{\cos \varphi} = 2r \frac{\sin^2 \frac{\varphi}{2}}{1 - 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}},$$

woraus für verschwindend kleines τ folgt

$$BC = \frac{r\varphi^2}{2}.$$

Aus dieser Fallhöhe läßt sich unter der erwähnten Voraussetzung, daß die Bewegung gleichförmig beschleunigt sei, die gesuchte Zentripetalbeschleunigung γ ermitteln. Für diese gilt

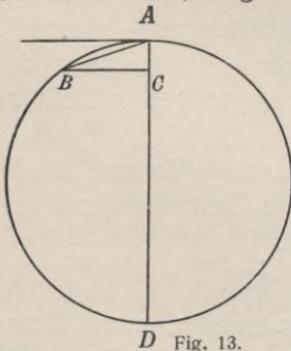
$$\frac{1}{2} \gamma \tau^2 = \frac{r\varphi^2}{2},$$

$$\gamma = r \left(\frac{\varphi}{\tau} \right)^2.$$

Nun ist φ/τ gleich der Winkelgeschwindigkeit w oder gleich v/r , wenn v die konstante Geschwindigkeit längs der Peripherie des Kreises bedeutet, demnach

$$\gamma = \frac{r \cdot v^2}{r^2} = \frac{v^2}{r}.$$

Eine in gewisser Hinsicht verwandte Ableitung hat FR. C. G. MÜLLER (Z. U. XXIV 209) mitgeteilt. Er geht davon aus, daß vermöge der festen Verbindung mit dem Zentrum der Massenpunkt stetig von der Tangente abgetrieben wird, und zwar um das Stück AC , während er sich von A bis B mit konstanter Geschwindigkeit auf dem Kreise bewegt (Fig. 13). Nun wird AC aus dem rechtwinkligen Dreieck ABD bekannterweise berechnet, indem der Bogen AB durch die Sehne AB ersetzt wird. Unter Voraussetzung einer gleichförmig beschleunigten Bewegung ergibt sich dann leicht die Formel $\gamma = v^2/r$. Auch fügt MÜLLER noch eine



D Fig. 13.

Betrachtung hinzu, durch die die eben erwähnte Voraussetzung gerechtfertigt wird. Doch bleibt die vorher angedeutete Unstrenghheit bestehen.

Auch im Vergleich mit den beiden hier wiedergegebenen Ableitungen scheint mir die oben (Nr. 3) mitgeteilte den Vorzug zu verdienen. Sie stützt sich in mathematischer Hinsicht darauf, daß bei der Entwicklung von $\sqrt{1+x}$ in eine unendliche Reihe bei verschwindend kleinem x die höheren Potenzen von x gegenüber der ersten außer Betracht bleiben können.

Die in meiner Oberstufe § 18, 2 gegebene Ableitung, die sich an POISSON anschließt, ist den Anfängern doch zumeist nicht recht geheuer, weil sie mit der Zerlegung einer endlichen Geschwindigkeit in zwei Komponenten rechnet, von denen die eine verschwindend klein ist und deswegen keine Verminderung der anfänglichen Geschwindigkeit bewirkt, andererseits aber doch zu dem endlichen Wert der Zentrifugalbeschleunigung führt.

Die elegante Methode des Hodographen ist für die Zentripetalbeschleunigung sehr geeignet, nicht aber für die Zentrifugalbeschleunigung, auf die es hier ankommt.

5. Es ist nun eine Bestätigung der Fliehkraftformel durch Versuche zu geben. Über die einschlägigen Versuche an der Schwungmaschine vergleiche man die spezielle Literatur.¹⁾ Zu exakten Messungen sind die bei uns gebräuchlichen Apparate, soviel ich sehen kann, durchweg ungeeignet. Empfehlen dürften sich dafür die von PERRY und von CREW angegebenen, die aber in Deutschland bisher noch nicht nachgebaut zu sein scheinen. Bei PERRY wirkt der Zug einer längs einer radialen Führung verschiebbaren Masse auf die elastische Wand eines Hohlraumes, der Quecksilber enthält, derart, daß die Volumänderungen in einer engen achsial angebrachten Röhre abgelesen werden können. (Ähnlich aber komplizierter und recht kostspielig ist ein von BRUNO, Z. U. XIX 299 beschriebener Apparat.) Bei CREW wird durch eine schwere verschiebbare Masse eine Spiralfeder ausgedehnt, und der Moment, wo die Masse das Ende der Führung erreicht, durch einen Stromkontakt an einer elektrischen Klingel zur Wahrnehmung gebracht. Beide Apparate scheinen zu absoluten Messungen der Fliehkraft geeignet zu sein; es wäre wohl zu wünschen, daß man auch bei uns Versuche damit anstellte.

1) WEINHOLD, Dem. (4), 99–106; MÜLLER, 65–71; ROSENBERG II, 33–40. Eine Reihe neuerer Apparate zur Bestätigung der Fliehkraftformel ist in meiner Schrift über die Zentrifugalkraft S. 77–80 aufgeführt, darunter auch die im Text genannten von PERRY und CREW; dazu kommt noch der ältere Apparat von SCHLEIERMACHER (Kohl Nr. 21 977, Ernecke Nr. 5266) und ein ähnlicher von KOLIG, Z. U. XXIV; endlich MAEY, Z. U. XXV 90 (Leybold Nr. 9797).

Eine indirekte Bestätigung der Zentrifugalkraftformel ergibt sich daraus, daß die mit ihrer Hilfe berechnete Schwingungsdauer des Zentrifugalpendels (s. Nr. 8) durch die Beobachtung als richtig erwiesen wird; ferner aus dem von MÜLLER beschriebenen Zentrifugalspiegelversuch (Z. U. XXIV 211).

6. Zentrifugalkraft am rotierenden Körper. Die HUYGENSsche Betrachtung führt auch unmittelbar zu den Erscheinungen am rotierenden Körper. Ein Massenpunkt an der Oberfläche eines rotierenden Körpers wird auf die ihm zunächst nach innen hin gelegenen Massenteilchen einen zentrifugalen Zug ausüben, diese ebenso auf die ihnen benachbarten weiter nach innen gelegenen. Es kommt also ein Zug zustande, der von allen Seiten her auf die Achse wirkt. Ist die Masse des Körpers symmetrisch verteilt, so werden sich je zwei entgegengesetzt gerichtete Zugkräfte aufheben und die Achse wird, abgesehen von der Spannung, keine einseitige Beanspruchung erfahren. Ist jene Voraussetzung nicht erfüllt, so treten die bekannten Erscheinungen, wie Schleudern der Achse, Zerreißung eines Schwungrades u. dgl. ein.

Eine besonders zu besprechende Erscheinung ist die Abplattung deformierbarer Körper an den Polen, die gewöhnlich an dem Kugelgerippe aus Messing demonstriert wird, besser aber an einer Kugel aus feuchtem Ton, die unterhalb der Achse der Schwungmaschine aufgehängt ist.¹⁾ Auch PLATEAUS bekannter Versuch mit der rotierenden Ölkugel gehört hierher.

An diese Versuche muß sich anschließen die Rechnung über die Verminderung der Erdschwere am Äquator und auf irgendwelchen Breitengraden durch die Fliehkraft, sowie die Besprechung der Abplattung der Erde (O. § 18, 5).

Was sonst über frei rotierende Körper zu sagen ist, kann erst nach Behandlung des Trägheitsmoments zur Erörterung kommen.

7. Die Zentripetalkraft. Am rotierenden Körper zeigt sich, daß die Zentrifugalkraft durch die Festigkeit des Körpers und schließlich durch den Widerstand der Achse aufgehoben wird. In dem einfacheren Fall des am Faden im Kreise umlaufenden Körpers ist es die Spannung des Fadens, die der Fliehkraft entgegenwirkt, aber schließlich doch auch wieder der Widerstand der Achse, an der das andere Ende des Fadens befestigt ist. Man kann diesen Widerstand als eine Zentripetalkraft einführen,

1) Genau beschrieben bei Weinhold (4) S. 102.

und man kann die Kreisbewegung dadurch zustande gekommen denken, daß auf einen tangential, also in gerader Linie bewegten Körper eine beständig nach dem Zentrum gerichtete Kraft ablenkend einwirkt. Nur darf man diese Kraft nicht mit der Spannung des Fadens identifizieren, da der mehr oder weniger elastische Faden ja nur die Vermittlung zwischen der Achse und dem umlaufenden Körper herstellt, und seine Spannung nach beiden Seiten hin wirksam ist. Man muß vielmehr die Zentripetalkraft von der Achse selbst ausgehend denken, und hierdurch dürfte es klar werden, daß es sich hier um eine „Ersatzkraft“ handelt, die man sich an die Stelle der festen Verbindung gesetzt denkt, um mit ihrer Hilfe den Vorgang mathematisch zu konstruieren, indem man die zwangsläufige Bewegung durch eine freie ersetzt.¹⁾

Hierbei ist zunächst an eine Achse gedacht, die gegen den, etwa in einer Fadenschlinge laufenden Körper in Ruhe bleibt, oder auch einfach mitgenommen wird. Hat man es mit einer Achse zu tun, die durch äußere Kräfte in Umdrehung erhalten wird und ihrerseits beständig durch starre Verbindung auf die rotierende Masse einwirkt, so sind kompliziertere Vorgänge im Spiel, von denen hier nicht die Rede sein soll. Nur soviel sei gesagt, daß hierbei tordierende Kräfte in Wirkung treten, die sich nicht so glatt auf Zentripetalkräfte reduzieren lassen.

Unter der eben angegebenen Beschränkung wird die Zentripetalkraft also als eine Ersatzkraft zu definieren sein, und das hierbei auftretende Problem wird folgendes sein:

Ein beweglicher Massenpunkt A sei im Abstände r von einem festen Punkte M gegeben und habe eine Geschwindigkeit v senkrecht zu der Abstandsgeraden. Welche nach dem Punkt M gerichtete Kraft muß auf ihn wirkend gedacht werden, damit er sich in einer Kreisbahn um M bewegt?

Das Problem löst sich mit Hilfe der Fliehkraftformel leicht. Da der Körper sich vermöge des Beharrungsgesetzes mit der Beschleunigung $b = v^2/r$ von der Kreisbahn entfernen würde, so muß dem Körper eine dieser entgegengesetzte Beschleunigung von gleicher Größe in der Richtung nach dem Zentrum hin erteilt

1) So ersetzt man ja in der höheren Mechanik durchweg die Bedingung, daß sich ein Körper auf einer Fläche oder einer Kurve zu bewegen hat, durch genau definierte Kräfte.

werden, um ihn in der Kreisbahn zu erhalten. Es ist also auch die Zentripetalkraft in dem eben definierten Sinn durch die Formel

$$k = mv^2/r$$

gegeben. Durch diese einfache Lösung ist man aller der Schwierigkeiten enthoben, die den Lehrbuchverfassern von jeher bei dem Kapitel der Zentripetalkraft zu schaffen gemacht haben.

Eine Bewegung der eben betrachteten Art wird man als eine freie Kreisbewegung bezeichnen können, wenn ein Körper sich wirklich ohne ersichtliche Zwangsverbindung in einem Kreise bewegt. Es fragt sich, ob es derartige Bewegungen in der Natur geben kann. Ein erstes Beispiel liefert die Aufgabe (O. § 10, 3): Wie groß müßte die Anfangsgeschwindigkeit einer parallel zur Erdoberfläche abgeschossenen Kanonenkugel sein, damit sie (abgesehen von der Wirkung des Luftwiderstandes) die Erde umkreist? (Antwort 7,905 km/sec.) Ein zweites Beispiel liefert die Berechnung der Fallbeschleunigung des Mondes gegen die Erde unter der Voraussetzung einer kreisförmigen Gestalt der Mondbahn (Antwort $b = 0,2705 \text{ cm/sec}^2$).

Man wird nicht versäumen dürfen, hier die „Mondrechnung NEWTONS“ zu Ende zu führen, indem man das Verhältnis dieser Größe zur Fallbeschleunigung an der Erdoberfläche als $\sim 1/60^2$ berechnet und damit einen ersten Ausblick auf das Gravitationsgesetz gewinnt.

8. Das Zentrifugalpendel. Eine schulmäßige Ableitung der Formel für das Zentrifugalpendel (konische Pendel) habe ich an anderer Stelle gegeben.¹⁾ Ich teile sie auch hier mit, weil ich nachher daran anzuknüpfen habe. Die Ableitung benutzt den Kunstgriff, an Stelle der die Zwangsläufigkeit bewirkenden Verbindung eine Ersatzkraft einzuführen (ebenso wie oben bei MÜLLERS Hebelmodell, vgl. S. 245). Der Grundgedanke bei der Einführung einer Ersatzkraft ist, daß ihr zufolge von dem Vorhandensein einer Beschränkung der Bewegungsfreiheit abgesehen, der Massenpunkt also als ein frei beweglicher betrachtet werden kann. Die Ersatzkraft AC (Fig. 14) muß längs des Fadens gerichtet und so groß sein, daß sie im Verein mit der Schwere AB eine Resultierende AD liefert, die in der horizontalen Ebene der Kreisbahn als Zentripetalkraft wirkt. Ist α der Ablenkungswinkel des Pen-

1) POSKE, Zentrifugalkraft § 26 und O. § 18, 6.

delfadens, $OA = l$ die Pendellänge, ρ der Radius des durchlaufenen Kreises, so ergibt sich leicht

$$AD = AB \cdot \operatorname{tg} \alpha = m g \operatorname{tg} \alpha = m \frac{4\pi^2}{T^2} \rho = m \frac{4\pi^2}{T^2} l \sin \alpha$$

und hieraus

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \cos \alpha}.$$

Die Ersatzkraft AC ist der an dem Faden hervorgerufenen Spannung gleich und entgegengesetzt, sie kann also (Fig. 14) durch die Strecke AG dargestellt werden. In dieser ist eine Komponente AF der Schwere enthalten, außerdem aber die Strecke GF , die den zentrifugalen Zug am Faden OA bedeutet, dessen Größe gleich $\frac{v^2}{l}$ ist. Diese Größe läßt sich leicht ermitteln, wenn man AD auf AO projiziert, es ist dann

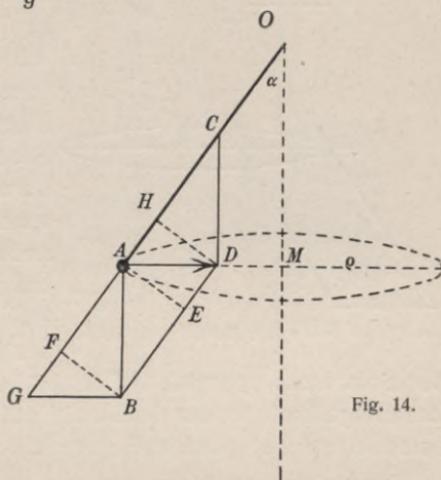


Fig. 14.

$$GF = AH = AD \cdot \sin \alpha = \frac{v^2}{\rho} \sin \alpha = \frac{v^2}{l}.$$

Für kleine Werte von α ist $\sqrt{\cos \alpha}$ nahezu gleich 1 und es wird $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, worauf bei der Ableitung der Pendelformel zurückzukommen sein wird. Hiermit ist erst die Natur der in Betracht kommenden Komponenten völlig aufgeklärt.

Die in den Lehrbüchern gegebenen Ableitungen für die Schwingungsdauer des Zentrifugalpendels sind fast durchweg unrichtig.¹⁾ Ein von HUYGENS selbst angegebenes Verfahren setzt eine Zentrifugalkraft voraus, die in der Ebene der Kreisbahn des bewegten Massenpunktes wirksam ist. Diese Voraussetzung ist aber unzutreffend, da die Zwangsläufigkeit hier gar nicht von der Art ist, wie sie bei der Ableitung der Zentrifugalformel zugrunde gelegt war; der bewegte Punkt ist nicht mit dem Zentrum des Kreises fest verbunden, sondern nur an eine Kugel- fläche gebunden, deren Mittelpunkt im Aufhängepunkt des Pendels liegt. In Wirklichkeit hat auch die Zentrifugalkraft hier eine andere Größe (wie oben bereits angegeben ist).

1) Vgl. meine Schrift § 23–26.

Ein anderes sehr verbreitetes Verfahren zerlegt die Schwere in zwei Komponenten, von denen die eine AG in der Richtung des Fadens, die andere AD in der Richtung des Kreisradius liegt (Fig. 15); die letz-

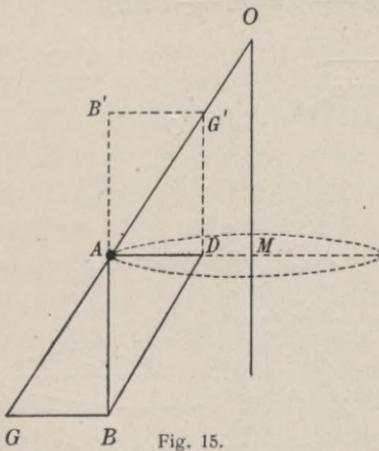


Fig. 15.

tere liefert die für die Kreisbewegung erforderliche Zentripetalkraft. Die hier vorgenommene Zerlegung muß gemäß dem früher Gesagten beanstandet werden (vgl. S. 234). Im besonderen ist AD nicht einfach eine Komponente der Schwere, sondern entspringt aus dem Zusammenwirken von Schwere und Fadenspannung, wobei die Schwere AF durch eine Komponente AB' der Fadenspannung gerade aufgehoben wird, die andere Komponente aber die Zentripetalkraft AD liefert. Andererseits ist auch AG keine Komponente der Schwere, sondern besteht, wie oben gezeigt, aus

der Schwerekomponente AF (Fig. 14) und der Kraft FG (ebenda), die die Zentrifugalkraft in der Richtung des Fadens bedeutet. Das Verfahren entspricht daher ganz und gar nicht den wirklichen Kraftverhältnissen.

Eine eingehende Analyse des Vorgangs, die aber über das Niveau der Schule hinausgehen dürfte, habe ich a. a. O. § 25 gegeben; ebenda in § 24 eine Darlegung über die fingierte Zentrifugalkraft.

Mit Hilfe einer fingierten Zentrifugalkraft läßt sich auch die oben angeführte HUYGENSSCHE Ableitung in eine einwandfreie Form bringen auf Grund folgender Überlegung: Der im Kreise um den Mittelpunkt M umlaufende Punkt würde, wenn er nicht gezwungen wäre, in der Kreis-

bahn zu bleiben, sich mit der Beschleunigung v^2/ρ von dem Kreise entfernen; er verhielte sich dann so, als ob eine Kraft von der Größe mv^2/ρ auf ihn wirkte. Da der Massenpunkt dieser fingierten Kraft nicht folgt, so müssen auf ihn Kräfte wirken, die diese fingierte Kraft gerade aufheben. Es müssen also (Fig. 16) die fingierte Zentrifugalkraft AD' , die Schwere AB und die Fadenspannung AC einander das Gleichgewicht halten. Hiernach ergibt sich leicht wie früher aus dem Parallelogramm $ABGD'$ die Formel für die Umlaufzeit. Zerlegt man AD' und

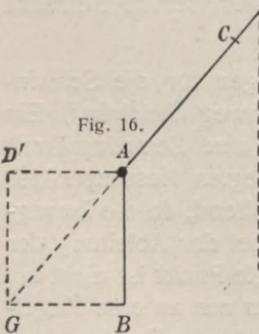


Fig. 16.

AB in Komponenten in Richtung des Fadens und senkrecht dazu, so sieht man, daß die letzteren sich aufheben, die ersteren zur Fadenspannung AG summieren. Diese Summierung hat allerdings hier nur for-

male Bedeutung, Rechenschaft dafür gewinnt man erst auf anderem Wege (siehe oben).

Unter den Anwendungen der Theorie des Zentrifugalpendels kommen namentlich der auf seitlich geneigter Schienenbahn laufende Eisenbahnwagen und die Kugelschwebe in Betracht. Unzutreffend ist es auch hier, die auf den Schwerpunkt wirkende Schwere in zwei Komponenten zu zerlegen, von denen die eine senkrecht zur Bahn, die andere in der Richtung nach dem Mittelpunkt des vom Schwerpunkt beschriebenen Kreises gelegen ist. Die korrekte Behandlung kann entweder nach dem Prinzip der Ersatzkraft, oder nach dem der fingierten Zentrifugalkraft geschehen. Im ersten Fall (Fig. 17) ist SR die an Stelle des Schienenwiderstands substituierte Kraft, SG die Schwere, und SC die resultierende Zentripetalkraft. Oder man bedient sich der fingierten Zentrifugalkraft SC' , die mit der Schwere zusammen eine gegen die Schienenbahn senkrechte Resultierende ergeben muß. Ebenso ist auch die Bewegung eines Radfahrers längs einer Kurve zu behandeln.¹⁾

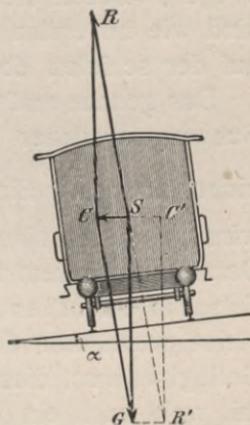


Fig. 17.

Über die Bewegung einer Kugel in einem Trichter oder in einer Kugelschale ist in neuerer Zeit mehrfach verhandelt worden, ich begnüge mich, auf die bezüglichen Veröffentlichungen zu verweisen.²⁾

§ 26. 6. Stück: Das Pendel.

1. Das Problem des Fadenpendels. Von der Unterstufe her sind die beiden Gesetze bekannt, daß die Schwingungsdauer (nahezu) unabhängig von der Amplitude, und daß sie proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge ist. (Man versäume nicht, die entsprechenden Versuche hier gleich zu Beginn noch einmal vorzuführen.) Die Frage, wie diese Eigenschaften des Pendels zu erklären sind, hat bereits GALILEI wenigstens annähernd zu beantworten vermocht. Denn vergleicht man die Bahnen des schwingenden Massenpunktes bei einfacher und doppelter Größe des Ausschlags, so sind in entsprechenden Punkten im zweiten Fall die Beschleunigungen doppelt so groß wie im ersten, daher ist

1) Hiernach wäre die unrichtige Zeichnung bei JOCHMANN-SPIES, 17. Aufl. Fig. 77 richtig zu stellen.

2) GRIMSEHL, Z. U. XV 216; K. FUCHS, Z. U. XVI 86, 343; WEINHOLD XV 349; JOHANNESSEN XXI 86. Ferner GRIMSEHL, Lehrbuch (2) § 33, wo auch die parabolische Oberfläche einer rotierenden Flüssigkeit behandelt ist.

zum Durchlaufen des doppelten Weges eine gleich große Zeit erforderlich.¹⁾ Vergleicht man ferner die Wege, die bei einfacher und bei vierfacher Pendellänge unter Voraussetzung desselben Ausschlagswinkels zurückgelegt werden, so sind die Beschleunigungen an entsprechenden Punkten stets gleich groß, und da die Wege zwischen diesen Punkten im zweiten Fall viermal so groß sind wie im ersten, so ist dazu (gemäß den Gesetzen des Falles auf der schiefen Ebene) die doppelte Zeit erforderlich.

Das genaue mathematische Gesetz für den Zusammenhang der Schwingungsdauer T mit den Größen l und g hat GALILEI noch nicht gefunden.²⁾ Ein Weg zur Auffindung der Gleichung $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ wird uns durch eine Beobachtung am Zentrifugalpendel gewiesen. Dem, der mit dem Zentrifugalpendel Versuche anstellt, kann die Tatsache kaum entgehen, daß die Schwingungsdauer dieselbe bleibt, wenn man das Pendel als ebenes Pendel schwingen läßt. Gelingt es uns, diesen Zusammenhang aufzuklären, so dürfte damit wohl auch ein Verständnis der Bewegung des ebenen Pendels gewonnen werden. Nun erfolgt die Bewegung des Fadependels (abgesehen von der Krümmung der Bahn) längs des Durchmessers des Kreises, den das Zentrifugalpendel beschreibt und fällt nahe zusammen mit der Projektion des im Kreise laufenden Massenpunktes auf den Durchmesser. Diese Projektion kann durch einen schönen Versuch³⁾ auf einem Schirm sichtbar gemacht werden, und es ist gut, dies zu tun, ehe man in die mathematische Analyse der Sinusbewegung eintritt.

Diese Analyse selbst wird in bekannter Weise ausgeführt (O. § 11), es ergibt sich daraus die Gleichung

$$T = 2\pi/\sqrt{b_1},$$

wenn b_1 die charakteristische Beschleunigung ist, d. h. die Beschleunigung, die dem längs des Durchmessers schwingenden Punkte im Abstand 1 von der Mittellage zukommt. Dabei ist die Beschleunigung b in irgend einem anderen Punkte des Durchmessers durch die Beziehung $b = -b_1 x$ mit b_1 verknüpft, wenn x den Abstand dieses Punktes vom Mittelpunkte bedeutet.

1) Ähnlich auch bei MACH, *Naturl. f. ob. Kl.* § 44.

2) Bewundernswert ist gleichwohl, wie er den angenäherten Wert

$T = 8\sqrt{\frac{l}{g}}$ ermittelt hat. Vgl. MACH, *Mechanik* (4) S. 167.

3) HÖFLER, *Physik* § 12 und *Z. U.* XIII 65; POSKE, *Oberstufe* § 11.

Ist andererseits ein Punkt gegeben, der gemäß dem Gesetz $b = -b_1 x$ in der Zeit T auf einer Geraden hin- und hergeht, so kann man dessen Bewegung stets ansehen als die Projektion einer gleichförmigen Kreisbewegung, die in derselben Zeit T auf einem Kreise verläuft, dessen Durchmesser die Bahn des hin- und hergehenden Punktes ist. Es ist selbstverständlich, daß man hier anschließend an den Wert $x = a \sin \frac{2\pi}{T} t$ den Begriff der Sinusschwingung (oder der harmonischen Bewegung) erörtert. Diese erfordert eine recht sorgfältige Durcharbeitung, bei der die Werte von x und v etwa für Intervalle von $\frac{T}{12}$ zu berechnen und zusammenzustellen sind.

Nunmehr ist die Schwingung des ebenen Fadenpendels zu der mathematisch beschriebenen Sinusschwingung in Beziehung zu setzen. Durch Analyse der Pendelbewegung (O. § 17) ergibt sich, daß der Massenpunkt den Bogen mit der Beschleunigung $b = -\frac{gs}{l}$ durchläuft, wenn s die zugehörige halbe Sehne bedeutet. Ist der Ausschlagswinkel des Pendels so klein, daß der Bogen mit der Sehne nahezu zusammenfällt, so bewegt sich der Massenpunkt fast genau so, wie ein längs der Sehne nach demselben Gesetz hin- und hergehender.¹⁾ Da nun die charakteristische Beschleunigung in diesem Falle $b_1 = \frac{g}{l}$ ist, so folgt durch Einsetzen

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{b_1}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Der Vergleich mit der Gleichung für das Zentrifugalpendel (S. 257) zeigt, daß sich die Werte von T nur um den Faktor $\sqrt{\cos \alpha}$ unterscheiden, der selbst für merkliche Werte von α noch nicht erheblich von 1 verschieden ist.²⁾

Bei größerem Ablenkungswinkel hört die Übereinstimmung

1) Der Fehler beträgt erst bei einem Ausschlagswinkel von $11,5^\circ$ etwa $\frac{1}{2}\%$. Eine mathematisch besser definierte Annäherung erhält man, wenn man im Ausdruck für die Komponente der Schwere, $g \sin \alpha$, den Bogen für den Sinus setzt; dann ist die Beschleunigung längs des durchlaufenen Bogens proportional mit α , d. h. mit dem von der Mitte aus durchlaufenen Bogenstück. Denkt man den Bogen seiner vollen Länge nach zur Geraden gestreckt, so wird auf diese die obige Entwicklung ebenfalls anwendbar. Man vgl. MACH, Naturl. f. ob. Kl. § 46.

2) Für $\varphi < 15^\circ$ ist $\sqrt{\cos \varphi} > 0,9828$.

auf, da die Größe von T beim Zentrifugalpendel mit wachsendem Winkel abnimmt, beim Fadenpendel dagegen zunimmt.¹⁾

Ich bin nach meinen Erfahrungen der Ansicht, daß die im Vorstehenden angedeutete Ableitung auch für eine Gymnasialprima nicht zu schwierig ist und daß man sie nicht zu der Klasse der „gekünstelten Deduktionen“ zählen darf, von denen im übrigen die elementaren Lehrbücher der Physik zu säubern dringend geboten ist. Mir erscheint die obige Ableitung sogar als unentbehrlich für die Einführung in die Betrachtung der Schwingungsbewegung und der Wellenbewegung überhaupt. Man wird nicht leicht ein Kapitel angeben können, in dem mathematische Analyse und experimentelle Prüfung so innig Hand in Hand gehen.

H. E. TIMERDING hat neuerdings²⁾ die älteren Versuche einer elementaren Ableitung des Pendelgesetzes kritisch beleuchtet. Er erkennt in dem interessanten und methodisch bedeutsamen SCHELLBACHSchen Verfahren³⁾ das Elementare nicht in einer Vermeidung der infinitesimalen Schreibweise, sondern in der Ausmerzung des Infinitesimalbegriffs; eben dies macht die schwache Seite der Ableitung aus, die im übrigen allen anderen elementaren Ableitungen darin voraus ist, daß sie auch das erste Glied der die Abhängigkeit vom Ausschlagswinkel φ darstellenden

$$\text{Reihe mit angibt } \left[T = \left(1 + \frac{\varphi^2}{16} \right) 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \right].$$

Eine andere von P. REIS herrührende und vielfach benutzte Ableitung⁴⁾ bedient sich der Gleichung zwischen Arbeit und lebendiger Kraft und benutzt eine elegante geometrische Deutung, die es ermöglicht, die eine der erforderlichen Integrationen durch die Rektifikation des Kreises zu ersetzen. Damit aber kommt in die Ableitung, bei aller mathematischen Feinheit, etwas Gekünsteltes, Zurechtgeschobenes, womit man sich heutzutage nicht mehr wird recht befreunden mögen.

Eine halbinduktive Herleitung hat FR. MÜLLER (Progr.-Abh. 1887; Z. U. I 87) vorgeschlagen, wobei er sich auf die experimentell gefundene Übereinstimmung der Schwingungsdauer des Zentrifugalpendels und

1) Es dürfte nicht überflüssig sein, genaue Zahlenangaben darüber zu machen, um wieviel sich die Schwingungsdauer ändert, wenn man zu größeren Ausschlagswinkeln übergeht. Nach TRAPPE-MASCHKE, Schulphysik (15. Auflage), ist für ein Pendel, dessen Schwingungsdauer T bei verschwindend kleinem Ausschlagswinkel = 1 Sek. ist,

bei dem Schwingungsbogen von	4°	$T = 1,000\ 08$	Sek.,
„ „ „ „	6°	$T = 1,000\ 17$	„ „
„ „ „ „	8°	$T = 1,000\ 31$	„ „
„ „ „ „	10°	$T = 1,000\ 48$	„ „

2) TIMERDING, Das Mathematische, S. 49 ff.

3) K. SCHELLBACH, Neue Elemente der Mechanik, Berlin 1860; TIMERDING a. a. O., S. 49.

4) TIMERDING a. a. O. S. 52.

des gewöhnlichen Fadenpendels stützte. Er konnte demzufolge die für das erstere gefundene Formel unter Voraussetzung kleiner Schwingungen ohne den Faktor $\cos \alpha$ auf das letztere anwenden. Doch hat MÜLLER selbst das Unzulängliche dieser Herleitung gefühlt und sich später dem oben erwähnten von REIS herrührenden Verfahren angeschlossen (T. S. 78).

Ein ebenfalls halbinduktives Verfahren (ich möchte es lieber pseudo-induktiv nennen) hat W. LOREY¹⁾ im Anschlusse an RIECKES Experimentalphysik (1. Aufl. S. 56) empfohlen. Es wird experimentell das Gesetz festgestellt

$$T_1^2 : T_2^2 = l_1 : l_2.$$

Ist nun für $T = 1$ die Pendellänge $l = 99,4$ cm gefunden, so erhält man

$$T^2 = \frac{l}{99,4},$$

worin $\frac{1}{99,4}$ die Proportionalitätskonstante der vorhergehenden Proportion darstellt. Nun ist die Pendelbewegung verwandt mit der Bewegung des freien Falls, die durch die Naturkonstante g charakterisiert ist; andererseits ist sie eine Kreisbewegung, wofür die mathematische Konstante π charakteristisch ist. „Nach Analogie [?] kann man daher erwarten, daß die Naturkonstante $\frac{1}{99,4}$ sich durch g und π ausdrücken läßt“. Nun ist $99,4 = \frac{981}{9,86} = \frac{g}{\pi^2}$, man erhält also das Pendelgesetz für die Dauer einer einfachen Schwingung $T = \pi \sqrt{l/g}$. LOREY sagt selbst, daß damit kein Beweis geliefert sein solle, ich kann aber nicht einmal zugeben, daß damit das Auftreten von π und g erklärlich gemacht sei. Es ist eine willkürliche und zufällige Substitution, die trotz aller Verwahrung des Lehrers doch leicht in den Schülern den Eindruck hinterläßt, als ob auf solchem Wege Gesetze gefunden oder gar Beweise geliefert werden könnten. Mag man darüber vom mathematischen Standpunkte denken, wie man will, vom physikalischen Standpunkte aus muß man ein solches Verfahren ablehnen. Lieber gar keine Aufklärung als eine solche Plausibelmachung. Zulässig wäre dagegen eine Verifikation der ohne Beweis mitgeteilten Formel mit Hilfe der empirisch gefundenen Zahl 99,4.

In experimenteller Hinsicht ist ROSENBERGS Vorschlag (II 48) beachtenswert, die Abhängigkeit von der Länge recht exakt zu prüfen, indem man etwa drei bifilare Pendel mit den Längen 1 : 4 : 9 an der Zimmerdecke aufhängt und die Anzahl der Schwingungen pro Minute zählt. Die Abhängigkeit von der Fallbeschleunigung zeigt man mit dem bekannten geneigten Pendel von MACH oder dessen Abänderungen nach OOSTING und QUEISSER (ROSENBERG II 49). Sehr gut kann man nach

1) Zeitschr. f. d. mathem. u. naturw. Unterr. XXXV S. 24 (1905).

W. KÖNIG (Z. U. VII 84) dazu auch ein schief gestelltes Metronom benutzen.

Für die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Größe der Erdschwere empfiehlt ROSENBERG auch den Analogieversuch mit einer schwingenden Magnetnadel; noch geeigneter ist es wohl, eine Eisenkugel schwingen zu lassen und die Schwingungsdauer durch einen untergestellten Magneten zu verändern.

Unter den Anwendungen ist besonders wichtig die Berechnung der Länge des Sekundenpendels und deren Prüfung durch den Versuch; ferner die Berechnung von g (am besten an dem langen Fadenpendel, mit dem der Versuch über die Projektion des Zentrifugalpendels ausgeführt wurde). Hierbei drängt sich die Notwendigkeit auf, auch die Schwingungen physischer Pendel näher zu untersuchen (Nr. 3). Auch der Schluß auf die Veränderlichkeit von g mit der geographischen Breite aus des Astronomen RICHER Beobachtungen (O. § 17, 4) gehört hierher.

Endlich ist auf die Unabhängigkeit der Schwingungsdauer von Stoff und Gewicht der schwingenden Masse hinzuweisen, durch deren experimentelle Bestätigung NEWTON und BESSEL den schärfsten Beweis dafür geliefert haben, daß am selben Ort der Erde alle Körper die gleiche Schwerebeschleunigung erfahren.

2. Andere pendelartige Schwingungen. Es gibt eine Reihe von Schwingungsvorgängen, die genau dem Kraftgesetz der harmonischen Bewegung folgen, bei denen also die Kraft streng proportional der Ausweichung aus der Ruhelage ist. Auf diese Vorgänge ist das Schwingungsgesetz $T = \frac{2\pi}{\sqrt{b_1}}$ ohne die Beschränkung auf kleine Amplituden anwendbar. Das Gesetz wird zweckmäßig auf die Form gebracht

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}},$$

worin k_1 die auf die Masse m im Abstand 1 von der Gleichgewichtslage ausgeübte Kraft bedeutet.

Die hierher gehörigen Fälle hat FR. C. G. MÜLLER¹⁾ eingehend behandelt: 1. Flüssigkeit in einem U-förmigen Rohr, die durch taktmäßiges Hin- und Herbewegen in Schwingung versetzt wird. Man bestimmt zweckmäßig die Anzahl der Schwingungen pro Minute $n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m}}$; berechnete und beobachtete Schwingungszahl stimmen sehr befriedigend überein. Verdoppelt man die Masse, so

1) MÜLLER, Z. U. II 115 und Technik, S. 79 ff.

vermindert sich die Schwingungszahl im Verhältnis $\sqrt{2}:1$, bei vierfacher Masse im Verhältnis $2:1$; gleiche Volumina anderer Flüssigkeiten (Äther, Quecksilber) haben die gleiche Schwingungszahl wie Wasser, dagegen verhalten sich bei gleichen Gewichten die Schwingungszahlen wie die Quadratwurzeln aus den spezifischen Gewichten. Eine Variante des Versuchs besteht darin, daß man ein (an der Biegung mit einem Hahn versehenes) U-förmiges Rohr mit den Öffnungen nach unten in zwei Gefäße mit Flüssigkeit senkt, das Rohr zum Teil mit der Flüssigkeit füllt und diese durch Heben und Senken des einen Gefäßes in Schwingung bringt (Z. U. II 119); dabei ist die große Menge Flüssigkeit in den Gefäßen ohne Einfluß auf die Schwingungsdauer. Die Schwingungen werden durch beigemischtes Eisenoxydhydrat (mittels einiger Tropfen Eisenchloridlösung und Ammoniak erzeugt) deutlich sichtbar. — Ähnlich verlaufen

1. die Schwingungen des Quecksilbers in der TORRICELLISCHEN Röhre bzw. im Barometer;
2. die Longitudinalschwingungen an Spiralfedern, z. B. einer Federwage von 25 kg* Tragkraft bei Belastung mit 20 kg* (MÜLLER);
3. die Transversalschwingungen von Stahlstreifen, die an einem Ende befestigt, am anderen durch ein Gewicht beschwert sind;
4. die Schwingungen einer an der ATWOODSCHEN Fallmaschine aufgehängten Kette (MÜLLER-PFAUNDLER, 9. Aufl. I § 42).

3. Das physische Pendel. Das Problem ergibt sich einfach daraus, daß beim Fadenpendel das Gewicht des Fadens oder des Aufhängedrahtes streng genommen nicht vernachlässigt werden darf, mehr noch daraus, daß die im praktischen Leben vorkommenden Pendel (besonders Uhrpendel) von dem Ideal des „mathematischen“ Pendels stark abweichen. Vor Augen gestellt wird das Problem dadurch, daß man ein Fadenpendel und eine Holzstange von derselben Länge gleichzeitig schwingen läßt und ganz roh den Unterschied der Schwingungsdauern feststellt.

Es ist das Verdienst von CHRISTIAN HUYGENS, dies Problem bewältigt zu haben, dessen Behandlung nach FR. C. G. MÜLLERS Wort den Gipfel der Schulmechanik bedeutet. Im Unterricht ist die Anknüpfung an die Betrachtungsweise von HUYGENS jeder anderen bei weitem vorzuziehen; abgesehen davon, daß sie direkt in den Gedankengang eines großen Forschers einführt, bietet sie

auch den natürlichsten Zugang zu dem Begriff des Trägheitsmomentes.

Eine Darstellung der HUYGENSSchen Betrachtungsweise findet man bei MACH.¹⁾ Der an GALILEISCHE Vorstellungen anknüpfende Grundgedanke von HUYGENS ist der, daß der Schwerpunkt der im physischen Pendel miteinander verbundenen Massen gerade nur so hoch steigen kann, wie er herabgesunken ist, gleichviel, ob die Massen verbunden bleiben oder ob ihre Verbindungen aufgelöst werden. MACH hat hiernach die Gleichungen aufgestellt, die zur Auffindung des „Schwingungspunktes“ und somit der reduzierten Länge führen. Einfacher gestaltet sich die Entwicklung, wenn man von vornherein das Prinzip der Erhaltung der Arbeit benutzt, d. h. die Summe der beim Fallen des Pendels bis zur tiefsten Lage verlorenen Arbeiten gleich der Summe der gewonnenen Bewegungsenergieen (lebendigen Kräfte) setzt.

Wir denken uns zur Vereinfachung längs einer starren Linie eine Anzahl von schweren Massenpunkten m_1, m_2, m_3, \dots in den Abständen r_1, r_2, r_3, \dots von der Achse angebracht und stellen zunächst eine Vorbetrachtung an. Wären die Massenpunkte getrennt voneinander und könnte jeder für sich schwingen, so würde der dem Drehpunkt nächste von ihnen die kürzeste Schwingungsdauer, der entfernteste die längste Schwingungsdauer haben. (Zur Erläuterung sind einfache Versuche anzustellen, wie sie z. B. ROSENBERG II 50 angibt.) Sind sie alle miteinander verbunden, so werden die näheren Massenpunkte die entfernteren beschleunigen, die entfernteren die näheren verzögern, und das ganze System wird eine mittlere Schwingungsdauer annehmen, wie sie bei freier Beweglichkeit einem mittleren unter diesen Punkten zukäme. Dieser Punkt wird der Schwingungspunkt des Systems genannt, sein Abstand vom Drehpunkt die reduzierte Pendellänge.

Die mathematische Durchführung des oben angegebenen Gedankens gestaltet sich nun sehr einfach. Ein Punkt im Abstände l von der Achse habe die Falltiefe h , dann hat ein Massenpunkt m_1 im Abstände r_1 die die Falltiefe $r_1 h$ und so fort, daher ist die Summe der verlorenen Arbeiten

$$m_1 g \cdot r_1 h + m_2 g \cdot r_2 h + \dots = gh \sum m r.$$

Andererseits sei v die Geschwindigkeit, die ein Punkt im Abstand l beim Herabfallen um die Höhe h erlangt, dann ist Geschwindigkeit des Mas-

1) MACH (4) 179 ff.

senpunkts m_1 im Abstand r_1 gleich $r_1 v$ und so fort, demnach die Summe der Bewegungsenergieen

$$\frac{m_1 r_1^2 v^2}{2} + \frac{m_2 r_2^2 v^2}{2} + \frac{m_3 r_3^2 v^2}{2} + \dots = \frac{v^2}{2} \sum m r^2.$$

Wir erhalten also die Gleichung

$$(1) \quad gh \sum m r = \frac{v^2}{2} \sum m r^2.$$

Es sei nun l der Abstand des Schwingungspunkts, der mit dem System die gleiche Schwingungsdauer hat, von der Achse, so gilt für diesen ebenfalls

$$(2) \quad ghml = \frac{v^2}{2} ml^2 \quad \text{oder} \quad gh = \frac{v^2}{2} l.$$

Durch Einsetzen in Gleichung (1) folgt sofort

$$(3) \quad l = \frac{\sum m r^2}{\sum m r}$$

und endlich die Schwingungsdauer

$$(4) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m r^2}{g \sum m r}}.$$

Man kann hierin noch umformen

$$\sum m r = M d,$$

wenn M die Gesamtmasse, d den Abstand des Massenmittelpunkts von der Achse bedeutet. Dann wird

$$(5) \quad l = \frac{\sum m r^2}{M d},$$

$$(6) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum m r^2}{g M d}}$$

oder wenn $g M d = P d = D$ gesetzt wird,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}}.$$

Der Ausdruck $J = \sum m r^2$ hat erst lange nach HUYGENS durch EULER den Namen Trägheitsmoment erhalten, D bedeutet das Drehungsmoment, das der Pendelstab durch das Gesamtgewicht der an ihm angebrachten Massen erfährt, wenn er um 90° aus der Ruhelage entfernt ist.¹⁾

Diese mathematische Ableitung hat E. SCHULZE (Z. U. XXI 223) durch einen sinnreich konstruierten Apparat sehr schön der Anschauung nahe gebracht, und so das HUYGENSSCHE „Gedankenexperiment“ durch ein

1) Die Bezeichnung J (von Inertia) für das Trägheitsmoment ist in der Technik allgemein gebräuchlich, auch vom Deutschen Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen (Liste B) vorgeschlagen.

wirkliches ersetzt.¹⁾ An den Haken einer eisernen Querstange sind sieben Pendel bifilar aufgehängt (Fig. 18), das mittelste und längste an dünnen Holzleisten, die anderen an dünnen Stahldrähten. Die Pendelkugeln sind 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 dm von der Achse entfernt und auf Querstangen gesteckt, derart, daß die oberste Querstange auf den Drähten

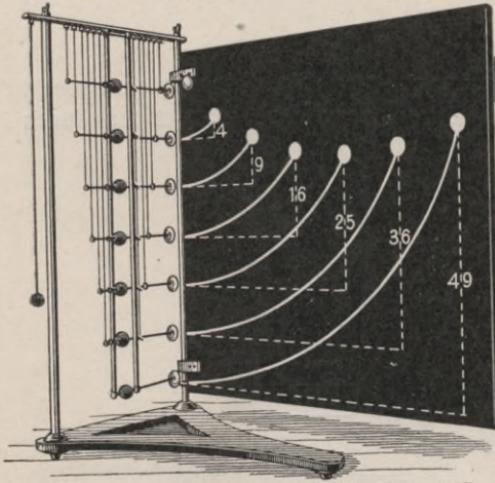


Fig. 18.

aller anderen Kugeln aufliegt. Bei der Abwärtsbewegung bilden also die Kugeln ein zusammenhängendes System, im tiefsten Punkte dagegen lösen sich die Pendel und schwingen jedes für sich mit der erlangten Geschwindigkeit weiter, voraus fliegt das längste Pendel, ihm folgen die anderen. Die Steighöhen werden durch weiße Pappscheiben sichtbar gemacht, die auf das eine Ende der Querstäbe aufgesteckt sind. Stellt man neben dem Apparat eine schwarze Papptafel parallel zur Schwin-

gungsrichtung auf, so lassen sich auf dieser die Steighöhen leicht markieren, beispielsweise findet man, wenn die Fallhöhen 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm waren, die Steighöhen 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 cm. Hierbei stellt sich also heraus, daß für die fünfte Kugel genau die Steighöhe gleich der Fallhöhe ist. Die empfehlenswerte Durchführung der Zahlenrechnung für die Gleichung „Arbeit = Bewegungsenergie“ führt zu demselben Resultat. An die Zahlenrechnung kann sich dann sogleich die obige allgemeine Entwicklung schließen.

Die Bestätigung des gefundenen Resultats läßt sich zunächst nur an Systemen von getrennten Massen vornehmen. Vorzüglich eignen sich dazu die oben erwähnten Pendel von ROSENBERG (II 50).

Für die Anwendung der Pendelformel auf andere schwingende Körper ist noch die Berechnung der entsprechenden Trägheitsmomente erforderlich (s. weiter unten). Nimmt man voraus, daß für eine prismatische oder zylindrische Stange von der Länge a der Wert des Trägheitsmoments gleich $\frac{1}{3}Ma^2$ ist, und setzt $Md = M \cdot a/2$, so erhält man die reduzierte Länge $l = \frac{2}{3}a$. Macht man nun einen Messingdraht von 3 mm Stärke, der sorgfältig gerade gerichtet ist, um eine an sein eines

1) Über einen Vorversuch mit nur zwei Kugeln vergleiche man die Originalabhandlung, ebenso über die genauere Technik und die methodische Auswertung der Versuche.

Ende angelötete Achse drehbar, so kann man dies leicht mit Hilfe eines Fadenpendels bestätigen. Weiteres in Nr. 5.

4. Das Trägheitsmoment. Die Bedeutung des Trägheitsmoments reicht über sein Auftreten in der Theorie des physischen Pendels hinaus. Es spielt eine wichtige Rolle überall, wo eine um eine Achse drehbare Masse (z. B. ein Schwungrad) durch Kräfte in Rotation versetzt wird.

Man erkennt schon aus der Behandlung des physischen Pendels, daß die einer Masse durch eine bestimmte Kraft erteilte Beschleunigung je nach ihrem Abstand von der Achse verschieden ist. Um dies für die Rotation überhaupt festzustellen, ist zunächst der experimentelle Weg einzuschlagen. Mit Hilfe eines der unten angegebenen Apparate ermittelt man leicht, daß eine Masse im Abstände 2 ersetzt werden kann durch die vierfache Masse im Abstände 1, ohne daß sich bei gleicher treibender Kraft die Winkelbeschleunigung ändert. An demselben Apparat wird man auch die Begriffe Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung erläutern, ehe man zur mathematischen Behandlung übergeht. Aber selbst wenn man die Formel für das Trägheitsmoment nicht mathematisch ableiten will, empfiehlt es sich doch, diese Versuche anzustellen, um eine klare Vorstellung von dem Verhalten der Massen bei der Rotation zu geben. Den tieferen Grund dafür, daß der Einfluß der Masse mit dem Quadrat des Radius zunimmt, lehrt freilich erst die mathematische Analyse genau verstehen.

Experimentelles. Das Prinzip der am meisten zu empfehlenden Vorrichtung hat FR. C. G. MÜLLER vor langer Zeit angegeben.¹⁾ Eine um eine lotrechte Achse drehbare Scheibe wird in beschleunigte Drehung versetzt vermittelt eines um die Achse gewickelten Fadens, der über eine Rolle geführt und durch ein Gewicht belastet ist. M. KOPPE (Z. U. V 8; 1891) hat den Apparat so umgestaltet, daß die Scheibe durch ein leichtes hölzernes Lineal ersetzt ist, auf dem Massen von bestimmter Größe in verschiedenen Abständen von der Achse angebracht werden können. Gemessen wird die Zeit eines oder mehrerer halber Umläufe. — FR. C. G. MÜLLER hat (1895) einen Universalapparat für die Mechanik („Krinolinenapparat“) angegeben, der auch zur Demonstration des Trägheitsmomentes bestimmt ist (Z. U. VIII 194 und XIV 71). Der Apparat hat als Hauptteil einen sehr leichten auf Spitzen drehbaren Magnesiumring von 1 cm Radius, mit dem schwerere Ringe von verschiedenen Radien,

1) Progr.-Abh. Brandenburg a. H. 1887 und Z. U. II 205 (1888).

sowie Scheiben und andere Gebilde verbunden werden können. Gemessen wird die Umlaufszeit. — SPIES hat (Z. U. XX 137; 1907) den Apparat von KOPPE so abgeändert, daß die Zeit bis zur Erreichung einer bestimmten Umlaufgeschwindigkeit gemessen wird, indem dann ein umklappbarer Hebel durch Zentrifugalkraft zu hörbarem Anschlagen gebracht wird. — GRIMSEHL beschreibt (Lehrbuch (2) § 64) einen Apparat, der dem von KOPPE ähnlich, aber mit einem langen dünnen Draht an der Decke des Zimmers angehängt ist; es wird die Zeit beobachtet, die verfließt, bis das ziehende Gewicht um eine bestimmte Strecke herabgesunken ist.

Ein von NOACK konstruierter „Apparat zur Einführung in die Lehre vom Trägheitsmoment“ (Z. U. V 195) beruht auf der Verwendung von Torsionsschwingungen eines Messingdrahts von 49 cm Länge, an den ein Bleizylinder von 1000 g Masse nebst einem leichten Balken aus Aluminiumrohr von 45 cm Länge, angehängt ist. Der Apparat ist mehr für die Anwendung des Trägheitsmoments auf die Behandlung der Torsionsschwingungen geeignet. Ein von HARTL ersonnenes Rad (V 76), vertikal an der Wand anzubringen, ist weniger zur Einführung in die Lehre als zur Bestätigung der Gesetze des Trägheitsmoments, insbesondere zum Nachweis der Richtigkeit der für Scheiben und Körper verschiedener Form berechneten Trägheitsmomente, geeignet. — Dasselbe dürfte auch von dem Apparat von HÖFLER (Z. U. VII 234) gelten, der zugleich ein ausgezeichnetes Hilfsmittel ist, die Versuche über Trägheitsmomente mit den Anfangsversuchen über beschleunigte Bewegung zu verknüpfen.¹⁾

Nachdem die in Betracht kommenden Begriffe des Drehmoments und des Trägheitsmoments durch die vorbereitenden Versuche zur Klarheit gebracht sind, wird die mathematische Behandlung keine Schwierigkeit mehr machen. Die zu lösende Aufgabe läßt sich in folgende vereinfachte Form bringen: *Ein Massenpunkt m sei an einem Arm r um eine Achse drehbar angebracht, senkrecht gegen den Arm wirke eine Kraft k im Abstände a von der Achse. Wie groß ist die Winkelbeschleunigung β , die die Masse erfährt? —*

Die Ableitung nimmt leicht den formalen Charakter einer bloßen Elimination an, wenn man nicht einen Weg wie etwa folgenden einschlägt, nachdem man die Größen a , r , k , m an dem bereits vorgeführten Demonstrationsapparat erläutert hat: Man ersetze die Kraft k durch eine an m selbst angebrachte k' , dann ist $k' = \frac{ka}{r}$; 2. die von k' an m hervorgebrachte lineare Beschleunigung ist $b = \frac{k'}{m} = \frac{ka}{mr}$; 3. die ihr ent-

1) Darauf bezügliche vortreffliche didaktische Bemerkungen findet man in der genannten Abhandlung, vgl. auch HÖFLER, Physik, S. 147 und Leitaufg. 92.

sprechende Winkelbeschleunigung ist $\beta = \frac{b}{r} = \frac{ka}{mr^2}$.¹⁾ Hierin bedeutet ka das Drehmoment (D) der Kraft, mr^2 das Trägheitsmoment J . Dieses letztere kann als „Ersatzmasse“ aufgefaßt werden, die, im Abstand 1 von der Achse angebracht, durch das vorhandene Drehmoment dieselbe Winkelbeschleunigung erfahren würde, wie die Masse m im Abstände r . Hiermit hat der Ausdruck mr^2 , der zuerst beim physischen Pendel auftrat, seine physikalische Deutung erhalten.²⁾

An dieser Stelle ist auch die bemerkenswerte Analogie zu beachten, die zwischen den Gleichungen für translatorische Bewegung und für Rotation besteht. Es entsprechen sich:

$$b = \frac{k}{m} \quad \text{und} \quad \beta = \frac{D}{J}.$$

Wie in der Gleichung $b = k/m$ die Kraft k das der Beschleunigung Förderliche, die Masse m das der Beschleunigung Hinderliche [den Trägheitswiderstand] bedeutet, so ist auch in der Gleichung $\beta = D/J$ das Drehmoment D das der Winkelbeschleunigung Förderliche, das Trägheitsmoment J das ihr Hinderliche.³⁾

Entsprechend ist auch das Verhältnis zwischen der Schwingungsdauer des Fadenpendels und des physischen Pendels:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{und} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}}.$$

Für eine größere Zahl von Massen, die mit derselben Achse starr verbunden sind, ergibt sich sofort die Größe des Trägheitsmoments $J = \sum mr^2$, sofern es sich um einzelne getrennte Massen, die als punktförmige angesehen werden können, handelt.

Gegen die Anwendung des Ausdrucks $\sum mr^2$ auf kontinuierlich zusammenhängende Massen hat TIMERDING (a. a. O. S. 54) vom Standpunkt des Mathematikers mit Recht Bedenken erhoben. Er sagt u. a.: „Das

1) Man kann den Sinn dieser Formeln noch weiter verdeutlichen durch folgende Überlegung: Eine Kraft k am Arme 1 erteile der Masse m an demselben Arme die (Winkel-)beschleunigung β ; läßt man nun dieselbe Kraft am gleichen Arm, auf eine gleiche Masse m wirken, die sich im Abstand 2 von der Achse befindet, so kommt erstens die Kraft im doppelten Abstand von der Achse nur mit der halben Stärke zur Wirkung, und zweitens entspricht der erlangten Beschleunigung eine nur halb so große im einfachen Abstände. Dadurch wird also die Beschleunigung eines Punktes im Abstände 1 (d. i. die Winkelbeschleunigung) auf $\frac{1}{4}$ der früheren herabgesetzt. (SPIES in Jochmanns Grundriß [17] S. 53).

2) Es ist öfter bemerkt worden, daß man mr^2 nicht schlechthin als Masse bezeichnen darf, da die Dimension eine andere ist. Gleichwohl ist obige Deutung ebenso zulässig wie die Deutung des Drehmoments durch die Kraft im Abstände 1 von der Achse.

3) HÖFLER, Physik, S. 146. Ähnliche Analogieen bestehen für die Arbeiten und Energien bei der Rotation, ebd. Leitaufg. 105–107.

Anstößige, was wir hier in den Lehrbüchern bewiesen finden, liegt nicht in dem, was sie sagen, sondern in dem, was sie verschweigen, in dem unvermittelten, unerklärten Übergang von den auf eine gerade Linie verteilten einzelnen Massenpunkten zu einem kontinuierlichen Körper. . . . Die Ehrlichkeit und Aufrichtigkeit fordert, daß wir nicht dem Schüler Worte sagen, mit denen wir einen anderen Sinn verbinden, als er darin erkennen kann. Die Klarheit verlangt, daß wir nicht eine Auseinandersetzung überspringen, die erst das wirkliche Verständnis erschließt. Diese Auseinandersetzung bedeutet aber hier ebenso wie in anderen Fällen, wir mögen es drehen und wenden wie wir wollen, die Einführung des Infinitesimalbegriffs.“

In der Tat ist, sofern die fundamentalen Begriffe im mathematischen Unterricht behandelt sind, der Übergang nicht schwer von der Schreibweise $\sum mr^2$ zu $\int r^2 dm$. Die Berechnung der am häufigsten vorkommenden Trägheitsmomente gestaltet sich dann überaus einfach.¹⁾ Für einen prismatischen oder zylindrischen Stab, der um den einen Endpunkt drehbar ist, ergibt sich z. B. der Wert $\frac{1}{3} Ml^2$, bei Drehung um den Mittelpunkt dagegen $\frac{1}{12} Ml^2$; für eine Kreisscheibe $\frac{1}{2} Mr^2$, für eine Kugel $\frac{2}{5} Mr^2$, für einen Hohlzylinder mit den Radien r und R der Wert $\frac{1}{2} M(r^2 + R^2)$.

5. Zur Prüfung der berechneten Trägheitsmomente verschiedener regelmäßig gestalteter Körper geben die oben erwähnten Apparate die Möglichkeit. Auch wird erst hier die genaue Auswertung der Versuche an der ATWOODSchen Fallmaschine unter Berücksichtigung des Trägheitsmoments des Rades möglich.²⁾ Abgesehen davon aber empfiehlt sich besonders die Anwendung auf das physische Pendel, dessen Betrachtung hiermit erst ihren Abschluß erreicht. Den einfachsten Versuch beschreibt MÜLLER (T. 84). Hat man für eine zylindrische Stange von der Länge a den Wert des Trägheitsmoments gleich $\frac{1}{3} Ma^2$ gefunden, so ergibt sich leicht die reduzierte Länge $l = \frac{2}{3} a$. Zur Prüfung benutzt man den schon in Nr. 3 erwähnten Messingdraht von 3 mm Stärke. Feilt man den Draht soweit ab, daß er halbe Sekunden schlägt, so findet man $l = 373$ mm und kann daraus sofort die Länge des Sekundenpendels ermitteln.

Es schließt sich hieran das Reversionspendel, für das eben-

1) Eine Anzahl von Berechnungen dieser Art z. B. bei GRIMSEHL (2) § 67; Berechnungen auf elementarem Wege u. a. bei HÖFLER, Physik, Leitaufg. 90.

2) WEINHOLD, D. (4) 71 verwendet zu diesem Behuf eine homogene Holz-scheibe von 100 g Masse, deren Trägheitsmoment dem einer Masse von 50 g am Umfang des Rades gleich ist.

falls MÜLLER eine einfache Vorrichtung angibt. Weitere Versuche über schwingende Scheiben usw. bei MÜLLER a. a. O., bei WEINHOLD (D.₄ 112). Über die Änderung des Trägheitsmoments bei Verlegung der Achse vgl. GRIMSEHL, L. (2) § 66 und Z. U. XVIII 35.

Endlich bilden die Torsionsschwingungen einer an einem Draht aufgehängten Kreisscheibe eine lehrreiche und der Rechnung zugängliche Anwendung. Man sehe den oben erwähnten Aufsatz von NOACK, sowie MÜLLER (T. 85). Letzterer weist auch auf die interessanten Beziehungen zu den Drehwagen von CAVENDISH und von BOYS (Z. U. III 37) hin. —

Ein auf die Hervorhebung des Energieprinzips gerichteter Unterricht darf auch die Energie rotierender Massen nicht außer Acht lassen. Die leichte Rechnung ergibt für die Energie einer rotierenden Masse den Wert $E = \frac{1}{2} J w^2$, wenn J wieder das Trägheitsmoment, w die Winkelgeschwindigkeit bedeutet. Die Besprechung der Aufspeicherung von Energie im Schwungrade wird sich unmittelbar anschließen.

Die Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit vom Trägheitsmoment, die mit der Erhaltung der Energie zusammenhängt, zeigt man an dem bekannten Freihandversuch mit einer an einem nicht ganz gespannten Faden herumgeschwungenen Kugel (Kastanie) oder an der einfachen Vorrichtung von HOLTZ (ROSENBERG II 33). Neuerdings kommen auch die schönen Versuche mit dem PRANDTLschen Drehschemel (ROSENBERG II 44) immer mehr in Aufnahme.

Die früheren Versuche über die Bewegung auf der schiefen Ebene finden erst hier ihren Abschluß durch den Nachweis, daß bei einer rollenden Kugel $\frac{2}{7}$ der Energie auf die Rotationsenergie der Kugel angerechnet werden müssen (O. § 29, 4).

Die Umwandlung von Rotationsenergie in potentielle Energie zeigt sehr schön ein von MAXWELL herrührender einfacher Apparat: ein kleines Rad, dessen beiderseits vorstehende Achse von zwei vertikalen Schnüren getragen wird und sich abwechselnd auf- und abwickelt (GIESELER, Z. U. XVIII 147; ROSENBERG II 33).

Hierher gehören endlich auch die Erhaltung der Rotationsenergie und Kreiselbewegung.

Die betreffenden Erscheinungen werden im wesentlichen nur experimentell behandelt und in „tunlichst populärer Weise“ auf das Beharrungsgesetz zurückgeführt. Für die Versuche sind außer dem einfachen Kreisel (SCHMIDT'sche Kreisel) und dem auf eine

Achse gesetzten Fahrrad, sowie dem Drehschemel (s. oben) noch BOHNENBERGERS Apparat und auch der FESSELSche Apparat zu empfehlen, da an diesen die Präzession in beiderlei Sinn, je nachdem die Schwere den Kreisel abwärts oder aufwärts treibt, demonstriert werden kann. Zur populären Einführung ist besonders das hübsche Buch von PERRY, „Der Drehkreisel“ geeignet, darin findet sich auch die leicht verständliche Erklärung der Präzession aus der Zusammensetzung zweier Drehbewegungen¹⁾ (O. § 32, 1).

Auch für die Präzession der Erdachse liefert dieses Prinzip die einfachste Erklärung. Schon wegen dieser kosmischen Erscheinung darf der ganze Abschnitt auf keinen Fall übergangen werden; sollte in dem Kursus der Mechanik dafür keine Zeit bleiben, so müßte in dem astronomischen Kursus darauf zurückgegriffen werden.

Der FOUCAULTSche Pendelversuch wird ebenfalls zweckmäßig im astronomischen Kursus vorgeführt und besprochen. Für die Erklärung empfehle ich das Prinzip der Zerlegung einer Drehbewegung (O. § 32, 2). Für den Versuch selbst ist neuerdings eine ganze Reihe von Anordnungen angegeben worden.²⁾

§ 27. Hydromechanik und Aeromechanik.

1. Während der Unterstufe eine eingehende methodische Bearbeitung dieser Gebiete zufiel, wird sich die Oberstufe mit einer systematischen Übersicht unter angemessener Ergänzung und Vertiefung begnügen müssen. Eine kursorische Wiederholung des Pensums der Unterstufe unter Einfügung einzelner charakteristischer Versuche ist natürlich, wo sie angestellt werden kann, von Wert. Auf manchen Schulgattungen wird die Zeit so knapp bemessen sein, daß im wesentlichen das auf der Unterstufe Gebotene ausreichen muß, und daß nur mehr beiläufig, wo sich dazu auf anderen Gebieten die Gelegenheit bietet, gewisse noch nicht erörterte Gegenstände berührt werden können. Zu solchen gehören namentlich die Molekularerscheinungen bei Flüssigkeiten, und die Erscheinungen der Diffusion bei Gasen.

Wo ein nochmaliges Eingehen auf diese Gebiete möglich ist,

1) Zur Theorie des Kreisels vgl. besonders M. KOPPE, Z. U. IV 70, VII 186, IX 127; über eine Dreifingerregel für den Kreisel A. SCHMIDT, Z. U. XVII 32, SCHICHT XXVI 240.

2) Man sehe die Literatur bei ROSENBERG II 214ff.; ferner E. ADOLPH, Z. U. VIII 312; SPIES, Z. U. XVIII 227 u. a.

wird es sich für die Hydromechanik namentlich darum handeln, die Prinzipien der Mechanik der Flüssigkeiten festzulegen und gleichzeitig den Unterschied zwischen einer fingierten unzusammendrückbaren Flüssigkeit, mit der sich die Unterstufe begnügen durfte, und elastisch kompressiblen Medien, wie es die Flüssigkeiten in Wirklichkeit sind, hervorzuheben. Es ist nicht ratsam, wie es wohl im Lehrbuch aus Gründen der Systematik geschieht, diese beiden Begriffe im Unterricht zu trennen.¹⁾

Ein zweiter hier zu behandelnder Gegenstand, der für die moderne Technik hochbedeutsam ist, ist die Stoßenergie bewegter Wassermassen. Eine hierfür geeignete nicht sehr kostspielige Einrichtung beschreibt MÜLLER (T. 109), ebenda eine solche für den Reaktionsdruck eines ausfließenden Wasserstrahls.²⁾ Daneben ist die Anschaffung eines RABESSCHEN Turbinenmodells (MÜLLER, 111) zu empfehlen, bei reicheren Mitteln auch die eines Turbinenapparats, der zum Betrieb einer kleinen Dynamomaschine dienen kann.³⁾

Bezüglich der Molekularerscheinungen bei Flüssigkeiten sei auf die oft genannten unterrichtstechnischen Werke verwiesen. —

2. Für die Aeromechanik gelten ähnliche Gesichtspunkte. Wo auf das BOYLE-MARIOTTESCHE Gesetz⁴⁾ noch einmal eingegangen werden kann, empfiehlt sich die Anstellung der Versuche in präziserer Form, als dies auf der Unterstufe in der Regel möglich ist. Eine große Anzahl von Apparaten sind gerade für diesen Zweck in neuerer Zeit beschrieben worden.⁵⁾ Sehr geeignet erscheinen MÜLLERS Apparat (T. 118), der die Änderungen des Volumens mit der Hahnluftpumpe herstellt und durch ein Quecksilbermanometer mißt⁶⁾, sowie diejenigen Vorrichtungen, bei denen der Zusammenhang von Druck und Volumen graphisch dargestellt wird. Mehr für Schülerübungen empfehlen sich die Versuche mit der MELDESCHEN Röhre (Z. U. I 168 u. a.). — Nicht übergangen sollte auch die Tatsache werden, daß die Gase bei

1) Über Apparate und Versuche hierzu vgl. MÜLLER, T. 95; ROSENBERG II, 54.

2) Man vgl. auch REICHEL, Z. U. IV 290.

3) Bei SAEGER u. Co. in Berlin; man vgl. auch GIESELER, Z. U. VI 35.

4) BOYLE hat das Gesetz bereits 1661 angegeben und die noch heute dafür üblichen Versuche (sowohl bei Verdichtung wie bei Verdünnung) beschrieben. MARIOTTE hat das Gesetz in seiner 1676 erschienenen Schrift *Essai sur la nature de l'air* allgemeiner bekannt gemacht.

5) ROSENBERG, I 85 ff.

6) Ähnlich auch der von NOACK beschriebene Apparat Z. U. XXV 17.

hohen Drucken, wie auch bei niederen, Abweichungen vom BOYLE-MARIOTTESchen Gesetz zeigen, die in der Wärmelehre weiterer Erörterung bedürfen.

Unter den neu hinzutretenden Gegenständen nimmt die Abnahme des Luftdruckes mit der Höhe die erste Stelle ein. Man darf sich hier nicht mit einer theoretischen Ableitung begnügen, sondern muß Versuche vorführen. An einen historischen Versuch von OTTO VON GUERICKE erinnert der Nachweis mit Hilfe einer luftgefüllten Flasche und empfindlichen Manometers (MÖLLER, T. 120).¹⁾

Ähnlich verwendbar ist das Variometer von HEFNER-ALTENECK (Z. U. IX 123). Weniger durchsichtig und überzeugend sind die Versuche mit Gasflämmchen.²⁾ Sehr zu empfehlen dagegen ist die direkte Messung mit einem vor Wärmewirkungen geschützten Aneroidbarometer oder Quecksilberbarometer, das vom untersten nach dem obersten Stockwerk eines Hauses getragen wird.

Für die mathematische Behandlung der Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe findet man in den Lehrbüchern eine Reihe von elementaren Verfahrensarten, die in der Regel darauf beruhen, daß eine Luftsäule von bestimmtem Querschnitt in Abschnitte von gleicher Höhe geteilt wird, innerhalb deren die Luftdichte als konstant angenommen wird. (Vgl. z. B. O. § 41.) Dabei ist zuerst das Gesetz zu entwickeln, daß Druck und Dichte in geometrischer Reihe abnehmen, wenn die Höhe in arithmetischer Progression wächst. Daran schließt sich zweitens die Berechnung der Höhe für eine gegebene Luftdruckdifferenz unter annähernder numerischer Auswertung des dabei auftretenden Faktors.³⁾

Eine elegante Variante bezüglich des ersten Teils der Aufgabe findet sich bei HÖFLER (Ph. § 46). Neben die in bekannter Weise geteilte Luftsäule I mit den Dichten d_0, d_1, d_2, \dots wird eine zweite II gestellt, die im ganzen q mal so viel Luft ($q < 1$) enthält wie I, so daß also die Dichteverteilung in beiden Säulen „mechanisch ähnlich“ ist; wäre also z. B. $q = \frac{1}{2}$, so wäre in gleichen Höhen die Dichte in II überall die Hälfte von der in I. Setzt man nun $q =$ dem Quotienten der Dichten zweier aufeinander folgenden Schichten der Säule I, so stimmt die unterste Schicht von II mit der vorletzten von I überein usf. Daraus folgt aber leicht, daß die Dichte der nächsthöheren Schicht von I durch den Faktor q^2 von der ersten verschieden ist, und allgemein die Dichte der n^{ten} Schicht um den Faktor q^n .

Die Bestimmung des Zahlenfaktors in der Formel für die Höhe kann theoretisch oder empirisch geschehen (HÖFLER, Ph. Leitaufgabe 124).

1) Man vgl. auch ELLEMANN Z. U. XX 30.

2) Literatur bei ROSENBERG II 98.

3) Man vgl. hierzu TIMERDING, Das Mathematische usw. S. 56ff.

Die Aufstellung der Formel für die Höhe wird beträchtlich vereinfacht durch Benutzung der Infinitesimalrechnung. Ist q die Querschnittsfläche einer prismatischen Luftsäule, der Druck an der Erdoberfläche gleich p_0 , der Druck in der Höhe h gleich p , so ist bei Erhebung um dh die Änderung dp des Druckes gleich dem Gewicht einer Luftsäule qdh unter dem Druck p , d. h. $= qdh \cdot s \cdot \frac{p}{p_0}$, wenn s das spezifische Gewicht der Luft beim Druck p_0 bedeutet. (Ist p in Quecksilberhöhe gemessen, so muß auch s das spezifische Gewicht der Luft in bezug auf Quecksilber bedeuten.)

Es folgt:

$$dp = - \frac{qs}{p_0} \cdot p \, dh$$

oder

$$\frac{dp}{p} = - c \cdot dh,$$

wo c eine Konstante ist. Durch Integration folgt

$$h + \text{konst.} = - 1/c \cdot \log \text{nat} p$$

und daraus für den Höhenunterschied

$$h_1 - h_2 = 1/c (\log \text{nat} p_2 - \log \text{nat} p_1).$$

Die theoretische Auswertung von $1/c$ macht dann keine Schwierigkeiten mehr.

B. Die Lehre von der Wärme.

Die Wärmelehre der Oberstufe ist nicht so sehr durch neue experimentell zu behandelnde Probleme gekennzeichnet, als durch das Bedürfnis, den Stoff unter einer einheitlicheren und strengeren Auffassung zu betrachten als auf der Unterstufe. Eine solche Betrachtung ist in logischer Hinsicht so wertvoll und bildend, daß man sie nicht gering einschätzen darf. Zunächst wird es auf eine kritische Erörterung des Temperaturbegriffs ankommen, dann auf die nicht minder bedeutsame des Begriffs der Wärmemenge. Das Hauptstück dieses Gebiets muß die Äquivalenz von Arbeit und Wärme bilden, die zunächst zur kinetischen Hypothese der Wärme und dann weiter im Zusammenhange mit der Lehre von den Dämpfen zu einer Würdigung der kalorischen Maschinen führt. Daneben kommen als Ergänzungen des Pensums der Unterstufe die Mitteilung und Leitung der Wärme sowie die Grundlagen der Meteorologie in Betracht.

Daß auch auf diesem Gebiet beständig Problemstellungen – zum Teil mehr gedanklicher Art – in didaktischer Hinsicht eine

wichtige Rolle spielen, ist selbstverständlich, doch soll mit Rücksicht auf den begrenzten Raum hierauf nicht überall eingegangen werden. Bemerket sei nur, daß sich hier das Heranziehen der historischen Entwicklung der Begriffe besonders empfiehlt.

§ 28. I. Der Temperaturbegriff.¹⁾

1. Theoretisches. Die Intensität des Wärmezustandes eines Körpers wird seine Temperatur genannt und zunächst nur nach der Stärke unserer Wärmeempfindung beurteilt. Die Messung der Temperatur beruht auf der Erfahrung, daß zwischen zwei verschieden warmen Körpern ein Wärmeaustausch stattfindet, derart, daß beide die gleiche Temperatur annehmen. Ein solcher Austausch tritt auch zwischen einem warmen Körper und dem Thermometer ein, wir dürfen daher annehmen, daß das Thermometer nach einer gewissen Zeit dieselbe Temperatur wie der Körper hat.

Eine Willkür liegt darin, daß wir das Volumen eines bestimmten Körpers, worauf zuerst GALILEI verfiel, als Merkmal der Temperatur wählen. Soweit wir indes prüfen können, gehen die Änderungen des Volums beim Quecksilber mit den Änderungen unserer Wärmeempfindung parallel.²⁾ Wir sind daher in der Lage, die unzuverlässigen Angaben unserer Empfindung durch die zuverlässigeren des Thermometers ersetzen zu können. Überdies können wir am Thermometer noch Volumänderungen wahrnehmen, wo wir mit dem Wärmesinn längst keine Unterschiede mehr empfinden, wir haben also in dem Thermometer ein feineres Erkennungsmittel für die Verschiedenheit der Wärmezustände, als es der Wärmesinn ist. „Allerdings ist es nicht selbstverständlich, daß zwei Körper *A* und *B*, die auf einen dritten *C* nicht volumändernd wirken, ihr Volum auch gegenseitig nicht ändern“ (MAXWELL). Dies ist jedoch, soweit unsere Erfahrung reicht, der Fall. Wir können deshalb als Körper von gleichem Wärmezustand oder gleicher Temperatur solche ansehen, die am Thermometer gleiche Volumanzeigen geben. Wir ordnen nunmehr jedem Wärmezustand ein Volum der thermometrischen Substanz als Zeichen oder Merkmal zu, und unterscheiden die Volumina durch Zahlen, die nach einem bestimmten Prinzip festgesetzt sind.³⁾ Willkürlich ist nicht nur die Wahl der thermometrischen Substanz (Quecksilber, Alkohol, Luft usw.), sondern auch das Prinzip der Zahlenzuordnung. Wäh-

1) MACH, Die Prinzipien der Wärmelehre, S. 38ff.; Über den Unterricht in der Wärmelehre, Z. U. I 3; Naturlehre für die oberen Klassen, Kap. IX.

2) Von dem WEBERSchen Gesetz der Empfindungsintensität ist hier natürlich abzusehen.

3) MACH bezeichnet diese Zahlen selbst als Temperaturen, worin ich ihm nicht folgen kann; so auch in mehreren anderen Fällen nicht, wie weiter unten ersichtlich.

rend die heute gebräuchlichen Temperaturzahlen einer arithmetischen Reihe der Volumina entsprechen, könnte ebensogut auch eine geometrische Reihe zugrunde gelegt sein. Statt daß also alle Volumzunahmen durch gleiche Teile eines Anfangsvolums (das bei der Temperatur des schmelzenden Eises liegt) dargestellt sind, könnte auch ein konstantes Verhältnis der Volumzunahme zum jeweiligen Volumen als Maßstab der Wärmeänderung gewählt sein. (So bei DALTON.)

Die der Temperatur zugeordneten Zahlen werden als Grade (gradus = Schritt) bezeichnet. Am hundertteiligen Thermometer entspricht ein Grad dem hundertsten Teil der Volumvergrößerung des Quecksilbers zwischen dem Gefrierpunkt und dem Siedepunkt des Wassers. Aber die Angaben des Quecksilberthermometers bleiben schon aus dem Grunde ungenau, weil die Verschiedenheit der Glassorten nicht ganz ohne Einfluß auf die scheinbare Ausdehnung des Quecksilbers ist (die Unterschiede der Thermometerangaben können bis 100^0 um 0,02, bis 350^0 um mehr als 10^0 unsicher sein).

Vor dem Quecksilberthermometer hat das Luftthermometer den großen Vorzug, daß die Ausdehnung der Gefäßwand von weit geringerm Einfluß ist als bei jenem. (Quecksilber dehnt sich etwa 7 mal, Luft etwa 146 mal so stark aus als Glas.) Daher stimmen Luftthermometer, besonders auch bei höheren Temperaturen, weit besser miteinander überein als Quecksilberthermometer. Dazu kommt, daß auch Thermometer, die mit anderen Gasen als Luft gefüllt sind (Gasthermometer), einen fast genau übereinstimmenden Gang haben. Man hat daraus öfter folgern wollen, daß die Volumzunahme im Gasthermometer der wahren Temperatur genau proportional sei. Dies ist unzulässig, solange für die „wahre Temperatur“ kein anderes Maß als eben die Angabe des Thermometers vorliegt.

Die Grundlagen einer absoluten Temperaturmessung sind von W. THOMSON geschaffen worden durch Bezugnahme auf die äußere Arbeit, die von einem Gase, indem es sich abkühlt, geleistet werden kann. Es kann die Temperatur dieser äußeren Arbeit proportional gesetzt werden, doch trifft dies, streng genommen, nur für „ideale Gase“ zu, bei denen die innere Arbeit gleich Null ist. Tatsächlich entsprechen die wirklichen Gase dieser Annahme mit sehr großer Annäherung, am meisten der Wasserstoff und das Helium, so daß die Angaben des Gasthermometers nur geringer Korrekturen bedürfen, um als absolute Temperaturen im oben definierten Sinne gelten zu können. Legt man beiden das Temperaturintervall $0^0 - 100^0$ C. zugrunde, so weichen die Angaben eines Luftthermometers von konstantem Volumen, das bei 0^0 auf den Druck 760 mm eingestellt ist, von dem der absoluten Skala ab¹⁾:

1) MACH, Prinzipien der Wärmelehre, S. 314.

bei	20°	40°	80°	140°	200°	300°
um	+ 0,03°	+ 0,04°	+ 0,02°	- 0,06°	- 0,18°	- 0,4°.

Die Teilung des Gasthermometers führt bekanntlich auf einen absoluten Nullpunkt. Der Sinn dieses Temperaturpunktes ergibt sich aus der Gleichung für das Luftthermometer bei konstantem Volumen

$$p = p_0 (1 + \alpha t)$$

als die Temperatur, bei der der Druck des Gases gleich Null geworden ist, bzw. gleich Null geworden sein würde, wenn die Luft bis zu diesem Punkt hin dem Gesetze von BOYLE-MARIOTTE genau folgte. Da dies nicht der Fall ist, so hat der absolute Nullpunkt streng genommen nur für ein „ideales Gas“ Bedeutung, ist also eine Fiktion.

Aber selbst wenn die Luft ein solches Gas wäre, so wäre doch noch gar nicht ausgemacht, daß der Nullpunkt der absoluten Skala die tiefste erreichbare Temperatur bezeichnete, da es von vornherein nicht ausgeschlossen ist, daß die betreffenden Stoffe auch im flüssigen oder festen Zustande noch unterhalb dieses Punktes Temperaturunterschiede zeigen, die dann freilich neu (z. B. thermoelektrisch) definiert werden müßten (MACH).

Für den Vergleich der Angaben von Quecksilberthermometern mit Luftthermometern seien folgende Zahlen angeführt.¹⁾

Ein hochgradiges, unter Druck gefülltes Quecksilberthermometer aus Jenenser Glas 59^{III} zeigte

$$0^\circ \quad 100^\circ \quad 200,4^\circ \quad 304,1^\circ \quad 412,3^\circ \quad 527,8^\circ,$$

wenn das Luftthermometer angab:

$$0^\circ \quad 100^\circ \quad 200^\circ \quad 300^\circ \quad 400^\circ \quad 500^\circ.$$

2. Experimentelles und Didaktisches zur Ausdehnung der Luft. Das Gesetz von GAY-LUSSAC $v_t = v_0 (1 + \alpha t)$, das für konstanten Druck gilt, ist mit Hilfe des Quecksilberthermometers gefunden worden (O. § 63). Eine direkte experimentelle Nachprüfung wird zumeist ausgeschlossen sein. Wohl aber empfiehlt sich eine hierauf gegründete Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten α , wofür verschiedene Verfahrensarten angegeben sind: WEINHOLD, D. 486; MÖLLER, T. 146; BAHRDT, Z. U. XX 17 ff.; letztere zur gleichzeitigen Bestimmung von α für verschiedene Gase. Man vgl. auch ROSENBERG II 115 ff. Bringt man unter Zuhilfenahme des BOYLE-MARIOTTESchen Gesetzes die GAY-LUSSACsche Gleichung auf die Form $p_t = p_0 (1 + \alpha t)$, die bei konstant gehaltenem Volumen gültig ist, so kann man das Gesetz auch in dieser Form zur Bestimmung von α benutzen.

1) LANDOLT-BÖRNSTEIN, Tabellen (3) S. 194.

Es empfiehlt sich für diesen Zweck das JOLLYSche Luftthermometer in einer für Schulzwecke ausreichenden Ausführung, etwa das von MÜLLER (Z. U. I 102) angegebene Modell eines Luftthermometers, das in diesem Fall statt mit einer Temperaturskala mit einer Millimeterskala versehen sein muß.¹⁾

Die Anwendung des Gesetzes beim Luftthermometer beruht auf der für konstanten Druck gültigen Formel $t = \frac{p_t - p_0}{\alpha \cdot p_0}$. Ein sorgfältig durchkonstruiertes selbstkorrigierendes Luftthermometer beschreibt FR. C. G. MÜLLER.²⁾

Die zusammengesetzte Form des BOYLE-GAY-LUSSACschen Gesetzes kommt hauptsächlich für die Reduktion eines Gasvolumens auf 0° und 760 mm Druck in Betracht, und ist durch Beispiele einzuüben. Über die Berechnung der Gaskonstante *R* vgl. man HÖFLER (Ph. Leitaufg. 145) und GRIMSEHL (L. § 123).

Eine interessante graphische Darstellung des Zusammenhangs von *p*, *v*, *T* gibt E. MACH an (Z. U. V 138; Naturlehre ob. Kl. § 252, auch bei HÖFLER, Ph. Leitaufg. 144).

§ 29. II. Kalorimetrie.

1. Theoretisches. Für die Bildung des Begriffs Wärmemenge ist der Ausgangspunkt derselbe wie für die des Temperaturbegriffs: der Wärmeausgleich zwischen zwei verschieden warmen Körpern. Die beim Ausgleich erhaltene Temperatur ist nicht bloß von den Temperaturen der beiden Körper, sondern auch von ihren Mengen abhängig. Mischungsversuche von Wassermassen verschiedener Temperatur verlaufen stets so, als ob eine gewisse Menge eines stoffartigen Etwas sich auf beide Körper gleichmäßig verteilte. Was man tatsächlich feststellen kann, ist nur, daß die Produkte aus Masse und Temperaturänderung einander gleich sind.³⁾ Dennoch ist man nicht berechtigt, diese Produkte schlechthin Wärmemenge zu nennen, wie MACH will, so wenig wie man die Geschwindigkeit als Quotienten von Weg und Zeit definieren darf. Man deutet (oder erklärt) vielmehr jene Konstanz durch die Annahme oder die Fiktion eines Wärmestoffs. Man hat sich damit einen Hilfsbegriff geschaffen, der sich in der Geschichte der Wärmelehre lange Zeit als überaus brauchbar zur einheitlichen Auffassung der Erscheinungen erwiesen hat, bis er schließlich zu einem Hemmnis des Fortschritts wurde und man seine fiktive Natur klar erkannte, ohne gleichwohl ihn als bequemes Darstellungsmittel fallen zu lassen.

1) Ähnlich ROSENBERG II 119.

2) Z. U. VIII 308 und T. 139, letzteres für 30 M. bei M. KOHL.

3) MACH, a. a. O., vgl. Fußnote 1 S. 144.

Mit diesem Vorbehalt werden wir auch im Unterricht der Oberstufe noch von ihm Gebrauch machen können.

Es ist lehrreich zu verfolgen, zu welchen Konsequenzen die Forschung durch die Annahme des Wärmestoffs genötigt gewesen ist, um mit den Tatsachen in Einklang zu bleiben. Zunächst darf man nicht, wie es wohl hier und da geschehen ist, die RICHMANNSCHE Mischungsregel einfach aus der Annahme der konstanten Menge des Wärmestoffs deduzieren. Diese Regel ist vielmehr nur der Ausdruck der Versuche über die Mischung gleichartiger Stoffe. Sind die Produkte

$$m_1 (t - t_1) = m_2 (t_2 - t)$$

experimentell als gleich nachgewiesen, so liefert eine einfache Umformung

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}.$$

Nachdem JOSEPH BLACK klar erkannt hatte, daß diese Regel für ungleichartige Körper, z. B. Wasser und Quecksilber, nicht zutrifft, war die Bildung neuer Begriffe, der spezifischen Wärme und der Wärmekapazität, erforderlich, um die Annahme eines Wärmestoffs in Einklang mit den Tatsachen zu halten. Spezifische Wärme eines Körpers nannte man die Wärmemenge, die zur Temperaturerhöhung um 1°C . für 1 kg dieses Körpers erforderlich ist, Wärmekapazität die Wärmemenge, die ein Körper von beliebiger Masse zur Temperaturerhöhung um 1°C . benötigt. Erst jetzt trat auch das Bedürfnis nach einer Einheit der Wärmemenge hervor, dem durch Schaffung des Begriffs der Kalorie entsprochen wurde.

Eine neue Schwierigkeit stellte sich bei den Beobachtungen über das Schmelzen und Verdampfen der Körper ein. Dem Verschwinden von Wärme in diesen Fällen begegnete BLACK durch die Annahme, daß die verschwundene Wärme in dem geschmolzenen Körper und im Dampf als verborgene oder latente Wärme enthalten sei. Dies erhielt dadurch eine Bestätigung, daß bei der Rückverwandlung die scheinbar verborgene Wärme wieder erscheint. Aber BLACK selbst hat schon erkannt, daß das Wesentliche an den Vorgängen eine Kompensationsbeziehung ist, derart, daß eine Wärmemenge „nicht allein wieder einer Wärmemenge, sondern auch der Schmelzung oder Verdampfung einer bestimmten Masse äquivalent sein kann.“ „Die Vorstellung, daß die latente Wärme überhaupt noch Wärme sei, ist müßig und geht über den notwendigen Ausdruck des Tatsächlichen hinaus“ (MACH). Hiermit war bereits die Möglichkeit geschaffen, die hypothetische Annahme eines Wärmestoffs in die neuere Auffassung der Wärme hinüberzuleiten. Aber erst die Verwandlung von Arbeit in Wärme wurde ein entscheidender Anstoß, mit der alten Anschauung zu brechen.

2. Experimentelles und Didaktisches. Versuche über Mischungs-temperatur, über spezifische Wärme fester und flüssiger Körper, über Schmelz- und Verdampfungswärme werden auf dieser Stufe, sofern sie überhaupt ange- stellt werden, in die praktischen Übungen zu ver- legen sein. Für die Darstellung des Wärmever- brauchs des Wassers, wäh- rend es die drei

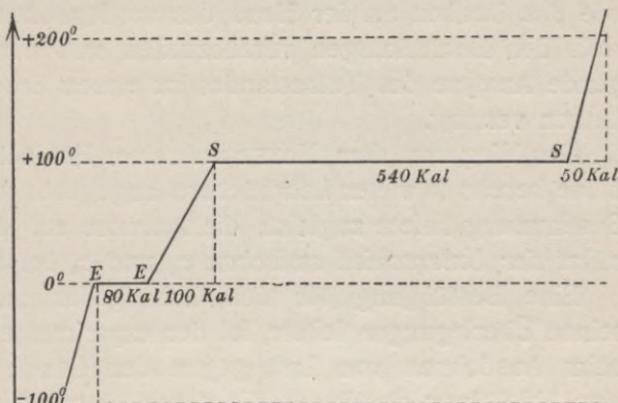


Fig. 19.

Aggregatzustände von -100°C . bis $+200^{\circ}\text{C}$. durchläuft, ist beiste- hende Fig. 19 lehrreich, die sich bei HÖFLER (Physik § 75) findet.

Für die spezifische Wärme der Gase ist eine experimentelle Behandlung im Unterricht wünschenswert, da sich auf deren Kenntnis die erste Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents gründet. WEINHOLD und MÜLLER geben keine Anweisungen hierzu; einen Apparat, der die Messung der spezifischen Wärme der Luft (oder eines anderen Gases) bei konstantem Druck während einer Unterrichtsstunde ermög- licht, hat W. BAHRDT (Z. U. XXVI 9) beschrieben. Ein beachtenswertes Verfahren zur Demonstration der Verschiedenheit von c_p und c_v ist von BERGER (Z. U. XIX 288; ROSENBERG II 127) beschrieben.¹⁾ Ein (durch Quecksilber) abgeschlossenes Luftquantum wird einmal bei konstantem Druck, dann bei konstantem Volumen durch eine elektrisch erwärmte Heizspirale während gleich langer Zeit erhitzt und die aus den Versuchen selbst berechenbaren Temperaturerhöhungen bestimmt. Sie betragen in einem Fall $17,7$ bzw. $22,9^{\circ}$. Für eine ungefähre Bestimmung des Verhältnisses c_p/c_v dürfte immer noch der CLÉMENT-DÉSORMESsche Ver- such in vereinfachter Form (MÜLLER, T. 150) am geeignetsten sein.

§ 30. III. Wärme und Arbeit.

Obwohl die Reibungswärme den bequemsten Zugang zu die- sem Gebiet bildet, empfiehlt es sich doch an dieser Stelle mehr, an die Berechnung des Wärmeäquivalents durch ROBERT MAYER anzuknüpfen (nachdem in der Mechanik schon eine vorläufige Darstellung des Zusammenhangs gegeben worden ist, vgl. S. 239).

1) Man sehe auch NAGELE, Z. U. XXVII 161.

Nicht nur aus historischen Gründen, sondern viel mehr noch, weil wir hier eins der eindrucksvollsten Beispiele dafür haben, wie das Denken an der Hand des vorliegenden Erfahrungsmaterials den Entdeckungen vorauszuweichen und durch bloße eindringende Analyse des Tatbestandes zu neuen Erkenntnissen zu gelangen vermag.

Der Weg, auf dem MAYER zu seiner Entdeckung gelangte, ist heute bereits in vielen Lehrbüchern angegeben (vgl. O. § 72). Die Bestimmung liefert zugleich die Antwort auf die Frage: *Woher rührt der Unterschied zwischen c_p und c_v bei den Gasen?*

Eine Bestätigung für den Grundgedanken, der MAYER bei seinen Überlegungen leitete, ist der experimentelle Nachweis, daß beim Ausdehnen von Luft gegen den Druck der Atmosphäre eine Abkühlung stattfindet, die durch thermoskopische oder thermometrische Methoden nachweisbar ist.¹⁾ Die umgekehrte Erscheinung der Erwärmung durch Kompression wird am einfachsten durch das pneumatische Feuerzeug demonstriert. In betreff der isothermischen und adiabatischen Ausdehnung der Gase stimme ich im übrigen GRIMSEHL (D. 96) darin bei, daß man sie nur ausnahmsweise mit einer besonders hierzu geeigneten Schülergeneration wird behandeln können und zwar dann, wenn man auch auf den zweiten Hauptsatz eingehen will und kann.

An die MAYERSche Berechnung des Wärmeäquivalents wird sich naturgemäß die Frage nach einer direkten experimentellen Bestätigung schließen. Ein Bericht über die Versuche von JOULE darf sicher nicht fehlen, doch ist auch ein im Unterricht ausführbarer Versuch dringend erwünscht²⁾, wenn es dabei auch „mehr auf die prinzipielle Anordnung des Versuchs als auf genaue Ergebnisse ankommt“ (KEFERSTEIN), auf die naturgemäß bei einem Demonstrationsversuch nicht zu rechnen ist. Als recht geeignet hat sich GRIMSEHLS Apparat (Z. U. XVI 290) erwiesen, der auch durch seine Anordnung eine Art Repetitorium der Wärmelehre bedeutet. Für Schülerversuche ist außer diesem auch der Appa-

1) Vgl. darüber ROSENBERG II 124ff. Man findet zuweilen die Angabe, daß mit obiger Erscheinung auch die Abnahme der Temperatur in der Höhe der Atmosphäre und die Abkühlung der Luft in der LINDESchen Eismaschine zusammenhänge. Ersteres ist nur soweit richtig, als ein aufsteigender Luftstrom eine Ausdehnung und damit eine Abkühlung erfährt; in betreff der Eismaschine vgl. weiter unten IV, 5.

2) Ich weiche hierin von K. ROSENBERG II 125 ab, der eine solche Bestimmung in der Schule für entbehrlich hält.

rat von WHITING zu empfehlen.¹⁾ Wohl zu beachten ist, daß MAYERS Versuch sich auf die Verwandlung von Wärme in Arbeit, die anderen experimentellen Feststellungen sich auf die Umwandlung von Arbeit in Wärme beziehen.²⁾

Durch die Erforschung der Beziehungen zwischen Arbeit und Wärme ist die Hypothese vom Wärmestoff hinfällig geworden. Entscheidend war bereits die Entdeckung RUMFORDS, daß aus Arbeit durch Vermittlung der Reibung unbegrenzte Mengen von Wärme erzeugt werden können. „Ein Körper, der erwärmt wird, nimmt keinen Stoff (keine Masse) auf, sondern gewinnt an Energie (an Arbeitsfähigkeit), und zwar beträgt der Energiegewinn für je eine Wärmeeinheit 427 kgm.“³⁾

Diese Auffassung erhält aber erst Anschaulichkeit durch eine neue Hypothese, derzufolge die Wärme als identisch mit der Bewegungsenergie der kleinsten Teile der Körper gedeutet wird. Diese kinetische Theorie der Wärme braucht nicht bis ganz an das Ende der Wärmelehre aufgeschoben zu werden, sondern wird besser schon hier erörtert, damit danach die Eigenschaften der Dämpfe sogleich im Licht dieser Hypothese aufgefaßt werden können. Für die in Betracht kommenden Einzelheiten sei auf HÖFLER, Ph. § 83 und O. § 72 verwiesen. GRIMSEHL (D. 96) hält auch einige Berechnungen, etwa die der mittleren Geschwindigkeit eines Gasmolekels, für äußerst lehrreich. Beachtenswert scheint mir namentlich auch der Aufschluß zu sein, den die VAN DER WAALSSche Gleichung über die Abweichung der Gase vom BOYLE-GAY-LUSSACSchen Gesetze gibt.⁴⁾

§ 31. IV. Dämpfe.

Die bedeutsamste Anwendung der Verwandlung von Wärme in Arbeit stellen die kalorischen Maschinen dar; diese sind auch historisch (JAMES WATT) der Anlaß zur genaueren Erforschung der Eigenschaften der Dämpfe gewesen. Der Unterricht wird gut tun, an diese praktische Seite des Gegenstandes anzuknüpfen.

1) H. HAHN, Handbuch 252 und Z. U. XVII 228.

2) Weitere Versuchsanordnungen sind angegeben von PULUJ (Weinhold, Dem.); SLOTTE, Z. U. XV 12; HESPE XVII 334; BORGESIU XIX 163; RUBENS XIX 171; L. KANN XXI 253; WENDLER XXII 89; PASCHEN und WOLFF XXIV 99; BOY und GRESSLER XXVI 340.

3) MACH, Naturl. f. d. ob. Kl. 183.

4) GRIMSEHL, L. § 164, 165; HÖFLER, Ph. Leitaufg. 132, 152 und 154 zur Gleichung von VAN DER WAALS, Leitaufg. 153.

Hier handelt es sich zunächst um keine eigentliche Problemstellung, sondern einfach um das Studium der Eigenschaften der Dämpfe, wobei von vornherein die Fragestellung leitend sein kann: *Wie unterscheiden sich Dämpfe von Gasen?*

1. Spannkraft der Dämpfe. Gesättigter Dampfraum. Um das Verhalten der Dämpfe studieren zu können, müssen wir sie in einen geschlossenen Raum bringen. Dazu eignet sich zunächst das TORRICELLISCHE Vakuum. Ein bekannter Versuch (O. § 67) zeigt nebeneinander das Verhalten von Luft, Wasserdampf, Alkoholdampf und Ätherdampf bei gewöhnlicher Temperatur.¹⁾ Die Spannkraft der Luft hängt von dem in die Röhre eingebrachten Volumen ab, und wächst mit diesem, bis der Atmosphärendruck erreicht ist. Die Spannkraft der Dämpfe dagegen ist unabhängig von der eingebrachten Flüssigkeitsmenge und auch von der Dampfmenge. Hiervon überzeugt man sich an einer TORRICELLISCHEN Röhre, die in einen hohen mit Quecksilber gefüllten Kropfzylinder eintaucht. Hebt man die Röhre höher, so vermehrt sich die Dampfmenge, ohne daß der Druck zunimmt; senkt man die Röhre tiefer oder neigt sie seitwärts, so vermindert sich die Dampfmenge gleichfalls ohne Vermehrung des Druckes. Hierbei ist zunächst neben dem Dampf stets noch unverdampfte Flüssigkeit vorhanden. Diese Versuche leiten zu dem Begriff des gesättigten Dampfes, genauer des Dampfes im gesättigten Dampfraum.

2. Spannkraft bei höherer Temperatur. Schon an den TORRICELLISCHEN Röhren wird beim Bestreichen mit einer Bunsenflamme die Erhöhung der Spannkraft sichtbar. Zum messenden Verfolgen des Zusammenhangs eignet sich besonders der Versuch, den MÜLLER T. 157 beschreibt. Ein mit Thermometer versehener Dampfkolben ist mit einer senkrecht abwärts gehenden ~ 90 cm langen Glasröhre verbunden, die in Quecksilber taucht. Nachdem durch längeres Sieden alle Luft ausgetrieben, steigt beim Wegnehmen der Flamme das Quecksilber in der Röhre empor, während das Wasser langsam weitersiedet. Jeder Siedetemperatur entspricht ein bestimmter Dampfdruck. Erhitzt man von neuem, so steigt bei 100° der Druck bis zum Atmosphärendruck. Bei

1) Über zahlreiche hierfür konstruierte Apparate vgl. Z. U. Am meisten empfiehlt sich doch, den Versuch mit vier TORRICELLISCHEN Röhren auszuführen. Im Notfall genügen auch zwei, von denen eine mit Luft, die andere nacheinander mit den Dämpfen bzw. den Flüssigkeiten beschickt wird.

dieser Gelegenheit stellt man zugleich auch die Abhängigkeit des Siedepunkts vom äußeren Druck fest.¹⁾

Für den genauen Nachweis, daß beim Siedepunkt die Spannung des gesättigten Dampfes gleich dem Atmosphärendruck ist, beschreibt ROSENBERG (II 133) einen einfachen Apparat nach GLAZEBROOK. Ebenso einfach ist vielleicht ein von BOHN (Leitfaden für die Oberstufe) angegebener Apparat (Fig. 20), den jeder Glasbläser für billigen Preis herstellt und dessen Gebrauch leicht ersichtlich sein dürfte. (In dem langen Schenkel des U-Rohres befindet sich ein TORRICELLISCHES Vakuum, im kurzen über dem Quecksilber eine kleine Menge Wasser; der untere Hahn wird geschlossen, nachdem durch Sieden die Luft verdrängt ist.) O. LEHMANN empfiehlt in FRICKS Technik (7) I 1076 einen ähnlichen Apparat, bestehend aus einem Heberbarometer, dessen kurzer, weiter Schenkel nach dem Einbringen von Wasser und Auskochen zugeschmolzen ist. Für Temperaturen über 200° ist ein ebensolcher Apparat mit offenem längeren Rohr gut brauchbar.

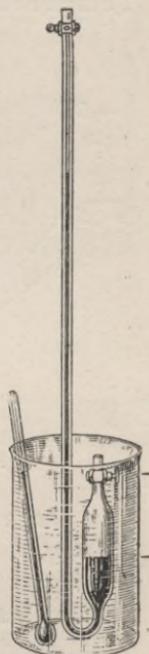


Fig. 20.

Auch für Temperaturen über 100° ist der eben erwähnte Apparat von BOHN geeignet, indem man ihn bei geöffnetem oberem Hahn in ein Bad mit Calciumchloridlösung (SP 179,5°), Anilin (184°) oder Glycerin (290°) stellt. Doch wird man bei der rasch ansteigenden Spannkraft des Wasserdampfes die Temperatur nicht zu weit steigern dürfen, wenn man ein Zerspringen des Gefäßes vermeiden will. Für höhere Temperaturen ist der PAPINSche Topf empfehlenswerter, an dessen Stelle MÜLLER (T. 158) einen billiger herzustellenden, bis 4 Atmosphären brauchbaren Apparat benutzt.

Man wird nicht versäumen, den Zusammenhang von Temperatur und Dampfspannung auch graphisch darzustellen (so bei GRIMSEHL § 132). Lehrreich sind zwei graphische Darstellungen bei MACH (Oberklassen § 253 und 254).

Die eine (Fig. 21) stellt dar, daß der Druck beim Vermindern des Dampfvolums in einer Hyperbel PQR anwächst, bei R ein Maximum erreicht, und daß dann von R bis S eine Verflüssigung ohne weitere Drucksteigerung eintritt. Wiederholt man den Versuch bei höherer Temperatur, so erhält man die Kurve $P'Q'R'$, die Verflüssigung beginnt

1) Eine etwas andere Form bei GRIMSEHL L. § 132.

erst bei höherem Druck und höherer Dichte. Die andere (Fig. 22) zeigt, wie bei steigender Temperatur das Maximum der Spannkraft rasch wächst und wie es bei jedem Gase eine Temperatur gibt, für welche dasselbe unendlich groß, d. h. unerreichbar wird. Dies ist die kritische Temperatur. Der Druck des Dampfes steigt bei einer höheren Tempe-

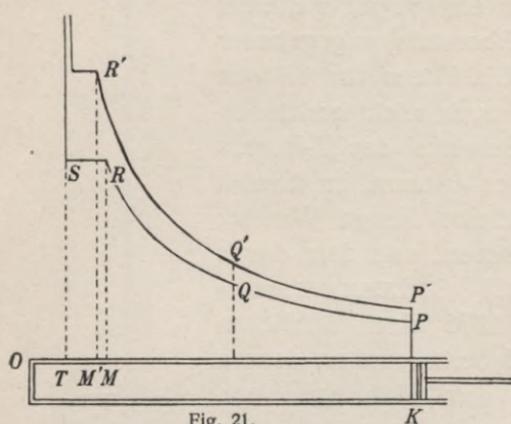


Fig. 21.

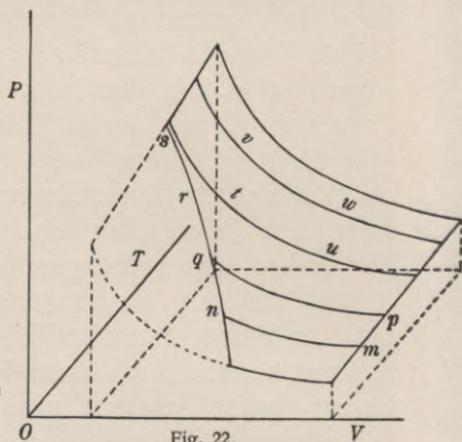


Fig. 22.

ratur längs der Kurven mn , pq , ut usw. Die Verflüssigung beginnt bei n , q , r , s , rechts von dieser Kurve verhalten sich die Dämpfe wie Gase. Die niederste Temperatur, bei der die Kurve des ansteigenden Druckes (ut) die Grenze $nqrs$ nicht mehr trifft, ist die kritische Temperatur, oberhalb deren der Dampf durch keinen noch so hohen Druck verflüssigt werden kann.

Die kritischen Temperaturen für einige bekannte Gase sind: O: -118° , N: -146° , (Luft: -140°), Wasserstoff etwa -240° , Kohlendioxyd: 31° .

3. Ungesättigter Dampf. Die Frage, wie sich Dampf verhält, der nicht mehr mit der Flüssigkeit in Berührung ist, kann nur durch einen besonderen Versuch beantwortet werden. Dazu dient der vorher (Nr. 1) erwähnte Kropfzylinder mit TORRICELLI'schem Rohr. Man stelle die Versuche mit Luft und Ätherdampf (ROSENBERG II 140) an. Dabei zeigt sich, daß der ungesättigte Ätherdampf sich wie ein Gas verhält. Bei zunehmendem Druck erreicht der Dampf das Maximum der Spannkraft und wird zu gesättigtem Dampf.

Für Wasserdampf sind ähnliche Demonstrationsversuche, die bei höherer Temperatur angestellt werden müßten, anscheinend bisher nicht angegeben worden. Ein Verfahren, überhitzten Wasserdampf von über 200° herzustellen und seine Schwerkondensierbarkeit zu zeigen, beschreibt MÜLLER, T. 155 (ROSENBERG II 141).

4. Spannkraft des Dampfes in zusammenhängenden Räumen von verschiedener Temperatur. Der hierhergehörige Versuch rührt von JAMES WATT her und ist von fundamentaler Bedeutung für die Vervollkommnung der WATTschen Dampfmaschine, da sich darauf die Erfindung des Kondensators gründet und damit die Möglichkeit, den fortwährenden Wechsel von Abkühlung und Erwärmung des Dampfzylinders zu beseitigen.

Die gewöhnlich benutzte Vorrichtung besteht in zwei miteinander verbundenen Kochkolben, deren einer Äther enthält und erwärmt wird, während der andere leer ist und gekühlt werden kann. An den zweiten ist ein abwärts gehendes in Quecksilber tauchendes Rohr angeschlossen.¹⁾ Man kann den Versuch auch mit Wasserdampf anstellen, indem man an den oben (Nr. 1) erwähnten Apparat von MÜLLER (T. 157) noch ein leeres Gefäß anschaltet und dies durch kaltes Wasser kühlt.

5. Kalorische Maschinen. An das bisherige schließt sich ungezwungen die Besprechung der kalorischen Maschinen an. Auf diesem Gebiet wird man im wesentlichen historisch vorgehen können.²⁾ Bei der Dampfmaschine wird in physikalischer Hinsicht besonders noch die Expansionswirkung des Dampfes und die Messung der Leistung mit Hilfe des Indikatordiagramms zur Sprache kommen. Von großem Wert ist eine direkte Messung der effektiven Leistung mittels des PRONYSchen Zaumes, wofür allerdings ein vollkommenes Modell einer Dampfmaschine nötig ist.³⁾ Das Lebensbild von JAMES WATT bietet eine Fülle charakteristischer Züge, unter denen die Verbindung von wissenschaftlichem Forschungstrieb und technischem Erfindergenie besonders hervortritt. Auch Dampfturbinen und Explosionsmotoren dürfen nicht außer Acht bleiben. Die hier und da aufgetretene Meinung, als gehörten solche technischen Dinge nicht in den physikalischen Unterricht, vermag ich nicht zu teilen. Ein gut Teil der Lebenskraft unserer Wissenschaft beruht auf dieser mannigfaltigen Ver-

1) Eine zweckmäßige Modifikation ist von HAMMERL angegeben (Z. U. IX 183).

2) Es sei besonders auf das Schriftchen von REULEAUX „Kurzgefaßte Geschichte der Dampfmaschine“ (Braunschweig, Vieweg) hingewiesen; ferner auf BECK, Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaus (Berlin, Springer) und MATSCHOSS, Entwicklung der Dampfmaschine, 2 Bde. (Berlin, Springer). Erinnert sei auch an SCHWALBES Versuche zur Geschichte der Dampfmaschine, mitgeteilt von H. BOHN in Z. U. XIV 203.

3) Vgl. ROSENBERG II 156. In betreff der Messung selbst vgl. man MÜLLER, T. 312 und PERRINE in Z. U. XX 110.

knüpfung von Forschung und Technik, Wissenschaft und Leben. Unsere Jugend hat ein richtiges Gefühl für die Bedeutung dieses Zusammenhangs und wendet ihm ihr lebhaftestes Interesse zu. Ein solches Interesse dürfen wir nicht ignorieren, es gilt vielmehr, es nutzbar zu machen, und daran die Flamme des Sinnes auch für die reine Forschung zu entzünden.

An die kalorischen Maschinen knüpft sich die hochbedeutsame Frage nach dem ökonomischen Koeffizienten oder dem Wirkungsgrad des kalorischen Prozesses. Hier sollte wenigstens historisch auf die Entdeckung CARNOTS hingewiesen und der Sinn des nach ihm benannten Satzes dargelegt werden (O. § 73, 8). Für ein weiteres Eingehen bieten SPIES (in JOCHMANN'S Lehrbuch) und GRIMSEHL (Lehrbuch § 148–151) Anhaltspunkte zu einer schulmäßigen Behandlung.

In diesen Zusammenhang gehören auch die Kältemaschinen, in denen ein Vorgang stattfindet, der eine Umkehrung des Vorgangs in den Dampfmaschinen bildet. Bei der letzteren wird Wärme in Arbeit verwandelt, indem gleichzeitig Wärme vom wärmeren Raum (dem Dampfkessel) zum kälteren (dem Kondensator oder der Atmosphäre) übergeht. Bei den Kältemaschinen wird Arbeit verbraucht und gleichzeitig geht Wärme von tieferer zu höherer Temperatur über.

Die LINDESche Eismaschine beruht auf der von JOULE und THOMSON entdeckten Tatsache, daß bei der Ausdehnung eines Gases auch innere Arbeit geleistet wird, die für Luft von 17°C . bei Druckänderung um eine Atmosphäre eine Temperaturerniedrigung um $0,262^{\circ}$ zur Folge hat. Dies ergibt, wenn die Luft auf 65 Atmosphären komprimiert wird und dann sich auf 22 Atmosphären ausdehnt, eine Temperaturerniedrigung um ca. 11° . Man erkennt, daß bei öfterer Wiederholung des Prozesses die Temperatur immer tiefer sinken muß, zumal die Temperaturerniedrigung bei niederen Temperaturen noch beträchtlicher ist.¹⁾

§ 32. Mitteilung und Leitung der Wärme.

1. Hier treten für die Oberstufe die quantitativen Verhältnisse in den Vordergrund. Für die Abgabe von Wärme an die Umgebung gilt annähernd das NEWTONSche Abkühlungsgesetz, wonach die Geschwindigkeit der Temperaturänderung mit der Temperaturdifferenz der sich berührenden Körper proportional ist. Die Gültigkeit erstreckt sich

1) Vgl. GRIMSEHL, L. § 160.

mit ziemlicher Annäherung nur auf ein Temperaturintervall von 40 bis 50°, wir haben es also mit einem rein empirischen Gesetz zu tun.¹⁾

2. In betreff der Wärmeleitung in festen Körpern gibt es eine Reihe lehrreicher Versuche. In theoretischer Hinsicht besonders wichtig ist die Wärmeleitung durch einen dünnen Metallstab, dessen Enden auf konstanter Temperatur gehalten werden (Versuch von BIOT, O. § 69). Der Vorgang ist dadurch kompliziert, daß zu der inneren Wärmeleitung noch eine Wärmeabgabe durch die Oberfläche an die kühlere Umgebung tritt.

Die Untersuchung dieses Vorgangs durch FOURIER ist ein Meisterstück wissenschaftlicher Analyse, das sich nach MACHS Urteil ebenbürtig neben GALILEIS Analyse der Wurfkurve stellt²⁾, und zugleich als Muster einer physikalischen Theorie, indem sie sich nicht auf eine Hypothese, sondern auf die Aussonderung ganz realer Elementarvorgänge gründet. Darum gebührt ihr auch von seiten des Unterrichts einige Aufmerksamkeit, wiewohl man von aller höheren Mathematik wird absehen müssen. Überdies rechtfertigt auch die enge Beziehung zum OHMSchen Gesetz ein Eingehen auf den Vorgang der Wärmeleitung.

Das Verfahren FOUERIERS besteht darin, daß er zunächst die innere Wärmeleitung von der äußeren isoliert (wie GALILEI beim horizontalen Wurf den freien Fall von der Bewegung nach dem Beharrungsgesetz), und daß er dann als Elementarvorgang den Wärmeübergang von einem Teilchen zum benachbarten ins Auge faßt (wie GALILEI die Geschwindigkeitsänderung von einem Zeitpunkt bis zum unendlich nahe benachbarten). Für den ersteren Zweck denkt er die Wärme durch eine Platte von so großem Querschnitt fließend, daß man von den Vorgängen am Rande absehen kann, und nimmt an, daß die beiden Seiten der Platte mit Wärmebehältern von konstanter Temperatur in Berührung sind. Dann läßt sich leicht einsehen, daß im Fall des stationären Zustandes auf der einen Seite eines dünnen Querschnitts ebensoviel Wärme zufließt, wie auf der anderen abfließt und es ist im Hinblick auf das Abkühlungsgesetz NEWTONS die Annahme berechtigt, daß die Menge der durchfließenden Wärme dem Temperaturegefälle $\frac{t-t'}{l}$ proportional sei, worin l die Dicke der Platte bedeutet. Ist noch q der Querschnitt, so wird die durchfließende Menge Q durchgestellt durch

$$Q = kq \frac{t-t'}{l}.$$

Hierin ist k eine vom Stoff abhängige Größe, die als innere Leitungsfähigkeit bezeichnet wird. Für $q = 1$, $t - t' = 1$, $l = 1$ wird $Q = k$, dadurch ist k definiert.

1) Schülerübungen hierzu in HAHNS Handbuch, Teil VII 2, 3.

2) MACH, Prinzipien der Wärmelehre 114 ff.

Soll die Wärmemenge, die durch zwei aufeinander folgende dünne Schichten fließt, konstant bleiben, so muß, bei gleichbleibendem Querschnitt, auch $\frac{t-t'}{l}$ konstant bleiben, d. h. die Temperaturdifferenzen müssen sich verhalten wie die Längendifferenzen, d. h. aber die Temperatur muß proportional der Länge abnehmen. Die Quecksilberhöhen von Thermometern, die vom erhitzten Ende des Stabes an in gleichen Abständen aufeinander folgen, müssen danach in einer geraden Linie liegen. Der Versuch bestätigt diese Folgerung. Einen ausgezeichneten Apparat hierfür mit Wärmeschutzvorrichtung und konstanten Grenztemperaturen beschreibt JOHANNESSEN in Z. U. XXI 89.

Schwieriger und für die Schulphysik nicht mehr zugänglich ist die Betrachtung des zusammengesetzten Falles, in dem gleichzeitig eine Wärmeabgabe nach außen stattfindet.¹⁾ Theorie und Versuch ergeben übereinstimmend, daß in diesem Fall die Temperaturen in geometrischer Reihe abnehmen, wenn die Abstände in arithmetischer Reihe wachsen (was wieder eine interessante Analogie zu GALILEIS Untersuchung der Wurfburve ergibt).

Sehr bemerkenswert ist, daß auch das Problem der Wärmeleitung nur durch den Substanzbegriff der Wärme einer Lösung zugänglich geworden ist. Wie man sich den Vorgang auf Grund der mechanischen Theorie der Wärme erklären soll, ob durch Übertragung von Bewegungsenergie oder durch Strahlung von Teilchen zu Teilchen, oder durch beides, ist noch nicht sicher ausgemacht.

Die Wärmestrahlung findet übrigens auf der Oberstufe am besten erst im Anschluß an die Lichtstrahlung, also als eine Form der Strahlungsenergie ihre Stelle.

§ 33. Zur Meteorologie.

Über die Stellung der Meteorologie im Physikunterricht sind verschiedene Meinungen laut geworden. Die einen (so SCHWALBE²⁾, W. ULE und KEFERSTEIN³⁾) befürworten, den meteorologischen Stoff angemessen auf die verschiedenen Kapitel der Physik zu verteilen, und mehr gelegentlich, an geeigneten Stellen auf die entsprechenden Witterungsvorgänge aufmerksam zu machen. Andere (so GRIMSEHL, D. 95) wollen sie im Anschluß an die Wärmelehre, also als besonderes Kapitel behandelt sehen. Sie bietet in der Tat eine vortreffliche Gelegenheit, Gegenstände aus verschiedenen Kapiteln der Physik repetitorisch heranzuziehen und hat den großen didaktischen Vorzug, „daß sie die Anwendbarkeit physikalischer Gesetze auch außerhalb des Laboratoriums

1) Einiges hierüber bei MACH, Oberklassen § 241 und HÖFLER, P. § 79.

2) Z. U. VIII 332.

3) Vgl. dessen Didaktik (2) 865.

und der Industriewerkstätte zeigt.“ Dazu kommt, daß sie in unserem Sinne ebenfalls eine gewisse „didaktische Einheit“ darstellt, insofern sich ihr hauptsächlichster Inhalt um ein großes Problem gruppiert, nämlich um die Frage: *Welches sind die Ursachen des Wetters und seiner Änderungen?* — Wo also die Zeit irgend ausreicht, sollte man diesem Gebiet eine zusammenhängende Betrachtung widmen, was nicht ausschließen mag, daß man auch an allen den Stellen, wo sich die Gelegenheit bietet, vorläufige Hinweise auf das Wetterproblem einfließt.

Beobachtungen von Thermometer- und Barometerständen eignen sich besonders für die Unterstufe des physikalischen Unterrichts, da, wo gleichzeitig in der Mathematik das Interesse für graphische Darstellungen angeregt ist. Auf der Oberstufe wird sich eine länger dauernde regelmäßige Beobachtung der meteorologischen Elemente nur dann von besonderem Nutzen erweisen, wenn ein Vergleich mit den Angaben der Wetterkarten und eine Beziehung zur Wetterprognose damit verbunden wird.

Auf die Einzelheiten des Unterrichts in der Meteorologie, soweit er vorwiegend vortragender Natur ist, soll hier nicht eingegangen werden.¹⁾ Auch für dieses Gebiet aber ist es dringend erwünscht, daß die physikalischen Grundlagen experimentell veranschaulicht werden. An einige derartige sei im folgenden erinnert.

Daß ein aufsteigender Luftstrom bei der Ausdehnung sich abkühlt, ist durch Versuche zu erläutern, die an früherer Stelle (S. 284) bereits erwähnt sind.²⁾ —

Über die Dampfbildung im luftgefüllten Raum gibt ein bekannter Versuch Aufklärung, bei dem Äther in eine luftgefüllte und mit Manometer versehene Flasche gebracht wird.³⁾ Einen Versuch, um die Spannung von Wasserdampf innerhalb eines luftgefüllten Raumes nachzuweisen, beschreibt MÜLLER (Z. U. I 104) und ähnlich REBENSTORFF (Z. U. XVII 213, ROSENBERG II 139), der auch auf die Möglichkeit einer quantitativen Ausdeutung hinweist. Hier kann sich das DALTONSche Gesetz anschließen, sowie die Darlegung, daß der beobachtete Luftdruck sich aus zwei Komponenten, der Spannkraft des Dampfes und der Spannkraft der Luft zusammensetzt. Bemerkenswert ist, daß die Spannungskurve des Wasserdampfes „zufällig auch der Grammmzahl des bei völliger Sättigung in einem Kubikmeter enthaltenen Wasserdampfes entspricht“ (MÜLLER T. 161). Auch eine direkte Bestimmung des Wasserdampfgehalts der Luft (ebd.) wird empfohlen.

1) Über Vorschläge in dieser Richtung vgl. man Vierteljahrsberichte des Wiener Vereins zur Förder. des physik. Unterr. 1900 und BÖRNSTEIN in Z. U. XVIII 149.

2) Über das Theoretische und die darauf bezüglichen Kontroversen vgl. KOERBER, Z. U. XIII 330, XIV 290.

3) Vgl. z. B. GRIMSEHL, L. § 133.

Auch die Bestimmung des Taupunkts ist ein geeigneter Gegenstand experimenteller Behandlung. ROSENBERG (II 151) empfiehlt zuerst einen rohen Versuch über das Eintreten des Beschlagens an einem Glase anzustellen, in dem sich Wasser befindet, das durch hineingeworfene Eisstückchen mehr und mehr abgekühlt wird. Dazu muß dann ein genauerer Versuch treten, für den sich besser als das veraltete Ätherhygrometer von DANIELL das Aspirationshygrometer von REGNAULT, am besten in der ALLUARDSchen Form (O. § 77) eignet.

Für die Demonstration des Entstehens atmosphärischer Niederschläge gibt es ebenfalls lehrreiche Schulversuche, namentlich die Erzeugung künstlicher Nebel nach KIESSLING (Z. U. XI 19, ROSENBERG II 154).¹⁾ Hierbei ist auch der Einfluß von Staub- und Rauchteilchen zu demonstrieren. Verwandte Versuche besonders auch zur Demonstration der ungleichen Temperaturänderung gesättigter und ungesättigter Luft infolge Druckwechsels und zur Erklärung des Föhn-Phänomens hat REBENSTORFF (Z. U. XVII 19) beschrieben. Auch sei auf dessen Gelatinehygroskopstreifen (Z. U. XVII 28) hingewiesen.

Versuche über das Aufsteigen erwärmter Luft, die von VETTIN (Pogg. Ann. 1857) herrühren, beschreibt BÖRNSTEIN (a. a. O.). Die Versuche werden mit raucherfüllter Luft angestellt, die sich in einer geschlossenen Glasglocke befindet und von unten her von einer Stelle der den Boden bildenden Glasplatte aus erwärmt wird. Einen Apparat, der auch die Ablenkung der Luftströme durch die Rotation, sowie die Wirbelbewegung der Zyklone demonstriert, hat V. L. ROSENBERG, Z. U. XII 335 beschrieben.

Auf Modelle und Schulwetterkarten ist ebenfalls in dem erwähnten Aufsatz von BÖRNSTEIN hingewiesen. —

In methodologischer Hinsicht ist auf diesem Gebiet die Erklärung der Taubildung von besonderem Interesse, zumal die darauf bezügliche Theorie von WELLS in der Literatur über induktive Logik eine hervorragende Rolle gespielt hat. Man vgl. oben § 2. —

Von mathematischen Ableitungen im engeren Sinne wird man in diesem ganzen Gebiet wohl absehen müssen. Selbst die grundlegende Herleitung der Rechtsdrehung der Luftströmungen auf der nördlichen Halbkugel überschreitet, wenn sie streng gegeben werden soll, wohl die dem Schulunterricht zumeist gesteckten Grenzen.²⁾ Lange hat die HADLEYSche Ableitung für ausreichend gegolten, die mit der Relativgeschwindigkeit der strömenden Luft gegen die aufeinanderfolgenden mit verschiedener absoluter Geschwindigkeit bewegten Breitengrade arbeitete. Dem mathematisch gebildeten Physiklehrer wird es aber gegen sein wissenschaftliches Gewissen gehen, eine Scheinableitung zu geben,

1) Man vgl. auch BÖRNSTEIN a. a. O. S. 151.

2) Man vgl. hierzu M. KOPPE, die CORIOLISSche Kraft, Z. U. X 16.

die für die Richtung Ost-West völlig versagt. Dem wirklichen Sachverhalt näher kommt folgende Überlegung.¹⁾ Denkt man sich die den Nordpol der Erde unmittelbar umgebende Kalotte als eine ebene Kreisscheibe, so läßt sich leicht einsehen, daß auf dieser ein vom Drehungsmittelpunkt ausgehender Körper eine Ablenkung erleidet, die der Drehung der Scheibe entgegengesetzt ist. Sogar für die Größe der senkrecht zur Bewegungsrichtung auftretenden Beschleunigung (der CORIOLISSCHEN Beschleunigung) läßt sich der Wert $2cw$ ermitteln. Man setze die in einer kleinen Zeit τ zurückgelegte Wegstrecke gleich $c\tau$, die Winkeldrehung der Scheibe in derselben Zeit gleich $w\tau$, dann ist die in dieser Zeit eintretende Abweichung von der Anfangsrichtung dargestellt durch $cw\tau^2$. Nach den Gesetzen der gleichförmig beschleunigten Bewegung folgt hieraus die Beschleunigung $b = 2cw$. Will man die Betrachtung für einen beliebigen Punkt der Erdoberfläche anstellen, so hat man nur in bekannter Weise die Erddrehung in zwei Momentandrehungen zu zerlegen, von denen die eine um eine durch den Punkt gehende Achse mit der Rotationsgeschwindigkeit $w \sin \varphi$ vor sich geht; während für die andere senkrecht dazu stehende Achse der Punkt im Äquator der Drehung liegt (aus dieser zweiten Komponente ergibt sich die an dem Ort senkrecht zur Erdoberfläche auftretende Zentrifugalkraft $rw^2 \cos^2 \varphi$). Die CORIOLISSCHE Beschleunigung für die Breite φ beträgt somit $2cw \sin \varphi$. Berechnet man hieraus den Umfang des Kreises, den ein Körper von 1 m Anfangsgeschwindigkeit in der Breite von Berlin entgegen der Erddrehung beschreibt, so findet man dessen Umfang ~ 54 km (KOPPE a. a. O.).

C. Wellenlehre und Akustik.

In der Regel werden diese beiden Gebiete getrennt behandelt, die Wellenlehre vorausgeschickt und die Akustik als Anwendungsgebiet darangeschlossen. Man folgt hierin eben der systematischen Anordnung der Lehrbücher. Richtiger scheint es mir, beide Gebiete inniger miteinander zu verschmelzen, da ja die Akustik der Anlaß gewesen ist, sich genauer mit den Wellenbewegungen in elastischen Körpern zu beschäftigen. So ist es in den folgenden methodischen Vorschlägen geschehen, und zwar derart, daß auch transversale und longitudinale Wellen getrennt und je bei den entsprechenden akustischen Vorgängen behandelt sind. Mit FR. MÜLLER stimme ich darin überein, daß die Heranziehung der Analogie mit den Wasserwellen nur mit großer Vorsicht geschehen sollte und besser in der Akustik ganz unterbleibt, da sie

1) Im Anschluß an O. WIENER, Z. U. XXVI 337.

hier die Anschauungen mehr verwirrt als klärt. Nur zur Erklärung der Bezeichnung „Welle“ mag das Periodische des Vorgangs als das den Wasserwellen und den Wellen bei elastischen Körpern Gemeinsame hervorgehoben werden.

An der Akustik sind das physikalische und das musikalisch-psychologische Interesse gleich sehr beteiligt. Es hängt von dem Grad musikalischer Anlage und Ausbildung des Lehrers und auch von der Beschaffenheit der Schülergeneration ab, wie weit auch das zweite neben dem ersten Berücksichtigung findet. Falsch wäre es, das Musikalische, weil es nicht ins Bereich der Physik fällt, möglichst auszuschalten; bietet sich doch vielmehr gerade hier Gelegenheit, die Verknüpfung der Physik mit anderen Gebieten und insbesondere auch mit psychologischen Problemen zu betonen und somit die Physik mit dem übrigen Geistesleben in Zusammenhang zu setzen. Allerdings können wir in unserer didaktischen Darlegung nicht näher auf diese Seite eingehen und müssen uns mit einem Hinweis darauf im Anschluß an die Behandlung des Saitenproblems begnügen.

Es wird vorausgesetzt, daß die grundlegenden Feststellungen über Tonhöhe und Schwingungszahl und über die wichtigsten Schallquellen bereits auf der Unterstufe erfolgt sind.¹⁾ Eine repetitorische Besprechung des früher erledigten Unterrichtsstoffs, insbesondere auch der Eigenschaften der musikalischen Skala empfiehlt sich als Einleitung oder kann gelegentlich in den weiteren Gang eingeschoben werden. Dann gruppiert sich die Behandlung auf der Oberstufe zweckmäßig um zwei Probleme: das Problem der schwingenden Saiten und das Problem der Ausbreitung des Schalles durch die Luft.

§ 34. I. Das Problem der schwingenden Saiten.

1. Eine erneute und genauere experimentelle Entwicklung der Gesetze schwingender Saiten muß den Anfang machen. Ausgezeichnet geeignet dafür ist ein schon von MERSENNE²⁾ angestellter,

1) Eine einheitliche Darstellung des ganzen Lehrgangs ohne Trennung in zwei Stufen haben A. VOSS und F. POSKE gegeben in „Die Akustik als Unterrichtsgegenstand“, Ztschr. z. Förd. d. physik. Unterr. II 193 ff. (1885), woraus Einzelnes in die folgende Darstellung übernommen ist.

2) MERSENNE (1636) spannte eine Saite von 15 Fuß Länge durch ein Gewicht von $6\frac{5}{8}$ Pfd. und beobachtete zehn Schwingungen in der Sekunde. Unter Zuerundelegung des für lange Saiten experimentell bestätigten Gesetzes, daß die Schwingungszahl der Länge umgekehrt proportional sei, berechnete er für eine sonst gleiche Saite von $\frac{3}{4}$ Länge die Schwingungszahl 200.

auch von MELDE (Akustik, S. 48) empfohlener Versuch, der von GRIMSEHL (Z. U. XV 200, Lehrb. § 194) noch vervollkommenet worden ist. Doch wird man sich zumeist mit Versuchen am Monochord begnügen müssen.¹⁾ Die schon von MERSENNE gefundenen drei Gesetze waren:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{l_2}{l_1}, \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{P_1}}{\sqrt{P_2}}, \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{q_2}}{\sqrt{q_1}},$$

worin n die Schwingungszahlen, l die Längen, P die Spannungen, q die Gewichte pro Längeneinheit bedeuteten. Auch hier sei daran erinnert, daß diese „beschreibenden“ Gesetze im Unterricht nicht durch Induktion aus einzelnen Versuchen hergeleitet, sondern nur durch solche Versuche bestätigt oder demonstriert werden können. Sie finden sich zusammengefaßt in der auf mathematischem Wege erhaltenen TAYLORSchen Formel $n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{P}{m}}$, worin m die Masse pro Längeneinheit bedeutet.

Die Frage nach der Begründung dieser Formel, soweit es im Rahmen der Schulphysik möglich ist, macht das eigentliche *Problem der schwingenden Saiten* auf der Oberstufe aus.

2. Wir betrachten an Stelle der schwingenden Saiten zunächst die leichter zu verfolgenden Vorgänge an einem schwingenden Seil (Spiraldraht, Kautschukschlauch). Eine Ausbiegung, die durch einen an einer Stelle ausgeübten mäßig starken Schlag (einen Impuls) hervorgerufen wird, pflanzt sich mit einer gewissen Geschwindigkeit längs des Seiles fort. Das Zurücklaufen der Ausbiegung verhindert man bei den ersten Versuchen, indem man das freie Ende des Seils lose auf dem Tisch liegen läßt. Macht man dann das freie Ende an der Wand fest, so kehrt der Impuls an dem schlaff gespannten Seil als entgegengesetzt gerichteter Impuls zurück. (Man rückt den Vorgang durch Analogie mit anderen Reflexionsvorgängen dem Verständnis näher.) Durch eine regelmäßige Folge von Impulsen endlich wird das Seil in eine regelmäßig auf- und niedergehende Bewegung versetzt, die sich bei rascherer Folge der Impulse in eine Wellenerscheinung mit zwischenliegenden Ruhepunkten verwandelt. Der einfachste Fall des auf- und niederschwingenden Seils entspricht genau der schwingenden Saite. Das Problem der schwingenden Saite aber

1) Besonders empfehlenswert sind die neueren mit Federwagen ausgerüsteten Monochorde, so das von BOHN (Z. U. XIX 290) angegebene; man beachte auch den sinnreichen Apparat von Fr. C. G. MÜLLER, Z. U. XXVI 357.

ist nun fürs erste durch ein anderes ersetzt: *Wie ist das Zustandekommen der „stehenden Wellen“ eines Seils zu denken?* Hiermit ist der Anlaß gegeben, den Vorgang der Wellenbewegung näher zu untersuchen.

3. Fortschreitende und stehende transversale Wellen. Zur Vereinfachung der Vorstellungen wird in bekannter Weise der phoronomische Vorgang der Wellenbewegung längs einer Reihe von getrennten Punkten behandelt (O. § 54), zu deren Demonstration MACHS Wellenmaschine ein so ausgezeichnetes Hilfsmittel ist¹⁾ und die zu der Aufstellung der Beziehung $c = n\lambda$ führt. Anschließend an die schon oben erwähnte Reflexion am befestigten Seilende wird nun die Superposition zweier entgegengesetzt laufender Wellenzüge graphisch (O. § 55) demonstriert. Diese Zusammensetzung macht erfahrungsgemäß den Schülern Schwierigkeit, zu deren Überwindung ein von BARTH angegebenes Modell (Z. U. XXIV 27) sehr geeignet ist.

Danach können die stehenden Wellen an der MACHSchen Wellenmaschine und schließlich noch einmal am gespannten Seil demonstriert werden. Die Unterschiede im Verhalten der schwingenden Teilchen bei fortlaufenden und bei stehenden Wellen sind recht scharf herauszuarbeiten, die Beziehung $l = \frac{\lambda}{2}$, worin l die Länge der stehenden, λ die der fortschreitenden Welle ist, muß zu völliger Klarheit gebracht werden. Es wird dann dem Schüler auch nicht schwer sein zu verstehen, daß das einfache Auf- und Niederschwingen des Seils den einfachsten Fall der stehenden Welle mit nur zwei Knotenpunkten an den Enden darstellt.

4. Nunmehr kann die Untersuchung über die Schwingungen der Saite, zunächst immer noch am schwingenden Seil, wieder aufgenommen werden. Schreibt man die Grundgleichung $c = 2nl$, worin l die Länge einer stehenden Welle, so findet man zunächst in dem Fall, daß l gleich der Seillänge selbst ist, für die Schwingungsanzahl den Wert $n = c/2l$, womit bereits ein Teil der TAYLORSchen Formel erhalten ist.

1) Darin, daß diese Maschine nur das phoronomische Bild, nicht den dynamischen Zusammenhang wiedergibt, kann ich keinen so großen Nachteil erblicken, wie andere Didaktiker. Es kommt doch vor allem auf eine klare Anschauung der phoronomischen Seite der Vorgänge an, das Detail der dynamischen Übertragung entzieht sich überhaupt der elementaren Betrachtung. Eine Wellenmaschine, die auch die dynamische Übertragung der Schwingungen versinnlicht, ist von VAN SCHAİK (Z. U. XIV 89) angegeben und wird von MÜLLER warm empfohlen.

Der wichtige Zusammenhang $n = c/2l$ läßt sich auch noch tiefer begründen, wenn man den schon berührten Vorgang der Reflexion eines Impulses an dem befestigten Ende eines Seils näher ins Auge faßt. Das Seil sei an den Enden A und B befestigt und es werde etwa bei C ein periodischer Impuls ausgeübt. Geht ein solcher etwa von C nach B , so kehrt er als entgegengesetzt gerichteter Impuls nach A zurück und wird dort als gleichgerichteter Impuls reflektiert, so daß er bei C durch einen zweiten neu einsetzenden Impuls beim Zusammentreffen verstärkt wird. So versteht man, daß die Saite in immer stärkere Schwingung gerät, wenn man bei C gleichgerichtete Impulse in demselben Tempo ausübt, in dem ein Impuls die doppelte Länge des Seils durchläuft. Nun ist diese Zeit $T = 2l/c$, daher $n = 1/T = c/2l$. Der beschriebene Vorgang wird besonders anschaulich bei der schon erwähnten Versuchsanordnung von GRIMSEHL. Ein Stahldraht von 0,9 mm Dicke und 58,10 m Länge war durch einen kleinen Flaschenzug unter Einschaltung einer Federwaage mit der Zugkraft von 5 Kgg gespannt, die durch einen kurzen Schlag in der Nähe des einen Endes erzeugte Welle lief in 1 Minute 50mal hin und zurück. Dies ergab für die Geschwindigkeit c den Wert von ~ 100 m/sec. Der Versuch macht auch ersichtlich, daß die Schwingungsdauer T des Drahtes mit dem Zeitunterschied zwischen zwei Impulsen übereinstimmt.

5. Um auch die Abhängigkeit der Größe c von Spannung und Masse des Seils zu erläutern, bedient man sich des MELDESCHEN Fadenschwingsapparats.¹⁾ Bei diesem werden stehende Wellen an einem einerseits mittels eines Gewichtstücks gespannten Faden durch eine elektromagnetische Stimmgabel oder einen WAGNERschen Hammer hervorgerufen, die Schwingungszahl n wird also konstant erhalten, dagegen ist die Spannung des Fadens sowie dessen Dicke veränderlich.

Nun hängt die Länge l der stehenden Wellen mit der Geschwindigkeit c durch die Gleichung $c = 2nl$ zusammen, man kann also bei gleichbleibender Schwingungszahl n die Änderungen von c nach den Änderungen von l beurteilen. Die Abhängigkeit der einen wie der anderen Größe von Spannung und Masse läßt sich in folgender Art zeigen: Ändert man die Belastung im Verhältnis 1 : 4 : 9 : 16, so nimmt die Länge der stehenden Wellen im Verhältnis 1 : 2 : 3 : 4 zu (bzw. ihre Anzahl wird $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ so groß wie zu Anfang). Hieraus erkennt man, daß auch c mit der Wurzel aus der Spannung wächst. Vervierfacht man den Quer-

1) ROSENBERG II 185; ebd. verschiedene Modifikationen des Apparats und genauere Angaben für die Ausführung der Versuche.

schnitt des Fadens, so wird die Länge der stehenden Wellen bei gleicher Spannung nur halb so groß. Hieraus ist ersichtlich, daß die Geschwindigkeit c der Quadratwurzel aus der „Masse pro Längeneinheit“ umgekehrt proportional ist.

Kehren wir nun zurück zu der in 4 entwickelten Gleichung $n = \frac{c}{2l}$, so ergibt sich jetzt n proportional mit $\frac{1}{2l} \sqrt{\frac{P}{m}}$, d. h. die TAYLORSche Formel ist bis auf einen konstanten Faktor als zutreffend erwiesen. Soweit also kann man die „Durchleuchtung“ der theoretischen Formel treiben. Auch ließe sich noch durch Bestimmung sämtlicher Größen an einer langsam schwingenden Saite die Proportionalitätskonstante = 1 bestimmen.¹⁾

Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit c von P und m kann auch an der beschriebenen GRIMSEHLSchen Vorrichtung leicht ermittelt werden. Wurde die Spannung auf das Vierfache und Neunfache gesteigert, so wuchs die Geschwindigkeit auf das Doppelte und Dreifache; bei doppelter Dicke, also vierfachem Querschnitt, war die Geschwindigkeit halb so groß, bei anderem Material der Quadratwurzel aus der Dichte umgekehrt proportional.

6. Die Übertragung der am Seil und am Faden gewonnenen Resultate auf die schwingenden Saiten, die im Vorhergehenden stillschweigend angenommen ist, erscheint als Analogieschluß zulässig, da es sich in beiden Fällen um durchaus ähnliche Verhältnisse handelt und nur das Material verschieden ist. (Die Steifigkeit des Materials bewirkt freilich bei Metallsaiten nicht unbeträchtliche Abweichungen.) Bezüglich der dynamischen Seite des Vorgangs ist nicht viel mehr zu sagen, als daß die Bewegung durch elastische Kräfte von einem Querschnitt der Saite zum anderen übertragen wird. Alle Versuche einer elementaren Ableitung der Formel $c = \sqrt{P/m}$ jedoch sind künstlich²⁾, man wird besser tun, die Schüler nicht damit zu plagen. Eine direkte strenge Ableitung der TAYLORSchen Formel (oder der Gleichung $c = \sqrt{P/m}$) ist nur mit höherer Mathematik zu geben und überschreitet jedenfalls die Grenzen der Schulphysik.

Dagegen bleibt bezüglich der Saiten noch die Frage zu beantworten, ob diese sich auch in eine größere Zahl von stehenden Wellen teilen lassen. Die bekannten Versuche bestätigen

1) Über den Vorzug des obigen Lehrganges vor der bloßen Bestätigung der TAYLORSchen Formel vgl. man das S. 220 bezüglich der Wurfparabel Gesagte.

2) Z. B. KINDEL in Z. U. I 57, anschließend an die Ableitungen von NEWTON und MAXWELL. Man vgl. auch HÖFLER, Ph. Leitaufgabe 137.

dies. An der Hand der Gleichung $c = 2nl$ erkennt man auch sofort, daß bei Teilung in zwei stehende Wellen n doppelt so groß, bei drei stehenden Wellen dreimal so groß werden muß usw. — Gesetz der Partialtöne.

Bezüglich der psychologischen Seite des Gegenstandes verweise ich auf HÖFLERS Aufsatz: „Eine Physik- und Psychologiestunde am Klavier“ (Z. U. XIV 65).

§ 35. II. Das Problem der Fortpflanzung des Schalles durch die Luft.

1. Wenn eine Stimmgabel schwingt, so wird die vor einer Zinke befindliche Luft die Hin- und Hergänge der Zinke mitmachen. Wir machen nun die Hypothese, daß im Fall einer harmonischen Bewegung des Schallerregers auch die benachbarte Luftschicht harmonische Hin- und Hergänge macht, und daß die weiter entfernten Luftschichten die gleiche Bewegung ausführen, jedoch nicht gleichzeitig, sondern um so später, je weiter sie von der Ursprungsstelle des Schalles entfernt sind. Dieser letzte Teil der Annahme stimmt mit der Tatsache, daß der Schall Zeit zur Fortpflanzung braucht, gut zusammen. Daß nicht die Luft selbst fortschreitet, sondern daß sich ein Bewegungszustand durch die Luft fortpflanzt, lehren überdies die einfachsten Beobachtungen. Der Rauch beim Abschießen einer Kanone wird nicht fortgeschleudert; Versuche an sensitiven Flammen mit WEINHOLDS Luftstoßapparat.¹⁾

Wir unterwerfen nun den so fixierten Vorgang der mathematischen Analyse, indem wir wie bei den Transversalwellen eine graphische Darstellung ausführen. Wir erhalten so das Bild einer fortschreitenden Longitudinalwelle, das sich sofort wieder an MACHS Wellenmaschine versinnlichen läßt. Auch an einer langen Spirale aus dünnem Draht, die man durch das Zimmer spannt, kann man longitudinale Wellen vorführen.²⁾ Bei den auftretenden Verdünnungen und Verdichtungen ist zu beachten, daß sie nicht den Wellenbergen und Wellentälern bei transversalen Wellen entsprechen; die Maxima der Verdichtung und Verdünnung liegen nicht an den Stellen größter Elongation, sondern an den Stellen stärkster Bewegung beim Durchgang durch die Mittellage (O. Fig. 152).

1) WEINHOLD, Dem., 249, weiteres bei ROSENBERG I 293, II 193, vgl. ob. S. 151.

2) MÜLLER T. 88; erwähnt sei auch WEINHOLDS Spirale, die aus Kupferdrahtwindungen von 7 cm Weite gebildet ist (Demonstr., 4. Aufl. 246) und die von RICHARZ, Z. U. XV 290, die an der Decke des Zimmers aufgehängt wird.

2. Die Bildung stehender Wellen mag zunächst auch am Spiraldraht veranschaulicht werden (MÜLLER a. a. O.). Die mathematische Analyse vermag auch hier den Vorgang an einer Punktreihe darzustellen, eine Versinnlichung der Schwingungen der einzelnen Teilchen ermöglicht wiederum MACHS Wellenmaschine. Beim Vorgang der Reflexion erfordert es hier besondere Beachtung, ob die Enden der Punktreihe fest oder frei beweglich sind. Im ersteren Fall liegt am Ende ein Schwingungsknoten, im letzteren ein Schwingungsbauch; dies hängt damit zusammen, daß dort eine Verdichtung als Verdichtung, hier als Verdünnung zurückkehrt, und Entsprechendes gilt für eine Verdünnung. Es ist leicht zu übersehen, daß auch hier (vgl. S. 298) die Gleichung $c = 2nl$ gilt, wenn l die Länge einer stehenden Welle ist.

3. Bisher sind die Longitudinalwellen an Spiraldrähten veranschaulicht worden, für die Anwendung auf die Fortpflanzung des Schalls in der Luft fehlt aber vor der Hand noch jeder Anhalt. Sucht man nun die an Spiraldrähten beobachteten Erscheinungen auf den Schall zu übertragen, so liegt es nahe, daß man den Schall nicht sich nach allen Seiten ausbreiten läßt, sondern daß man ihn zwingt, sich nur nach einer Richtung fortzupflanzen. Man läßt demgemäß die von einer Stimmgabel erregte Luftbewegung in eine Röhre eintreten. Dabei beobachtet man das Phänomen der Resonanz. Man kann leicht feststellen, etwa mit zwei verschiedenen Stimmgabeln, daß die Länge einer an einem Ende geschlossenen Röhre ziemlich genau $\frac{1}{4}\lambda$ sein muß, wenn stärkste Resonanz eintreten soll.¹⁾ *Läßt sich dies Verhalten aus unserer Hypothese erklären?*

Wir analysieren den Vorgang unter Zugrundelegung unserer Hypothese genauer.²⁾ Es zeigt sich, daß der Sachverhalt ähnlich ist wie bei der Fortpflanzung eines Impulses längs einer Saite. Man denke sich jedes Luftteilchen in der Richtung der Röhrenachse hin und her pendelnd und unterscheide die beiden Hälften einer Pendelschwingung als Hin- und Rückgang, je nachdem sie in die Röhre hinein oder aber entgegengesetzt gerichtet sind. Betrachten wir zunächst einen Hingang (Fig. 23a),

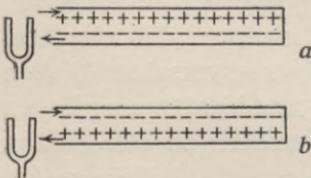


Fig. 23.

1) ROSENBERG I 107.

2) So schon in dem Aufsatz von A. VOSS und F. POSKE; ferner POSKE O. § 87.

der sich durch die Röhre fortpflanzt und als Verdichtung am geschlossenen Ende ankommt. Da die Verdichtung (aus leicht verständlichen mechanischen Gründen) als Verdichtung reflektiert wird, so kehrt die Bewegung als Rückbewegung durch die Röhre an die Öffnung zurück. Trifft sie hier mit einer Rückbewegung zusammen, so werden sich beide verstärken, also wird nun eine stärkere Bewegung, diesmal eine Rückbewegung, in die Röhre hineinschreiten (Fig. 23b). Diese wird als Verdünnung an dem geschlossenen Ende ankommen, wegen der Gegenwirkung des Luftdrucks einen Hingang hervorrufen, der als solcher zur Öffnung zurückkehrt usf. Man erkennt, daß während des Hin- und Zurücklaufens eines Impulses $\frac{1}{2} T$ verfließen sein muß, der durchlaufene Weg, d. i. die doppelte Röhrenlänge $2l$ muß demnach $= \frac{1}{2} \lambda$ sein, und daher $l = \frac{1}{4} \lambda$.

4. Bei offenen Röhren ergibt der Versuch $l = \lambda/2$. Die Analyse nach dem Beispiel der eben angestellten zeigt, daß auch dies Ergebnis aus der gemachten Hypothese seine Erklärung findet (O. § 87, 2). Es läßt sich aber noch eine weitere Folgerung ziehen. Wenn die gegebene Erklärung richtig ist, so kann es an den Erscheinungen nichts ändern, wenn man die Röhren (offene wie geschlossene) um eine oder mehrere halbe Wellenlängen verlängert. Denn in diesem Fall wird der zu durchlaufende Weg um eine oder mehrere ganze Wellenlängen verlängert, und da hierfür eine oder mehrere ganze Schwingungsdauern erforderlich sind, so wird dadurch der resultierende Schwingungszustand an der Öffnung der Röhre nicht beeinflusst werden.

Es lassen sich auch leicht die allgemeinen Gleichungen für die Schwingungszahl der Töne ableiten, die in Röhren von gegebener Länge l verstärkt werden, nämlich bei geschlossenen Röhren $n = \frac{2k+1}{4} \frac{c}{l}$, bei offenen Röhren $n = \frac{k}{2} \frac{c}{l}$, wo k eine ganze Zahl bedeutet. Zur Bestätigung der gezogenen Folgerungen kann namentlich der folgende Versuch dienen: Man streiche eine Stimmgabel mit hoher Schwingungszahl (z. B. $n = 2040$) kräftig an, nachdem man der einen Zinke die Öffnung einer am anderen Ende verschlossenen Glasröhre gegenübergestellt hat, in der feines Korkpulver verteilt ist; hat man die Röhrenlänge etwa durch einen verschiebbaren Kork richtig abgestimmt, so werden durch die Anwendung des Korkpulvers stehende Wellen von etwa 8 cm Länge sichtbar; bei $l = 36$ cm erhält man fünf Knotenpunkte in den Abständen 4, 12, 20, 28, 36 cm vom offenen Ende. In den Räumen zwischen den Knoten zeigen dünne senkrecht gestellte Lamellen des Korkpulvers die Bewegung der Luft an. Wie daraus sich die Schwin-

gungszahl des Tones berechnen läßt, ist leicht ersichtlich.¹⁾ Durch diesen Nachweis dürfte die anfangs aufgestellte Hypothese schon einen hohen Grad von Wahrscheinlichkeit erreicht haben.

5. Es kommen aber noch weitere Bestätigungen hinzu. Wir wenden unsere Erfahrungen über die Resonanz in Röhren nunmehr auf das Anblasen von Röhren mittels einer Anblasespalte an. Auch hierbei gelten die eben gefundenen Gleichungen. Der Vorgang ist auch auf dieselbe Art zu erklären. Der aus der Anblasespalte dringende bandförmige Luftstrom (das Luftband) trifft gegen den Rand der Röhre und erzeugt, je nachdem er zuerst mehr nach innen oder mehr nach außen gerichtet ist, an der Öffnung der Röhre eine Verdichtung oder Verdünnung; eine Verdichtung geht als Hingang in die Röhre hinein und kehrt vom geschlossenen Ende als Rückgang zurück, dieser treibt das Luftband nach außen und ruft an der Öffnung der Röhre eine Verdünnung hervor, die als Rückgang in die Röhre hineingeht usf. Es tritt also eine Hin- und Herbewegung des Luftbandes ein, deren Periode gleich der Dauer des viermaligen Durchlaufens der Röhrenlänge ist, so daß wieder $l = \lambda/4$ wird. Entsprechend bei offenen Röhren und bei Lippenpfeifen.²⁾

6. Endlich gestatten die Vorgänge in den Lippenpfeifen noch eine weitere Analyse auf Grund der graphischen Darstellung der stehenden longitudinalen Wellen. Man kann diese aus der Darstellung der stehenden transversalen Wellen leicht ableiten, indem man die Elongationen um 90° gedreht denkt und dabei den Umstand berücksichtigt, daß die Phasen in benachbarten stehenden Wellen einander stets entgegengesetzt sind. Daraus geht hervor, daß in der Nähe der Knoten Verdichtung und Verdünnung beständig wechseln, während in den Bäuchen beständig lebhafte Hin- und Herbewegung ohne merkliche Verdichtung und Verdünnung stattfindet. Sinnfällig demonstrieren läßt sich dies ebenfalls an der MACHSchen Wellenmaschine. Ebenso muß sich die Luft in den Lippenpfeifen verhalten, und es ist möglich, die

1) Der Versuch rührt von R. KÖNIG in Paris her, der auf diese Weise Schwingungszahlen bis jenseit der Grenze der Hörbarkeit (96 000 Schwingungen) gemessen hat. Zur Erklärung der Rippung vgl. man W. KÖNIG, Z. U. VIII 191, zur Fixierung der Erscheinung MACKEDANZ, Z. U. XXI 40.

2) Die ältere von TYNDALL herrührende Erklärung, daß aus dem Reibungsgeräusch des Luftstroms der der Röhre entsprechende Ton verstärkt werde, ist unzutreffend; die richtige Erklärung hat schon KIESSLING (Ztschr. LISSER-BENECKE II 64) gegeben.

Verdichtungen und Verdünnungen an den Knoten nachzuweisen durch das auswählende Ventil von SZYMANSKI (Z. O. I 148, O. § 88, 2), das je nach seiner Stellung nur die Verdichtungen oder nur die Verdünnungen hindurchläßt und ihre Wirkung an einem Manometer sichtbar macht.¹⁾ Die Demonstration der lebhaften Bewegung in den Bäuchen durch das Tamburin von HOPKINS dürfte allgemein bekannt sein.

Durch alle diese Nachweise wird die Annahme, daß die Fortpflanzung des Schalles in der Luft in einer longitudinalen Wellenbewegung bestehe, endgültig als zutreffend erwiesen. — Wir haben es hier mit einem Musterbeispiel der Prüfung einer Hypothese zu tun; es werden Folgerungen aus der Hypothese gezogen und durch das Experiment bestätigt.

Unter den Anwendungen der gefundenen Gesetze seien besonders noch die KUNDTschen Staubfiguren, die durch longitudinale Schwingungen von Stäben hervorgerufen werden, genannt; sie dienen zur Bestimmung der Schwingungszahl der Stäbe, und auch zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen, die ja nach der Gleichung $c = 2nl$ mit der Länge l der stehenden Wellen zusammenhängt. Die fernere Anwendung auf Orgelpfeifen und andere Tonerzeuger bedarf hier keines näheren Eingehens.

Als Abschluß aller vorausgehenden Betrachtungen wäre endlich noch die Anschauung von einer im Raum sich nach allen Seiten ausbreitenden Kugelwelle zu bilden, die dadurch zustande kommt, daß Verdichtungen und Verdünnungen nach allen Seiten sich auf beständig größer werdende Kugelflächen verteilen. Setzt man dabei die Energiemenge als konstant voraus, so folgt theoretisch, daß die Intensität des Schalles mit dem Quadrat der Entfernung abnehmen muß. Doch sind dafür noch keine strengen experimentellen Nachweise erbracht.

Mathematische Ergänzung. Unter Voraussetzung von Sinusschwingungen läßt sich den durch Zeichnung und Wellenmaschine veranschaulichten Gesetzen der Wellenbewegung noch eine präzisere mathematische Form geben.

1) Das Ventil kann auch zum Nachweis der Dichtigkeitsänderungen in fortschreitenden Wellen (nach SZYMANSKI) besonders bei gesungenen Vokalen, CHLADNischen Platten und der CAGNIARD LATOURSchen Sirene dienen, doch sind die Wirkungen hier weniger augenfällig. — Andere Methoden bei ROSENBERG II 198.

Ist $y = a \sin \frac{2\pi}{T}t$ die Gleichung für die Elongation eines schwingenden Punktes, so gilt $y = a \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{c} \right)$ oder $y = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ für einen um den Abstand x von dem ersten entfernten Punkt, da dieser erst nach der Zeit $\frac{x}{c}$ Sek. von dem gleichen Schwingungszustand ergriffen wird. Diese Gleichung stellt zugleich den Bewegungszustand für jeden Punkt einer Punktreihe in dem Fall einer transversalen Wellenbewegung dar.

In dem Fall der Interferenz einer ankommenden und einer reflektierten Welle erhält man, wenn man x von der reflektierenden Wand an rechnet, den Schwingungszustand einer stehenden Welle dargestellt durch

$$a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) - a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = 2a \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \frac{2\pi t}{T}.$$

Die Diskussion dieses Ausdrucks ergibt für die Lage der Knotenpunkte $x = \frac{k\lambda}{2}$. Entsprechendes läßt sich für die Reflexion am offenen Ende der Röhre ausführen, wobei statt des $-$ Zeichens das $+$ Zeichen eintritt.

Für fortschreitende longitudinale Wellen läßt sich überdies die Verdichtung bzw. Verdünnung bestimmen durch den Quotienten $\frac{y-y'}{x-x'}$, wenn y und y' die Elongationen zweier benachbarter Punkte, x und x' ihre Abstände vom Nullpunkt der Punktreihe bedeuten. Die Auswertung geschieht am einfachsten durch Differenzieren und liefert

$$-\frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Daraus geht hervor, daß die maximale Verdichtung bzw. Verdünnung gegen die Elongation eine Phasenverschiebung von $\frac{\lambda}{4}$ bzw. $\frac{T}{4}$ erfährt.¹⁾ Ähnliches ergibt sich für die Verdichtung und Verdünnung in stehenden longitudinalen Wellen.

Psychologische Ergänzung. Am Schlusse der Akustik ist auch die geeignete Stelle, dem Primaner den subjektiven Charakter der Sinnesempfindung gegenüber dem objektiven Charakter des Schwingungsvorgangs zum Bewußtsein zu bringen, nachdem schon auf der Unterstufe einiges Vorbereitende hierüber gesagt war. Er muß einsehen, daß es falsch ist zu sagen: der Schall besteht in einer schwingenden Bewegung der Luft oder eines festen Körpers oder gar: die Oktave ist das Doppelte des Grundtons, wie in einem sehr verbreiteten Lehrbuch zu lesen war; richtig dagegen: die Schallempfindung wird durch eine

1) Man vgl. auch HÖFLER, P., Leitaufgaben 135–136.

schwingende Bewegung hervorgerufen, bzw. „die Schwingungszahl der Oktave ist doppelt so groß wie die des Grundtons“. Weiteres am Schlusse der Optik.¹⁾

D. Optik.

Von der Optik sagt E. MACH²⁾: „Die enge Beziehung zwischen Theorie und Beobachtung, welche seit GALILEI gepflegt wird . . . bildet den wesentlichsten Vorzug der modernen Wissenschaft. An der Tatsache strebt diese Wissenschaft ihre Begriffe zu bilden, jedes einzelne Experiment sucht sie denkend zu zerlegen und kritisch mit den Voraussetzungen der Theorie zu vergleichen. In der Optik ist es besonders leicht, jeden Schritt der Deduktion durch das Experiment zu prüfen. Deshalb ist die Optik ein zur Einübung dieser Methode vorzüglich geeigneter Unterrichtsstoff.“

MACH weist auch darauf hin³⁾, daß in der Optik die Hypothese, besonders in der Form der „Arbeitshypothese“ keine solche Rolle gespielt hat, wie auf anderen Gebieten der Physik. „Die Erkenntnis der einzelnen Eigenschaften des Lichtes ist den Forschern, man möchte fast sagen, gegen ihren Willen, im Laufe der Jahrhunderte sehr langsam und allmählich durch die Tatsachen abgezwungen worden. Diese so gefundenen Eigenschaften sind nicht einzeln und nicht in ihrer Verbindung irgend etwas Hypothetisches, sondern sie sind ganz im Sinne NEWTONScher Forschungsziele durchaus tatsächliche Eigenschaften des Lichtes. Eine „*working hypothesis*“, welche aus der Beachtung von Ähnlichkeiten im Verhalten des Lichts mit anderen bekannteren Vorgängen (Schall- und Wasserwellen) sich ergab, ist ja der Forschung behilflich gewesen; indem aber die einzelnen Ähnlichkeiten und Unähnlichkeiten mit anderen Vorgängen bestimmt hervortraten, wurden dieselben zu ebensovielen tatsächlichen begrifflichen Bestimmungen des Lichtes.“

Zwei Probleme stehen im Mittelpunkt des Unterrichts der Oberstufe: die Zusammensetzung des weißen Lichts aus farbigen Lichtarten und die Wellennatur des Lichtes. Beide haben zunächst unabhängig voneinander ihre Bearbeitung gefunden, und auch der Unterricht wird am besten diesem historischen Gange folgen, um so mehr als dabei ganz natürlich das zweite Problem aus dem ersten herauswächst. Neben diesen beiden Gegenständen

1) Man sehe auch den oben (S. 301) angeführten Aufsatz von HÖFLER.

2) Z. U. V 228.

3) Bemerkungen über die historische Entwicklung der Optik, Z. U. XI 3.

werden auch die Gebiete der Reflexion und Brechung des Lichts einer Wiederaufnahme behufs Klärung und Präzisierung der nur propädeutisch eingeführten Begriffe bedürfen. Endlich fordert die Gesichtswahrnehmung nebst den damit zusammenhängenden Problemen eine ausführliche Behandlung.

Die übliche Anordnung des Stoffs, bei der die Interferenzerscheinungen fast an das Ende gestellt sind, hat den großen Nachteil, daß die vorausgehenden Abschnitte noch nicht unter dem Gesichtspunkt der Wellenbewegung des Lichts aufgefaßt werden können. Es ist deshalb hier eine andere Anordnung gewählt, bei der die Grundlagen der Wellentheorie unmittelbar auf die Betrachtung der prismatischen Farbenzerstreuung folgen.

Die Optik ist an vielen Stellen vorzüglich zu einer objektiven Demonstration vor einem großen Hörerkreise geeignet, wenn man nur eine genügend starke Lichtquelle zur Verfügung hat. Andererseits soll man sich nicht scheuen, manche Beobachtungen subjektiv machen zu lassen. Der dadurch veranlaßte Zeitverlust wird reichlich dadurch aufgewogen, daß die subjektive Beobachtung in der Regel einen anderen Grad von Unmittelbarkeit und Eindringlichkeit besitzt, als die schönste objektive, aber eben darum mehr bildhafte Demonstration.

§ 36. I. Geradlinige Ausbreitung, Reflexion und Brechung des Lichts.

1. Dieses Gebiet wird zunächst, was die theoretische Seite betrifft, nur in der Form der geometrischen Optik behandelt. Es kommt hier gleich im Beginn auf eine präzisere Fassung dessen an, was schon auf der Unterstufe vom Lichtstrahl gesagt wurde. Der schon den Alten geläufige Begriff ist ohne Frage auf die Lichtlinien zurückzuführen, die man wahrnimmt, wenn man durch die Augenwimpern hindurch gegen eine Lichtquelle blickt. Die Alten haben sich daher auch ursprünglich vorgestellt, daß die „Sehstrahlen“ vom Auge ausgehen und gleichsam die Gegenstände betasten. Als man mit wachsender Naturerkenntnis diese Sehstrahlen durch Lichtstrahlen ersetzte, die von den leuchtenden Gegenständen ausgehend gedacht wurden, war man wohl hauptsächlich durch die geradlinige Begrenzung der Schattenräume geleitet, vielleicht auch durch den geradlinigen Gang des durch eine kleine Öffnung hindurchgetretenen Lichtbündels. Indem man dann von Dicke und qualitativen Unterschieden absah, wurde schließlich die gerade Linie der Geometrie zum Symbol für den Weg des Lichtes. In diesem Sinne ist die Definition (O. § 91) aufzufassen: „Unter Lichtstrahlen versteht man die geraden Linien, längs denen das Licht in einem gleichartigen (homogenen) Medium sich ausbreitet.“ Übersieht man die ganze Entwicklung, so zeigt

sich, daß der Begriff des Lichtstrahls doch nicht schlechthin aus der Erfahrung abstrahiert, sondern als eine „Idee“ an die Erscheinungen herangetragen worden ist. Wollte man den Lichtstrahl selbst als mathematische Linie ansehen, so ergäben sich physikalische Schwierigkeiten, da bei einem Lichtbündel, dessen Querschnitt unter eine gewisse Grenze sinkt, die auftretenden Beugungserscheinungen den Charakter des Strahls völlig verändern. Von den hier auftretenden Paradoxieen befreit erst die Wellentheorie des Lichts.

2. Das Reflexionsgesetz ist auf der Unterstufe mit naiver Empirie festgestellt worden. Auf der Oberstufe kann man an diesem einfachen Beispiel schon das Ineingangreifen von Empirie, Hypothese, Abstraktion und Theorie den Schülern verdeutlichen.¹⁾ Selbst zahlreiche Messungen an verschiedenen spiegelnden Flächen führen nur zu einem empirischen Gesetz; die Erweiterung zu einem physikalischen Gesetz von allgemeiner Gültigkeit ist ein „hypothetischer Akt, eine willkürliche, wenn auch vielleicht sehr wahrscheinliche Annahme, und zunächst nichts anderes als eine Arbeitshypothese“. Die klare Aufstellung des Gesetzes erfordert ferner eine scharfe Definition der darin enthaltenen Begriffe. Schwierigkeiten schließt schon der Begriff des „ebenen Spiegels“ ein, er ist streng genommen eine Abstraktion, denn man kann eine ebene spiegelnde Fläche nur als eine vollkommen mathematische Ebene definieren, eine solche gibt es aber in der Natur nicht, unser Reflexionsgesetz gilt also mit allerdings durchaus brauchbarer Annäherung für Spiegel, die in genügendem Grade als mathematisch eben angesehen werden dürfen.

Von dem Begriff des Strahls war vorher schon die Rede, auch hier zeigt sich, daß nur der weitere Ausbau der Theorie in der Wellenbewegung das Mittel liefert, die Darstellung des Reflexionsvorgangs zu präzisieren.

In dem Abschnitt über die Reflexion des Lichtes sind die Hohlspiegel ein beliebtes Feld unexakter mathematischer Betrachtung gewesen. Die übliche Ableitung hat wegen ihrer Unstrenge gewisse Bedenken gegen sich. Gibt man sie, so sollte man den wirklichen Sinn der dabei angewandten Vereinfachung deutlich machen. Dieser besteht nicht darin, daß die Öffnung des Spiegels sehr klein oder seine Krümmung sehr gering ist, sondern daß das auffallende Strahlenbündel eine sehr kleine Öffnung hat, und daß seine sämtlichen Strahlen unter kleinen Winkeln auf den Spiegel fallen. Für solche Strahlenbündel gilt dann die einfache Hohlspiegelformel.

Heute, wo die Schülerübungen einen stets wachsenden Raum einnehmen, ist auch der Weg beachtenswert, auf dem HAHN²⁾ zu der Hohl-

1) Vgl. P. GRUNER in den Monatsheften f. d. n. U. I (1907) S. 25.

2) HAHN, Handbuch VIII Aufg. 9.

spiegelformel gelangt. Aus „Nadelversuchen“ ergibt sich, daß Gegenstand und Bild sich ebenso gegen den Abstand Spiegelscheitel-Krümmungsmittelpunkt verschieben, wie zwei konjugierte harmonische Punkte. Es wird die Vermutung aufgestellt, daß für die Beziehung zwischen Gegenstandsweite, Bildweite und Krümmungsradius das mathematische Gesetz des harmonischen Mittels gelte, d. h.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Dies Gesetz wird durch Versuche bestätigt und auf die verschiedenen „Hohlspiegelfälle“ angewandt. Es ist aber in diesem Fall kein mathematisch genaues Gesetz, sondern eine empirisch aufgestellte Annäherungsformel.

Unter den Versuchen mit Hohlspiegeln verdient die Demonstration des frei in der Luft schwebenden Hohlspiegelbildes nicht übergangen zu werden; auch ROSENBERG (II 4 23) urteilt, daß der Versuch lehrreich sei und mehr als eine interessante Spielerei bedeute. Das Lehrreiche liegt namentlich in der frappanten Körperlichkeit eines solchen Bildes.

Daß bei stärkerer Krümmung des Spiegels eine Katakaustik auftritt, ist am besten mit einem halbkreisförmig gekrümmten Metallstreifen zu zeigen.¹⁾ Die mathematische Behandlung fällt außerhalb der Grenzen des Physikerunterrichts, gibt aber, wo die Verhältnisse dafür günstig sind, ein treffliches Übungsmaterial für die Mathematik ab.²⁾

Andererseits ist auch auf die Aberrationsfreiheit der parabolischen Spiegel hinzuweisen, obwohl die mathematische Begründung dieser Eigenschaft auch erst in der Mathematik erfolgen kann. Verständlich macht indes, daß durch eine angemessene Biegung des sphärischen Spiegels nach außen die Aberration aufgehoben werden können.

3. Das Brechungsgesetz kann, wie schon S. 157 angedeutet, nicht durch Induktion aus Versuchen gefunden werden. Es kann sich bei diesen nur um eine Bestätigung, nicht um die Entdeckung des Gesetzes handeln. „Optische Scheiben mit aufgezeichnetem Sinusnetz ermöglichen keine Heuristik“ (MÜLLER, Z. U. XXII 146). Dieses Urteil trifft auch ein VON RECKNAGEL (vgl. Z. U. VI 307) empfohlenes Verfahren wenigstens zum Teil; man kann zunächst an einige Messungen mit kleinen Winkeln die Vermutung anschließen lassen, daß wohl das Verhältnis α/β konstant sei; diese Vermutung wird durch Versuche mit größeren Winkeln nicht bestätigt. Soweit ist alles in Ordnung. Man kann aber dann aus diesen Versuchen nicht das Sinusgesetz induktiv ableiten, der

1) Die Lage des Bildes bei stark gekrümmten sphärischen Spiegeln ist sehr schön zeichnerisch dargestellt in SCHELLBACH und ENGEL, Atlas der geometrischen Optik. Ebenda auch lehrreiche Zeichnungen für die Brechung des Lichts in Linsen und in Wassertropfen.

2) Vgl. SCHELLBACH, Z. U. I 186, 239.

Scharfblick des Genies läßt sich nicht durch eine dem Schüler zugeschobene und in den Mund gelegte Pseudo-Entdeckung ersetzen. Man soll sich, wenn man die Schwierigkeit gezeigt hat, damit begnügen, das Gesetz anzugeben und durch die gemachten Messungen prüfen zu lassen, oder durch weitere Messungen zu bestätigen.

Zur rechten Beurteilung der Schwierigkeiten, die bei der Entdeckung des Gesetzes zu überwinden waren, ist ein Blick auf die Geschichte des Problems nützlich. Bekanntlich hat PTOLEMÄUS die ersten Refraktions-tabellen für Luft und Wasser, Luft und Glas aufgestellt und daraus schließen zu dürfen geglaubt, daß das Verhältnis des Einfallswinkels zum Brechungswinkel konstant sei. Erst KEPLER hat bemerkt, daß dies nur für kleinere Einfallswinkel (bis etwa 30°) zutrifft, dann aber eine immer stärkere Abweichung eintritt, je mehr der Einfallswinkel wächst. Er nahm an, daß der gebrochene Winkel aus zweien zusammengesetzt sei, von denen der eine dem Einfallswinkel proportional sei, der andere von der trigonometrischen Sekante des Brechungswinkels abhängig sei „KEPLER selbst fühlte, wie diese Theorie zu gekünstelt sei, um als ein Naturgesetz gelten zu können, er hoffte aber mit Recht, einen Schritt näher zur endlichen Entdeckung des wahren Brechungsgesetzes getan zu haben.“¹⁾ Einen weiteren Fortschritt bedeutet dann die Entdeckung von SNELLIUS, daß die Wege des Lichts bis zur gegenüberliegenden Wand, je nachdem sie in Wasser oder in Luft zurückgelegt werden, ein konstantes Verhältnis haben, welche Größe auch der Einfallswinkel haben mag. Diese Wege (AD und AC) verhalten sich aber, wie aus der Fig. 24 ersichtlich, wie $\text{cosec } \beta : \text{cosec } \alpha$. DESCARTES endlich bemerkte, daß dies Verhältnis durch das einfachere $\sin \alpha : \sin \beta$ ersetzt werden könne.²⁾ Bemerkenswert ist, daß schon DESCARTES die Nötigung zu einer mathematischen Begründung empfand, die erst viel später durch die Wellentheorie des Lichts ermöglicht wurde.

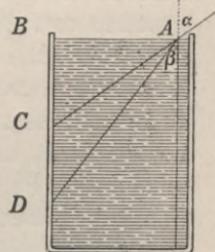


Fig. 24.

In die experimentelle Behandlung des Gesetzes führt am besten der schon auf der Unterstufe vorgeführte Versuch KEPLERS am Glaswürfel ein. Er läßt sich leicht zu einer Erläuterung der SNELLIUSSCHEN Entdeckung verwerten. MÖLLER (T. 182) hat den Versuch zu einer zweckmäßigen Demonstration umgestaltet, die auch zur Messung brauchbar ist. Mißt man nämlich die Abstände BC und BD , so findet man daraus

1) WILDE, Geschichte der Optik I 190. Man vgl. auch POGGENDORFF, Geschichte der Physik, S. 311.

2) Ich halte es mit ROSENBERGER (II 112) für wahrscheinlich, daß DESCARTES von der Entdeckung des SNELLIUS Kenntnis gehabt hat. Anders urteilt GERLAND, Geschichte der Physik 482.

leicht das Verhältnis $t\alpha : t\beta$ und dann weiter $\sin\alpha : \sin\beta$. Auf andere experimentelle Hilfsmittel soll hier nicht weiter eingegangen werden.¹⁾

Für die geometrische Konstruktion des gebrochenen Strahles ist die von WEIERSTRASS herrührende mit Hilfe zweier konzentrischer Kreise (O. § 96, 1) am meisten zu empfehlen.

In Betreff der sonstigen üblichen Versuche sei besonders daran erinnert, daß das Bild einer im Wasser liegenden Münze nicht nur gehoben, sondern auch dem Beobachter genähert erscheint, wenn man es mit einem Auge betrachtet. Beim Sehen mit beiden Augen erscheint es nur gehoben.²⁾ Der Grund der Verschiedenheit liegt darin, daß das austretende Strahlenbündel astigmatisch ist.

Bei der Totalreflexion tritt bereits die fundamentale Bedeutung des Brechungsgesetzes für die Erklärung optischer Erscheinungen in helles Licht. Der Übergang ergibt sich von selbst bei der Konstruktion des Strahlenweges aus Wasser und Luft für verschiedene Einfallswinkel. Auch hier ist es ratsam, den Versuch voranzustellen, bei dem ein Lichtstrahl so lange gedreht wird, bis totale Reflexion eintritt.

Nur erinnert sei, daß astronomische und terrestrische Strahlenbrechung in diesem Abschnitt nicht übergangen werden sollten (O. § 97).

4. Der Durchgang des Lichts durch planparallele Platten und durch Prismen bietet weitere lehrreiche Anwendungen des Brechungsgesetzes dar. Bei ersteren ist die Parallelverschiebung des Lichtstrahls sowohl subjektiv wie objektiv leicht sichtbar zu machen. Das Eingehen hierauf ist wichtig, weil darauf bei der Interferenz des Lichtes zurückzukommen sein wird. Die Betrachtung des Prismas beginnt man am besten damit, daß man eine Anzahl von solchen unter die Schüler verteilt und die Farben sowie die Verschiebung etwa der Umrahmungen der Fensterscheiben betrachten läßt.³⁾ Für solche, die sich schwer damit zurechtfinden, stellt man ein Prisma fest auf und davor zur Fixierung des Auges eine Ablendung parallel zur brechenden Kante. Man stellt dann dieselbe Erscheinung objektiv dar und richtet das Augenmerk zunächst nur auf die Ablenkung des Lichtes. Zu messenden Versuchen kann recht gut die optische Scheibe dienen. Hierbei entdeckt man auch das Minimum der Ablenkung, und daß es bei symmetrischem Durchgang des Lichtes durch das Prisma eintritt. Für die experimentelle Bestätigung

1) Außer der bekannten optischen Mattglasscheibe (Z. U. III 102; VI 269; VII 107 u. a.) seien noch genannt der Apparat von BLÜMEL II 162, von STAHLBERG (Z. U. XV 65) und die verbesserte TYNDALL-MACHSche Trommel von STROMAN (Z. U. XVIII 71, XIX 160). Zur Totalreflexion überdies G. KEMMA, XV 156; B. KOLBE XIX 1; GRIMSEHL XX 215.

2) H. HAHN, Z. U. VII 17; GÖTTING, Z. U. IX 235; vgl. oben S. 157.

3) Wo Schülerübungen stattfinden, wird die Betrachtung natürlich in diesen vorgenommen und weiter ins Einzelne ausgeführt (HAHN, Handbuch, Abschn. VIII 18).

dieser Bedingung hat MÜLLER (T. 185) ein sehr einfaches Verfahren angegeben.

Nun erst darf die mathematische Betrachtung einsetzen, die in jedem Fall von genauer Konstruktion des Strahlenganges begleitet sein sollte. Für die Bedingung des Minimums gibt es eine Reihe von elementaren Ableitungen¹⁾, von denen man je nach der mathematischen Vorbildung der Schüler den rechnerischen oder den konstruktiven den Vorzug geben wird. Die Behandlung nach der Infinitesimalmethode hat nicht den Vorzug größerer Einfachheit.²⁾

Für das Minimum D der Ablenkung erhält man, wenn γ den Winkel an der brechenden Kante bezeichnet, die Gleichung

$$\sin \frac{1}{2} (D + \gamma) = n \sin \frac{1}{2} \gamma,$$

deren Anwendung zur Bestimmung von n auf der Hand liegt und für Schülerübungen vortrefflich geeignet ist.³⁾ —

An das Prisma schließt sich in den fast durchweg systematisch geordneten Lehrbüchern die ziemlich lange Zeit in Anspruch nehmende Betrachtung der Linsen und optischen Instrumente an. Man sollte aber das Problem der Farbenentstehung, das bereits das lebhafteste Interesse der Schüler erweckt hat, nicht länger zurückstellen. Ich ziehe daher vor, sofort zu diesem überzugehen, zumal einiges von den Linsen schon auf der Unterstufe gesagt ist, der gelegentlichen Anwendung der Linsen bei den Versuchen also nichts im Wege steht.

§ 37. II. Farbenzerstreuung durch das Prisma.

1. Dieses Problem hat ebenfalls eine lange, bis ins Altertum zurückreichende Geschichte.⁴⁾ Im I. Teil dieses Buches ist auch bereits (S. 24) auf die Bedeutung der NEWTONSchen Untersuchungen in methodischer Hinsicht hingewiesen worden. Es wird dem Unterricht sicher von Nutzen sein, wenn von diesen Untersuchungen soviel als irgend angeht in die Darstellung eingeflochten wird.

Anzuknüpfen ist wiederum an die schon erwähnten Beobachtungen am Prisma. Man wird aber diesmal das Augenmerk darauf richten, daß helle Flächen, durch das Prisma gesehen, mit farbigen Rändern gesäumt erscheinen. Auch an das Regenbogenphänomen ist schon hier zu erinnern. Den Weg zur Erklärung dieser merkwürdigen Erscheinungen bahnte NEWTONS Grundver-

1) Vgl. MÜLLER, Z. U. III 247, POSKE, O. § 98, ferner die Literatur in Z. U.

2) Vgl. z. B. E. DINGELDEY, Sammlung von Aufgaben usw. S. 131.

3) HAHN, Handbuch, Abschn. VIII 8.

4) Man vgl. u. a. GOETHE, Materialien zur Geschichte der Farbenlehre.

such, den man nun jedenfalls zum Ausgang der weiteren Betrachtung wählen wird, nur daß man die runde Öffnung durch einen engen Spalt ersetzt. Kann man kein Sonnenlicht benutzen, so empfiehlt sich (auch für die späteren Versuche) die Benutzung einer kurzen optischen Bank, an der die Lichtquelle (Bogenlampe mit wagerechter positiver Kohle) fest angebracht ist, so daß die ganze Vorrichtung ohne Änderung der Einstellung bequem gedreht und das Spektrum auf die den Schülern gegenüberliegende Wand geworfen werden kann. Über die Einzelheiten vgl. man ROSENBERG I 351, II 435, MÜLLER, T. 185, GRIMSEHL, L. § 258.

NEWTON kam nach mehreren unzutreffenden Annahmen (vgl. S. 24) auf die Vermutung, daß das weiße Licht aus farbigen Lichtarten zusammengesetzt sei und daß diese sich durch ihre verschiedene Brechbarkeit unterscheiden. Heute wird dies zuweilen schon als eine einfache Folgerung aus dem Grundversuch angesehen. NEWTON dachte strenger, und wir tun gut, ihm darin zu folgen. Zur Bestätigung seiner Vermutung stellte er den Versuch an, den er selbst als Experimentum crucis, als entscheidenden Versuch bezeichnet. Er sonderte durch einen Schirm mit schmalen Spalt beliebige verschiedenfarbige Bestandteile des Spektrums aus und wies mit einem zweiten Prisma nach, daß diese verschieden stark gebrochen werden, und zwar um so stärker, je näher sie dem violetten Ende liegen.¹⁾

NEWTON schloß aus diesen und ähnlichen Versuchen, „daß die Strahlen, die durch die Brechung einmal farbig geworden sind, bei wiederholten Brechungen ihre Farben unverändert behalten und sich auch nicht mehr, wie das Licht der Sonne, durch die Brechung ausbreiten, daß man daher jede einzelne Farbe des Spektrums, im Gegensatz zum heterogenen Sonnenlicht, homogen nennen müsse.“²⁾

Um den anderen Teil der Vermutung, nämlich, daß das weiße Licht aus diesen farbigen Lichtarten zusammengesetzt sei, zu beweisen, stellte NEWTON einen weiteren Versuch an, der zu den stehenden Schulversuchen gehört, indem er nämlich die farbigen

1) Eine sehr schöne Variante des Versuchs (Versuch mit gekreuzten Prismen), die auch schon von NEWTON herrührt, bei MÜLLER, T. 186, dort fälschlich als das Experimentum crucis bezeichnet; vgl. BODE, Z. U. V 296; ROSENBERG II 437.

2) WILDE, Geschichte der Optik II 40.

Lichtarten des Spektrums durch eine Linse wieder zu Weiß vereinigte.¹⁾ Andere Versuche, die dasselbe zeigen, bei MÜLLER, T. 186 und ROSENBERG a. a. O. Daß eine Summe von farbigen Lichteindrücken die Empfindung von Weiß hervorbringen kann, wird durch den am besten hier vorzuführenden Farbenkreisel dargetan, wobei indessen die Verschiedenheit der Körperfarben von den Spektralfarben nicht unbeachtet bleiben darf und die Erklärung der ersten als ein Problem für die weitere Untersuchung hinzustellen ist. Eine Vereinigung subjektiver Farbeneindrücke zu Weiß wird übrigens auch erreicht, wenn man das Spektrum auf einen rotierenden Spiegel fallen läßt (ROSENBERG, II, 444).

Die drei genannten Versuche müssen im Unterricht vorgeführt werden, durch sie sind die Fundamente von NEWTONS Farbenlehre festgelegt. Es ist indessen gut, sich zu vergegenwärtigen, daß streng genommen auf diese Weise nur gezeigt ist, daß die farbigen Lichtarten aus dem weißen Licht entstehen und rückwärts wieder bei der Mischung weißes Licht ergeben. Daß aber nun weißes Licht aus den farbigen Lichtarten zusammengesetzt sei oder bestehe — in dem Sinn, daß diese alle in jenen enthalten wären — ist eine Annahme, die über das rein Tatsächliche hinausgeht.²⁾ Es ist in der Tat — auch bei Hinzunahme der Undulationstheorie des Lichts — schwer, sich vorzustellen, wie die unendliche Reihe der homogen gedachten Elementarstrahlen in dem einen weißen Lichtstrahl enthalten sein sollen. Die Sachlage ist ähnlich wie bei der chemischen Verbindung, wo auch die Eigenschaften der Bestandteile mehr oder weniger von denen der Verbindung verschieden sind. Während aber hier die Zahl der Komponenten meist nur klein ist und die Molekularhypothese eine anschauliche Vorstellung der Vereinigung der Elemente gestattet, fehlt bei der Zusammensetzung des weißen Lichts anscheinend jede Möglichkeit der Veranschaulichung. Man begreift, daß GOETHE zumal unter dem Eindruck des sehr unzulänglichen Farbenkreiselexperiments sich gegen die Konsequenzen der NEWTONSchen Lehre sträubte. Beachtenswert ist, daß auch heute wieder Stimmen laut werden, die sich gegen die „Zusammengesetztheit“ des weißen Lichts erklären und das weiße Licht vielmehr auf

1) Daß die Brennweite der zur Vereinigung dienenden Linse kleiner sein muß als der Abstand des Spektrums vom Prisma, hebt GRIMSEHL D. 66 hervor.

2) MACH ist in E. u. J. 246 allerdings der Meinung, daß die Frage durch NEWTONS experimentum crucis entschieden sei.

einen Ätherstoß zurückführen, der erst bei der Brechung in die Reihe der farbigen Elementarstrahlen (Schwingungen) aufgelöst werde. Es mag daher der Hinweis nützlich sein, daß hier noch ein ungelöstes Problem vorliegt (vgl. unten § 36 Nr. 6).

2. Die Vereinigung der Elementarfarben zu Weiß legt die Frage nahe, welches Resultat man erhalten wird, wenn man nicht alle Farben des Spektrums, sondern nur einen Teil von ihnen vereinigt. Eine Reihe von Versuchsanordnungen¹⁾ ermöglicht die Herstellung spektraler Mischfarben, sowie auch die Demonstration der komplementären Mischfarben, die durch Teilung des Spektrums erhalten werden. Die sich hier aufdrängende Frage nach der Entstehung der Körperfarben möge für einen späteren Abschnitt zurückgestellt bleiben.

Nachdem die Mischung der Spektralfarben vorgeführt ist, kann auch die Erklärung der an den Anfang gestellten Erscheinung, der farbigen Säume prismatischer Bilder von begrenzten hellen Flächen gegeben werden. Es wird darauf in den Lehrbüchern selten näher eingegangen. Eine Erläuterung durch eine allerdings unvollkommene Zusammensetzung farbiger Teilstreifen findet man in O. § 100, 5 und Fig. 270.

3. Die Definition der Elementarfarben des Spektrums bloß durch die verschiedene physiologische Wirkung ist überaus unsicher – vergleichbar der Wirkung verschiedener Wärmegrade auf den Wärmesinn. Eine Definition vermitteltst des zugehörigen Brechungsquotienten hat bereits NEWTON zu geben versucht (Opt. p. II, prop. III, probl. 1), indem er die von ihm unterschiedenen sieben Farben durch bestimmte Werte des Brechungsquotienten gegeneinander abgrenzte. Genaue Messungen stellte FRAUNHOFER nach der Methode des Minimums der Ablenkung an, die nach ihm die FRAUNHOFERSche Methode genannt wurde. Er fand bei diesen Versuchen, daß die Wiedererkennung gleicher Stellen im Spektrum am leichtesten zu erreichen war mit Hilfe der sogenannten FRAUNHOFERSchen Linien, die stets genau bei denselben Farbentönen des Sonnenspektrums liegen. Man wird sich an dieser Stelle mit der historischen Darstellung begnügen können, wobei besonders das Schaffen FRAUNHOFERS selbst Beachtung

1) Versuche bei ROSENBERG I 355, II 437. Besonders erwähnt sei die Vorrichtung von E. LEYBOLDS Nachf. und GRIMSEHL, Z. U. XX 212. Man vgl. auch die Versuche mit rotierendem Spiegel von STROMAN, Z. U. XVIII 32.

verdient¹⁾, und kann die FRAUNHOFERSchen Linien gelegentlich der Dispersionsversuche beiläufig einmal demonstrieren (vgl. aber § 40).

Die solcher Art gewonnene Charakteristik der Elementarfarben des Spektrums ist indessen noch von der Natur des zum brechenden Medium gewählten Stoffes abhängig – wie die Angaben eines Thermometers von der Natur der thermometrischen Substanz. Auch ohne genauere Messung kann durch den bloßen Augenschein die verschiedene Ausdehnung des Spektrums bei Flint- und Kronglas, Wasser und Schwefelkohlenstoff demonstriert werden. Die Verschiedenheit zeigt sich namentlich, wenn man für die Größe der totalen Dispersion, etwa zwischen den FRAUNHOFERSchen Linien *B* und *H*, als Maß die Differenz der den beiden Endpunkten zugehörigen Brechungsquotienten $n_e - n_r$ wählt (O. § 101). Die solcher Art durchgeführten Messungen für verschiedene Substanzen liefern, abgesehen von den genauen quantitativen Werten, die folgenden beiden Sätze:

- a) Die totale Dispersion ist für verschiedene Stoffe von verschiedener Größe und auch nicht von dem (mittleren) Brechungsquotienten abhängig; dem stärkeren Brechungsvermögen entspricht auch nicht immer die stärkere Dispersion.
- b) Die durch verschiedene Stoffe erzeugten Dispersionsspektren sind einander nicht geometrisch ähnlich.

4. An die eben gefundenen Sätze schließt sich die Folgerung: Je zwei Stoffe können bei gleich großer Dispersion ungleiche Richtungsänderung oder umgekehrt bei gleicher durchschnittlicher Richtungsänderung der Strahlen ungleiche Dispersion bewirken.²⁾ Dies führt dann auf deduktivem Wege zur Konstruktion des achromatischen Prismas und des Geradsichtprismas.

Nach ROSENBERG (II 438) zeigt man erst durch ein Doppelprisma (Fig. 25), das zur Hälfte aus Kronglas, zur anderen Hälfte aus Flintglas besteht, daß bei gleichem brechenden Winkel das letztere ein längeres und zugleich weiter abgelenktes Spektrum liefert als das erstere. Es muß daher möglich sein, durch passende Verkleinerung des brechenden Winkels des Flintglasprismas entweder die Länge oder die Ablenkung seines Spektrums auf dieselbe Größe wie beim Kronglasprisma zu brin-

1) Man sehe z. B. A. KISTNER, Deutsche Physiker und Chemiker.

2) Nach WEINHOLD D. (3) 355 bewirken ein Wasserprisma von 60°, ein Kronglasprisma von 43° und ein Schwefelkohlenstoffprisma von 34° brechendem Winkel in der Minimumstellung gleiche Ablenkung, aber verschiedene Dispersion.

gen. Eine einfache Betrachtung lehrt, daß beides zugleich nicht erreichbar ist. Sind nämlich δ_r und δ_v die Ablenkungen für rot und violett, n_r und n_v die Brechungsquotienten, so ist bei kleinem brechendem Winkel γ

$$\delta_r = (n_r - 1)\gamma \quad \text{und} \quad \delta_v = (n_v - 1)\gamma,$$

also die Dispersion

$$\delta_v - \delta_r = (n_v - n_r)\gamma.$$

Setzt man die Werte für Kronglas und Flintglas unter Annahme eines halb so großen Winkels für das letztere ein, so werden die Dispersionen annähernd gleich groß, während die Ablenkungen für rote Strahlen sich etwa wie 3 : 5 verhalten (ROSENBERG, Lehrb. für die Oberklassen 412). Bei entgegengesetzter Aufstellung werden also die Dispersionen sich aufheben und nur die Differenz der Ablenkungen wird übrig bleiben: Achromatisches Prisma. Macht man die Ablenkungen gleich, so gelangt man auf demselben Wege zum Geradsichtprisma. Die erstere Erscheinung wird durch ein bekanntes Unterrichtsmodell, die zweite durch ein Geradsichtspektroskop demonstriert.

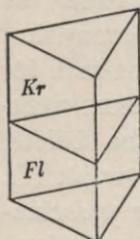


Fig. 25.

Die Anwendung der Achromasie auf Linsen wie auch das gesamte übrige Gebiet der Spektroskopie verschieben wir bis nach Einführung der Undulationstheorie und verweilen nur noch bei der Betrachtung des Regenbogens.

5. Bezüglich des Regenbogens kann ich der Meinung ROSENBERGS nicht beipflichten, daß man trachten solle über diesen „heiklen Gegenstand“ so rasch als möglich hinwegzukommen. Handelt es sich doch um die auffallendste Erscheinung aus der meteorologischen Optik, die von jeher Interesse und Phantasie der Menschen erregt hat. Einer solchen gegenüber sollte sich der Physikunterricht schlechthin als unzulänglich erklären? Auch MÜLLER (T. 191) bedauert es, daß manche Bücher und auch wohl viele Lehrer die Theorie des Regenbogens sehr oberflächlich abtun. Andererseits hat ja bekanntlich PERNTER (Z. U. XII 338, 366) sich gegen die übliche, an DESCARTES und NEWTON anschließende Erklärung des Regenbogens gewendet und eine Behandlung auf Grund der AIRYSchen, die Beugung heranziehenden Theorie verlangt (eine schulmäßigere Gestaltung dieser Theorie hat AL. MÜLLER, Z. U. XX 297 zu geben versucht). Ich schließe mich dem Urteil von E. MAISS (Z. U. XX 366) an, der einen mittleren Weg empfiehlt, und sehe es schon als einen Gewinn an, wenn den Schülern die Farbenfolge, die Größe des Halbmessers und die Kreisgestalt des Regenbogens erklärt wird. Man wird allerdings nicht unter-

lassen dürfen, darauf hinzuweisen, daß noch eine ganze Reihe von Eigentümlichkeiten (variable Breite, Mannigfaltigkeit des Farbenbildes, größte Intensität der blauen Farbe, innere sekundäre Bogen mit umgekehrter Farbenfolge, weiße Regenbogen auf Nebel) noch unerklärt bleiben und nur durch eine strengere Theorie ihre Erklärung finden.¹⁾

Man wird mit einer „recht naturwahren“ Beschreibung des Phänomens und der „Anregung zu gelegentlicher aufmerksamer Betrachtung“ beginnen müssen. Dabei ist auch die Veränderlichkeit des Ortes des Regenbogens mit dem Ort des Beobachters hervorzuheben. Behufs Erklärung der Erscheinung ist daran anzuknüpfen, daß in der Wolkenwand, an der das Phänomen auftritt, nicht nur Reflexion, sondern auch Brechung (wegen der Regenbogenfarben) angenommen werden muß. Es kommt also darauf an, den Gang eines Lichtstrahls in einem Wassertropfen näher zu untersuchen. Dies geschieht nach dem Vorgang von DESCARTES (aber in etwas einfacherer Behandlungsart, vgl. Z. U. XIII 42), indem man den Winkel δ , der das Supplement der Drehung des Strahls darstellt, für verschiedene Einfallswinkel α und die zugehörigen Brechungswinkel β nach der leicht abzuleitenden Formel $\delta = 4\beta - 2\alpha$ berechnet (O. § 102). Unter der Annahme $n = 4/3$ erhält man eine Tabelle von nebenstehender Art:

Hieraus ist ersichtlich, daß der Wert von δ für Einfallswinkel zwischen 59° und 60° einen Maximalwert annimmt und daß die in der Nähe dieses Wertes liegenden (mindestgedrehten) Strahlen nahezu parallel sind.²⁾ Diese bringen also, wenn sie das menschliche Auge treffen, einen stärkeren Lichteindruck hervor, als alle anderen divergent austretenden Strahlen. Das weitere in O. § 102. Insbesondere ist der Unterschied der Werte von δ für rot und violett zu beachten: $\delta_r = 42^\circ 30'$,

α	β	δ
10°	$7^\circ 29'$	$9^\circ 56'$
20°	$14^\circ 51' 8$	$18^\circ 27' 2$
30°	$22^\circ 1' 5$	$28^\circ 6'$
40°	$28^\circ 49' 3$	$35^\circ 17' 2$
50°	$35^\circ 4'$	$40^\circ 16'$
55°	$37^\circ 54' 3$	$41^\circ 37' 2$
56°	$38^\circ 26' 7$	$41^\circ 46' 8$
57°	$38^\circ 58' 6$	$41^\circ 54' 4$
58°	$39^\circ 29' 8$	$41^\circ 59' 2$
59°	$40^\circ 0' 4$	$42^\circ 1' 6$
60°	$40^\circ 30' 3$	$42^\circ 1' 2$
70°	$44^\circ 48' 75$	$39^\circ 15'$
80°	$47^\circ 36' 75$	$30^\circ 27'$

1) Der Hauptmangel der DESCARTESSchen bzw. NEWTONSchen Theorie liegt in der unrichtigen Annahme, daß die mindest abgelenkten Strahlen die einzigen wirksamen Strahlen sind; sie führt zu dem falschen Resultat, daß die Regenbogen stets das gleiche Aussehen haben müßten (CHWOLSON II 719).

2) NEWTON erinnert daran, daß bei Annäherung der Sonne an einen der Wendekreise die Tage eine Zeit lang nur sehr wenig zu- und abnehmen. Die in älteren Lehrbüchern verbreitete Figur, bei der zwei riesengroße Regentropfen in den Bogen eingezeichnet sind, einer für den Gang der violetten, der andere für den der roten Strahlen, stammt auch von NEWTON.

$\delta_0 = 40^\circ 20'$, woraus sich die ungefähre Breite des Regenbogens wie auch die Folge der Farben erklärt.

Diese Betrachtungen dürften schon genügen, ein, wenn auch rohes Verständnis der Art, wie auch beim Regenbogen die bisher erkannten optischen Gesetze ins Spiel treten, zu erzielen. Will man einen Schritt weiter gehen, so kann man die empiristische Art der Herleitung der mindestgedrehten Strahlen, wie DESCARTES sie gibt, durch eine elementare Maximumbetrachtung ersetzen (O. a. a. O.).¹⁾

An die Stelle der Rechnung kann auch die zeichnerische Behandlung treten. Vorbildlich dafür ist die schöne Figur in SCHELLBACH und ENGELS Atlas. Eine sehr einfache Konstruktion für den Weg eines Lichtstrahls in einem Wassertropfen hat WEIERSTRASS angegeben (nach SCHELLBACH, Z. U. II 125, auch bei MÜLLER, T. 191). Bei mathematisch vorgeschrittenen Schülern ist auch die konstruktive Behandlung von HOSSFELD (Z. U. XII 203), allerdings nur als Aufgabe für den Mathematikunterricht, zu empfehlen.

Es handelt sich schließlich noch um die experimentelle Wiedergabe der Erscheinung. Die Demonstration mittels einer wassergefüllten Glas- kugel sollte vermieden werden; nach SCHÖEPP (Z. U. XXII 368) entsteht das hierbei auftretende dem Regenbogen ähnliche objektive Bild in ganz anderer Weise als der Regenbogen selbst. Zur Demonstration eignet sich vielmehr nur ein zylindrisches Gefäß, das die Farbenerscheinung nicht längs eines Kreisbogens, sondern nur in einer Ebene senkrecht zur Achse des zylindrischen Gefäßes zeigt. Sehr gut zu brauchen ist hierfür die von STROMAN konstruierte optische Trommel (Z. U. XVIII 78); ähnliche Versuchsanordnungen haben GRIMSEHL (Z. U. XX 213) und SCHÖEPP a. a. O. beschrieben.

Man sollte den Regenbogen übrigens nicht subjektiv nennen, wie es häufig geschieht; er ist dies ebensowenig wie das virtuelle Bild in einem ebenen oder Hohlspiegel. Er ist vielmehr die Projektion eines eigentümlichen, in der Natur objektiv vorhandenen Strahlenkomplexes auf den Himmelshintergrund; mit der Veränderung unseres Ortes ist es ein anderer, aber stets wieder realer Strahlenkomplex, der der Projektion zugrunde liegt. Schon die Möglichkeit, den Regenbogen auf der photographischen Platte abzubilden, spricht gegen die rein subjektive Natur.

1) Auch die streng infinitesimale Methode ist im vorliegenden Fall nicht kompliziert, da aus $\delta = 4\beta - 2\alpha$ für $d\delta/d\beta = 0$ die Gleichung $da = 2d\beta$ folgt; da ferner aus $\sin\alpha = n \sin\beta$ sich $\cos\alpha da = n \cos\beta d\beta$ ergibt, so findet man nach kurzer Umrechnung $\sin\alpha = \sqrt{(4 - n^2)}/3$. Ähnlich bei mehrmaliger Reflexion im Innern des Tropfens.

§ 38. III. Wellentheorie des Lichtes.

Die bisherigen Betrachtungen aus der Optik waren teils geometrischer Art, teils betrafen sie rein tatsächliche Feststellungen über den Zusammenhang der farbigen Lichtarten mit der ebenfalls geometrisch definierten Größe des Brechungsquotienten. Die Frage nach der Natur des Lichts — ob es etwa auf der Ausschleuderung (Emission) kleinster Teilchen aus den leuchtenden Körpern, oder auf der Ausbreitung eines Bewegungszustandes wie beim Schall beruhe, ist noch unerörtert geblieben. Es ist bemerkenswert, daß der große NEWTON, auch darin GALILEI ähnlich, die Frage nach den Ursachen der Vorgänge zurückstellte gegen die Untersuchung der Erscheinungen selber. Er blieb bei der aus dem Altertum überkommenen Emissionshypothese stehen, obwohl er sich der Möglichkeit nicht verschloß, daß doch vielleicht die Ausbreitung des Lichts eine wellenartige sei. Nur war seine Zeit für eine Entscheidung noch nicht reif.¹⁾ Es ist empfehlenswert, auch bei der Behandlung dieses Gebietes im Unterricht sich möglichst an den historischen Gang anzuschließen.

1. Die erste Erschütterung der Emissionshypothese ging von der Erkenntnis der ungeheuer großen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes aus. Noch DESCARTES hatte die Ausbreitung für momentan gehalten, nachdem GALILEI vergeblich einen Versuch gemacht, die Geschwindigkeit zu bestimmen. Dann kam zuerst die astronomische Bestimmung von OLAF ROMER, später die terrestrische durch FIZEAU. Für den Unterricht dürften diese beiden genügen; MACH verknüpft die zweite geistreich mit GALILEIS Versuchsprojekt.²⁾

Die enorm große Geschwindigkeit des Lichts war einer der Gründe, die HUYGENS veranlaßten, die Emissionshypothese abzulehnen und nach Analogie der Schallausbreitung auch beim Licht eine kugelförmig nach allen Seiten fortschreitende Wellenbewegung anzunehmen.³⁾ HUYGENS errichtete auf dieser Grundannahme

1) ROSENBERGER (Gesch. d. Ph. III 182) sagt bezüglich des noch hundert Jahre später herrschenden Streites: Man darf nicht verkennen, wie es von Physikern ohne eigentliche historische Bildung wohl manchmal geschieht, daß die Emissionstheorie noch immer im Vorteil, und daß BIOTS und anderer Gegnerschaft gegen die Undulationstheorie nicht so unsinnig war, wie man jetzt wohl manchmal annimmt.

2) Man vgl. z. B. MACH, Populärwissensch. Vorles. (4) 59.

3) Vgl. HUYGENS, Abhandlung über das Licht, OSTWALDS Klass. Nr. 20, S. 15. — Der Grund ist heute, nachdem die großen Geschwindigkeiten der Elektronen bekannt geworden sind, nicht mehr stichhaltig.

eine bewundernswerte Gedankenschöpfung, eine mathematisch durchgeführte Wellentheorie des Lichts, lange bevor noch die sichere Bestätigung der Theorie durch das Experiment möglich war. Es gelang ihm, die geradlinige Fortpflanzung, die Reflexion und die Brechung des Lichts aus seiner Grundannahme zu erklären. Aber vieles andere (so die gleich zu betrachtenden farbigen Ringe und Beugungsstreifen) blieb unerklärt, so daß auch NEWTON sich damit nicht befreunden konnte.

2. Es ist nützlich, hier bereits einen Teil der HUYGENSSchen Lehre einzuschieben, wie es sich auch empfiehlt, hier die Analogie mit den Wasserwellen heranzuziehen, wobei es sich allerdings lediglich um die phoronomische Seite der Vorgänge handeln kann (vgl. oben S. 298). Zunächst wird man den Unterschied von Kugelwellen und ebenen Wellen beim Licht durch Versuche über Kreiswellen und geradlinige Wellen beim Wasser erläutern können.¹⁾ Man kann dann an die wohl allen Schülern bekannte Erscheinung der Bugwelle bei fahrenden Schiffen erinnern.²⁾

MACH erläutert die für unseren Zweck sehr wichtige Erscheinung durch Fig. 26 in folgender Art: Wenn man auf die in einer Geraden liegenden gleich abstehenden Punkte a, b, \dots, m einer Wasserfläche in gleichen Zeitintervallen nacheinander Steinchen fallen läßt, so entsteht durch jedes Steinchen ein Wellenkreis; beim Auffallen des letzten Steinchens in m haben die vorhergehenden Wellen einen Raum durchschritten, der zwischen den Geraden mp und mq eingeschlossen ist.

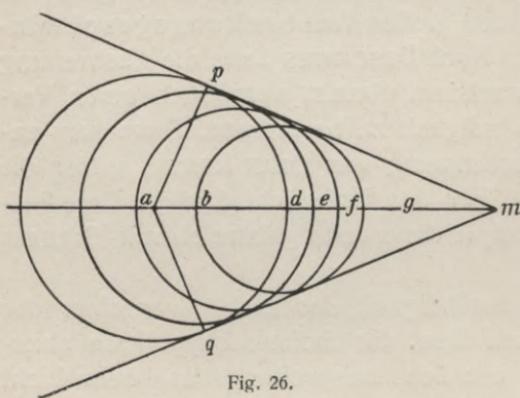


Fig. 26.

In den Geraden mp, mq treffen die Wellenberge der Einzelwellen am dichtesten zusammen und stellen zwei stärkere gerade Wellenlinien dar, die in den Richtungen ap und aq fortschreiten. Bewegt sich ein Schiff gleichförmig von a nach m , so kann man sich vorstellen, daß vom Bug aus jeden Augenblick solche Einzelwellen ausgehen, die zusammenwirkend die Bugwelle pmq erzeugen. (Der Winkel $amp = \alpha$ ist bestimmt durch $\sin \alpha = v/w$, wenn v und w die Geschwindigkeiten der Wellen und des Schiffes bedeuten.)

1) GRIMSEHL, Z. U. XIX 271 und MEUTZNER, Z. U. XXIII 174.

2) MACH, Oberkl. § 217.

Ähnlich denkt sich HUYGENS die Ausbreitung der Kugelwellen dadurch zustande kommend, daß die von einer Welle getroffenen Teilchen sich so verhalten, als wären sie die Erregungszentren neuer, von ihnen ausgehender Elementarwellen (bekannte Figur nach HUYGENS, z. B. O. Fig. 157).

Auch die Erscheinung, daß eine ebene Lichtwelle, die auf eine Öffnung etwa eines Fensterladens fällt, sich jenseits derselben im wesentlichen geradlinig fortpflanzt, ist durch eine Konstruktion leicht verständlich zu machen, die MACH (O. § 218) angibt. Die von den Punkten der

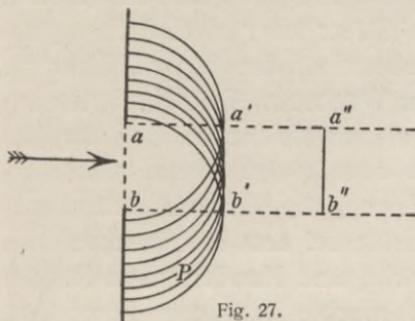


Fig. 27.

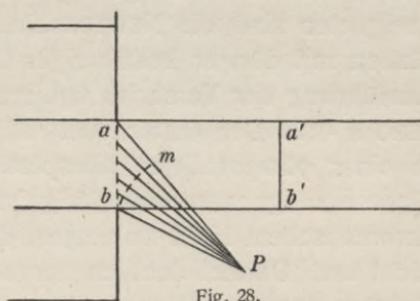


Fig. 28.

Öffnung ab (Fig. 27) ausgehenden Elementarwellen treffen am dichtesten und gleichzeitig in dem mit ab kongruenten und parallelen Ebenenstück $a'b'$ zusammen, ebenso nachher in $a''b''$ usw. In einem Punkt seitwärts der Öffnung (Fig. 28) treffen im allgemeinen die Elementarwellen „mit ungleich langen Wegen“, also nacheinander ein, wodurch ihre Wirkung sehr abgeschwächt wird (MACH, a. a. O.). Weitere Aufklärung liefern die im folgenden zu betrachtenden neuen optischen Erscheinungen, bei denen sich auch die Fruchtbarkeit der HUYGENSSCHEN Hypothese erweisen wird.

Auf Grund des so erläuterten „HUYGENSSCHEN Prinzips“ lassen sich nunmehr Reflexion und Brechung ebener Wellen in bekannter Weise erklären (O. § 59).

3. NEWTON selbst hatte in den nach ihm benannten Farbringen eine der Erscheinungen unter Händen, die in der Folge zu den Bestätigungen der Undulationshypothese gezählt werden konnten. Hiermit zu beginnen ist nicht nur aus historischen Gründen ratsam, sondern hauptsächlich deswegen, weil es sich hier um eine reine Interferenzerscheinung ohne Einmischung der Beugung handelt.¹⁾ (Auch bei FRESNELS berühmtem Interferenzversuch, den man gern an den Anfang stellt, spielen Beugungen

1) A. KUNDT beginnt in seinen „Vorlesungen“ (S. 804) ebenfalls mit der reinen Interferenz und zwar mit den Erscheinungen an dünnen Blättchen.

an den Spiegelrändern mit hinein und verwirren leicht den Anfänger; der Versuch unterliegt überdies mannigfachen experimentellen Schwierigkeiten, so daß WEINHOLD, ROSENBERG u. a. davon abraten, ihn als Unterrichtsversuch aufzunehmen. Man vgl. aber S. 327.)

Ehe man Versuche anstellt, möge an die bunten Farben an Seifenblasen, an einer dünnen Petroleumschicht auf Wasser, an einem Sprung im Glase erinnert und eine oder die andere von diesen Erscheinungen gezeigt werden. Für das genauere Studium geeigneter sind die NEWTONSchen Gläser oder zwei Spiegelglasplatten mit dünner keilförmiger Luftschicht dazwischen. Über die Ausführung der Versuche vgl. man WEINHOLD, D. (4) 445, ROSENBERG II 482. Den einfachsten Fall stellen die Farbenringe dar, die in einer planparallelen Glasplatte oder einer dünnen Glimmerplatte erzeugt werden.¹⁾ Nötig ist auch, die Versuche mit monochromatischem Licht zu zeigen, da hierbei erst der Wechsel von Licht und Dunkel deutlich hervortritt, und Hunderte von Ringen sichtbar werden. Schon NEWTON machte Versuche dieser Art, indem er einzelne aus dem prismatischen Spektrum ausgesonderte Farben benutzte.

NEWTON machte zur Erklärung der Erscheinung die Hypothese der Anwandlungen (*fits*), vermöge deren die Lichtteilchen in kleinen Intervallen abwechselnd leichter reflektiert oder leichter durchgelassen würden. Hierin lag bereits der Begriff der Periodizität der Erscheinung. NEWTON konnte auch aus Versuchen mit verschiedenfarbigen Lichtarten bereits folgern, daß die Intervalle der „Anwandlungen“, gemessen in durchlaufenen Wegstrecken, bei den roten Strahlen am größten, bei den violetten am kleinsten sind. Es gelang ihm auch, die Farbe der im natürlichen weißen Licht auftretenden Ringe aus der Mischung der auf verschiedene Ringsysteme verteilten Elementarfarben zu erklären.

Die richtige Deutung der Versuche auf Grund der Undulationstheorie gelang erst THOMAS YOUNG (1773–1829), also ein Jahrhundert nach NEWTON.²⁾ Der Leitbegriff, der dies ermöglichte, war die von ihm entdeckte Interferenz der Wellenbewegungen. Er zeigte zuerst, daß sich die betreffenden Erscheinungen bei Wasserwellen und Schallwellen aus der Summation der zusammentreffenden Bewegungen erklären lassen (auch die Erklärung der Differenzttöne rührt von ihm her), und wandte dies Prinzip auf die NEWTONSchen Farbenringe an. Bei der

1) W. VOLKMANN, Z. U. XXII 32, GEHRCKE, Z. U. XXV 142. Einen einfachen Apparat für objektive Demonstration NEWTONScher Ringe beschreibt auch U. BEHN, Z. U. XVI 134.

2) Man vgl. ROSENBERGER, Geschichte der Physik III 139ff.

Wichtigkeit, die dieser neue Begriff in der Geschichte der Optik gespielt hat und in der Tat für die folgenden Untersuchungen besitzt, ist es empfehlenswert, hier die analogen Erscheinungen an Wasserwellen und Schallwellen einzuschalten. Für Wasserwellen vgl. GRIMSEHL, L. (4) § 188, für Schallwellen sind die bekannten Versuche über Interferenz von Stimmgabelschwingungen anzustellen. Nach diesem Prinzip werden nun auch die NEWTONSchen Farbenringe erklärlich. YOUNG selbst leitet bereits aus NEWTONS Messungen die Größe der Wellenlängen und Schwingungszahlen für die verschiedenen Elementarfarben des Spektrums ziemlich genau (z. B. für das äußerste Rot $n = 463.10^{12}$) ab. YOUNG vermochte auch den schwarzen Fleck in der Mitte der durch Reflexion erhaltenen NEWTONSchen Ringe durch Annahme des Verlustes von $\frac{1}{2} \lambda$ beim Auftreffen auf ein optisch dichteres Medium (nach Analogie des elastischen Stoßes) zu erklären. Eine Entscheidung zwischen den beiden streitenden Hypothesen war damit noch nicht geliefert, die Verteidiger der Emissionstheorie hielten zäh an dieser fest.

Für die Berechnung der Wellenlängen mit Hilfe der NEWTONSchen Farbenringe findet man genaue Anweisungen bei GRIMSEHL, L. (2) § 292.

4. Ein neues Feld für die Anwendung und zugleich Bestätigung der Undulationshypothese boten die von GRIMALDI (1665) entdeckten Erscheinungen der Diffraktion oder Beugung, die ebenfalls NEWTON schon weiter untersucht hatte.

GRIMALDIS Versuch bestand darin, daß er in das durch eine sehr enge Öffnung gegangene Bündel von Sonnenlicht einen dunklen Gegenstand brachte, und hinter ihm auf einer weißen Fläche am Fußboden die Verbreiterung des Schattens nebst den farbigen Randstreifen beobachtete. NEWTON wiederholte den Versuch und fügte u. a. auch den Versuch hinzu, daß er das durch eine mäßig breite Öffnung gefallene Licht durch einen schmalen Spalt hindurchgehen ließ, der durch zwei scharfe Messerschneiden gebildet war; er beobachtete drei bis vier farbige Streifen zu beiden Seiten des Lichtbandes. NEWTONS Erklärung aus einer abstoßenden Kraft des Schirmrandes war unzulänglich. Die erste Erklärung auf Grund der Undulationshypothese gab YOUNG, indem er den scharfen Schirmrand zufolge einer richtigen Beobachtung als Ausgangsstelle von sekundärem Licht ansah, das er aber auf eine Reflexion am Rande zurückführte. Er zog selbst später seine Erklärung zugunsten der von FRESNEL (1818) gegebenen zurück.¹⁾

Die Beugungserscheinungen sind eins der heikelsten Kapitel für den elementaren Unterricht, und auch in den Schullehrbüchern zumeist nicht befriedigend dargestellt. Der für die Berechnung

1) In neuerer Zeit hat indessen MAEY gezeigt, daß die YOUNGSche Erklärung, bei richtiger Interpretation aus dem HUYGENSSchen Prinzip, noch heute ihre Berechtigung hat. Vgl. Ann. d. Phys. 49, 69 (1893) und Z. U. XVII 11.

der Wellenlänge einfachste Versuch – ein dünner Draht in einiger Entfernung von einem engen Spalt aufgestellt, entsprechend dem ersten Versuch von GRIMALDI – bietet in Betreff der Erklärung ziemliche Schwierigkeit (vgl. unten Nr. 5), am meisten dürfte es sich empfehlen, von dem NEWTONSchen Versuch der Beugung durch einen schmalen Spalt auszugehen, dessen Erklärung nach FRESNEL leicht verständlich ist (vgl. O. Fig. 292). Zur Veranschaulichung kann ein schöner Versuch mit Wasserwellen dienen, den GRIMSEHL (L₂ Fig. 731 und Z. U. XVII 276) beschreibt. Die FRESNELSche Erklärung beruht auf der Anwendung des HUYGENSSchen Prinzips, wonach alle in der Öffnung liegenden Punkte als Zentren sekundärer Wellensysteme anzusehen sind. Man darf aber nicht bei der Erklärung parallele Strahlenbündel voraussetzen, wie in Lehrbüchern oft geschieht, da dies nur für subjektive Beobachtung mit auf ∞ eingestelltem Fernrohr (oder Auge) zutrifft. Die hiermit verbundene Messung einer Lichtwellenlänge sollte niemals versäumt werden, sie geschieht nach der Gleichung $\sin \alpha = \frac{\lambda}{b}$, oder $\lambda = \frac{bd}{e}$, am besten unter Benutzung eines Spalts mit Mikrometerschraube.¹⁾

Die Behandlung von zwei oder mehr Spalten und schließlich eines Gitters ist nicht so einfach, wie es nach den Lehrbüchern (selbst MACH, Oberklassen, ist davon nicht ausgenommen) manchmal scheint. Für eine exakte elementare Behandlung sei auf MÜLLER-PFAUNDLERS Lehrbuch verwiesen.²⁾

5. Eine hiervon verschiedene Behandlung ist für die durch eine Schirmwand hervorgerufene Beugung angezeigt. Hierfür hat MAEY (a. a. O.), an THOMAS YOUNG anknüpfend, die Anweisung zu einer elementaren Darstellung gegeben (vgl. auch O. § 109, 2 u. 3). Erst nachdem die am Schirmrande nach außen und nach innen gebeugten Lichtwellen nachgewiesen sind, kann der oben erwähnte Versuch mit dem in ein schmales Lichtbündel gestellten Draht befriedigend erklärt und zur Berechnung der Lichtwellenlänge benutzt werden.³⁾

1) MACH empfiehlt (Z. U. I 199) mit möglichst einfachen Abmessungen zu arbeiten, um den Zusammenhang recht anschaulich zu machen, z. B. Spaltbreite $b = 1$ mm, Entfernung des Schirmes $e = 10000$ mm, Abstand des ersten Minimums von der Mittellinie $d = 7$ mm, daher $\lambda = 0,0007$ mm. Oder $b = \frac{1}{2}$ mm, $e = 5000$ mm, was ebenfalls $d = 7$ mm, $\lambda = 0,0007$ mm liefert.

2) Eine andere nur teilweise elementare Darstellung der Gitterspektren gibt MACH, Z. U. V 225.

3) MÖLLER, Z. U. IV 37; GRIMSEHL, Apparate für Schülerversuche.

Bei dem hier angegebenen Unterrichtsgang erübrigt es, den FRESNELSchen Spiegelversuch anzustellen, der, abgesehen von den experimentellen Schwierigkeiten, auch noch in didaktischer Beziehung das Bedenken gegen sich hat, daß die Erscheinung durch die Einführung von zwei virtuellen Lichtquellen kompliziert ist. Daß die von diesen aus gemessenen Weglängen wie reelle Weglängen in Ansatz gebracht werden müssen, trägt nicht zum leichteren Verständnis bei. Will man den Versuch anstellen, so seien die Bemerkungen von W. VOLKMANN, Z. U. XXII 94 und XXIV 218 der Beachtung empfohlen.¹⁾

Die erstaunlichen Leistungen von FRESNEL vermochten übrigens noch nicht, der Undulationshypothese die allgemeine Anerkennung zu verschaffen.²⁾ Er starb 1827, erst 39 Jahre alt, ohne den Sieg seiner Ansichten erlebt zu haben. Namentlich waren es die gleich nachher zu betrachtenden Polarisationserscheinungen, die der Erklärung durch Lichtwellen noch Schwierigkeit machten, dagegen durch die Emissionshypothese (allerdings unter Hinzunahme von Hilfshypothesen) anscheinend befriedigend erklärt werden konnten. Den endgültigen Sieg brachte erst der Nachweis von FOUCAULT (1854), daß die Lichtgeschwindigkeit im Wasser kleiner als in Luft ist, sowie es die Undulationshypothese forderte, die nunmehr zum Rang einer Theorie erhoben war (O. § 108). —

Den Abschluß der vorangehenden Darstellung wird eine zusammenfassende Übersicht über Wellenlängen und Schwingungszahlen (O. § 110) bilden müssen, die zunächst auf das sichtbare Spektrum beschränkt ist. Der Unterschied zwischen Brechungsspektrum und Beugungsspektrum läßt sich jetzt ohne Schwierigkeit verstehen. Die Elementarfarben des Spektrums sind nunmehr unabhängig von irgendeiner Substanz allein durch die Schwingungszahl pro Sekunde definiert.

6. Polarisation des Lichts. Es bleibt nun noch das wichtige Problem übrig, ob die Schwingungen, die das Licht hervorbringen, longitudinal oder transversal gerichtet sind. HUYGENS glaubte ersteres, erst die Entdeckungen von MALUS (1808) und FRESNEL (1816) führten zu der zuerst von THOMAS YOUNG (1817) ausgesprochenen Vermutung, daß die Schwingungen transversal

1) Sehr vereinfachte experimentelle Hilfsmittel für den gleichen Zweck hat GRIMSEHL 1914 in Braunschweig vorgeführt und wird sie in der Z. U. beschreiben.

2) In der zur Prüfung der FRESNELSchen Arbeiten eingesetzten Kommission hatte POISSON als Haupteinwand vorgebracht, daß sich danach im Zentrum des Schattens einer kleinen undurchsichtigen Scheibe eine helle Stelle befinden müsse. Dies wurde unerwarteter Weise durch FRESNEL bestätigt und trug viel zum Erfolg seiner Theorie bei.

seien; diese Vermutung fand namentlich durch FRESNELS Versuche ihre Bestätigung.

Im Unterricht dürfen die Grunderscheinungen, die zur Annahme transversaler Wellen geführt haben, den Schülern nicht vorenthalten bleiben, man sollte sich auch nicht bloß auf einige historische Angaben beschränken. Es läge nahe, an das älteste hierher gehörige Phänomen, die Doppelbrechung im Kalkspat, anzuknüpfen. Eine einfachere und bessere Einführung in dies schwierige Gebiet bieten indes die Beobachtungen von MALUS über die Polarisation des Lichts durch Reflexion, die ja auch tatsächlich den Anstoß zur Ausbildung der Lehre von den transversalen Schwingungen gegeben haben.¹⁾ Der Apparat von NORRENBURG ist mehr für subjektive Beobachtung geeignet. Zur objektiven Demonstration empfehlen sich die Vorrichtungen, die GRIMSEHL (Z. U. XVIII 321, L₂ § 301) und ROSENBERG (II 488) angegeben haben. Als Analysator kann ein von H. REIFF (Z. U. XIX 28) beschriebenes Spiegelsystem dienen.²⁾

Die Versuche lehren, daß ein von dem „Polarisator“ unter 55° reflektiertes Lichtstrahlenbündel sich von einem Strahlenbündel natürlichen Lichtes unterscheidet, indem es von einem zweiten unter gleicher Neigung aufgestellten Spiegel bei dessen Drehung nicht mehr gleichmäßig nach allen Seiten reflektiert wird. Das Licht zeigt also senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung eine seitliche Verschiedenheit, die sich am einfachsten durch die Annahme transversaler Wellen erklärt. Zur Erläuterung des Vorgangs beim Auftreffen eines polarisierten Lichtstrahls auf einen Analysator dienen Versuche mit Seilwellen, wie sie zuerst wohl von MACÉ DE LÉPINAY (Z. U. II 87), später von SCHREBER und SPRINGMANN (Exp.-Ph. II 90), VOLKMANN (Z. U. XVI 97) und SPIES (Z. U. XXI 85) angegeben worden sind. Eine solche mechanische Verdeutlichung ist an dieser Stelle kaum zu entbehren, zumal diese Versuche auch für die elektrischen Wellen von Bedeutung sind.

Ist das Prinzipielle festgelegt, so hängt es von der verfügbaren Zeit ab, wie weit man noch auf weitere Polarisationserscheinungen eingehen will. MÜLLER (T. 211) beginnt das Kapitel von der Polarisation überhaupt mit den Erscheinungen am Turmalin, wofür ja die Turmalinzange ein leicht zu beschaffendes Hilfsmittel ist. Doch fehlt es bei dieser Art

1) Über das Geschichtliche vgl. man ROSENBERGER III 147 ff., 183 ff.

2) Geeignete Aufsätze für die optische Bank sind auch von LUMMER in MÜLLER-PFAUNDLERS Lehrb. II, Abt. 1 angegeben.

der Einführung an einer leicht auffaßbaren Definition der Polarisations-ebene. Dagegen ist es leicht, mit einem durch Reflexion polarisierten Lichtbündel die Turmaline auf ihre Polarisations-ebene zu untersuchen. Für die Versuche über Doppelbrechung genügen Kalkspat-Rhomboeder und Nicol von mäßiger Größe und Güte. E. MACH (Oberkl. § 222) gibt den Quarzprismen den Vorzug. Sehr eingehend behandeln dies Gebiet GRIMSEHL, Lehrbuch (§ 301–315) und BERLINER (§ 660–682). GRIMSEHL ist der Ansicht, man solle die Doppelbrechung gar nicht anfangen, wenn man nur drei bis vier Stunden dafür zur Verfügung habe. Immerhin ist es von Nutzen, mindestens das Verhalten eines Kalkspatprismas und eines Nicol zu demonstrieren, selbst wenn man nichts weiter als die Polarisiertheit der durchgegangenen Strahlen vorführt. Ein Vorzeigen der farbenprächtigen Versuche an Kristallplatten ohne genaueres Eingehen halte auch ich für unzulässig.

Aus der Reflexion an den Wasser- und Staubteilchen der Luft erklärt sich auch die Polarisation des diffusen Himmelslichtes, die sich durch einfache Versuche feststellen läßt. Es erklärt sich auch „die sehr auffällige Tatsache, daß eine ausgedehnte ruhende Wasserfläche, ein Teich oder ein See, bald als Spiegel glänzt, bald schwarz und glanzlos erscheint, das zweite dann, wenn wir in einer Richtung danach hinsehen, nach der die Fläche das Tageslicht wegen seiner Polarisiertheit nicht reflektiert“ (BERLINER). Erwähnt sei auch, daß polarisiertes Licht nach diffuser Reflexion von einer Papierfläche wieder ganz unpolarisiert ist, wie sich leicht zeigen läßt. —

Es ist nun auch die wichtige Frage zu beantworten, wie sich das natürliche Licht von dem polarisierten unterscheidet. Hier sind bisher nur hypothetische Vorstellungen möglich. FRESNEL hat sich das Licht vorgestellt als eine rasche Folge von Schwingungsbewegungen, deren Richtung fortwährend wechselt. Dabei ist es dann (nach Versuchen von STEFAN) wahrscheinlich, daß die Schwingungsrichtung auf tausende von Wellenlängen, ja auf Meilen konstant bleibt. Auch ist daran gedacht worden, daß das Licht aus entgegengesetzt polarisierten elliptischen Schwingungen bestehen könne.¹⁾ Erwähnt mag auch hier schon werden, daß die neuere elektromagnetische Lichthypothese keine mechanischen Schwingungen von Ätherteilchen, sondern periodisch wechselnde magnetische und elektrische Spannungszustände im Äther als das der Lichtbewegung zugrunde Liegende ansieht.²⁾

Die Annahme des Lichtäthers selbst ist eine Hypothese, die durch die Tatsachen gefordert wird, insofern ein Zustand, sei es der Schwingung oder der Spannung, nicht ohne materiellen Träger gedacht werden kann. Man kann hier kaum noch von einer Hypothese sprechen.

1) M. PFAUNDLER (9) II 1, 1152ff.

2) Vgl. auch HÖFLER, Physik, S. 518.

Nur die Annahmen über die atomistische oder kontinuierliche Struktur dieses Mediums, über Elastizität und Dichte usf. sind durchaus hypothetischen Charakters und haben sich bisher noch nicht in einwandfreier Form aufstellen lassen. Die Schwierigkeit ist durch die elektromagnetische Lichttheorie eher noch gesteigert worden.

Ein noch ungelöstes Problem ist es endlich, wie die Vereinigung einer ungeheuer, wenn nicht gar unendlich großen Zahl von Schwingungen verschiedener Perioden, d. h. die Verbindung der farbigen Lichtarten zu weißem Licht zu denken ist. Hier kann man sich eine Summation der Schwingungen in ähnlicher Weise wie in der Akustik vorstellen, nur daß es sich hier nicht um eine Reihe diskreter Schwingungen, sondern allem Anschein nach um eine kontinuierliche Folge von solchen handelt.

§ 39. IV. Auge und optische Instrumente.

1. Die in den Lehrbüchern bisher meist befolgte systematische Anordnung, wonach Linsen und optische Instrumente, als zur geometrischen Optik gehörig, unmittelbar hinter der Reflexion im ersten Teil der Optik, behandelt werden, hat den Nachteil, daß dabei die Rolle des Auges nicht die ihr gebührende Beachtung findet, und daß ferner die Definition des Brechungsquotienten der Präzision ermangelt, da die Farbenzerstreuung noch nicht dargelegt ist. Es ist daher gewiß berechtigt, die genannten Gegenstände erst jetzt zu besprechen, wobei allerdings zweckmäßig wieder von der Fiktion der Lichtstrahlen Gebrauch gemacht wird, da auch die ganze neuere Theorie mit dieser arbeitet.

Wir gewinnen aber bei dieser Anordnung des Stoffs die Möglichkeit, die Betrachtung des ganzen Gebiets von vornherein an eins der bedeutsamsten Probleme, das Problem des Sehens, anknüpfen zu können.

Im übrigen hat die übliche mathematische Ableitung der Linsenformel erhebliche Bedenken gegen sich, da sie mit zu vielen „Vernachlässigungen“ arbeitet und für die Anwendung auf die optischen Instrumente nicht ausreicht. Es ist daher zu verstehen, daß MÜLLER (T. 188) empfiehlt, die Linsengesetze wesentlich auf experimentellem Wege zur Anschauung zu bringen. Immerhin kann für die bisherige mathematische Ableitung der Linsengesetze geltend gemacht werden, daß die vorgenommenen Vereinfachungen es doch ermöglichen, mindestens eine angenäherte Erklärung des wirklichen Strahlenganges aus dem Grundgesetz der Lichtbrechung zu geben.

Gegen die alte Behandlung der optischen Instrumente hat sich namentlich H. KEFERSTEIN¹⁾ gewandt, doch fehlt es bisher, wenigstens in den Schulbüchern, noch an einer genügend einfachen unterrichtsmäßigen Darstellung der Grundlagen der neueren Theorie. Die Sachlage ist hier ähnlich wie bei der Erklärung des Regenbogens; allerdings geht die korrekte Behandlung nicht wie bei diesem über die Grenzen des Schulunterrichts hinaus, aber sie dürfte doch bei einigermaßen gründlichem Eingehen mehr Zeit erfordern als dafür verfügbar ist. Man wird sich daher nur unter besonders günstigen Umständen darauf einlassen können.²⁾

An eine rein topische Beschreibung des Auges mag die Bemerkung geknüpft werden, daß man zur Vereinfachung der theoretischen Untersuchung das Auge durch ein homogenes, von einer brechenden Kugelfläche begrenztes Medium ersetzt denken kann, dessen Brechungsquotient gegen Luft etwa $103/77$ ist (LISTINGS schematisches Auge). Hierdurch ist es nahegelegt, zunächst den Durchgang des Lichts durch

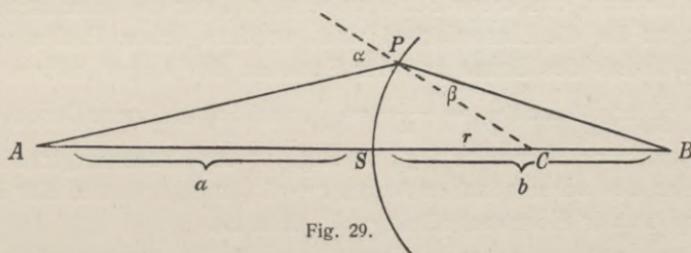


Fig. 29.

eine brechende Kugelfläche zu untersuchen, die ein Medium gegen Luft begrenzt und gegen diese konvex gekrümmt ist. Man findet hier durch eine leichte Rechnung für den Fall, daß die von einem Punkt auf der konvexen Seite ausgehenden Strahlen nahe der Zentrale auffallen, daß auch der Bildpunkt auf der Zentrale liegt und daß unter Berücksichtigung der entgegengesetzten Vorzeichen von a und b , wenn a und b die Abstände des Objektpunkts und des Bildpunkts von der brechenden Fläche, r deren Radius bedeutet,

$$\frac{n}{b} - \frac{1}{a} = \frac{n-1}{r}.$$

1) KEFERSTEIN, Strahlengang und Vergrößerung der optischen Instrumente. Abh. z. Did. u. Phil. d. Naturw. I Heft 5. Vgl. auch Z. U. XVIII 331. Zu empfehlen ist auch M. v. ROHR, Die optischen Instrumente (Aus Natur und Geisteswelt, Bd. 88).

2) Sehr schätzenswerte Fingerzeige gibt GRIMSEHLS Lehrbuch. Eine ausgezeichnete Darstellung findet man bei A. BERLINER, an diese schließt sich die nachstehende Übersicht eines Lehrgangs mehrfach an.

Es ist nämlich (Fig. 29), wenn Winkel $PCS = \varphi$ gesetzt wird:

$$\frac{AP}{AC} = \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha}, \quad \frac{BP}{BC} = \frac{\sin \varphi}{\sin \beta},$$

daher

$$\frac{BP}{BC} \cdot \frac{AC}{AP} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n,$$

oder $\frac{b(r-a)}{(b-r)(-a)} = n$, woraus obige Gleichung folgt, deren Analogie mit der Hohlspiegelformel Beachtung verdient. Auch hier bedeuten die bei der Ableitung vorgenommenen „Vernachlässigungen“, daß die Formel nur für Lichtstrahlenbündel von kleiner Öffnung bei angenähert senkrechter Inzidenz auf größere Genauigkeit Anspruch machen kann.

Aus der aufgestellten Gleichung folgt für $a = \infty$ die Brennweite $f = \frac{nr}{n-1}$, also im Fall $n = \frac{4}{3}$, $f = 4r$ (innere Brennweite); dagegen für $b = \infty$ (äußere Brennweite), $f' = \frac{-r}{n-1}$, d. h. im Fall $n = \frac{4}{3}$ $f' = -3r$.

Man beachte, daß diese Beziehungen nicht nur mathematische Vorbereitungen für die Linsenformel sind, sondern schon Bedeutung für das Verständnis des Baues und der Funktion des Auges haben. Denn für $n = \frac{4}{3}$ ergibt sich $\frac{r}{f} = \frac{n-1}{n} = \frac{1}{4}$, und da der innere Durchmesser des Augapfels ~ 22 mm beträgt, so folgt für den Krümmungsradius der Oberfläche des schematischen Auges $r \sim 5\frac{1}{2}$ mm, während der Krümmungsradius der Hornhaut allein $\sim 7\frac{1}{2}$ mm ist.

Für eine konkave brechende Fläche ist r negativ zu setzen, wie eine der obigen analoge Entwicklung zeigt. Es ist ferner leicht zu sehen, daß ein schmales homozentrisches Strahlenbündel, das aus irgendeiner Richtung normal auf die brechende Fläche fällt, auch nach der Brechung durch einen Punkt hindurchgeht, der auf der Normale liegt, also homozentrisch bleibt.

Für die Demonstration der entsprechenden Erscheinungen ist besonders STAHLBERGS Lichtbrechungskasten (Z. U. XV 65) geeignet, in dessen eine Seitenwand ein Uhrglas mit der konvexen Seite nach außen oder innen eingesetzt werden kann.

2. Die Linsenformel ergibt sich durch zweimalige Anwendung der oben für Kugelflächen gefundenen Formel, zunächst unter der vereinfachenden Voraussetzung, daß die Dicke der Linse gegen die Entfernungen a und b verschwindend klein ist, und unter sinngemäßer Berücksichtigung der Vorzeichen. (Das Verfahren setzt eine ziemliche Sicherheit der Schüler im Operieren mit algebraischen Größen voraus.)

Man erhält so für bikonvexe Linsen mit den Krümmungsradien r_1 und r_2 die Gleichung

$$\frac{1}{b} - \frac{1}{a} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

die für absolute Werte von a , b , r_1 , r_2 auch ersetzt werden kann durch

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{a} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right),$$

oder bei Einführung der Brennweite f durch

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f}.$$

Versteht man unter α und β die Abstände des Objekts und des Bildes von dem vorderen bzw. hinteren Brennpunkt (Brennebene), so nimmt die Linsenformel die NEWTONSche Fassung an

$$\alpha\beta = f^2.$$

Die Diskussion der Gleichung und ihre experimentelle Bewahrheitung sind allgemein bekannt. Während es sonst Regel ist, die Versuche voranzustellen und ihnen die mathematische Behandlung folgen zu lassen, mag hier auch einmal der umgekehrte Weg eingeschlagen werden.¹⁾ Die Versuche können ohne besondere Vorrichtung mit frei auf dem Tisch stehenden Linsen ange stellt und der Verlauf der Strahlen durch Salmiaknebel sichtbar gemacht werden.²⁾ Daß von diesem Verlauf eine deutliche Anschauung gewonnen wird, die das mathematische Schema in der Wirklichkeit wiederfindet, ist das Wichtigste an diesen Versuchen.

Bei der Demonstration des Brennpunkts mit Hilfe von Sonnenlicht ist nicht zu übersehen, daß es sich hier (ebenso wie beim Hohlspiegel) nicht um die Vereinigung von streng parallelen Strahlen in einem Punkt, sondern um ein Sonnenbildchen handelt. DVORAK (Z. U. XXV 286) empfiehlt, den Versuch mit einer Linse von sehr großer Brennweite (4 m) anzustellen: Der Durchmesser

1) Andererseits kann man auch bei den Linsen wie bei den Hohlspiegeln nach H. HAHN von der mathematischen Entwicklung absehen und im Schülerpraktikum die Vermutung, daß $1/a + 1/b = 1/f$ sei, durch genaue Messungen bestätigen (HAHN, Handbuch VIII Aufg. 11).

2) Von besonderen Vorrichtungen sind außer dem schon erwähnten Apparat von STAHLBERG dessen Vorläufer, die optischen Kästen von MACH (siehe PFAUNDLER, Lehrbuch II 2) und KOLBE (FRICK-LEHMANN II 1153) zu nennen; ferner die HARTLSche Scheibe und die verwandten Vorrichtungen von K. L. ROSENBERG und SZYMANSKI.

des Sonnenbildchens ist $\sim \frac{1}{100}$ der Brennweite, wie aus der scheinbaren Größe der Sonne (32') leicht zu folgern.

Man sollte hiermit gleich die Demonstration der Bilder von leuchtenden Objekten verbinden und daran dann die Erläuterung durch Zeichnung und Rechnung anknüpfen. MÜLLER (T. 190) rät, man möge auch nicht unterlassen, das reelle durch eine Sammellinse erzeugte Bild in der Luft freischwebend zu zeigen. Für die objektive Demonstration virtueller Bilder gibt KEFERSTEIN (a. a. O. S. 6) eine Versuchsanordnung an, bei der ein Hohlspiegel so verwendet wird, daß das virtuelle Bild in seinen Krümmungsmittelpunkt fällt.

Für die genauere Konstruktion des Ganges der Lichtstrahlen muß die Dicke der Linse berücksichtigt werden. Will man sich nicht mit der bloßen Andeutung der Benutzung der Knotenpunkte begnügen, so findet man z. B. bei GRIMSEHL (L_2 , § 255) eine elementare Darstellung. Die Beschränkung auf Linsen von verschwindend geringer Dicke läßt sich indessen rechtfertigen durch Berufung auf den GAUSSSchen Begriff der äquivalenten Linse; der Hinweis hierauf wird in der Regel genügen müssen, um dem Schüler „die vereinfachenden Annahmen des Unterrichts als zulässig erscheinen zu lassen“ (KEFERSTEIN, a. a. O. S. 5).

Hier dürfte auch die richtige Stelle sein, das Problem noch einmal aufzunehmen, wie sich die Fiktion von Lichtstrahlen mit der Wellen-

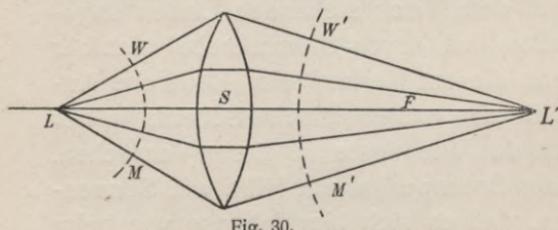


Fig. 30.

theorie des Lichtes verträgt. Ein System von Lichtwellen gehe von dem selbstleuchtenden Punkt L (Fig. 30) aus, die Wellenfläche WM sei nach dem Durchgang durch die Linse S in die Wellenfläche $W'M'$ über-

gegangen; dann treffen in L' alle von $W'M'$ ausgehenden Elementarwellen mit gleicher Phase zusammen und summieren ihre Wirkungen, während an allen anderen Stellen eine mehr oder weniger vollständige Vernichtung der Bewegung durch Interferenz erfolgt.¹⁾

3. Auf dieser Stufe dürfen auch die Linsenabweichungen nicht unerwähnt bleiben. Am meisten in die Augen fallen die chromatischen Abweichungen, die schon bei den Versuchen über den Strahlengang in Salmiaknebel sichtbar werden. Ihre Erklärung bildet eine schöne An-

1) Genaueres bei MÜLLER-PFAUNDLER (9) II 1, 443ff., von wo die obige Figur entnommen ist. Ebenda ist auch der schwierige Fall behandelt, wenn L ein Punkt einer beleuchteten Fläche, also ein Kreuzungspunkt inkohärenter Strahlen ist.

wendung der gelegentlich der Farbenzerstreuung gewonnenen Einsichten über die Abhängigkeit des Brechungsquotienten von der Art des Lichtes. Gute Demonstrationen sind mehrfach angegeben (vgl. ROSENBERG II 440 und besonders W. VOLKMANN, Z. U. XXV 201). Man wird besser tun, den Gebrauch farbiger Glasscheiben zu vermeiden, da diese kein homogenes Licht liefern und das Verhältnis des von ihnen gelieferten farbigen Lichts zu dem ähnlichen des Spektrums bei dem hier eingeschlagenen Lehrgang noch nicht klargestellt ist. Die einfachste Demonstration besteht darin, daß der Saum eines zuvor parallelen Lichtstrahlenbündels vor der Vereinigung durch eine Linse rot, nach der Vereinigung violett erscheint (ROSENBERG I 357). Eine noch lehrreichere Anordnung, die zugleich die sphärische Abweichung demonstriert, beschreibt MACH (Z. U. II 54).

Hieran schließt sich sofort die Besprechung der achromatischen Linsen, unter Benutzung des bereits über achromatische Prismen Festgestellten. MÖLLER empfiehlt neben einer achromatischen Linse von 20 cm Brennweite noch eine zerlegbare von 30 cm Brennweite. Die Achromasie ist übrigens, wie bei den Prismen, völlig genau nur für zwei farbige Strahlen zu erzielen; um drei Farben zu vereinigen, sind drei Linsen erforderlich, doch ermöglichen gewisse Jenenser Glassorten dies auch schon bei zwei Linsen.

Die sphärische Abweichung bei Linsen wird sehr schön durch Zeichnungen nach Art der in ENGEL und SCHELLBACHS Atlas enthaltenen erläutert. Zur experimentellen Demonstration empfiehlt sich besonders das von MACH (Z. U. II 52) beschriebene Verfahren, wonach vor eine recht große Linse (24 cm Öffnung) eine entsprechend große Kartonblende gesetzt wird, die in der Achse und in zwei verschiedenen Entfernungen von dieser drei kleine Öffnungen hat. Auf einem hinter die Linse gehaltenen Schirm entstehen drei runde Lichtflecke (deren Zuordnung zu den Öffnungen man durch ein Gelatineblättchen von mittlerer, etwa grüner Farbe, leicht feststellen kann). Das Weitere bei ROSENBERG (II 434).

4. Von den optischen Instrumenten bietet die photographische Kamera die Vorstufe zum Verständnis des Auges. Von Anastigmaten und Aplanaten wird nicht mehr als die Erläuterung des Sinnes dieser Konstruktionen anzugeben sein.

Beim Auge sind nunmehr die Elemente der Theorie des Sehens zu erörtern. Die Konstruktion der auf der Netzhaut erzeugten Bilder erfolgt so, daß man den Zentralstrahl eines normal auffallenden Strahlenbündels durch den Knotenpunkt zieht, der ~ 7 mm hinter der Hornhaut liegt. Hier ist besonders die Bedeutung des Netzhautbildes für die Beurteilung von Gestalt, Lage und Größe bzw. Entfernung des Gegenstandes zu erörtern (O.

§ 103). Weitere dem Grenzgebiet der physiologischen Psychologie angehörige Erscheinungen in Abschnitt VI. Von der „Weite des deutlichen Sehens“ kann abgesehen werden, da sich eine solche nicht präzis definieren läßt¹⁾; wichtiger ist der Nahepunkt (bei normalen Augen ~ 15 cm), nach dem auch die Vergrößerung der Lupen beurteilt wird. Die Erklärung der Akkommodation, der Brillen für Kurzsichtige und Weitsichtige gibt hier zu Bemerkungen keinen Anlaß. Was die Sehschärfe betrifft, so ist zu merken, daß (nach HELMHOLTZ) zwei Punkte in 1 m Abstand vom Auge mindestens $\frac{1}{3}$ mm voneinander entfernt sein müssen, um getrennt wahrgenommen zu werden, und proportional bei größerer Entfernung. (Ein messender Versuch hierzu bei MÜLLER, T. 202.) Die Farbenwahrnehmung bleibt besser einem späteren Abschnitt (VI) vorbehalten.

5. Für die optischen Instrumente ist folgende allgemeine Betrachtung wichtig, die die üblichen Lehrbuchdarstellungen in

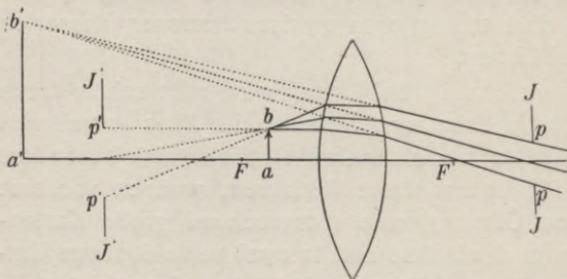


Fig. 31.

einem wesentlichen Punkte ergänzt. Auf einen das Auge treffenden Strahlenkegel wirkt die Iris wie eine Blende, indem sie die Öffnung des in das Auge gelangenden Strahlenbündels be-

grenzt. Verfolgt man den Weg dieses Strahlenbündels rückwärts, so findet man leicht, indem man das Bild konstruiert denkt, das die Linse von jener ersten Blende erzeugen würde, daß dieses Bild ebenfalls die Umgrenzung des eintretenden Lichtbündels bestimmt.²⁾ Man kann daher die Iris auch durch eine an diese Stelle gebrachte Blende von der dem Bild der Iris entsprechenden Größe ersetzt denken: Die beiden Blendenöffnungen heißen Eintrittspupille (E. P.) und Austrittspupille (A. P.). Die durch die Mittelpunkte der „Pupillen“ nach einem Objektpunkt bzw. dem entsprechenden Bildpunkt gezogenen Strahlen bestimmen den „Strahlengang“. Bei der

1) Vgl. DVORAK, Z. U. XXI 373.

2) Ein „Fundamentalversuch“ für die Abbildung einer Blendenöffnung bei KEFERSTEIN a. a. O. S. 13. Genauerer über die wahre Eintrittspupille des Auges ebd. S. 15.

Anwendung auf das Sehen durch eine Lupe ergibt sich, daß in der Tat für die Wirkung nur schmale Lichtbüschel in Betracht kommen, wie zunächst Fig. 31 erkennen läßt¹⁾, in der JJ die Iris, pp die Pupille des Auges bedeuten. Statt aber die vom Bilde $a'b'$ kommenden Strahlen durch JJ kann man auch die vom Gegenstand ab ausgehenden Strahlen (Fig. 32) durch das Pupillenbild $p'p'$ begrenzen und erhält dann die bei a und b angegebenen Strahlenkegel als die für das Netzhautbild allein in Betracht kommenden. Führt man die entsprechende Konstruktion für ein der Lupe ganz nahe gebrachtes Auge aus, so liegt das Pupillenbild auf derselben Seite wie die Pupille, und die Strahlen $p'ap'$ bzw. $p'bp'$ begrenzen die vom Objekt ausgehenden wirklichen Lichtbündel. Andererseits ist die Ausdehnung des abbildbaren Objekts wesentlich bedingt durch die Linsengröße.

„Objektpunkte, die so liegen, daß die von ihnen nach der E. P. zielenden Strahlen die Linse überhaupt nicht treffen, können auch nicht abgebildet werden. Punkte, die so liegen, daß nur ein Teil der von ihnen aus nach

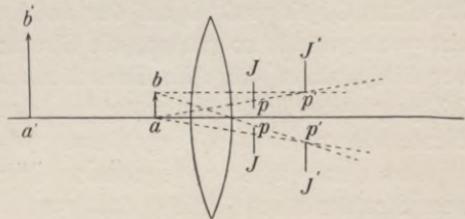


Fig. 32.

der E. P. zielenden Strahlen die Linse trifft, werden zwar noch abgebildet“, aber ihre Bilder sind lichtschwächer. Hierdurch bestimmt sich Umfang und Helligkeit des Gesichtsfeldes (BERLINER, L₂, S. 616).

Für die Lupe folgt das Verhältnis der Bildgröße zur Gegenstandsgröße auf bekannte Weise aus der Gleichung $1/a - 1/b = 1/f$, wenn für b der Abstand des Nahepunkts des Auges gesetzt wird. Maßgebend für die eigentliche Vergrößerung ist aber das Verhältnis der Sehwinkel, unter denen das Bild durch die Lupe und andererseits der Gegenstand im Fall des Sehens ohne Lupe erscheint. Dies Verhältnis hängt von der Stellung des Auges zum Objekt und auch von der Stellung der Lupe ab (GRIMSEHL, L₂ § 266).

Besonders wichtig ist die richtige Darstellung des Strahlenganges für das Verständnis des holländischen oder Galileischen Fernrohres. Wie bei der Lupe ist auch hier die Augenpupille A. P. zugleich Austrittspupille der Strahlen, demnach ist die Begrenzung der vom Objekt kommenden Strahlen durch die zugehörige Eintrittspupille E. P.

1) Fig. 31 nach H. KEFERSTEIN, Fig. 32 nach A. BERLINER.

(das durch das ganze System entworfene Bild der Augenpupille) bestimmt. Wie die Fig. 33 zeigt, füllt das von einem Objektpunkt a kommende wirksame, d. h. nach der Eintrittspupille $E. P.$ gerichtete Strahlenbündel 1,1 bei weitem nicht die Objektivöffnung aus. Das Objektiv allein entwirft von dem Objektpunkt a den Bildpunkt a' , die gegen diesen konvergierenden Strahlen (2,2) werden durch die Okularlinse divergent (3,3) gemacht, so daß in a'' ein virtueller Bildpunkt entsteht. Entsprechend

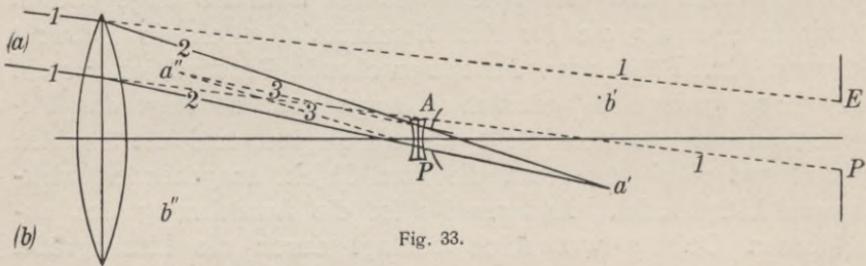


Fig. 33.

für einen Objektpunkt b auf der anderen Seite der Achse. Ist das Auge auf ∞ eingestellt, so müssen die Strahlen 3,3 einander parallel sein und der Bildpunkt a'' liegt im Unendlichen. Aber der Winkel der Strahlen 3,3 gegen die Achse ist größer als der Winkel der Strahlen 1,1 gegen diese; hiervon ist die Vergrößerung abhängig.

Aus dem vorher angegebenen Grunde beanspruchen die abbildenden Strahlenbündel nicht das ganze Objektiv, sondern je nach dem Ort ihrer Herkunft verschiedene Teile desselben. „Eben darum bewirkt eine Verkleinerung des Objektivs durch Abblenden stets auch eine Verkleinerung des Gesichtsfeldes, ganz im Gegensatz zum astronomischen Fernrohr, wo durch eine beliebige Einengung des Objektivs immer nur eine Verringerung der Lichtstärke, niemals aber eine Abnahme der Gesichtsfeldgröße herbeigeführt wird“ (KEFERSTEIN a. a. O. S. 39). Aus dem Gesagten geht auch hervor, daß die Darstellung der Lehrbücher von dem Strahlengang im GALILEISCHEN Fernrohr unzureichend ist. Beim astronomischen Fernrohr und beim Mikroskop sind die Darstellungen der Lehrbücher im wesentlichen zutreffend, obwohl diese sich zumeist mit der vereinfachenden Annahme je einer Objektiv- und Okularlinse begnügen.

Den Strahlengang in einem Mikroskop mit zusammengesetztem Objektiv und Okular zeigt eine Darstellung von CZAPSKI in Winkelmanns Handbuch der Physik, die auch bei BERLINER (Lehrb., Fig. 626) wiedergegeben ist. Bezüglich des Mikroskops ist noch zu beachten, daß die übliche Darstellung nur für undurchsichtige Objekte gilt; bei durchsichtigen spielt, nach ABBE, die Beugung eine wesentliche Rolle bei der Bilderzeugung (vgl. auch v. ROHR a. a. O. S. 80 ff.).

Was die Vergrößerung betrifft, so sind die theoretischen Berechnungen weniger wichtig als die praktischen Methoden zur zahlenmäßigen

Bestimmung. Diese werden vorwiegend nur in den Schülerübungen zur Ausführung gebracht werden können.¹⁾

Über die Demonstration der genannten optischen Instrumente durch einfache Linsenzusammenstellungen vgl. man ROSENBERG I 347, 350, sowie auch KEFERSTEIN a. a. O. Von anderen Instrumenten verdienen noch das Prismenfernrohr und der Augenspiegel (O. § 106) berücksichtigt zu werden. Eine etwas abweichende Anordnung zur Demonstration des Prinzips des Augenspiegels bei MÜLLER, T. 201.

§ 40. V. Von der Strahlungsenergie.

In diesem Kapitel läßt sich alles zusammenfassen, was über Absorption, Spektralanalyse, Ausdehnung des Spektrums in das unsichtbare Gebiet hinein, Ausdehnung des Strahlungsbegriffs auf Wärme und überhaupt über strahlende Energie zu sagen ist. Eine natürliche (nicht systematische) Anordnung ergibt sich durch Anknüpfung an ein früher schon (in § 35, 2) berührtes, aber noch aufgeschobenes Problem, nämlich das der Körperfarben. Ist an diesen der Leitbegriff der Absorption entwickelt, so führt dieser durch einfache und naheliegende Fragestellungen zu den übrigen Gegenständen des oben bezeichneten Gebiets.

1. Das Problem der Körperfarben wird am leichtesten bei den Farben durchsichtiger Körper angefaßt. *In welcher Beziehung stehen diese Farben zu den Farben des Spektrums?* Ein bekannter Versuch (ROSENBERG I 357) gibt darüber Aufschluß: Ein beim Spektralversuch vor den Spalt gehaltenes rotes Glas bewirkt, daß im Spektrum (mehr oder weniger) alle Farben bis auf das rote Ende verschwinden. Entsprechendes lehren Versuche mit verschiedenfarbigen Gelatineblättern und mit verschieden gefärbten Lösungen. Das Verschwinden gewisser Teile des Spektrums läßt auf Absorption der betreffenden Strahlengattungen schließen.

In nahem Zusammenhang hiermit steht die Herstellung additiver und subtraktiver Farbenmischungen, die auch für das Verständnis der Photographie in natürlichen Farben wichtig ist. Beide Arten der Farbenmischung lassen sich nacheinander mit derselben Vorrichtung herstellen; die erste, indem man zwei verstellbare Spiegel benutzt, mittels deren das Licht einer Lichtquelle durch zwei nebeneinander stehende farbige Gläser oder Gefäße mit farbigen Lösungen auf einen Schirm geworfen wird; die zweite, indem man

1) HAHN, Handbuch, VIII, Aufg. 16, 17.

die farbigen Gläser hintereinander stellt und nur einen der Spiegel benutzt.¹⁾ Es sind für den gleichen Zweck mehrfach Versuchsanordnungen angegeben.²⁾ Besonders lehrreich ist die subtraktive Mischung von drei verschiedenen Farben mittels dreier durchsichtiger Kreisscheiben von roter, grüner und blauer Farbe (ROSENBERG II 452); für die additive Mischung von drei Farben sind kompliziertere Vorrichtungen nötig (Photochromoskop von IVES und die unten angeführte Vorrichtung von LIESEGANG).

2. Nach der Rolle, die die Absorption bei durchsichtigen Körpern spielt, ist zu vermuten, daß auch die Farben undurchsichtiger Körper auf teilweiser Absorption des auf sie fallenden Lichts beruhen. Zur Bestätigung dient das Auffangen eines vollständigen Spektrums auf rotem Papier (O. Tafel IV, Fig. 14). Wir können uns hiernach die Vorstellung bilden, daß von dem weißen, auf einen Körper auffallenden Licht ein Teil absorbiert, ein anderer Teil reflektiert wird, und daß der letztere die Farbe des Körpers bestimmt. Es geht hieraus hervor, daß ein Körper schwarz erscheinen muß, wenn das auf ihn fallende Licht die Lichtarten nicht enthält, die er zu reflektieren vermag. Dies ist besonders wirksam mit Natriumlicht zu zeigen, dessen spektroskopische Untersuchung nur einen schmalen Streifen gelben Lichtes liefert.

Aus dem Gesagten erklären sich die Farben von Pigmentmischungen, z. B. die merkwürdige Tatsache, daß durch Mischung von blauem mit gelbem Farbstoff meist Grün (als Differenzfarbe) entsteht, während die entsprechenden Komplementärfarben weiß liefern³⁾; ferner der Einfluß der Beleuchtung auf die Körperfarben, namentlich die Verschiedenheit bei Tageslicht und Lampenlicht, da letzteres arm an blauen und fast frei von violetten Strahlen ist (Versuche z. B. bei WEINHOLD, D₄ 429). Auch die Erklärung des Dreifarbendrucks (O. § 113) findet hier ihre Stelle.

3. Einige Darlegungen über Farbenwahrnehmung, insbesondere über die Hypothese von YOUNG und HELMHOLTZ können sich hier anschließen; ferner über Farbenblindheit und über die Farbenphotographie nach IVES und MIETHE sowie nach LUMIÈRE (O. § 107, 1).

1) So auch von LOOSER, Z. U. XX 359 beschrieben.

2) Zu den bei ROSENBERG II 450ff. genannten sind noch hinzuzufügen: STROMAN, Z. U. XXI 112; LIESEGANG XXIII 45.

3) Genaueres z. B. bei GRIMSEHL, L. (2) 634.

4. Die Tatsache der Absorption des Lichts in farbigen Körpern führt zu der Frage, *worin diese Absorption besteht*. Wie beim Stoß zweier Körper die verschwundene Bewegungsenergie sich hauptsächlich als Wärme wiederfindet, so ist auch von der verschwundenen Lichtenergie Entsprechendes zu erwarten. Bezüglich der Wärmewirkung des Spektrums wird man sich zunächst auf historische Mitteilungen beschränken müssen, da die betreffenden Versuche, wenn man nicht gerade Thermosäule oder Bolometer anwenden will, zur Demonstration wenig geeignet sind. (Über die Demonstration mit Hilfe phosphoreszierender Schirme vgl. Nr. 5.) Der Astronom FR. WILH. HERSCHEL hat (1800) die grundlegenden Versuche angestellt. Er brachte sehr empfindliche Thermometer in die verschiedenen Farbenabschnitte des Sonnenspektrums und beobachtete eine Zunahme der Wärme vom violetten nach dem roten Ende hin. Ja, er entdeckte noch Wärmewirkungen über das äußerste Rot hinaus¹⁾; spätere genauere Untersuchungen wiesen sogar Spektrallinien in diesem ultraroten Teil des Spektrums nach. Die Frage, ob es sich bei der Wärmewirkung nicht um besondere dem Licht beigemischte Wärmestrahlen handle, wurde erst nach langem wissenschaftlichem Streit verneint.

Die Frage, ob das Spektrum sich auch jenseits des violetten Endes noch fortsetze, ob es also ein ultraviolettes Spektralgebiet gebe, schließt sich hier sogleich an. Man wird zunächst die chemischen Wirkungen des Lichts zur Sprache bringen, auch wohl eine Photographie des Spektrums herstellen lassen, die unter günstiger Bedingung bis H reicht (MÜLLER, T. 196). Zu erwähnen ist die Eigenschaft des Glases, die jenseits H liegenden ultravioletten Strahlen zu absorbieren, während Quarz (Bergkristall) und Flußspat sie hindurchlassen. Eine Demonstration der ultravioletten Strahlen mittels Fluoreszenzschirms kann später folgen. Eine gute Übersicht wird durch eine möglichst vollständige Spektraltafel ermöglicht.²⁾ Am besten schließt sich hier auch die Frage nach der Gesamtenergie des Spektrums und nach dem absoluten Betrag der Sonnenstrahlung an (O. § 113).

5. Besondere Formen nimmt die Absorption des Lichts in den fluoreszierenden und phosphoreszierenden Körpern an.

1) ROSENBERGER III 65.

2) Z. B. in HÖFLERS „Physik“ und „Naturlehre“.

Hier sind Versuche in größerer Auswahl zur Verfügung. Bei der Fluoreszenz ist es besonders wichtig, nachzuweisen, daß sie zu meist durch Strahlen höherer Brechbarkeit angeregt wird, und daß die erregende Lichtart von der fluoreszierenden Substanz absorbiert wird (ROSENBERG II 454). Für die Phosphoreszenz sind, neben den bekannten Zusammenstellungen phosphoreszierender Substanzen, Schirme mit Balmainischer Leuchtfarbe oder mit Zinksulfid (nach DANNEBERG) sehr zu empfehlen.¹⁾

Nunmehr lassen sich auch die unsichtbaren Spektralgebiete demonstrieren. Für die ultravioletten Strahlen benutzt man die Fluoreszenz einer Uranglasplatte oder eines Baryumplatincyanürschirmes; die Wirkung ist schon bei Dispersion durch ein Glasprisma gut sichtbar, noch schöner bei Verwendung von Quarzprisma und Quarzlinse.

Für die ultraroten Strahlen dient der Zinksulfidschirm, dessen Leuchten durch die von einer dünnen Hartgummiplatte durchgelassenen Strahlen gelöscht wird. Für eine ausführliche methodische Behandlung dieser Erscheinungen gibt DANNEBERG a. a. O. beachtenswerte Winke.

Auf die theoretische Frage nach der Natur des Fluoreszierens und Phosphoreszierens näher einzugehen, empfiehlt sich bei dem noch vielfach hypothetischen Charakter der Forschung nicht.

6. Mit der Absorption hängt nun auch die Spektralanalyse eng zusammen, deren experimentelle Grundlagen im Unterricht nicht übergangen werden dürfen. Das Problem der Fraunhofer'schen Linien hatte die Physiker schon lange beschäftigt, die Koinzidenz der hellen Natriumlinien mit den D-Linien des Sonnenspektrums war schon FRAUNHOFER bekannt, ein ähnliches Zusammentreffen wurde in den fünfziger Jahren für die hellen Linien anderer Flammenspektren konstatiert, doch führten alle diese Beobachtungen zu keiner entscheidenden Aufklärung, bis KIRCHHOFF und BUNSEN mit ihrer epochemachenden Entdeckung hervortraten. Über das bei dieser Entdeckung angewandte Verfahren vgl. Abschn. I § 2. KIRCHHOFF zog aus seiner Entdeckung sofort die richtigen Schlüsse bezüglich der Emission und Absorption von farbigen Flammen, sowie bezüglich der Konstitution der Sonnenatmosphäre.²⁾

1) DANNEBERG, Z. U. XXI 157.

2) Die theoretische Begründung des Gesetzes über den Zusammenhang von Absorption und Emission erfolgte, durch die Entdeckung veranlaßt, erst

Im Unterricht muß die „Umkehrung der Natriumlinie“ unbedingt gezeigt werden. Die wirksamste Art der objektiven Vorführung ist der KIRCHHOFFSchen ähnlich, nur daß man heute statt Kalklichts das elektrische Bogenlicht, und statt der Alkoholflamme eine durch glühendes Natrium (oder Natriumchlorid) stark gefärbte Bunsenflamme anwenden wird.¹⁾ Andere Versuchsanordnungen bei ROSENBERG II 446. Eine an KIRCHHOFFS ersten Versuch anknüpfende Anordnung, bei der Sonnenlicht benutzt wird (GLÖSER, Z. U. VI 303) ist weniger überzeugend, kann aber dazu dienen, das Zusammenfallen der hellen Emissionslinie des Natriumdampfs mit der D-Linie des Sonnenspektrums zu demonstrieren.

Ein Eingehen auf die theoretische Ableitung des KIRCHHOFFSchen Gesetzes liegt außerhalb des Schulbereichs. Wohl aber kann eine einfache Demonstration noch zeigen, daß auch bei schwachleuchtenden Natriumflammen das Gesetz zutrifft. Einen von BUNSEN hierfür angegebenen Apparat beschreibt WEINHOLD (D₄ 406); die Benutzung einer Kugelhöhle mit Natrium befürwortet SCHELLBACH (Z. U. II 82) und MÜLLER (T. 199), eine objektive Demonstration empfiehlt ROSENBERG (II 449). In theoretischer Hinsicht ist noch der Hinweis wichtig, daß hier eine Analogie mit den Resonanzerscheinungen vorliegt, die auf anderen Gebieten der Physik ebenfalls eine wichtige Rolle spielen.

Wie weit dann in das große Gebiet der Emissionsspektren eingegangen werden kann, wird von den besonderen Schulverhältnissen abhängen. Besonders glänzend lassen sich die Spektren der Schwermetalle durch Verwendung von Bogenlicht zwischen Elektroden der betreffenden Metalle hervorrufen (MÜLLER, T. 198). Eine geeignete Vorrichtung hierfür mit raschem Wechsel der Metalle hat VOLKMANN (Z. U. XXIV 234) angegeben.

Ein Ausblick auf die Astrophysik gehört auch an diese Stelle; zu zeigen ist die Koinzidenz der Wasserstofflinien mit den entsprechenden des Sonnenspektrums, allerdings nur für subjektive Beobachtung (MÜLLER, T. 199). Von Sternspektren sind Tafeln vorzuzeigen.

7. Die letzte Aufgabe dieses Abschnitts wird darin bestehen, daß der Strahlungsbegriff auf den weiten Bereich der dunklen

zwei Monate später (Dezember 1859), noch später die „chemische Analyse durch Spektralbeobachtungen“ (1860).

1) Über den entsprechenden Versuch für die rote Lithiumlinie vgl. GRIMSEHL, Z. U. XXVI 79.

Wärmestrahlung ausgedehnt wird. Nachdem die ultraroten Strahlen ihrem Wesen nach als mit der Lichtstrahlung gleichartig erkannt sind, obwohl sie vorwiegend als Wärmestrahlen sich kundgeben, ist die Frage nahegelegt, ob die Wärmestrahlung überhaupt, auch wo sie ohne Verbindung mit Lichtstrahlung auftritt, doch ihrem Wesen nach mit dieser übereinstimmt. Als Wärmequellen kommen dafür hauptsächlich die weißleuchtende Bunsenflamme, eine nicht ganz bis zur Rotglut erhitzte Eisenkugel und der LESLIESCHE WÜRFEL (oder WEINHOLDS Dampfkapsel) zur Anwendung. Es ist zu zeigen, daß charakteristische Eigenschaften der Lichtstrahlung auch der dunklen Wärmestrahlung zukommen.

Dies ist am leichtesten an der Reflexion zu zeigen, wofür die Versuche mit den PICTETSCHEN Hohlspiegeln wohlgeeignet sind (MÜLLER, T. 163; ROSENBERG II 460). Als Wärmeindikator benutzt man ein Luftthermometer oder REBENSTORFFS thermoskopisches Papier (Z. U. IX 227, XV 145, XXI 300).

Die Brechung der Wärmestrahlen ist weniger leicht zu zeigen; legt man darauf Wert, so kann man die Vereinigung der dunklen Wärmestrahlen hinter einer mit Jodlösung gefüllten kugelförmigen Flasche dazu benutzen (WEINHOLD₄ 552).

Wichtig ist aber noch der Nachweis der verschiedenen Durchlässigkeit für Wärmestrahlen, die der Durchsichtigkeit für Lichtstrahlen zur Seite tritt. Exaktere Versuche erfordern die Benutzung eines Bolometers, das der subtilen Thermosäule MELLONIS weit vorzuziehen ist (O. § 117, 2). Doch genügen auch Versuche mit der WEINHOLDSCHEN Dampfkapsel (oder einem geschwärzten, auf einige 100° erhitzten Kupferblech) und einem der gebräuchlichen Wärmeindikatoren, um die Diathermanität des Steinsalzes, die Athermanität des Alauns zu zeigen.

Die verschieden starke Emission von berußter und von glatter Oberfläche zeigt ebenfalls die Dampfkapsel WEINHOLDS; daß dem starken Emissionsvermögen der berußten Fläche ein starkes Absorptionsvermögen entspricht, kann mit dem HESSSCHEN Farberthermoskop (ROSENBERG I 173) sichtbar gemacht werden. —

Bei der Zusammenfassung der Lehre von der Strahlung ist der Gesichtspunkt beachtenswert, daß die Wärmestrahlen an sich ebenso wenig warm, wie die Lichtstrahlen leuchtend oder farbig sind. Die Wärmewirkung entsteht erst an den Körpern, auf die die Wärmestrahlen fallen. Dies ist namentlich von Wichtigkeit für die richtige Auffassung der Rolle, die die Sonnen-

strahlen bei der Erwärmung der Erdoberfläche spielen, während sie die Luft, die sie durchsetzen, kalt lassen.

Aus der eben angedeuteten Überlegung erwächst der allgemeine Begriff der Energiestrahlung, der den Schlußstein des ganzen Abschnitts bildet. Die Steigerung von Wärmestrahlen zu Lichtstrahlen bedeutet nichts anderes als eine Steigerung der Schwingungszahl. Je höher die Temperatur eines strahlenden Körpers steigt, desto größer wird die Schwingungszahl, desto kleiner die Wellenlänge (O. § 117, 5). Die unterste bis jetzt beobachtete Grenze liegt bei $\lambda = 0,3 \mu\mu$, eine Wellenlänge, die etwa $\frac{1}{2000}$ von der Wellenlänge des roten Lichts beträgt. Andererseits erscheint der Unterschied von sichtbarer und unsichtbarer Strahlung lediglich durch die Organisation des Auges bedingt. Dies führt zu dem folgenden letzten Abschnitt.

§ 41. VI. Das physiologisch-psychologische Grenzgebiet.

Die Optik ermöglicht, wie schon früher erwähnt, und nötigt zugleich zu einem Exkurs in das physiologische und philosophische Grenzgebiet. In der scharfen Unterscheidung zwischen physikalischen, physiologischen und psychologischen Vorgängen liegt, wie auch KIESSLING (D. 56) hervorgehoben und HÖFLER des öfteren ausgeführt hat, „gerade ein hervorragend didaktischer Wert“. Leider kommen diese Dinge, bei der ohnehin knapp bemessenen Zeit, in der Regel in unserem höheren Unterricht zu kurz. Es wäre aber zu erwägen, ob man nicht lieber manche Kapitel, z. B. aus der angewandten Elektrizitätslehre, preisgeben sollte, um für diese dem „Menschen“ ungleich näher liegenden Dinge Platz zu erlangen.¹⁾ Bei der großen Zahl hierher gehöriger Versuche und Erscheinungen kann es sich immer nur um eine Auswahl handeln, schon damit nicht das Wesentliche durch die Mannigfaltigkeit der Eindrücke in den Hintergrund gedrängt wird.

Man beginne mit rein physikalischen Vorgängen. Dazu gehört außer den in Abschn. IV genannten die Unschärfe der Bilder, die sich darin zeigt, daß beim Sehen durch eine feine Öffnung die Umrisse eines hellen Gegenstandes weit schärfer erscheinen, weil die Öffnung als Blende wirkt (ROSENBERG II 465). Ferner der SCHEINERSche Versuch (ebd.).

Physiologisch dagegen zu erklären sind die Dauer des Lichteindrucks (Stroboskop, Farbenkreisel), die Irradiation und die Erscheinungen der Ermüdung der Sehnerven (subjektive Nachbilder).

1) Materialien hierfür bei ROSENBERG II 463 ff.; HÖFLER, Physik (Log. und Psychol., Anhang, Nr. 44). KEFERSTEIN empfiehlt noch v. BEZOLD, Farbenlehre und HELMHOLTZ, Populäre Vorträge.

Ein besonders reiches Material physiologischer Erscheinungen liefert die Farbenwahrnehmung, namentlich auffallend und leicht hervorzurufen sind die komplementären Kontrasterscheinungen und die farbigen Schatten (Simultankontrast).¹⁾

Ganz ins psychologische Gebiet gehört das Zustandekommen des Vorstellungsbildes eines Gegenstandes auf Grund des umgekehrten Netzhautbildes, das Körperlichsehen mit zwei Augen und die Wahrnehmung der Tiefendimension (stereoskopisches Sehen); ferner eine ganze Reihe von optischen Täuschungen, die jedenfalls weder physikalisch noch physiologisch zu deuten sind.²⁾

Hier grenzt endlich die Betrachtung an die Frage nach der Entstehung der Raumvorstellungen und nach der Natur unserer Raumschauung. Wenn schon ein Übergreifen auf dies Gebiet nicht zu den Aufgaben des Physikunterrichts gehört, so wird es sich doch empfehlen, auch schon im Physikunterricht den Schülern die Augen für die hier sich aufdrängenden Probleme zu öffnen. Die Antworten könnte dann freilich nur ein systematischer Psychologieunterricht in sachlicher und methodischer Hinsicht ausreichend begründet geben.³⁾

Endlich wäre hier auch die schon in der Akustik berührte Erörterung des Verhältnisses von Sinnesempfindung und mechanischer Bewegung noch einmal aufzunehmen und in der Richtung auf eine das Weltbild der Physik ergänzende Weltanschauung weiterzuführen (vgl. S. 13).

1) Letztere sind nach HELMHOLTZ psychologisch, nach HERING physiologisch zu erklären. Man vergleiche auch HÖFLER und WITASEK, Hundert psychologische Schulversuche. (Joh. Ambr. Barth.) 3. Aufl. 1911.

2) Was an Stelle der früher viel diskutierten Streitfrage „Empfindungs- oder Urteilstäuschung?“ als gegenwärtig bestbegründete Erklärung zu gelten habe, darüber äußert sich A. HÖFLER wie folgt: „Jene herkömmliche Alternative ist durchbrochen durch die überzeugende Deutung von BENUSSI (Grazer Untersuchungen zur Gegenstandstheorie und Psychologie 1904), daß es Täuschungen im ‘Gestalt-Erfassen’ sind. Dies sei hier nur gesagt als Warnung an alle Nichtpsychologen, von diesen Dingen lieber ganz zu schweigen, falls sie nicht den ganz neuen Einsichten in die Eigenart der ‘Gegenstände höherer Ordnung’ – zu denen auch die ‘Gestalten’ (Gestaltsqualitäten nach EHRENFELS) gehören, haben folgen können oder wollen. Zusammenfassendes und Fortführungen hoffe ich in Band I der Neubearbeitung meiner Psychologie bringen zu können.“

3) Man vgl. HÖFLER Physik, Log. Anhang § 44, und besonders HÖFLER, Grundlehren der Logik und Psychologie. Näheres im IX. Band dieser Handbücher.

E. Elektrizität und Magnetismus.

§ 42. Einleitung.

Dieses umfangreichste, dabei jüngste und noch in beständiger starker Umbildung begriffene Gebiet ist in didaktischer Hinsicht wohl das schwierigste, aber auch durch formal bildende Kraft und durch Weite des Überblicks über den gesamten Naturzusammenhang allen anderen Gebieten überlegen. Daher hat sich auch immer mehr die Überzeugung befestigt, daß dieses Gebiet den Abschluß des physikalischen Unterrichts zu bilden hat.

Der Aufschwung der Elektrizitätslehre datiert von der Zeit an, seit exakte Messungen und damit scharf bestimmte Maßbegriffe auf sie angewandt worden sind. Wohl sind in diesem „Neuland“ auch in rein qualitativer Richtung Entdeckungen gemacht worden, aber eine wirkliche Beherrschung des Erfahrungsmaterials ist erst durch jene Maßbegriffe möglich geworden. Dabei ist bemerkenswert, daß diese Maßbegriffe nicht eigentlich aus den Experimenten heraus gewonnen, sondern durch das konstruierende Denken an die Erscheinungen herangebracht worden sind. Nirgends spielen die vom Denken geschaffenen Begriffe als Hilfsmittel zur Bewältigung der Tatsachen eine so große Rolle wie hier.

So sind auch COULOMBS Gesetze für die magnetische und elektrische Kraft Antizipationen des Denkens gewesen, deren direkte Bestätigung durch Versuche überhaupt nur näherungsweise möglich war; so war das OHMSche Gesetz auf Grund einer mit Scharfblick durchgeführten Analogie eine Schöpfung des Denkens, deren genaue Bestätigung sich durch Jahrzehnte hingezogen hat.¹⁾ Ja auch AMPÈRE, obwohl er das nach ihm benannte Gesetz bei der Veröffentlichung experimentell begründete, hat es doch aller Vermutung nach auf einem andern Wege entdeckt.²⁾ Selbst FARADAY, der größte Experimentator des letzten Jahrhunderts, verdankt einen großen Teil seiner Erfolge dem Gedankenbilde einer mechanisch vermittelten Ausbreitung der Kraftwirkungen durch den Raum. Und vollends die Geistesarbeit von GAUSS und WEBER erschafft ein Begriffssystem, vermöge dessen das ganze Gebiet mit Maßbestimmungen durchsetzt wird, ähnlich

1) Erst 1876 wurde das Gesetz durch eine eigens zu seiner Prüfung eingesetzte Kommission der British Association endgültig als richtig anerkannt. (Rosenberger III 498.)

2) Vgl. Rosenberger III 307.

wie ein neu erobertes Land mit einem Triangulationsnetz überzogen wird. Für den reifen Schüler hat es hohen Reiz, diese Eroberungsarbeit näher kennen zu lernen; es bedarf aber einer besonderen didaktischen Kunst, die Einführung in dieses Gebiet nicht zu einer vorwiegend systematischen werden zu lassen, sondern auch hier soweit als möglich an die historischen Fragestellungen und an die Probleme selbst anzuknüpfen.

Zugleich ist die Elektrizitätslehre auch für die Auffassung des Naturzusammenhangs auf Grund der Energieverwandlung von fundamentaler Bedeutung. Die Elektrizität ist das vermittelnde Agens, durch das die Verwandlung der Energieformen ineinander ermöglicht wird, die heut in der elektrischen Kraftübertragung so hohe Triumphe feiert. Der Beginn dieser Entwicklung ist durch die Entdeckung der Verwandelbarkeit von elektrischer und mechanischer Energie ineinander gegeben. Man weiß, eine wie große Rolle diese Beziehungen namentlich in der berühmten Arbeit von HELMHOLTZ über die Erhaltung der Kraft gespielt haben. In der unterrichtlichen Behandlung werden daher auch die Energieverwandlungen und das in ihnen herrschende Äquivalenzgesetz zu kräftigem Ausdruck zu bringen sein.

Für die Gestaltung des Lehrgangs hat HÖFLER in seiner Naturlehre¹⁾ sorgsam durchdachte und sehr beachtenswerte Anleitungen gegeben, in denen besonders auch für die Beziehungen zur Mechanik eine Eingliederung an den dafür geeigneten Stellen befürwortet ist. Welche Abweichungen von jenen Vorschlägen der Verfasser dieser Didaktik vornehmen zu müssen geglaubt hat, um den ihm vorschwebenden Unterrichtsgang zu verwirklichen, wird in der Einzeldarstellung hervortreten.

Zu erwägen bleibt besonders, ob bei einer eingehenden Behandlung des elektrischen Potentials nicht schon zuviel von dem Baugerüst festgehalten wird, das seinerzeit zur Errichtung des Systems der elektrischen Einheiten gedient hat.

Im Gegensatz zu der herkömmlichen, an die geschichtliche Entwicklung anschließenden Behandlung ist von manchen Seiten ein Lehrgang empfohlen worden, der hiervon völlig absieht und sogleich mit Versuchen am Starkstrom beginnt, wobei die Herkunft dieses Starkstroms zunächst im Dunkeln gelassen wird.²⁾ Dies Vorgehen dürfte gewiß für

1) Besonders im Vorwort zur 2. Auflage (1910), das unter dem Titel „Zum Gebrauche der Oberstufe der Naturlehre beim mündlichen Unterricht“ auch besonders ausgegeben ist (Vieweg u. Sohn, 61 S. M. O. 60).

2) So bei EPSTEIN, Überblick über die Elektrotechnik, Frankfurt a.M. 1892.

die Einführung an technischen Lehranstalten, wo man rasch in medias res kommen will, manches für sich haben und hat auch eine gewisse das Interesse sofort stark in Anspruch nehmende Kraft; dennoch möchte ich es für die allgemeinen Bildungszwecke unserer höheren Lehranstalten nicht befürworten.

Eine Einführung in die Elektrizitätslehre von E. BRUNN (Z. U. XIV 83) verwirft das Ausgehen von der Elektrostatik, schließt diese vielmehr erst an die Entladungsvorgänge beim Funkeninduktor an. Ein Eingehen auf diesen Vorschlag erübrigt sich, nachdem P. SPIES (Z. U. XIV 86) ihn einer kritischen Erörterung unterzogen hat, der ich durchaus beistimme.

Noch radikaler ist ein Vorschlag von KLEINPETER (Z. U. XXIV 129), der vorwiegend aus praktischen Gesichtspunkten die Induktionserscheinungen an den Anfang des ganzen Abschnitts stellt. Ich kann mich auch mit dieser Anordnung, die mit dem schwierigsten Problem der Elektrizitätslehre beginnt, nicht befreunden. Die Begriffe der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes werden aus Versuchen an einer magnetoelektrischen Maschine (Doppel-T-Ankermaschine) entwickelt, die *EMK* durch die Zahl der geschnittenen Kraftlinien definiert, die Stromstärke aus den Wirkungen am Drehspulinstrument abgeleitet, ihre Proportionalität mit der *EMK* auf demselben Wege gezeigt, das OHM'sche Gesetz noch vor jeder Bestimmung des Widerstandes aufgestellt, die Einheit des Widerstandes schließlich empirisch bekannt gegeben. Es scheint nicht, daß bei diesem Vorgehen eine wirkliche Sonderung der Begriffe und eine vorsichtige Ausdehnung ihres Gültigkeitsbereichs, wie bei dem älteren Verfahren, erzielt werden kann.

Eine völlig mit dem Herkömmlichen brechende Darstellung des Gebiets hat G. MIE gegeben.¹⁾ Seine „Experimentalphysik des Weltäthers“ vermeidet alle Begriffe der Fernwirkungstheorie, macht vielmehr die „Feldstärke“ des Äthers zu einem Grundbegriff. Auch von der heut üblichen Anknüpfung an das absolute Maßsystem wird abgesehen, vielmehr die praktischen Einheiten Volt, Coulomb, Ampère, Ohm durchweg einfach übernommen. CLASSEN hat auf dieser Grundlage Vorschläge zur Behandlung der elektromagnetischen Maße im Unterricht (Z. U. XXV 137) gemacht. Die Vorschläge sind noch zu neu, als daß schon ein Urteil darüber zulässig wäre, ob der neue Weg im Unterricht gangbar sein wird. Eine möglichst einfache Einführung in die Lehre von den Maßeinheiten würde ja ohne Zweifel willkommen zu heißen sein, wenn sie nicht etwa mit anderweitigen Nachteilen erkauft wird.

1) Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Stuttgart 1910, Enke. Vgl. Z. U. XXIII 375.

§ 43. Elektrostatische Maßbestimmungen und elektrischer Strom.

Wenn die Ermittlung quantitativer Gesetze als das Hauptziel des Unterrichts auf der Oberstufe zu gelten hat, so wird man in der Elektrostatik am besten gleich mit dem COULOMBSchen Gesetz einsetzen. Denn erst hieraus ergibt sich die Möglichkeit, feste Maßbestimmungen für die fundamentalen Begriffe der Elektrizitätsmenge und des elektrischen Potentials zu gewinnen, wenschon sich nicht in Abrede stellen läßt, daß es sich hier vornehmlich um Festlegung eines Begriffssystems handelt, dem experimentelle Messungen nicht überall sogleich angeschlossen werden können. Dies entspricht aber durchaus dem Wesen des vorher gekennzeichneten Erkenntnisprozesses und braucht eben aus diesem Grunde nicht beanstandet zu werden. Man muß nur keine Unklarheit darüber lassen, daß es sich zunächst um einen gedanklichen Aufbau handelt, der als Hilfsmittel zur wissenschaftlichen Beherrschung der Tatsachen erforderlich ist.

1. Das COULOMBSche Gesetz. COULOMB hat vermutet, daß für die elektrischen Anziehungen und Abstößungen ebenso wie für die Gravitation das Gesetz der umgekehrten Proportionalität mit dem Quadrat der Entfernung bestehe. Er hat dies durch Versuche mit der Drehwage geprüft und mit hinreichender Annäherung bestätigt gefunden. Wiederholt man die Versuche im Unterricht, so wird man ebenfalls nur annähernde Bestätigung erhalten; dies macht nichts aus, wenn man die störenden Umstände erläutert und auf schärfere indirekte Beweise hinweist. (Der wesentlichste störende Umstand ist der, daß die Ladung nicht punktförmig, sondern auf einer kugeligen Fläche ausgebreitet ist, und daß überdies noch gegenseitige Influenz der beiden Ladungen ins Spiel kommt.)

Einen geeigneten, von der Drehwage verschiedenen Apparat haben ODSTRCIL und A. M. MEYER beschrieben; NOACK gibt eine vervollkommnete Form (Z.U. VI 224) an, mit der er recht befriedigende Resultate erhalten hat. Der Wert dieser Messungen, selbst wenn die Resultate zu wünschen übriglassen, ist nicht zu unterschätzen, da erst dadurch eine deutliche Anschauung der in Betracht kommenden Vorgänge ermöglicht wird. Die COULOMBSchen Versuche führen auch in bekannter Weise zum Begriff der elektrostatischen Ladungseinheit (LE).

2. Es läge am nächsten, nun sofort nach Analogie des Gravitationskraftfeldes das elektrische Kraftfeld einer punktförmig ge-

dachten Elektrizitätsmenge zur Anschauung zu bringen. Doch ist es besser, da ein solches auch einem elektrisch geladenen Körper zukommt und die Versuche sich im wesentlichen nur an einem solchen anstellen lassen, erst diesen näher in Betracht zu ziehen.

Man sieht leicht, wenn man sich verschieden großen Körpern gleich große Ladungsmengen zugeführt denkt, daß der Ladungszustand ein verschiedener sein wird. Die Analogie zu dem Begriff des Wärmeszustandes führt zu dem entsprechenden des elektrischen Zustandes. Wie der Grad des Wärmeszustandes am Thermoskop oder Thermometer, so kann der Grad des elektrischen Zustandes (der Ladungsgrad) an einem entfernt aufgestellten und mit dem Körper leitend verbundenen Elektroskop (oder Elektrometer) erkannt werden.

Es folgen nun die bekannten Feststellungen über den Ladungsgrad, die sich in die drei Sätze zusammenfassen lassen (O. § 123): Der Ladungsgrad eines Leiters ist auf der ganzen Oberfläche konstant. – Der Ladungsgrad eines Leiters ist der ihm zugeführten Elektrizitätsmenge proportional. – Werden zwei Leiter verschiedenen Ladungsgrades miteinander verbunden, so geht stets positive elektrische Ladung vom Körper höheren zum Körper niedrigeren Ladungsgrades über.¹⁾ Die entsprechenden Versuche sind, soweit quantitativ, mit einem empirisch geeichten Elektrometer, z. B. dem KOLBESCHEN, anzustellen; für bloße Veranschaulichung genügen auch Blattelektroskope mit gut sichtbaren Blättchen (KOLBE).

3. Nunmehr kann zum elektrischen Felde und zum Begriff der Feldstärke (O. § 124) übergegangen werden. Daran schließt sich die Arbeitsdefinition für einen beliebigen Punkt des Feldes. Die Ableitung des mathematischen Ausdrucks $V = e/r$, die bei Verzicht auf die infinitesimale Methode nur durch eine umständliche Grenzbetrachtung gegeben werden kann, erscheint nicht unbedingt notwendig, zumal zahlenmäßig auswertbare Versuche dazu doch wohl nicht ausgeführt werden können. Die Klarstellung des Begriffs muß hier genügen, bis dieser beim galvanischen Strom weitere Bearbeitung findet.

Wichtig ist aber dann, daß der Ladungsgrad eines Leiters durch den für seine Oberfläche geltenden Potentialwert gemessen

1) Die Begründung für diese Darstellungsweise bei POSKE, Z. U. I 89, III 161; SZYMANSKI, Z. U. IV 11.

werden kann; demzufolge kann man auch die Begriffe Ladungsgrad und Potential, obwohl sie ursprünglich verschiedenes bedeuten, nunmehr füreinander setzen.

Das Verständnis für die Definition der elektrostatischen Einheit des Potentials ist hiermit völlig vorbereitet, und somit auch für die Definition der praktischen Einheit von 1 Volt = $\frac{1}{300}$ elektrostatischer Potentialeinheit. Wie man auf diese Festsetzung gekommen, wird später beim JOULESchen Gesetz ersichtlich; doch genügt diese Einführung des Volt durchaus für die Behandlung des OHMSchen Gesetzes.

Am Kraftfelde ist endlich auch der Begriff der Potentialdifferenz oder Spannung zu erläutern, für deren Messung ebenfalls die praktische Einheit 1 Volt benutzt wird. Hier läßt sich auch schon darauf hinweisen, daß diese Größe mit der beim VOLTAelement auftretenden Spannung nahezu übereinstimmt.

4. Der streng systematische Aufbau würde nun erfordern, daß nach HÖFLERS Vorschläge die ungeheure Tragweite und Bedeutung des Potentialbegriffs näher dargelegt wird an den Beziehungen:

Potential und elektrostatische Grundbedingung (HÖFLER, O § 137) —

Potential und Elektrisierung durch Verteilung (ebd. § 138)

Potential und Kapazität, Kondensatoren (ebd. § 139).

Bei einem aufs knappste bemessenen Lehrgang wird man diese Beziehungen wohl beiseite lassen dürfen; nicht übergehen sollte man aber die Arbeit beim Laden und Entladen (O § 127). Die Ableitung des Wertes $A = \frac{1}{2} VE$ ist nicht zu schwierig, dieser Ausdruck dient späterhin als Vorbild für die Bewertung der elektrischen Stromarbeit. Es ist nun verständlich, daß man von elektrischer Energie sprechen kann, und daß im besonderen zur Erzeugung solcher Energie bei der Influenzmaschine eine entsprechende Arbeitsleistung erforderlich ist (O. § 127, 4).¹⁾

Dem Schüler muß es schon hier zum Bewußtsein kommen, daß mit diesen Maßbegriffen ein wichtiges Hilfsmittel zur quantitativen Beherrschung der Erscheinungen geschaffen ist, obwohl die Natur des wunderbaren Agens, der Elektrizitätsmenge, dabei ganz im Dunkeln bleibt. Er muß auch hier schon sehen, daß es

1) Von einem Versuch, die Influenzmaschine vollständig zu erklären, sieht man im übrigen besser ab, da namentlich die Ladung der zweiten Belegung nicht einwandfrei abzuleiten ist.

möglich ist, die Größe der elektrischen Energie, durch Messung der beim Entladen erzeugten Wärme, zu bestimmen, was ebenfalls erst später, beim elektrischen Strom, zu wirklicher Ausführung kommt.

5. Der Hauptzweck der voraufgehenden Begriffsbestimmungen ist aber ihre Anwendung auf den elektrischen Strom. Ein solcher ist nichts anderes als der Ausgleichsvorgang zwischen Stellen verschieden hohen Potentials. Zur Vorbereitung dient schon der Funkenstrom in einem Funkenzieher, der die beiden Konduktoren einer Reibungselektroskopmaschine verbindet, oder der Funkenstrom zwischen den Polen einer Influenzmaschine. Ein eigentlicher Strom tritt erst bei kontinuierlichem Übergang auf. Das Abströmen durch einen Holzstab z. B. ist direkt nicht mehr wahrnehmbar, kann aber durch Einschalten eines Glockenspiels wieder bemerkbar gemacht werden (man vgl. O. § 128, 1 und ROSENBERG II 247). Ein wichtiger Versuch (O. § 128, 2) zeigt den Abfall des Potentials längs der Leitung. Man bringt dies der Auffassung näher durch die lehrreiche Analogie von strömendem Wasser und strömender Wärme mit strömender Elektrizität. Beide Analogien werden durch entsprechende Versuche veranschaulicht.¹⁾

6. Es folgt nun in bekannter Weise der Nachweis der Potentialdifferenz an den Polen eines galvanischen Elements bzw. einer galvanischen Batterie, und gegebenenfalls auch an den Zuführungsstellen einer Starkstromleitung. Der Nachweis geschieht mit geeichten KOLBESchen Elektrometern unter Zuhilfenahme eines VOLTASchen Kondensators²⁾, bei Starkstrom auch wohl mit einem BRAUNschen Elektrometer. Ausgezeichnet geeignet namentlich für schwache Spannungen ist auch das Quadranten-elektrometer, das neuerdings öfter in den Schulen angewandt wird. Hierbei ist bereits der Begriff der *EMK* einzuführen. Anzugeben ist die *EMK* des DANIELL-Elements (gesättigte Lösungen von $ZnSO_4$ und $CuSO_4$ zwischen Zn und Cu) = 1,08 Volt, die

1) Eine sehr instruktive Vorrichtung zur Erzeugung einer beständigen Wasserströmung in einer geschlossenen Leitung beschreibt MÜLLER T. 245. Die Vorrichtung dient zur Erläuterung von galvanischem Element wie von Dynamomaschine und ist auch wie letztere umkehrbar.

2) GRIMSEHL beschreibt ein noch empfindlicheres Elektrometer (Z. U. XVI 5), mit sehr praktisch eingerichtetem Kondensator.

des Kadmium-Normalelements (CdSO_4 und HgSO_4 zwischen Cd und Hg) = 1,0186 Volt. Zugleich ist auch der Nachweis zu führen, daß die Potentialdifferenz einer Batterie aus mehreren nacheinander geschalteten galvanischen Elementen der Zahl der Elemente proportional ist.

Der Schluß ist jetzt leicht zu ziehen, daß in dem Schließungsdraht eines galvanischen Elements oder einer Batterie ein elektrischer Strom fließen muß, dessen Vorhandensein durch die von der Unterstufe her bekannten Wirkungen nachweisbar ist. Die Ursache dieses Stromes ist in der Potentialdifferenz an den Klemmen des Elements zu suchen. Für die Potentialdifferenz an den Klemmen des offenen Elements wird die neue Bezeichnung der elektromotorischen Kraft (*EMK*) eingeführt. Die Einheit dafür ist ebenfalls 1 Volt.

Den Potentialabfall längs des Schließungsdrahts zu zeigen erübrigt sich an dieser Stelle, da man in anderem Zusammenhang (OHMSches Gesetz für Leiterstücke) ohnehin darauf eingehen muß. Will man die Erscheinung schon hier demonstrieren, so benutze man eine Batterie von 4–6 Akkumulatoren oder die Starkstromleitung.

§ 44. Magnetische Maßbestimmungen. Begriff der Stromstärke.

1. Das Problem der Erforschung der Gesetze des galvanischen Stroms erfordert zu seiner Lösung zunächst eine Klärung des Begriffs der Stromstärke. Man könnte daran denken, in Analogie mit strömendem Wasser unmittelbar die durch einen Querschnitt des Leiters strömende Elektrizitätsmenge zu messen; diese Menge ist indessen der direkten Messung durch Schulversuche oder Schülerversuche nicht zugänglich.¹⁾ Man schlägt deshalb ein indirektes Verfahren ein, indem man die elektromagnetische Wirkung des Stroms zur Messung der Stromstärke benutzt. Die Maßbestimmung dieser Wirkung erfordert aber die Begriffe der magnetischen Polstärke und der Horizontalintensität des Erdmagnetismus, mit diesen wird also zu beginnen sein.

Hierbei kommt der Begriff des magnetischen Pols zur Anwendung, der ja bekanntlich kritischen Einwendungen nicht standhält.²⁾ In der

1) Erst in anderem Zusammenhange, beim OHMSchen Gesetz und bei der JOULESchen Wärme, wird auf das Verhältnis der magnetischen Stromstärke zu der elektrostatisch gemessenen Elektrizitätsmenge einzugehen sein.

2) Man vgl. namentlich RUOSS, Z. U. XXI 304.

Tat kann man nicht von einem realen magnetischen Pol sprechen, da ja die Kraftwirkungen, wie das Kraftlinienbild zeigt, fast von der ganzen Länge des Magnetstabes ausgehen. Man wird aber für den wirklichen Magneten einen gedachten Magneten substituieren können, bei dem die Wirkungen von zwei symmetrisch zur Drehungsachse gelegenen Polen ausgehen, und der in betreff seiner Wirkung auf andere Magnete, wenigstens innerhalb eines gewissen Entfernungsbereichs, mit dem wirklichen Magneten äquivalent ist. Die in den Polen konzentrierte magnetische Masse wird ebenfalls eine gedachte Masse sein. Nur an solchen gedachten Massen läßt sich zunächst das COULOMBSche Gesetz als innerhalb gewisser Grenzen gültig erweisen. Die so gemachte Substitution ist ähnlich der Ersetzung eines physischen durch ein mathematisches Pendel. Aufgabe des Unterrichts ist es, dann weiterhin die hier benutzte Abstraktion als eine vorübergehende Hilfsannahme erkennen zu lassen und die Betrachtungen vielmehr an das magnetische Kraftfeld (§ 48) anzuknüpfen. Als Einführung aber in die Lehre vom Magnetismus scheint auch heut noch das COULOMBSche Gesetz unentbehrlich zu sein.

2. Zum Nachweis des COULOMBSchen Gesetzes für Magnetpole und zur Messung der Polstärke ist in den letzten Jahren eine große Reihe von Vorrichtungen angegeben worden.¹⁾ Daß COULOMBS Messungen selbst, ähnlich wie die elektrostatischen Messungen, eine nicht sehr scharfe Bestätigung des Abstandsgesetzes liefern, ist bekannt. Auch die Methoden, die für den Unterricht zur Verfügung stehen, können auf keine allzu große Exaktheit Anspruch machen.

Schon die Bestimmung der Lage der Pole ist mit Schwierigkeiten verknüpft. Die bloße Berufung darauf, daß bei Stäben „erfahrungsgemäß“ oder „in der Regel“ die Pole in etwa einem Zwölftel der Stablänge vor den Enden liegen, kann nicht als zureichende Begründung dienen.²⁾ Es sollte, ehe man die Pole benutzt, mindestens außerhalb des Unterrichts (etwa im Schülerpraktikum) eine Bestimmung ihrer Lage vorausgegangen sein.

BAHRDT ermittelt den „Schwerpunkt“ der über die Länge des Stabes verteilten „magnetischen Massen“ mittelst der Wage; PÜNING findet den Pol, indem er den Magnetstab einer Kompaßnadel in der Richtung des magnetischen Meridians gegenüberstellt und dann nach Drehung des Stabes um 90° eine solche Lage des Stabes aufsucht, daß die Ablenkung der Nadel ebenso groß wie vorher ist; dieser Methode gibt

1) Außer den bei ROSENBERG II 226 ff., 239 ff. angeführten sind noch zu nennen: W. BAHRDT, Magnetische und magnetelektrische Messungen im Unterricht (Abhdl. z. Did. u. Phil. d. Naturw. II Heft 4); FR. MÜLLER, Über die Pole gerader Stabmagnete, Z. U. XXIV 346.

2) Vgl. namentlich RUOSS, Z. U. XXI 304, und MÜLLER, Z. U. XXIV 346.

RUOSS (Z. U. XIX 95) den Vorzug, indem er den Einfluß des entfernteren Pols dadurch nahezu aufhebt, daß er an den Stab in der Achsenrichtung noch einen oder mehrere gleiche Stäbe mit entgegengesetzten Polen ansetzt. MÜLLER (Z. U. XXII 73) verschiebt eine Kompaßnadel längs des Stabes so lange, bis sie genau senkrecht zum Stabe steht; die Einstellung wird mit Hilfe eines Lichtzeigers bewirkt, der Einfluß des entfernten Pols durch sehr große Länge des Stabes (Stahldraht von 2 m) nahezu beseitigt.¹⁾

Was nun die Bestimmung der Polstärke von Magneten betrifft, so trage ich kein Bedenken, eine der neuerdings beschriebenen Polwagen, etwa die von KLEIBER, GRIMSEHL oder BAHRDT, zu empfehlen.

Man soll nur nicht den Schein erwecken wollen, als ob das COULOMBSche Gesetz sich als ein für alle Entfernungen gültiges nachweisen ließe. [Auch bei MÜLLERS scharfsinnig durchkonstruierter Vorrichtung (Z. U. XXII 10) versagt das Gesetz naturgemäß für kleinere Abstände, gerade „auf Grund des COULOMBSchen Gesetzes“, das nur für wirklich punktförmige magnetische Massen als streng gültig anzusehen ist.] GRIMSEHL gibt deshalb auch bei seinen Versuchen die Resultate für Abstände von 2–16 cm an, um daraus zu folgern, daß nur etwa zwischen 6 und 15 cm das Gesetz zutrifft. Ist nämlich $m_1 m_2 / r^2 = k$, so ergeben sich aus den gemessenen Werten von r und k Werte des Produkts $m_1 m_2$, die nur innerhalb dieses Intervalls annähernd übereinstimmen, für kleinere und für größere r aber darunter bleiben. Dies erklärt sich hinreichend daraus, daß im ersten Fall die ferner liegenden magnetischen Massen weniger zur Wirkung beitragen, im zweiten Fall der entgegengesetzte Pol schon relativ beträchtlicher mitwirkt.²⁾ Dieses Beispiel ist methodisch überaus lehrreich, da es zeigt, wie unzulässig es ist, aus dem Nachweis eines Gesetzes innerhalb eines engen Bereichs auf die allgemeine Gültigkeit dieses Gesetzes zu schließen. Hat man zwei Nadeln von gleicher Stärke (vgl. Ruoss XIX 90), so ergibt sich aus $mm = kr^2$ sofort der Wert der Polstärke m in absoluten Einheiten.

Auf das COULOMBSche Gesetz für den Fall der Anziehung ungleichnamiger Pole pflegt meist nicht eingegangen zu werden; es erübrigt sich dies auch, da es uns weiterhin nur auf die Horizontalintensität des Erdmagnetismus und auf deren Verwendung bei der Bestimmung der elektromagnetischen Stromstärke ankommt.

Ein schärferer Nachweis für die Richtigkeit des COULOMBSchen Gesetzes läßt sich unter Heranziehung der Horizontalintensität des Erd-

1) Für Schülerübungen benutzt H. HAHN (Hdb. IX Aufg. 1) die ROBISONschen Magnetstäbe, deren Pole in zwei an die Enden angesetzten Stahlkugeln liegen.

2) Überhaupt wird bei diesen Versuchen, wie RUOSS Z. U. XXI 304 gezeigt hat, die Wirkung beider Pole durch die eines äquivalenten Pols ersetzt.

magnetismus führen, wenn man das GAUSSSCHE Verfahren der Ablenkung einer kleinen Kompaßnadel in der sogenannten 1. Hauptlage aus zwei verschiedenen Entfernungen benutzt. Ist die Länge des Magnetstabes klein gegen die Abstände r_1 und r_2 , seines Mittelpunkts von der Nadel, so ist mit großer Annäherung $\operatorname{tg} \alpha = \frac{2lm}{Hr^3}$, d. h. bei kleinen Winkeln die Ablenkung umgekehrt proportional der dritten Potenz der Entfernung. Für den Versuch benutzt man am besten die Nadel der Tangentenbussole. Die Resultate sind recht befriedigend.

3. Die Horizontalintensität des Erdmagnetismus ergibt sich am leichtesten durch Bestimmung des Drehungsmoments $D = 2mH$, das ein Magnet durch das Erdfeld erfährt. Daraus folgt sofort $H = D/2m$. Eine Messung unmittelbar in Dyn ist durch den Pendel-Dynmesser von MÜLLER (T. 223 und Z. U. XXIII 17) oder die von NOACK vervollkommnete KLEIBERSCHE Polwage möglich. Auch BAHRDT (a. a. O. S. 20) verfährt nach der gleichen Methode. Weniger zur Demonstration geeignet ist GRIMSEHLS Verfahren, bei dem ein Magnetstab durch einen anderen von bekannter Polstärke m_1 in einer Lage senkrecht gegen den magnetischen Meridian festgehalten wird. Dabei wird $mH = \frac{m m_1}{r^2}$, also $H = \frac{m_1}{r^2}$.

Da gerade auf diesem Gebiet Schülerübungen sehr am Platze sind, so mag es sich empfehlen, in der Klasse die Messung nach dem größeren Verfahren zu demonstrieren, und genauere Messungen dem Schülerpraktikum zuzuweisen.

Daß auf die Größe der Horizontalintensität übrigens Eisenteile in den Wänden und Decken des Gebäudes von sehr erheblichem Einfluß sind und selbst große Abweichungen erklärlich machen, darauf hat besonders GRIMSEHL hingewiesen.

Genauere Resultate erhält man, wenn man nicht die vorausgehende Bestimmung der Polstärke benutzt, sondern unabhängig davon außer dem Produkt mH noch den Quotienten m/H nach der GAUSSSCHE Methode bestimmt. So GRIMSEHL (Lehrb.₂ § 354) und HAHN (Hdb. IX Aufg. 9).

Besonders sorgfältig durchgearbeitet ist dieses Verfahren von MÜLLER.¹⁾ Er bestimmt das Produkt mH mittels seines Pendel-Dynmessers, und ermittelt darauf den Quotienten m/H aus der Ablenkung, die eine kleine Magnetnadel (Nadel mit Lichtzeiger, Z. U. XXII 1) durch denselben Magnetstab erfährt. Durch eine einfache Rechnung (wie oben) ergibt sich $m/H = \frac{r^3}{2l} \operatorname{tg} \varphi \cdot \left(1 - \frac{l^2}{4r^2}\right)^2$.

Die Auswertung geschieht rasch, wenn man nach MÜLLERS Vorschlag die Werte des Faktors $\frac{r^3}{2l} \left(1 - \frac{l^2}{4r^2}\right)^2$ für eine Reihe von in Betracht kommenden Werten von r vorher berechnet hat.

1) Z. U. XXII 74, XXIII 17. Vgl. auch ROSENBERG II 242.

Verfährt man auf diese Weise, so kann man zugleich mit H auch m finden, demnach eine Bestimmung der Polstärke auf die unter 2) angegebene Weise unterlassen.

Die Bestimmung von mH aus Schwingungsbeobachtungen, wie sie im Hochschulpraktikum üblich ist, wird sich nur in solchen Fällen ausführen lassen, wo den Schülern das Arbeiten mit der Schwingungsformel für das physische Pendel wirklich ganz geläufig geworden ist.

MÜLLER hat endlich a. a. O. noch eine weitere Verwendung seines Dynmessers beschrieben, durch die auch ohne anderweitige Ermittlung des Quotienten m/H eine Bestimmung beider Größen ausführbar ist. Er bestimmt für jeden von zwei gleich großen Stabmagneten (10 : 1,2 : 0,8 cm) die Größen m_1H und m_2H . Danach läßt er einen der beiden Magneten in der Normalstellung stehen, stellt aber seitlich dagegen unter 90° (also in der 2. GAUSSschen Hauptlage) den anderen und bestimmt wiederum die Gleichgewichtslage des Dynmessers. Die Differenz beider Ablesungen liefert, unter Benutzung der vollständigen Gleichung für die 2. Hauptlage¹⁾, das Produkt m_1m_2 . Aus den nunmehr bekannten Werten von m_1H , m_2H und m_1m_2 lassen sich alle drei Größen bestimmen.

Es läßt sich nicht verkennen, daß diese Bestimmung wohl die einwandfreieste und genaueste von allen schulmäßigen Methoden ist. Es ist allerdings bei all diesen Rechnungen l nicht der Länge des Magnetstabs, sondern dem Abstand der beiden fingierten Pole gleichzusetzen, also bei den gewählten Dimensionen unbedenklich $= 5/6 l$. MÜLLER zeigt aber (XXIII 23), daß mäßige Abweichungen ohne merklichen Einfluß auf das Resultat bleiben.

4. Wirkung eines Stromleiters auf einen Magnetpol. Das Ziel der hier anzustellenden Untersuchung ist die Definition der elektromagnetischen Stromeinheit (SE). Die Grundlage hierfür bildet das LAPLACESche Elementargesetz, das bekanntlich aus dem experimentell gefundenen BIOT-SAVARTSchen Gesetz für die Wirkung eines unbegrenzten geradlinigen Leiters auf einen Magneten abgeleitet ist. Treffend sagt MÜLLER (Z.U. XXII 146) hierüber: „Erst dem mathematischen Scharfblick von LAPLACE gelang es, in dem BIOT-SAVARTSchen Integralgesetz das Grundgesetz zu entdecken. Hier liegt ein ähnlicher Fall vor wie bei der Auffindung des Sinusgesetzes für die Optik, das selbst ein KEPLER in seinem großen und wohlgeordneten Beobachtungsmaterial vergeblich gesucht hat. Deshalb wäre es ein pädagogischer Mißgriff, die Sinus-

1) $k = 2m_1m_2 \left[\frac{r-a}{[(r-a)^2 + a^2]^{3/2}} - \frac{r+a}{[(r+a)^2 + a^2]^{3/2}} \right]$, wo $a = \frac{l}{2}$.

formel vor der Klasse heuristisch herleiten zu wollen. Wir können nicht anders, als sie den Schülern fertig zu geben, wie so manche anderen großen Gesetze der Physik. Hinterher aber gilt es, die Formel durch ausgewählte Versuche hinreichend zu belegen, sie auf die wichtigsten Sonderfälle auszudehnen und zur Lösung geeigneter, der experimentellen Prüfung zugänglicher Aufgaben anzuwenden.“

Der vollständige Ausdruck des LAPLACESchen Gesetzes ist

$$k = \frac{mli \sin \varphi}{r^2};$$

diese Formel gleich vollständig zu geben, hat indessen ein gewichtiges Bedenken gegen sich. Bringt man nämlich die Stromstärke i von Anfang an in das Gesetz hinein, so begeht man eine *petitio principii*, da man ja hintennach erst die Messung der Stromstärke auf dieses Gesetz gründet. Es sind daher auch alle Versuche für unseren Zweck unbrauchbar, die von vornherein die Proportionalität dieser Wirkung mit der Stromstärke experimentell nachweisen wollen. Ferner ist die Abhängigkeit von $\sin \varphi$ für die nächsten Anwendungen nicht erforderlich; hat man freilich irgend Zeit, so lohnt es sich sehr, darauf einzugehen, denn gerade dieses Sinusgesetz ist „das Eigentümliche und Rätselhafte bei der Fernwirkung zwischen Stromstärke und Magnetpol“ (MÜLLER). Wir werden im folgenden davon absehen und erst hernach (unter 6) darauf zurückkommen.

Was vom LAPLACESchen Gesetz mitgeteilt und wenn irgend möglich durch Versuch erläutert werden soll, ist also zunächst nur, daß bei senkrechter Stellung des Leiterstücks zu der Verbindungslinie mit dem Pol die auf diesen ausgeübte Kraft der Polstärke und der Länge des Leiterstücks direkt, dem Quadrat des Abstandes aber umgekehrt proportional ist.

Das Gesetz kann durch eine von W. BAHRDT¹⁾ angegebene Versuchsanordnung demonstriert werden. Ein langes schmales Rechteck aus 10 Windungen dünnen Leitungsdrahtes (52 cm : 9 cm) wird mit der einen Schmalseite in verschiedenen Abständen (10 bis 30 cm) der einpoligen magnetischen Wage gegenübergestellt; die auf den Pol ausgeübten Kräfte entsprechen recht genau dem LAPLACESchen Abstandsgesetz. (Empfehlenswerter wäre es wohl, nur einen einfachen Leitungsdraht und entsprechend größere Stromstärke zu nehmen.) Mit dersel-

1) Sonderheft der Z. U. II 4, S. 36 ff.

ben Vorrichtung läßt sich auch näherungsweise zeigen, daß die Kraft der Polstärke proportional ist. Was endlich die Abhängigkeit von der Länge des Elements betrifft, so könnte man auch dafür noch einen Versuch einrichten¹⁾; man kann sich aber damit begnügen, diese Abhängigkeit historisch anzugeben und die Bestätigung dafür durch die bei einem ausgedehnten (kreisförmigen) Leiter sich ergebenden Folgerungen zu führen.

Daß nun die Wirkung auch von der Stromstärke überhaupt abhängt, kann durch Veränderung der Stromstärke leicht demonstriert werden, auch ohne daß noch ein Maß für diese festgesetzt ist. Da mit der Einschaltung von Widerstand in den Stromkreis die Wirkung auf den Magnetpol abgeschwächt wird, so kann man schließen, daß die Stromstärke abgenommen hat. Man sieht hiernach ein, daß man geradezu die Wirkung auf einen Magnetpol von bestimmter Polstärke zur Messung der Stromstärke benutzen kann.

Nunmehr ist die Einheit der elektromagnetischen Stromstärke (SE) zu definieren als die Stärke des Stromes, der einen Kreisbogen von der Länge 1 cm und dem Radius 1 cm durchfließend auf einen Magnetpol von der Polstärke 1, der sich im Mittelpunkt des Kreises befindet, die Kraft 1 Dyn ausübt.²⁾

Die so bestimmte Einheit heißt 1 Weber, der zehnte Teil davon = 1 Ampère ist die gebräuchliche praktische Stromeinheit. Bei dem unten erwähnten Apparat von GRIMSEHL kann durch gleichzeitiges Einschalten eines Amperemeters die Angabe des Apparats sofort auf seine angenäherte Richtigkeit kontrolliert werden.

Man kann nun einen Strom von der Stromstärke i dadurch definieren, daß seine Wirkung auf einen Magnetpol unter sonst gleichen Umständen i mal so groß ist als die des Einheitsstromes. Es wird dann, wie aus dem vorhergehenden leicht abzuleiten, die Kraft k eines Stromes i , der ein Leiterstück von der Länge l cm durchfließt, auf einen Magnetpol von der Stärke m im Abstände r cm darzustellen sein durch

$$k = \frac{mli}{r^2}.$$

5. Anwendung auf Kreisströme. Für einen kreisförmigen Lei-

1) Die von BAHRDT a. a. O. S. 38 angegebene experimentelle Herleitung zeigt zwar die Abhängigkeit von $\sin \varphi$, aber nicht die von der Länge des Leiterelements.

2) GRIMSEHL hat (Sonderheft II 2, 15) einen kleinen Apparat angegeben, der diese Definition veranschaulicht. Gegen die Zulässigkeit der hier gewählten Demonstrationsart hat MÜLLER, Z. U. XX 373, schwerwiegende Bedenken erhoben. Will man den Apparat benutzen, was ja für die Verdeutlichung des Begriffs der Stromstärkeinheit von Wert wäre, so wird man eine Diskussion seiner Ungenauigkeiten nicht unterlassen dürfen.

ter vom Radius r in bezug auf einen im Mittelpunkt befindlichen Pol folgt sofort

$$k = \frac{m 2 r \pi i}{r^2} = \frac{2 m \pi i}{r}$$

und bei n Drahtwindungen

$$k = \frac{2 m n \pi i}{r}.$$

Zur Bestätigung dieses Gesetzes können kreisförmige Leiter dienen, in deren Mittelpunkt der Pol einer einpoligen Polwage gebracht wird (BAHRDT a. a. O. S. 41). Von hier ist nur noch ein Schritt zur Theorie der Tangentenbussole. Die Gleichung

$$i = \frac{rH}{2\pi} \operatorname{tg} \alpha$$

gestattet zunächst eine einfache Prüfung des Einflusses von r bei gleichbleibender Stromstärke. Zur Anstellung des Versuchs dienen Tangentenbussolen mit zwei kreisförmigen Drähten, deren Radien sich wie 1 : 2 verhalten. Solche Apparate sind mehrfach beschrieben.¹⁾ Bei gleichem Wert von i verhalten sich die Werte von $\operatorname{tg} \alpha$ umgekehrt wie die Radien. Leitet man denselben Strom in entgegengesetzter Richtung durch die beiden Kreisdrähte, so heben sich die Wirkungen auf die Magnetnadel auf.

Für die Tangentenbussole selbst ergibt sich dann die bekannte Beziehung

$$i = \frac{rH}{2\pi} \operatorname{tg} \alpha \text{ Weber} = \frac{5rH}{\pi} \operatorname{tg} \alpha \text{ Ampère}$$

und es ist nun möglich, die Stromstärke in absolutem Maß bzw. in Ampère auch mittels der Horizontalkomponente des Erdmagnetismus zu finden. Bei gekürztem Lehrgang macht diese Bestimmung die früher unter 3) angegebene entbehrlich. Die Berechnung des Reduktionsfaktors der Tangentenbussole schließt sich unmittelbar an. Hiermit ist ein Instrument für die Messung der Stromstärke gewonnen, das indessen den Nachteil hat, daß die Angaben erst in Ampère umgerechnet werden müssen und daß zudem die Messungen ziemlich viel Zeit erfordern. Man wird daher gut tun, die Tangentenbussole alsbald durch ein Ampèremeter zu ersetzen, dessen Richtigkeit durch einige Kontrollversuche an der Tangentenbussole geprüft werden kann. Auch wenn die Konstruktion, etwa eines Drehspulinstruments, nicht sofort zur Erläuterung kommt, hat es doch kein Bedenken, ein solches Instrument zu benutzen. (Man vgl. auch ROSENBERG II 305.)

6. An Stelle von 3) und 4) gibt MÜLLER (Z. U. XXII 146 und XXIII 24) einer noch vollkommeneren Verwertung des LAPLACESchen Elementar-

1) QUINCKE, Z. U. VI 121; FR. C. G. MÜLLER, Z. U. VIII 34 u. T. 272; GRIMSEHL, Sonderh. II 2, S. 12.

gesetzes den Vorzug, indem er auch den Faktor $\sin \varphi$ berücksichtigt. Eine experimentelle Demonstration für diesen Teil des Gesetzes hat, wie oben schon erwähnt, W. BAHRDT gegeben. MÜLLER leitet aus dem vollständigen Elementargesetz in der Form $dk = \frac{mi}{\rho^2} dl \sin \varphi$ durch Integration (die auch elementar ausführbar) zunächst die Wirkung eines Leiters von der Länge AB (Fig. 34) auf einen in M befindlichen Pol ab, und findet, da $AB \sin \varphi = AC \cos \alpha = \rho d\alpha$ und $\rho = r/\cos \alpha$ ist,

$$k = \int_0^\alpha \frac{mi}{r} \cos \alpha d\alpha = \frac{mi}{r} \sin \alpha.$$

Dieser sehr einfache Ausdruck liefert sofort das BIOT-SAVARTSche Gesetz für einen geraden unendlich langen Stromleiter, $k = \frac{2mi}{r}$.

Er ermöglicht aber weiter auch für mannigfache Formen von geradlinig begrenzten Leitern die auf einen Magnetpol ausgeübte Kraft zu berechnen. So ist für ein Quadrat in Beziehung auf seinen Mittelpunkt $k = \frac{8im}{r} \sin 45^\circ = \frac{im}{r} 4\sqrt{2}$; für ein Rechteck, dessen Länge dem dreifachen, dessen Breite dem doppelten Polabstand gleich ist, wird

$$k = \frac{mi}{r} (2\sqrt{2} + 5) = \frac{mi}{r} \cdot 5,07,$$

also für beide Pole zusammen

$$k = \frac{mi}{r} 10,14.$$

Diese Formel wird nun auf einen der beiden oben beim Pendeldynmesser beschriebenen Magnetstäbe (vgl. S. 358) angewandt, indem ein rechteckiger Rahmen von entsprechender Größe an den Dynmesser angesetzt wird, so daß er normal zum Spiegel diesen umgreift und der auf seine Spitze gestellte Magnetstab gerade in die Mittelebene des Rahmens zu stehen kommt. Die Auswertung der Dynmesserableseung ergab bei einem Versuch $i = 0,199$ Amp., während das Amperemeter genau 2 Amp. zeigte.

Man wird zugeben müssen, daß hiermit ein Kabinettstück exakter Schulerperimentierkunst geleistet ist. Die theoretischen Vorarbeiten liegen noch ganz innerhalb des Bereichs des Pensums der Realanstalten, und der geistige Gewinn, der aus solcher intensiven Bearbeitung erwächst, ist sicher nicht gering anzuschlagen.

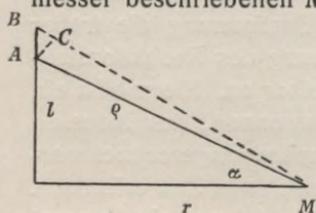


Fig. 34.

§ 45. Das OHMSche Gesetz.

Nach Festlegung der Stromstärkeeinheit ist der Weg zum Verständnis des OHMSchen Gesetzes gebahnt. Wie schon erwähnt, ist das OHMSche Gesetz nicht auf empirischem Wege gefunden, sondern verdankt seinen Ursprung einer wohl auf die empirischen Daten des Widerstandes und der elektroskopischen Kraft gestützten, im wesentlichen aber doch gedanklichen Untersuchung. Auf die theoretische Ableitung¹⁾ wird man wohl in der Regel verzichten; aber doch scheint es nicht der Sachlage zu entsprechen, wenn man eine experimentelle Ableitung des Gesetzes zu geben versuchte, so dankenswerte Vorarbeiten in dieser Richtung auch vorliegen.²⁾ Auch für eine experimentelle Herleitung mit Hilfe der Reibungselektrizität (ROSENBERG II 288) kann ich mich nicht erwärmen; Versuche dieser Art sind zwar sehr geeignet, zu zeigen, daß auch die strömende statische Elektrizität dem OHMSchen Gesetze folgt, aber nicht ausreichend, um einen Beweis des Gesetzes für die in vieler Hinsicht so ganz anders verlaufende galvanische Strömung zu liefern.³⁾ Es kann sich vielmehr nur darum handeln, den Sinn des Gesetzes zu erläutern und es durch eine Reihe von Versuchen zu bestätigen, sowie danach seine Ausdehnung auf Leiterstücke und auf Verzweigungen darzulegen.

1. Durch Vorversuche überzeugt man sich, wie schon auf der Unterstufe geschehen ist, daß durch einen längeren Leitungsdraht der Strom geschwächt wird, oder daß der Leitungsdraht einen „Widerstand“ ausübt. An Versuche solcher Art hat auch G. S. OHM angeknüpft, und überdies gemutmaßt, daß die Differenz der elektroskopischen Zustände an den Polen eines offenen Elements von Einfluß sei. Die Analogie mit der Wärmeleitung führte ihn dann zu Betrachtungen, deren Abschluß das nach ihm benannte Gesetz bildete. Dies Gesetz ist also seinem Ursprung nach eine Gedankenschöpfung, die sich in engem Anschluß an die Erfahrung vollzog, deren Richtigkeit aber erst durch genaue Versuche bestätigt werden mußte, wie sie nach OHM namentlich von R. KOHLRAUSCH und FECHNER angestellt worden sind.

Die theoretische Betrachtung OHMS gründet sich auf die Beobachtung, daß das Potential (der „elektroskopische Zustand“) längs einer

1) Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet von G. S. OHM. Berlin 1827.

2) Es sei besonders auf SZYMANSKI, Z. U. V 177, und NOACK, Z. U. VI 57, verwiesen.

3) Genau messende, für die Schule aber zu komplizierte Versuche dieser Art gibt OCCHIALINI an (N. Cim. 1911; Z. U. XXIV 297).

geschlossenen Leitung vom positiven gegen den negativen Pol beständig abnimmt, ähnlich wie die Temperatur eines Stabes, dessen Enden auf konstanter, verschieden hoher Temperatur gehalten werden. Betrachtet man nun¹⁾ den Vorgang in einem Draht von der Länge l , an dessen Enden die Potentiale V_1 und V_2 bestehen, so kann man das „Gefälle“ der Elektrizität in dem Draht (d. h. die Potentialdifferenz pro Längeneinheit) darstellen durch $\frac{V_1 - V_2}{l}$. OHM macht nun die (der Wärmeleitung entsprechende) Hypothese, daß die durch den Querschnitt q in der Zeiteinheit hindurchströmende Elektrizitätsmenge dem Gefälle und ferner dem Querschnitt q proportional sei, also $i = kq \frac{V_1 - V_2}{l}$, worin k eine Proportionalitätskonstante bezeichnet. Schreibt man die Gleichung in der Form

$$i = \frac{V_1 - V_2}{\frac{l}{kq}}$$

und setzt $l/kq = w$, so erhält man

$$i = \frac{V_1 - V_2}{w}.$$

Hierin bedeutet w eine mit l wachsende, mit q abnehmende Größe, mit welcher i umgekehrt proportional ist. Diese Größe spielt also dieselbe Rolle wie das, was bei den Vorversuchen als Widerstand bezeichnet wurde. Wenn man demnach die Größe w als Maß des Widerstandes ansetzt, dann ist k gleich dem reziproken Wert des Widerstandes in dem speziellen Fall, daß $l = 1$ und $q = 1$ ist. k heißt die Leitfähigkeit. OHM hat dann weiter gezeigt, daß die zunächst für einen Leitungsdraht aufgestellte Gleichung auch für den gesamten Schließungskreis eines galvanischen Elements gilt. Ist nämlich, wie die Versuche lehren, i im ganzen Verlauf des Schließungskreises konstant, so ist auch $\frac{V_1 - V_2}{w}$ konstant, d. h. die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten des Schließungskreises ist dem zwischen ihnen befindlichen Widerstand proportional. Denkt man sich die ganze Potentialdifferenz eines Elements an der Klemme vereinigt, und nennt w_i den inneren, w_a den äußeren Widerstand, so kann man den Zusammenhang von V und w graphisch darstellen²⁾ und findet, wenn k die Klemmenspannung bei geschlossenem Element, e die Gesamtspannung darstellt,

$$i = \frac{k}{w_a} = \frac{e}{w_a + w_i}$$

oder

1) Vgl. E. MACH, *Naturl. f. d. ob. Kl.* § 319.

2) Vgl. z. B. BREMER, *Leitfaden* S. 119.

$$i = \frac{e}{w},$$

wenn man mit w den Gesamtwiderstand des Stromkreises bezeichnet. Noch allgemeiner kann man verfahren, indem man für sämtliche einzelnen Teile des Schließungskreises die Gleichungen in der Form aufstellt:

$$\begin{aligned} iw_1 &= V - V_1 \\ iw_2 &= V_1 - V_2 \\ iw_3 &= V_2 - V_3 \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ iw_n &= V_{n-1} - V_n \end{aligned}$$

$$i(w_1 + w_2 + \dots + w_n) = V - V_n$$

$$iw = E$$

$$i = \frac{E}{w}.$$

Die Herleitung dieses ganzen Zusammenhangs ist nicht einfach und muß durch experimentelle Demonstrationen unterstützt werden. Es muß mit Hilfe eines sehr empfindlichen geeichten Elektrometers die Potentialabnahme längs der Leitung gemessen und auch die Klemmenspannung bei offenem und bei geschlossenem Element bestimmt werden.¹⁾ Vollends wäre es unzulässig, den von OHM benutzten Begriff der Stromstärke, der sich auf die strömende Elektrizitätsmenge gründet, an dieser Stelle durch Schulversuche zu veranschaulichen.

2. Man wird daher in der Regel von der theoretischen Herleitung des OHMSchen Gesetzes absehen und sich damit begnügen müssen, daß man das Gesetz einfach mitteilt und dann durch Versuche bestätigt. Bevor man es indessen mitteilen kann, bedarf es zunächst noch einer Untersuchung des Widerstandes mit Hilfe der Substitutionsmethode. Nachdem die Vorversuche die Abnahme der Stromstärke mit zunehmender Länge des Leitungsdrahtes sowie auch die Ersetzbarkeit eines Drahtstückes durch ein anderes gezeigt haben, kann man zur Festlegung des Widerstandsbegriffs von vornherein definieren: Zwei Leiterstücke haben gleichen Widerstand, wenn sie füreinander eingesetzt die Stromstärke des Stromkreises nicht ändern. Da dies auch für zwei und mehr aufeinanderfolgende Leiterstücke gilt, so kann man den Widerstand eines beliebigen Leiterstücks seiner Länge proportional setzen. Die folgenden Versuche werden am besten

1) Vgl. z. B. GRIMSEHL, L. (2) §§ 393, 394. — Eine Herleitung des OHMSchen Gesetzes auf Grund der Jonentheorie ist von J. STARK (1901) gegeben und von KEFERSTEIN (Z. U. XV 178) in elementare Fassung gebracht worden.

mit einem Akkumulator oder einem DANIELL-Element angestellt. Als Stromanzeiger ist irgendein Demonstrationsgalvanometer oder auch ein Differentialgalvanometer (SZYMANSKI, Z. U. V 177) zu benutzen; letzteres gestattet die Gleichheit zweier Widerstände unmittelbar durch einen Versuch unter Benutzung der beiden Leitungszweige zu bestimmen. MÜLLER verwendet sein Wagegalvanometer (T. 261).

Man untersucht nun zunächst den Einfluß des Querschnittes, indem man z. B. einen Manganindraht von 0,45 m Länge und 1 mm Dicke durch einen solchen von 0,5 mm Dicke ersetzt; der Widerstand des dünnen Drahtes ist ebenso groß wie der eines viermal so langen Drahtes von 1 mm Dicke, der Widerstand ist daher viermal so groß geworden. Man kann auch statt dessen beide Drähte mit den äquivalenten Längen eines Rheostatendrahtes vergleichen (MÜLLER, T. 280). Man muß vier solche Drähte von halber Dicke nebeneinander schalten, um die gleiche Stromstärke wie vorher zu erhalten. Hiernach ist der Widerstand dem Querschnitt umgekehrt proportional zu setzen.

Um endlich die Abhängigkeit von dem Material des Drahtes zu untersuchen, vergleiche man mehrere Drähte verschiedenen Materials (etwa Kupfer, Messing, Eisen, Manganin) mit den äquivalenten Längen einer und derselben Drahtsorte (z. B. des Rheostatendrahtes). Eine besonders geeignete Vorrichtung hierzu beschreibt MÜLLER (T. 281). Zu Versuchen mit Kohle sind die dünnsten Kohlenstifte für Bogenlicht (3 mm stark) geeignet. Es ist der bemerkenswerte und überraschende Umstand zu beachten, daß im Gegensatz zu den Ladungserscheinungen bei der statischen Elektrizität hier das Material, also die chemische Beschaffenheit des Leiters von Einfluß ist.

Nunmehr kann die Widerstandseinheit 1Ω durch eine Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° definiert werden; die Begründung für die Wahl dieser Länge folgt nachher beim JOULESchen Gesetz (S. 371). Eine Erläuterung durch eine mit Quecksilber gefüllte Glasröhre ist nicht unzweckmäßig, wenschon eine solche nur annähernd genau herstellbar ist.

Hieran schließt sich die Definition des spezifischen Widerstandes c (O. § 130), wofür die vorhergehenden Versuche als Beispiele herangezogen werden können, und die Aufstellung der Gleichung $w = \frac{cl}{q}$.

Es folgen dann noch Versuche über die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur und über Flüssigkeitswiderstände (MÜLLER, T. 281). An letztere schließt sich die Folgerung, daß der elektrische Strom auch innerhalb des Flüssigkeitselements einen Widerstand erleidet, der zusammen mit dem der äußeren Leitung den Gesamtwiderstand des Stromkreises darstellt.

3. Nachdem die Einheiten für die drei Größen der elektromotorischen Kraft, der Stromstärke und des Widerstandes festgesetzt sind, ist die Formel des OHMSchen Gesetzes für einen geschlossenen Stromkreis verständlich:

$$i = \frac{e}{w},$$

worin unter w der Widerstand des Gesamtstromkreises zu verstehen ist. Auch hier bedeutet wie beim Kraftgesetz $b = k/m$ der Zähler das der dargestellten Größe Förderliche, der Nenner das ihr Hinderliche (vgl. auch S. 271). Es ist zunächst ersichtlich, daß nur für zwei von diesen drei Größen die Einheit willkürlich gewählt werden kann. Sind die Einheiten 1 Volt und 1 Ampère festgesetzt, so folgt daraus die Einheit des Widerstandes, 1 Ohm, als derjenige Widerstand, in dem die Potentialdifferenz 1 Volt die Stromstärke 1 Ampère hervorbringt.

Die Bestätigung dieses Gesetzes kann auf verschiedenem Wege geschehen, wobei die Messung der Stromstärke am bequemsten mit einem Amperemeter erfolgt, da man dabei jeder Umrechnung der Stromstärken enthoben ist, wie sie etwa bei einer Tangentenbussole nötig ist.

a) Man benutze ein Demonstrationselement mit veränderlichem Plattenabstand (Zn und Kohle in einem rechteckigen Glasgefäß mit Chromsäurelösung); verdoppelt man den inneren Widerstand, indem man das Element nur bis zu halber Höhe füllt oder die Platten in den doppelten Abstand bringt, und verdoppelt auch den äußeren Widerstand (unter Berücksichtigung des Amperemeterwiderstandes), so sinkt die Stromstärke auf die Hälfte (STROMAN, Z. U. XX 361).

b) Man benutze einen Akkumulator und bestimme w_i aus zwei Beobachtungen, indem man die Stromstärke erst bei dem Gesamtwiderstand w , dann etwa bei $w + 1$, ermittelt; aus

$$i = \frac{e}{w} \quad \text{und} \quad i_1 = \frac{e}{w+1}$$

folgt leicht

$$\frac{i}{i_1} = \frac{w+1}{w} \quad \text{und} \quad w = \frac{i}{i-i_1} \text{ Ohm.}$$

Ist der äußere Widerstand w_a bekannt, so ist nun auch der innere w_i ermittelt.

Bei verschiedenen Zusatzwiderständen erhält man stets dieselben Werte von w_i und e ; dies beweist die Richtigkeit des Satzes, daß die Stromstärke i dem Gesamtwiderstand w umgekehrt proportional ist. Aus einer der Gleichungen läßt sich auch e (in Volt) berechnen.

c) Man verfähre auf gleiche Weise wie vorher mit einem DANIELL-Element und bestimme $e = 1,1$ Volt. Hat man früher die Spannung des offenen Elements am Elektrometer gemessen, so erkennt man, daß sich die *EMK* des Akkumulators und des Daniell der Theorie gemäß verhalten wie die am Elektrometer gemessenen Potentialdifferenzen. Erforderlichenfalls sind die betreffenden elektrometrischen Versuche hier zu wiederholen, wobei dann gleich die Versuche über den Potentialabfall längs des Leitungsdrahtes angeschlossen werden können.

d) Man schalte zwei Akkumulatoren oder zwei DANIELL-Elemente hintereinander und bestimme wie vorher die *EMK* des Stromkreises. Man findet sie doppelt so groß wie bei einem Element, ebenfalls gemäß den früheren Messungen am Elektroskop. Man schalte auch zwei Elemente nebeneinander und zeige die Unveränderlichkeit der *EMK*.

e) Es folgen nun die bekannten Anwendungen auf Parallelschaltung und Reihenschaltung von Elementen, die indessen heute von geringerer Bedeutung sind. Über den Satz, daß das Maximum der Stromstärke erzielt wird, wenn der innere Widerstand einer Batterie gleich dem äußeren ist, vergleiche man LEICK (Z. U. XXVI 364).

4. Den Übergang zum OHMSchen Gesetz für Leiterstücke bilden zweckmäßig Versuche über den Spannungsabfall längs eines Drahtes, anschließend an die entsprechenden elektrostatischen Versuche (§ 43 Nr. 5) und an die ebenfalls schon früher erwähnten thermischen und hydrodynamischen Analogien. Man verwendet am besten eine Batterie von 4–6 Akkumulatoren, von der man den einen Pol direkt, den andern durch einen längeren Walzenwiderstand zur Erde ableitet. Die elektrische Differenz zwischen dem letzteren Pol und verschiedenen Stellen der eingeschalteten Leitung prüft man am Elektrometer und weist so die graduelle Zunahme der Potentialdifferenz nach. Noch wirksamer wird der Nachweis, wenn man ein längeres Stück (etwa 4 m) dünnen Drahtes, zwischen Fußklemmen gespannt, mit der Starkstromleitung verbindet und die Potentialdifferenz gleich weit voneinander entfernter Punkte an verschiedenen Stellen der Leitung ermittelt. Die Versuche ergeben die Proportionalität der Potentialdifferenz mit dem Widerstande des Leiterstückes, also $e_1/w_1 = e_2/w_2$ usf. Durch korrespondierende Addition findet man für die Gesamtleitung (vgl. auch oben Nr. 1, S. 264):

$$\frac{e_1}{w_1} = \frac{e_2}{w_2} = \dots = \frac{e}{w} = i,$$

womit das OHMSche Gesetz für Leiterstücke erwiesen ist. Die Demonstrationsversuche sind in den praktischen Übungen durch genauere (HAHN, Handbuch 411) zu ersetzen.

5. Im Anschluß an das Ergebnis läßt sich nun der Unterschied zwischen der Spannung an den Polen des offenen Elements und der Klemmenspannung bei geschlossenem Stromkreis verstehen. Den Ausgang bildet am besten wieder der Versuch. Man schließt z. B. ein Chromsäureelement (*EMK* 1,8 V) durch einen 1 m langen und 0,2 mm dicken Eisendraht und findet am Elektrometer $k = 1,5$ Volt, dagegen bei einem Draht von 1 m Länge und 0,4 mm Dicke sinkt k auf 0,6 Volt; bei Kupferdraht von 1 m Länge und 0,2 mm Durchmesser ist der Ausschlag nur eben noch merklich (GRIMSEHL, Lehrb. § 392).

Bezeichnet man die Klemmenspannung mit k , so folgt aus dem OHMSchen Gesetz für Leiterstücke

$$i = \frac{k}{w_a} = \frac{e}{w_i + w_a}.$$

Schaltet man an die Klemmen noch einen zweiten Leitungskreis mit sehr großem Widerstand an, so wird dadurch, wie das Elektrometer zeigt, die Klemmenspannung nicht merklich geändert; man kann daher die Klemmenspannung auch messen, indem man ein Galvanometer mit großem Widerstande anschließt, das nach Volt geeicht ist (Voltmeter). Es schließt sich ein Versuch an über die Messung der Klemmenspannung mit dem Voltmeter. Auch läßt sich das Voltmeter zum Nachweis des Potentialabfalls auf einem Leitungsdraht benutzen, wobei als Stromquelle eine Akkumulatorenbatterie oder die Starkstromleitung dienen kann. (Diese Versuche eignen sich gut für Schülerübungen, bei denen dann 1 Element als Stromquelle genügt.)

6. Es folgen nun die Gesetze der Stromverzweigung und als Anwendung die Eichung des Galvanometers (MÜLLER, T. 284) sowie das Gesetz der WHEATSTONESchen Brücke, das sich auf sehr einfache Weise aus dem Gesetz des Potentialabfalls längs einer Leitung ergibt (O. § 132, 4). Ein anschaulicher Versuch zur Demonstration der Gesetze der Stromverzweigung ist O. § 132, 2 angegeben. —

Über Messung der Entladungsströme von Elektrisiermaschinen und Leydener Flaschen vergleiche man MÜLLER, T. 284. Eine Influenzmaschine von 30 cm Scheibendurchmesser liefert einen Strom von $\frac{1}{25000}$ Ampère.

Hierher gehört endlich auch die Vergleichung der elektrostatischen mit der elektromagnetischen Stromeinheit, die von W. WEBER und R. KOHLRAUSCH (1856) durch galvanometrische Vergleichung des Entladungs-

stroms einer Leydener Flasche mit einem galvanischen Strom ausgeführt worden ist. Die Beziehung

$$1 \text{ elektromagn. SE.} = 3 \cdot 10^{10} \text{ elektrostatische SE.}$$

oder

$$1 \text{ Ampère-Sekunde} = 3 \cdot 10^9 \text{ elektrost. SE. pro Sek.} = 1 \text{ Coulomb}$$

ist für den folgenden Abschnitt wichtig. Eine schulmäßige Nachprüfung ist nicht gut möglich, wohl aber empfiehlt sich der Nachweis, daß auch durch den Entladungsstrom einer Leydener Flasche (dem durch eine feuchte Schnur der Schwingungscharakter genommen ist) oder durch eine kleine Elektrisiermaschine ein Galvanometerausschlag hervorgehoben wird.

§ 46. Wärmewirkungen des Stroms; Stromenergie.

Die Beobachtung, daß besonders dünnere Drähte durch den Strom erwärmt werden, legt die Frage nahe, nach welchem Gesetz diese Erwärmung von den im OHMSchen Gesetz auftretenden Größen abhängt. Besonders die Abhängigkeit von der Stromstärke ist schon früh Gegenstand der Forschung gewesen. OHM und FECHNER, ebenso auch nach ihnen noch VORSELNANN DE HEER hatten gemeint, daß die erzeugte Wärme einfach proportional der Stromstärke sei; JOULE wies (1841) durch Versuche die Proportionalität mit dem Quadrat der Stromstärke nach. Diese Proportionalität mit dem Quadrat der Stromstärke ist auf den ersten Blick außerordentlich überraschend und fordert zu einer Untersuchung über den Grund dieses Zusammenhangs auf.

Die methodische Behandlung gestaltet sich daher hier umgekehrt wie beim OHMSchen Gesetz. Wir gehen von dem empirisch gefundenen Gesetz der Stromwärme aus und suchen dies Gesetz dann theoretisch zu begründen. Dabei ergeben sich weitere Erkenntnisse in bezug auf die Stromenergie.

1. Messung der Stromwärme. JOULE hat das Gesetz durch quantitative Versuche am Kalorimeter nachgewiesen. Diese sollten auch für die unterrichtliche Behandlung den Ausgangspunkt bilden. Versuche am FOSTERSchen Apparat oder mit dem LOOSERSchen Doppelthermoskop¹⁾ bilden nur einen mangelhaften Ersatz für die direkte Messung, die man nacheinander mit einfacher und doppelter Stromstärke ausführt.²⁾ Auch ein Versuch mit ver-

1) Eine experimentelle Ableitung gibt auch GRIMSEHL, Z. U. XV 347.

2) Wo praktische Schülerübungen bestehen, werden die Messungen am zweckmäßigsten in diese verlegt.

doppeltem Widerstand bei gleicher Stromstärke ist anzustellen. (Genaueres bei MÜLLER, T. 301, und O. § 133.) Als Leitungsdraht benutzt man am besten Manganin oder Konstantan, da bei diesen die Erwärmung keine merkliche Änderung des Widerstandes nach sich zieht.

2. Die theoretische Erörterung muß an den früher entwickelten Arbeitsbegriff des Potentials anknüpfen. Besteht zwischen den Enden eines Drahts die Potentialdifferenz $P_1 - P_2 = E$ elektrostatische Potentialeinheiten, so würden E Arbeitseinheiten notwendig sein, um die Einheit der Elektrizitätsmenge (in elektrostatischem Maß) von dem niederen Potential P_2 auf das höhere P_1 zu bringen. Umgekehrt können E Arbeitseinheiten geleistet werden, wenn die Einheit der Elektrizitätsmenge vom höheren Potential P_1 nach dem tieferen P_2 fließt. Für eine Elektrizitätsmenge von m elektrostatischen Einheiten ist die Arbeit $A = mE$ Erg. Die Analogie mit dem strömenden Wasser ist hier zur Erläuterung des Zusammenhangs sehr nützlich.

Nun ist die 1 Ampère entsprechende Anzahl von elektrostatischen Elektrizitätseinheiten nach den Messungen von WEBER und KOHLRAUSCH $= 3 \cdot 10^9$ pro Sekunde, daher die Arbeitsleistung bei der Potentialdifferenz 1 ($= PE$)

$$A_1 = 3 \cdot 10^9 \text{ Erg.}$$

Aus Zweckmäßigkeitsgründen¹⁾ hat man als größere Arbeitseinheit 1 Joule $= 10^7$ Erg eingeführt, mithin wird

$$A_1 = 300 \text{ Joule.}$$

Damit ein Strom von 1 Ampère die Arbeit 1 Joule leistet, müßte die Potentialdifferenz $\frac{1}{300} PE$ betragen, diese Größe hat man 1 Volt genannt. 1 Volt ist also die Potentialdifferenz, die an den Enden eines Drahtes bestehen muß, wenn ein Strom von 1 Ampère darin während 1 Sekunde die Arbeit von 1 Joule oder die dieser entsprechende Wärmemenge hervorbringt.

Mißt man die Potentialdifferenz e in Volt, die Stromstärke i in Ampère, so erhält man demnach für die Arbeit

$$A = e \text{ Volt} \times i \text{ Ampère} = e i \text{ Joule.}$$

Da ferner nach dem OHMSCHEN Gesetz $e = i/w$, so wird

$$A = i^2 w \text{ Joule.}$$

1) Bei der Wahl dieser Arbeitseinheit wird die Einheit der Potentialdifferenz annähernd von gleicher Größe wie die an konstanten Elementen leicht herstellbare elektromotorische Kraft, und andererseits auch die nach dem OHMSCHEN Gesetz davon abhängige Einheit des Widerstands fast genau so groß wie die zuvor gebräuchliche SIEMENS-Einheit. Vgl. auch O. § 133 und oben S. 266.

Da dem mechanischen Wärmeäquivalent zufolge 1 Joule = 0,24 Grammkalorien entspricht, so kann man das Gesetz auch für die Wärmemenge Q in der Form schreiben

$$Q = 0,24 i^2 w \text{ Grammkalorien,}$$

und endlich bei einer Stromdauer von t Sekunden

$$Q = 0,24 i^2 w t \text{ Grammkalorien.}$$

Man berechnet nun den Wert von Q für die oben angestellten Versuche und findet eine befriedigende Übereinstimmung mit dem Ergebnis der kalorimetrischen Messung. Man sieht sofort, einen wieviel höheren Wert eine solche quantitative Bestimmung hat als alle bloßen Proportionalitätsnachweise.

3. Nachdem so der Begriff der vom Strom erzeugten Energie klargelegt ist, kann auch das Maß für die Leistung, d. h. für die pro Sekunde erzeugte Energie aufgestellt werden. Es ist pro Sekunde

$$\begin{aligned} 1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampère} &= 1 \text{ Joule pro Sekunde} \\ &= 1 \text{ Voltampère oder 1 Watt,} \end{aligned}$$

ferner ist

$$1000 \text{ Watt} = 1 \text{ Kilowatt.}$$

Erzeugt 1 Strom während 1 Stunde eine sekundliche Leistung von 1 Kilowatt, so ist der Gesamtbetrag der hervorgebrachten Arbeit

$$\begin{aligned} A = 1 \text{ Kilowattstunde} &= 1000 \text{ Joule} \times 3600 \\ &= 36 \cdot 10^5 \text{ Joule} \sim 3,6 \cdot 10^5 \text{ kgm.} \end{aligned}$$

Wir betrachten jedoch in diesem Abschnitt nur die Verwandlung der Stromenergie in Wärme; die Verwandlung in mechanische Arbeit wird später (§ 48) besprochen.

4. Unter den Anwendungen der Stromwärme verdienen die Glühlampen eine eingehendere Behandlung.¹⁾ Durch Messung am Ampèremeter und Voltmeter ist der Energieverbrauch der verschiedenen Formen leicht festzustellen. Die Unterschiede von Parallelschaltung und Nacheinanderschaltung sind leicht verständlich zu machen, wie auch die Tatsache, daß bei Parallelschaltung die aus dem Starkstromnetz herausgenommene Energie proportional der Zahl der Lampen wächst. Zu mannigfachen lehrreichen Exkursen geben auch die Metallfadlampen und die NERNSTlampe Anlaß. Über eine „Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents mit Hilfe der Glühlampe“ vgl. GRIMSEHL, Z. U. XVI 210.

5. Auch das Bogenlicht ist nicht bloß vom technischen Standpunkt aus interessant. Versuche mit Metallstäben zeigen einen Flam-

1) Empfohlen sei besonders die Abhandlung von GRIMSEHL, Die elektrische Glühlampe im Dienste des physikalischen Unterrichts.

menbogen, der aus glühenden Metalldämpfen besteht. Wegen des großen Energieverbrauchs ist die Spannung zwischen den Enden des Lichtbogens erheblich größer als zwischen den Enden einer gleichlangen metallischen Leitung, sie beträgt 30–50 Volt. Bei Parallelschaltung nach Art der Glühlampen würde durch einen Vorschaltwiderstand etwa bei 220 Volt Netzspannung ein großer Teil der Stromenergie nutzlos verbraucht werden; man schaltet daher zweckmäßig mehrere Bogenlampen nacheinander. Das schwierige Problem, diese hierbei zu gleichmäßigem Brennen zu bringen, ist von der Technik glänzend gelöst. Überhaupt sind die Reguliervorrichtungen der Bogenlampen bewundernswerte Muster von technisch fein durchgearbeiteten Erfindungen.

6. Das umgekehrte Problem der Verwandlung von Wärme in Stromenergie fordert zu Demonstrationsversuchen über thermoelektrische Ströme und den PELTIER-Effekt auf, deren nähere theoretische Erörterung aber wohl außerhalb der Grenzen des Schulunterrichts liegt. Gewisse Formen von Thermosäulen (GÜLCHER) haben hier und da zum Aufladen von Akkumulatoren Verwendung gefunden.

§ 47. Chemische Wirkungen des Stroms.

Quelle der Stromenergie galvanischer Elemente.

Nach dem Bisherigen erscheint der Strom als ein Vorgang, durch den Energie von einer Stelle einer Leitung nach einer anderen übertragen wird. Das Hauptproblem, um das es sich nunmehr handelt, ist der Ursprung der elektrischen Energie in den galvanischen Elementen. Um diesem Problem näherzukommen, studieren wir zunächst die chemischen Wirkungen des Stroms. Dabei führen die FARADAYSchen Gesetze für die ausgeschiedenen Stoffmengen zu einer Theorie der Leitung des Stroms in Elektrolyten, die galvanische Polarisierung leitet zum Verständnis der konstanten Elemente, endlich wird der chemische Prozeß in den Elementen als Quelle der Stromenergie erkannt. Die eingehendere Behandlung dieses Abschnitts gestaltet sich für den Physikunterricht dadurch besonders schwierig, daß einesteils nicht unbedeutende Kenntnisse aus der Chemie vorausgesetzt werden, andernteils aber – und dies ist die Hauptsache – die modernen Theorien der Stromentstehung dem elementaren Verständnis nicht leicht zugänglich zu machen sind.¹⁾ Es wird für dieses Gebiet eine Grenzausinandersetzung mit dem chemischen Unterricht

1) Für die hier erforderliche Grundlegung vergleiche man besonders das ausgezeichnete kleine Werk von LÜPKE, Grundzüge der Elektrochemie auf experimenteller Basis (5. Aufl. Berlin 1907).

stutzufinden haben, dem ein gut Teil der spezielleren Theorie, namentlich die Lehren vom osmotischen Druck und der Lösungstension, zu überlassen sein dürfte.

1. Man wird mit den einfachsten Erscheinungen der Elektrolyse beginnen, zunächst mit solchen, bei denen sich keine sekundären Prozesse abspielen. Besonders geeignet hierfür sind¹⁾ geschmolzenes Bleichlorid, eine konzentrierte ($\frac{60}{100}$) Lösung von Zinkchlorid oder ($\frac{10}{100}$) Zinnchlorid in Wasser, die eine schöne dendritische Ausscheidung des Metalls an der Kathode zeigen, oder endlich eine konzentrierte Lösung von Salzsäure. Als Ionen (Anion und Kation) hier nach älterer (FARADAYScher) Benennung unmittelbar die an den Elektroden ausgeschiedenen Stoffe zu bezeichnen, wird man besser vermeiden.

2. Als Übergang zu den elektrolytischen Zersetzungen, bei denen sekundäre Prozesse auftreten, kann die Zersetzung von Kupfersulfatlösung zwischen Kupferelektroden (oder auch Platin als Kathode, Kupfer als Anode) dienen. Die Ausscheidung von Cu an der Kathode und Auflösung von Cu an der Anode lassen sich deuten aus der Zerlegung von CuSO_4 in Cu und SO_4 , von denen SO_4 die Auflösung des Cu bewirkt. Die Begriffe von Anion und Kation sind nunmehr in dem Sinn einzuführen, daß sie nicht die an den Elektroden ausgeschiedenen Stoffe, sondern die Bestandteile bezeichnen, in die der Elektrolyt beim Durchgang des Stroms zerfällt. Weitere in bekannter Weise zu behandelnde Substanzen sind dann: Lösung von CuSO_4 , die alkalischen Laugen, verdünnte H_2SO_4 , Lösung von Glaubersalz, jedesmal zwischen Platinelektroden.

Aus der Gesamtheit der bisher untersuchten Vorgänge ergibt sich, daß das Metall sich stets an der Kathode ausscheidet, also mit dem Strom wandert.

3. Ehe auf den Vorgang im Elektrolyten näher eingegangen wird, sind die wichtigen FARADAYSchen Gesetze zu behandeln, zunächst Gesetz I anknüpfend an die Frage: *Wie hängt die zersetzte Menge des Elektrolyten mit der Stromstärke zusammen?* Zum Nachweis der (keineswegs selbstverständlichen) Proportionalität von Stromstärke und Menge der zersetzten (oder auch ausgeschiedenen) Substanz ist an erster Stelle das Knallgasvoltmeter geeignet. Eine zuverlässige Form hat MÜLLER (Z. U. XIV 140

1) LÜPKE a. a. O., GRIMSEHL L. (2) § 416, MÜLLER T. 287.

und T. 288) beschrieben.¹⁾ Einen Demonstrationsversuch, bei dem die Stromstärke durch Einschalten parallel geschalteter Glühlampen verzweifacht und verdreifacht wird, hat BOHN angegeben.²⁾ Neben dem Knallgasvoltmeter ist mindestens noch ein Gewichtsvoltmeter (Kupfervoltmeter) heranzuziehen, doch eignen sich die Messungen damit mehr für das Schülerpraktikum.³⁾

An den Nachweis der Proportionalität schließt sich die Möglichkeit, die Stromstärke in elektrochemischem Maß zu bestimmen. Es ist für das Folgende in methodischer Hinsicht wichtig, daß das elektrolytische Äquivalent für die Einheit der Stromstärke für mehrere Substanzen, etwa H, Cu, Ag, Zn, angegeben wird (vgl. O. § 136, 4). Grundlegend ist die auch im folgenden mehrfach benutzte Zahl für Wasserstoff; die durch 1 Ampère in 1 Sekunde entwickelte Menge beträgt $1036 \cdot 10^{-8}$ Gramm.

Eine Stromstärkemessung auf elektrochemischem Wege kann mit der Bestimmung des Reduktionsfaktors der Tangentenbussole verbunden werden (ROSENBERG II 329).

4. Der Vergleich der elektrochemischen Maßzahlen der Stromstärke für verschiedene Elemente führt zu dem II. FARADAYSchen Gesetz. Die Bestätigung kann, wie MÜLLER (T. 290) betont, im allgemeinen nur nach den Methoden der quantitativen Analyse im Laboratorium geschehen. Hier ist eine Stelle, wo man sich mit der Mitteilung der genauen Zahlen, die die strenge Forschung ergeben hat, begnügen darf. Die bekannte Demonstration mit drei HOFMANNschen Zersetzungsapparaten ist ganz unzuverlässig, die quantitative Vergleichung, auch nur von Knallgasvoltmeter und Kupfervoltmeter, im Unterricht wohl meist zu zeitraubend.⁴⁾

Aus den erwähnten Maßzahlen dagegen ergibt sich sofort das Gesetz, daß bei gleicher Stromstärke und in gleicher Zeit die Mengen der aus verschiedenen Elektrolyten ausgeschiedenen Bestandteile den chemischen Äquivalentzahlen proportional sind.

1) Andere Formen von B. KOLBE, Z. U. X 75, XIV 77; GRIMSEHL XVIII 283; REBENSTORFF, XXI 181. — NOACK, Aufg. Nr. 126; W. ROTH, vgl. HAHNS Handbuch, X, Aufg. 12.

2) H. BOHN, Leitfaden der Physik, Oberstufe § 197; vgl. auch GRIMSEHL, L. (2) § 417.

3) MÜLLER, T. 290; HAHN, Handbuch, X, Aufg. 9.

4) Eine Demonstrationsvorrichtung mit vorher eingestellten Hebelwagen für die Ausscheidung von Schwermetallen wie Ag, Cu, Bi, Sn wird von Gebr. RUHSTRAT in Göttingen in den Handel gebracht. Man vgl. auch W. KAUFMANN in Müller-Pfaundler (10) V 482.

HELMHOLTZ gibt dem Gesetz die Fassung: „Die selbe Menge Elektrizität macht, wenn sie durch irgendeinen Elektrolyten fließt, immer die selbe Menge von Valenzwerten an beiden Elektroden frei oder führt sie in andere Verbindungen über.“¹⁾ Ist die durch 1 Ampère in 1 Sek. entwickelte Menge Wasserstoff $1036 \cdot 10^{-8}$ g, so ist die entsprechende Menge eines beliebigen anderen Elements

$$\epsilon = 1036 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\text{Atomgewicht}}{\text{Wertigkeit}} \quad \text{oder} \quad = 1036 \cdot 10^{-8} \times \text{Valenz.}$$

Die weitere Darstellung wird dann auf Grund des im folgenden skizzierten Sachverhalts stattfinden müssen, und es wird von den besonderen Umständen abhängen, wie weit hier auf Einzelheiten eingegangen werden kann.

5. Der Vergleich der bei 1 Ampère Stromstärke in der Sekunde ausgeschiedenen Ionenmenge mit der 1 Ampère entsprechenden Elektrizitätsmenge führt zur FARADAYSchen Zahl, die ebenfalls noch als ein Ausdruck tatsächlicher Verhältnisse angesehen werden muß. Da 1 Ampère pro Sekunde 0,00001036 g Wasserstoff entwickelt, so muß bei Ausscheidung von 1 g Wasserstoff oder der äquivalenten Menge eines anderen Stoffes (des „Grammäquivalents“) stets die gleiche Elektrizitätsmenge von ~ 96540 Coulomb durch den Elektrolyten hindurchgehen. HELMHOLTZ hat eine Erklärung dieses merkwürdigen Verhaltens gegeben durch die Hypothese des elektrischen Elementarquantums. Er nahm an, daß ebenso wie die Materie in Atome, so auch die Elektrizität in kleinste, nicht weiter zerlegbare Teile zerfällt, von denen je 1, 2 oder 3 sich mit einem Atom verbinden können, je nachdem das Atom 1-, 2- oder 3wertig ist.

Für dieses Elementarquantum hat STONEY (1881) den Namen Elektron vorgeschlagen.

Nun enthält 1 Gramm Wasserstoff nach gewissen Schätzungen der neueren Physik $6,2 \cdot 10^{23}$ Atome. Demnach würde der Ausscheidung eines Wasserstoffatoms der Übergang einer Ladung von $\frac{96540}{6,2 \cdot 10^{23}}$ Coulomb oder $1,56 \cdot 10^{-19}$ Coulomb entsprechen. Die einfachste Vorstellung, die man sich von dem Vorgang der elektrolytischen Leitung machen kann, wäre hiernach die, daß diese kleine negative Elektrizitätsmenge (das elektrische Elementarquantum) direkt durch das Atom eines Kations von der Anode nach der Kathode transportiert würde.

So einfach, wie eben angenommen, liegt der Vorgang aber nicht. Wenn Kupfersulfatlösung zwischen Kupferelektroden elektrolysiert wird, müßte danach ein beständiger Transport von Kupferatomen von der Anode zur Kathode stattfinden. Statt dessen beobachtet man, daß die

1) HELMHOLTZ, Vorträge und Reden, II 266.

Lösung an der Anode immer konzentrierter, die an der Kathode immer verdünnter wird, bis sie fast nur reines H_2SO_4 enthält.¹⁾ Nach einer schon von GROTHUSS (1805) aufgestellten, von FARADAY weiter ausgebildeten Hypothese gibt ein der Anode zunächst liegendes Molekül (z. B. $CuSO_4$) sein Anion (SO_4) an die Anode ab, während das Kation (Cu) sich mit dem Anion des benachbarten Moleküls verbindet usw. HITTORF (1853–1859) stellte fest, daß die beiden Ionen sich mit verschiedener Geschwindigkeit durch die Flüssigkeit bewegen und erklärte daraus die Konzentrationsunterschiede an den beiden Elektroden.

F. KOHLRAUSCH hat dann nachgewiesen, daß in sehr verdünnten Lösungen die Beweglichkeit eines Ions „eine ihm eigentümliche Größe ist, unabhängig von der Natur des mit ihm verbundenen anderen Ions“. Ferner war gefunden worden, daß die elektrolytische Leitung schon bei den kleinsten Potentialdifferenzen auftritt, das also „der freien Bewegung der positiv und negativ geladenen Ionen keine chemischen Kräfte entgegenstehen können“ (v. HELMHOLTZ). Damit war der Boden vorbereitet für die neue Dissoziationshypothese von ARRHENIUS, wonach von einem in wässriger Lösung befindlichen Salz bereits vor dem Durchgang des Stroms ein bestimmter Bruchteil der Moleküle in elektrisch geladene Ionen gespalten ist. Diese Hypothese ist nicht zur Erklärung der elektrolytischen Erscheinungen ersonnen, sondern auf einem anderen Gebiete, dem der Lösungen, zuerst aufgestellt und erprobt worden. Die Dissoziation der Elektrolyten schafft nach dieser Hypothese erst die Möglichkeit für den Stromdurchgang.

6. Die Anwendung der elektrolytischen Dissoziationshypothese auf die Erklärung der galvanischen Elemente liegt schon jenseits der Grenze dessen, was noch im Schulunterricht zur Sprache kommen kann. Gerade auf diesem Felde liegen bewundernswerte Leistungen der neueren Elektrochemie vor. Unter Umständen kann der chemische Unterricht hier ergänzend eintreten. Nur Andeutungen wird man geben können über die Rolle des osmotischen Drucks der Ionen (VAN'T HOFF) und über die Lösungstension der Metalle (NERNST). Die Entstehung der Potentialdifferenz beim DANIELL-Element ist in ganz populärer Form etwa so zu erklären: An der Zinkplatte ist die Lösungstension des Zinks größer als der Druck der in Lösung befindlichen Zinkionen; infolgedessen lösen sich Zinkatome als Kationen (Zn^+) auf und die Zinkplatte wird – geladen. An der Kupferplatte ist die Lösungstension des Cu kleiner als der Druck der Kupferionen; infolgedessen scheiden sich die Kupferkationen (Cu^+) aus und laden die Kupferplatte positiv. Der Ursprung der Potentialdifferenz der galvanischen Kette ist also an den Berührungsstellen von Metall und Elektrolyt zu suchen.

1) Versuch von HITTORF; vgl. LÖPKE, S. 52.

Ähnlich ist der Vorgang im VOLTA-Element, wo die sich ausscheidenden H -Ionen (H^+) das Kupfer positiv laden. Im offenen Element kann der Vorgang nicht andauern, weil die Ladung des Kupfers der weiteren Ausscheidung von H entgegenwirkt. Sorgt man durch Verbindung der Elektroden für Ausgleich der Ladungen, so kann die Ausscheidung weitergehen. Äußerst lehrreich ist hierzu der Versuch mit einem zunächst offenen VOLTA-Element, das erst im Moment des Stromschlusses lebhaft Gasentwicklung an der Kupferplatte zeigt (MÜLLER, T. 293).

7. Eine schon von der Unterstufe her den Schülern geläufige Frage, die nach der Inkonstanz der VOLTASchen Kette und nach dem Grund der Konstanz der neueren Ketten, findet seine Aufklärung durch die bekannten Versuche über den Polarisationsstrom, bei denen sich der Gebrauch des Morsetasters empfiehlt, dessen Ruhekontakt den Ladestrom, dessen Arbeitskontakt den Entladestrom eines Voltameters schließt (MÜLLER T. 293). Für das Verständnis nützlich ist auch der Nachweis, daß eine mit Wasserstoff beladene Platte sich einer unbeladenen Platte aus gleichem Stoff gegenüber stets elektronegativer erweist (MÜLLER ebd.). Die Erklärung der konstanten Elemente und insbesondere der Akkumulatoren ist bekannt (Versuche bei MÜLLER a. a. O, ROSENBERG II 323 und O. § 137).

8. Den Abschluß bildet der Nachweis, daß die Quelle der Stromenergie bei galvanischen Elementen in den chemischen Umsetzungen innerhalb des Elements liegt, denn die Auflösung des Zinks ist erfahrungsgemäß mit Wärmeentwicklung verknüpft, und es findet, wenn die Bedingungen für das Zustandekommen eines galvanischen Stromes erfüllt sind, eine Umwandlung der beim chemischen Prozeß auftretenden Wärme in Stromenergie statt. Eine genaue auf dieser Grundlage angeestellte Berechnung ist in O. § 137, 5 gegeben.

§ 48. Das magnetische Kraftfeld.

Wechselwirkung zwischen Magneten und Stromleitern.

Die Wirkungen von Strömen auf Magnete sind schon an einer früheren Stelle (in § 44) zur Begründung der elektromagnetischen Stromeinheit herangezogen worden. Es könnte angemessen scheinen, die hier noch folgenden Betrachtungen schon dort einzuschalten, um den Gegenstand bereits da, wo er zum erstenmal auftritt, ganz zu erledigen und ihn von vornherein unter den Gesichtspunkt des magnetischen Kraftfeldes zu stellen. Ich gebe der hier getroffenen Anordnung den Vorzug aus zwei Gründen; einmal, weil es mir wichtig scheint, daß die Schüler den Übergang von der (an jener Stelle benutzten) Fernwirkungstheorie

zur Theorie der Kraftlinien im Verlauf des Unterrichts selbst erleben, und dann auch, weil eine eingehendere Behandlung der Kraftlinien die notwendige Vorbedingung für das Verständnis der Induktionswirkungen ist, die aus manchen Gründen an den Schluß des ganzen Gebiets gehören.

Die FARADAYSche Hypothese, daß die Kraftlinien selbst so real wie gespannte Fäden sind, daß sie sich zu verkürzen streben, und sich je nach ihrer Richtung anziehen oder abstoßen, geht schon über die hier zu benutzenden Festsetzungen hinaus. Es ist strittig, wie weit darauf im Unterricht eingegangen werden kann.¹⁾ Im Interesse einer klaren Scheidung der Begriffe ist aber zu fordern, daß solche völlig hypothetischen Vorstellungen nicht von vornherein in die Behandlung der Kraftlinien aufgenommen werden, daß man diese vielmehr fürs erste als ein rein mathematisches Mittel zur exakten, quantitativen Darstellung der Erscheinungen einführt.

1. Bezüglich des magnetischen Kraftfeldes ist an die auf der Unterstufe gezeigten Versuche anzuknüpfen. Die Wirkung eines Stabmagneten auf eine in seiner Nähe befindliche Magnetnadel läßt sich so auffassen, als ob schon vor der Heranbringung der Magnetnadel die ganze Umgebung des Magnetstabes sich in einem eigentümlichen Zustande befände, den man als eine Art Spannungszustand bezeichnen kann. Eine quantitative Bestimmung dieses Zustandes kann dadurch geschehen, daß man für jede Stelle des Feldes die daselbst auf einen magnetischen Einheitspol ausgeübte Kraft ermittelt. Diese Kraft stellt die Feldstärke \mathfrak{H} an dieser Stelle dar. Ferner dient zur näheren Beschreibung des Feldes die Kraftlinie, d. h. „die Linie“²⁾, die eine sehr kleine Magnetnadel beschreibt, wenn sie in ihrer Längsrichtung so fortgeführt wird, daß sie beständig die Tangente zur Bahn der Bewegung bildet“; oder noch bestimmter, längs der sich ein magnetischer Pol im magnetischen Felde bewegen würde, wenn er ohne Beharrungsvermögen an jeder Stelle der Richtung der dort herrschenden magnetischen Kraft folgte. Rein konventionell ist die Richtung der Kraftlinien als vom Nordpol zum Südpol hingehend festgesetzt, also als die Richtung, in der sich der magnetische

1) Man vgl. SCHÜLKE, Z. U IV 41 und von Lehrbüchern u. a. BREMER, Abschnitt C VI.

2) Nach FARADAY, Exp. Res. art. 3071.

Nordpol etwa einer lotrecht schwimmenden frei beweglichen Stricknadel bewegen würde.

Schon hier ist hinzuzufügen, daß die Kraftlinien durch das Innere des Magneten fortgesetzt, also geschlossen vorgestellt werden können. Ihre Ein- und Austrittsstellen liegen teils an den Endflächen, teils an den Seitenflächen eines Stabmagneten, wie die Eisenfeilkurven erkennen lassen. Da eine Magnetnadel auch in Abwesenheit jedes anderen Magneten eine Richtkraft durch den Erdmagnetismus erfährt, so muß man auch der Erde ein magnetisches Feld zuschreiben, dessen Kraftlinien in der magnetischen Meridianebene und in der Richtung der Inklination verlaufen (Begriff des homogenen Kraftfeldes).

In betreff der Eisenfeilkurven kann übrigens schon hier nicht scharf genug betont werden, daß diese wohl den Verlauf der Kraftlinien angeben, auf die Stärke des Feldes oder gar auf die „Zahl der Kraftlinien“ keinen sicheren Schluß gestatten. Daß auch hier Versuche anzustellen sind, ist selbstverständlich (vgl. ROSENBERG II 231 ff.). Daß bloßes Vorzeigen fertiger Kraftlinienbilder nicht genügt, betont namentlich MÜLLER; „das Fesselnde liegt hier, wie überall, in dem sichtbaren Entstehungsvorgang“.

2. Die vorstehenden Festsetzungen genügen fürs erste (weitere S. 383). Es drängt sich aber sofort, angesichts der Wirkung von Stromleitern auf Magnetnadeln, die Frage auf, ob auch Stromleiter ein magnetisches Feld haben. Hierfür sind schöne Versuche vorhanden, die namentlich bei Verwendung von Starkstrom zu voller Geltung kommen. Zu zeigen ist die Anordnung von Eisenfeile längs eines geradlinigen Leiters, wozu als drastische Ergänzung die Rotation einer vertikal aufgehängten Stricknadel um einen Stromleiter tritt (GRIMSEHL, Abh. II 2, S. 6 und Lehrbuch₂, § 427). Der Sinn der Rotation und damit die Richtung der Kraftlinien ergibt sich aus der Rechtehandregel.

Daß in der Tat die Kraft nur in einer zum Stromleiter senkrechten Richtung wirkt, kann durch eine Reihe besonderer Versuche (GRIMSEHL a. a. O.) nachgewiesen werden. Auch das magnetische Feld eines kreisförmigen Leiters kann durch Versuche mit Eisenfeile demonstriert werden, sowohl in der Ebene des Leiters als in der durch den Mittelpunkt gelegten Normalebene. Eine besondere „Rechte-Faust-Regel“ in diesem wie in dem vorigen Fall einzuprägen, dürfte überflüssig sein, es genügt, daß, wenn man in der Richtung des Stromes blickt, die Kraftlinien im Sinn des Uhrzeigers

gerichtet sind, also ein magnetischer Nordpol in eben diesem Sinn sich bewegt. Für die Wirkung eines Kreisstroms von n Windungen auf einen im Mittelpunkt befindlichen Einheitspol ist schon früher (S. 361) der Wert gefunden worden, der nunmehr die Feldstärke in diesem Punkt bezeichnet, nämlich

$$\mathfrak{H} = \frac{n\pi i}{5r},$$

was z. B. bei 100 Windungen und 5 Ampère Stromstärke für einen Kreis von 31,4 cm Radius den Wert von 10 magnetischen Einheiten gibt (GRIMSEHL). Inwieweit im übrigen das Feld innerhalb eines solchen Ringes als homogen angesehen werden kann, ist Gegenstand einer Kontroverse in der Zeitschrift für den physikalischen Unterricht gewesen.¹⁾

Aus den Kraftlinien eines Kreisstromes ist noch zu ersehen, daß ein solcher wie eine magnetische Scheibe wirkt, die an der Seite, von der aus gesehen der Strom „im Zeigersinn“ fließt, einen Südpol, an der entgegengesetzten Seite einen Nordpol hat. Die Einstellung solcher kreisförmiger Leiter senkrecht zum magnetischen Meridian läßt sich sehr schön mit einem von ROSENBERG (II 346) angegebenen Apparat, einem über einer Quecksilberdoppelrinne aufgehängten kreisförmigen Leiter, zeigen.

Hiernach ist auch die magnetische Wirkung eines Solenoidstroms, der aus einer Reihe von Kreisströmen bestehend gedacht werden kann, also auch einer Stromspule bestimmt. (AMPÈRES Theorie des Magnetismus, O. § 138, 3.)

3. Da stromdurchflossene Leiter sich wie Magnete verhalten, so liegt die weitere Vermutung nahe, daß nicht nur Stromleiter auf Magnete, sondern auch Magnete auf Stromleiter Wirkungen ausüben. Dies wäre nichts anderes als die dem Gesetz von Aktion und Reaktion entsprechende Umkehrung der Wirkung von Stromleitern auf Magnete.

Der typische Versuch hierfür ist der von EBERT angegebene (ROSENBERG II 358; O. § 140, 1), der die Bewegung eines geradlinigen Leiterstücks zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten demonstriert.²⁾ Noch einfacher ist die Demonstration am AMPÈRESchen Gestell (MÖLLER, T. 257). Für die Bewegung des Leiters

1) MÖLLER, Z. U. XX 374 und XXIV 226; GRIMSEHL XX 376; vgl. auch BAHRDT, S. H. II, 4.

2) Ein ähnlicher Versuch mit einem Blattgoldstreifen zwischen Magnetpolen ist schon in EISENLOHRS Lehrbuch (9) 1863 § 515 beschrieben.

im magnetischen Felde ist die FLEMINGSche Dreifingerregel für die linke Hand (B. K. S.-Regel) recht bequem, die aus der Rechtenhand-Regel für die Wirkung von Stromleitern auf Magnete unmittelbar gemäß der Relativität der Bewegung folgt.

Die Besprechung des Drehspulengalvanometers wird sich unmittelbar hier anschließen. Versuche zur Erläuterung des Prinzips dieses wichtigen Instruments bei ROSENBERG I 269 und MÜLLER, T. 257. Über die Theorie des Instruments vgl. GRIMSEHL, Lehrb. § 446. Man könnte an dieser Stelle auch schon die Betrachtung der dauernden Drehung eines Leiters im magnetischen Felde, also die Bewegung der Elektromotoren anschließen. So GRIMSEHL, L. § 448 ff. Doch sind diese wegen der Rolle, die der Eisenanker spielt, und wegen der gleichzeitig auftretenden Induktionswirkungen besser einem späteren Abschnitt vorzubehalten.

4. Da sich Stromleiter wie Magnete verhalten, so war zu erwarten, daß Stromleiter auch aufeinander anziehende und abstoßende Wirkungen ausüben.¹⁾ Diese Erwartung führt zu dem berühmten AMPÈRESchen Gesetze über die Wirkungen von Stromleitern aufeinander (O. § 140). Zu den Versuchen ist immer noch das „klassische“ AMPÈRESche Gestell am meisten zu empfehlen, an dem in jüngster Zeit mehrere Abänderungen beschrieben worden sind.²⁾

Zunächst verhalten sich stromdurchflossene Leiter, die eine (etwa kreisförmige oder rechteckige) Fläche umschließen, gemäß der früher schon erkannten Eigenschaft nun auch gegeneinander wie magnetische Doppelflächen, die von den Leitern umgrenzt sind. Zwei solche nebeneinander befindliche Leiter ziehen sich an, wenn die Flächen von den Strömen in entgegengesetztem Sinn umflossen werden, sie stoßen sich dagegen ab, wenn der Sinn in beiden derselbe ist.

Beachtet man hierauf das Verhalten der unmittelbar einander benachbarten Teile der beiden Leiter, so erhält man leicht das

1) Dieser Weg zu den AMPÈRESchen Entdeckungen ist allerdings nicht der historische. AMPÈRE kam zu seinen Versuchen durch die Vermutung, daß ebenso wie die Reibungselektrizität auch die strömende anziehende und abstoßende Kräfte ausüben werde. Daß die im Text ausgesprochene Erwartung übrigens keine zwingende Kraft hat, geht schon daraus hervor, daß bei Magneten und weichem Eisen ein ähnlicher Schluß nicht gezogen werden kann (MACH, Oberkl. § 334).

2) WEINHOLD, Ph. D. (4) 818; SALTZMANN, Z. U. V 202; RAPS, Z. U. VII 114; BRUNHES, Z. U. VII 192; KOLBE, Z. U. VIII 155; ADAMI, Z. U. XIII 280; EHRHARDT, Z. U. XVIII 257; HEINRICH, Z. U. XVIII 272; VOLKMANN, Z. U. XVIII 287.

AMPÈRESche Grundgesetz für gleichgerichtete und entgegengesetzt gerichtete, sowie schließlich auch für gekreuzte Ströme.

5. Die Wirkungen zwischen Magneten und Stromleitern wie zwischen Magneten untereinander und Stromleitern untereinander lassen sich, auf Grund des Vorhandenseins eines magnetischen Kraftfeldes in allen diesen Fällen, zusammenfassen mittels eines erweiterten Kraftlinienbegriffs. Dieser FARADAYSche Begriff besteht darin, daß die Kraftlinien Zusammenhänge innerhalb des Mediums selbst darstellen und elastischen Fäden vergleichbar sind.

Die Anziehung zwischen ungleichnamigen Magnetpolen läßt sich hiernach zurückführen auf ein Bestreben der Kraftlinien, sich in ihrer Richtung zu verkürzen. Die Abstoßung zwischen gleichnamigen Magnetpolen läßt sich, wie das Kraftlinienbild an die Hand gibt, erklären aus der Annahme, daß parallele und gleichnamige Kraftlinien das Bestreben haben, sich voneinander zu entfernen. Die abstoßende Wirkung zweier entgegengesetzter Ströme läßt sich nun, wie wiederum am Kraftlinienbilde sichtbar, leicht auf dasselbe Prinzip zurückführen. Dagegen zeigt das Kraftlinienbild zweier gleichgerichteter Ströme, daß die benachbarten Kraftlinien einander entgegengesetzt gerichtet sind; man muß in diesem Fall eine Anziehung entgegengesetzt gerichteter Kraftlinien annehmen, um die Wirkung zu erklären.

Zusammenfassend kann man sagen, daß in der Richtung der Kraftlinien eine Zugspannung und senkrecht dazu eine Druckspannung herrscht. GRIMSEHL (Lehrb. § 348) sagt aber mit Recht: „Wir müssen uns wohl hüten, aus diesem anschaulichen Bilde sichere Schlüsse zu ziehen. Das Bild kann als Pfadfinder bei der Forschung dienen, niemals als Beweismittel, das einen strengen experimentellen und theoretischen Nachweis ersetzen könnte.“ Es handelt sich hier ja nur um hypothetische Hilfsvorstellungen; alle vermeintlichen experimentellen Beweise, die man hier und da angegeben findet, sind unzutreffend, da man ja immer nur an Leitern, nicht an den Kraftlinien selbst Versuche anstellen kann. Aber die Annahme solcher Gebilde, die nicht als bloße mathematische Fiktionen, sondern als Realitäten anzusehen sind, ist überaus wertvoll für die Auffassung der Induktionsvorgänge.

Nicht minder wichtig ist auch die mathematische Fixierung des Begriffs der Kraftlinienzahl. Hierüber etwas Genaueres durch Versuche mit Eisenfeile ausmachen zu wollen ist vergeblich, diese gestatten nur ganz rohe Schlüsse aus der Art der Zusammenhäufung auf größere oder geringere Feldstärke. Will man also mit diesem Begriff überhaupt arbeiten, so muß man ihn exakt definieren. Wenn wir an irgendeiner Stelle eines magnetischen Kraftfeldes ein Flächenstück von 1 qcm senkrecht zur Richtung der an dieser Stelle herrschenden Feldstärke abgegrenzt denken, und wenn diese Kraft 1 Dyn beträgt, so

denken wir uns durch die Mitte des Flächenstücks eine Kraftlinie gezogen und bezeichnen diese als Einheitskraftlinie. Beträgt die Feldstärke ξ Dyn, so denken wir ξ solche Einheitskraftlinien durch das Flächenstück gelegt. Denkt man sich ferner durch den ganzen Umfang des Flächenstücks Kraftlinien gelegt und diese bis zu einem anderen, normal zu ihnen liegenden Flächenstück fortgesetzt, so wird dies im allgemeinen an Größe von dem ersten verschieden sein, je nachdem die Kraftlinien sich einander nähern oder sich voneinander entfernen. Man erhält also einen Raum von der Gestalt eines Kegelstumpfs, der von n Kraftlinien durchsetzt ist. Diesen Raum denke man sich den Einheitskraftlinien entsprechend in ξ Röhren geteilt, so erhält man die sogenannten Einheitskraftröhren. Man kann sich z. B. das ganze Feld um einen magnetischen Nordpol in solche Einheitskraftröhren zerlegt denken und diesen Kraftröhren die Eigenschaften beilegen, die vorher den Kraftlinien zugeschrieben wurden. Man hat so gleichsam die mathematischen Linien in physikalische Gebilde übersetzt. Die Brauchbarkeit dieser Vorstellung tritt erst im folgenden Abschnitt deutlich hervor. Die hier stillschweigend gemachte Voraussetzung, daß die Gesamtzahl der Kraftlinien sich während des Fortschreitens durch den Raum nicht ändert, läßt sich, wenn nur ein magnetischer Pol als „Quellpunkt“ der Kraftlinien vorhanden ist, leicht als richtig erweisen; hat der Pol die Feldstärke 1, so geht durch jede kugelförmige Niveauläche die gleiche Anzahl Kraftlinien, nämlich 4π . In anderen Fällen dagegen führt die Vorstellung von der Kontinuität der Kraftlinien als realer Gebilde zu der Folgerung, daß die Dichtigkeit der Kraftlinien und also auch die Feldstärke dem Querschnitt der Kraftröhren umgekehrt proportional ist.

§ 49. Die Induktionserscheinungen.

FARADAY selbst hat seine Entdeckungen leider nicht in der Reihenfolge, wie sie gemacht worden sind, sondern „solchermaßen beschrieben, daß sie den klarsten Überblick über das Ganze gewähren“. ¹⁾ Es ist daher in diesem Fall ausgeschlossen, dem historischen Gang der Entdeckung zu folgen. Als verbürgt ist jedoch die Erzählung anzusehen, daß FARADAY lange Zeit ein kleines Modell eines Elektromagneten in der Tasche mit sich herumgetragen und gelegentlich betrachtet haben soll, von der Vermutung erfüllt, daß es möglich sein müsse, die elektromagnetische Wirkung umzukehren und elektrische Ströme mit Hilfe von Magneten zu erzeugen. Es ist auch wohl sicher, nach der Darstellung in seiner ersten Mitteilung (1831) zu schließen, daß die

1) FARADAY, Exp. Unt. I § 5.

grundlegenden Versuche sämtlich mit Drahtspulen angestellt worden sind.

Es wird neuerdings mehrfach bevorzugt, diesen Abschnitt mit Versuchen über die Bewegung eines linearen Leiterstücks im Kraftfelde eines Magneten zu beginnen.¹⁾ Dies Verfahren entspricht aber allzusehr einer mathematisch gearteten, aus den Elementen aufbauenden Darstellungsform, als daß wir es hier befürworten möchten.

Eine mehr an den vermutlichen historischen Gang anknüpfende Einführung empfiehlt MÜLLER (T. 307), indem er den Anker eines Hufeisenmagneten mit einer Spule bewickelt und die in dieser beim Losreißen (oder Wiederanlegen) des Ankers auftretenden Induktionsströme am Galvanometer demonstriert. Er streift auch die Spule direkt in rascher Bewegung über den einen Schenkel des Hufeisenmagneten, und stellt endlich, indem er an einem Eisenring die eine Hälfte durch Bewicklung mit einer Spule zum Elektromagneten macht und die andere Hälfte mit der Sekundärspule umgibt, einen einfachen Demonstrationsapparat nach Art der ältesten FARADAYSchen Vorrichtung her.

Es scheint indessen doch noch einfacher und durchsichtiger, zuerst mit den geraden Spulen zu arbeiten, die seit langer Zeit schon allgemein für diesen Zweck in Gebrauch sind, und von diesen zu den Versuchen mit Leiterstücken überzugehen. Man beginnt in diesem Fall damit, daß Induktionsströme entstehen, wenn der Leiter Kraftlinien schneidet, und schließt daran erst die Entstehung von Strömen durch Auftreten oder Verschwinden von Kraftlinien. Der Übergang von den ersteren zu den letzteren ist verständlicher, als der umgekehrte Weg sein würde.

1. An die vorher erwähnte FARADAYSche Problemstellung anknüpfend zeigt man zuerst, daß in einer Spule Ströme entgegengesetzter Richtung entstehen, wenn man einen Magneten hineinschiebt oder wieder herauszieht. Noch besser ist es, den Magneten ruhig liegen zu lassen und die Spule hin- und herzuführen, weil dabei das Durchschneiden der Kraftlinien des ruhenden Kraftfeldes noch anschaulicher wird. (Hierfür ist erforderlich, daß an den üblichen Schlittenapparaten auch die sekundäre Spule verschiebbar ist.) Nach dem, was früher über die magnetischen Wirkungen an Stromspulen gesagt ist, läßt sich vermuten, daß

1) So GRIMSEHL, L. § 459.

man den Magneten durch eine Stromspule ersetzen kann, und dies wird durch den Versuch bestätigt. Dieser zweite Versuch legt auch nahe, daß das eigentlich Wirksame hierbei nicht die Magnetpole, sondern die Kraftlinien des magnetischen Feldes sind, da diese sowohl bei Magneten als bei Stromspulen vorhanden sind. Hiermit entfällt auch jede Nötigung, noch fernerhin zwischen Magnetinduktion und Voltainduktion zu unterscheiden, wenschon man in den Lehrbüchern aus historischen Gründen wohl noch diese Bezeichnungen angibt.

Es ist also zu erwarten, daß in jedem Leiterstück, das bei der Bewegung die Kraftlinien eines Feldes schneidet, ein Strom entsteht. Die einfachste Vorrichtung, um dies zu demonstrieren, ist die in § 48 Nr. 3 angegebene von EBERT; der Versuch u. a. bei GRIMSEHL (L. § 459) und O. § 141, 4¹).

Die Richtung des induzierten Stroms gemäß der FLEMINGSchen Dreifingerregel für die rechte Hand ist durch den Versuch leicht nachweisbar.

An der empfohlenen Vorrichtung ist auch unschwer festzustellen, daß die Wirkung des Magnetfeldes auf den entstehenden Strom der Bewegung entgegenwirkt (LENZsche Regel), daß also zur Bewegung ein Arbeitsaufwand erforderlich ist, dessen Äquivalent eben der erzeugte Strom darstellt.

2. Der andere Fall der Induktion durch das Entstehen oder Verschwinden von Kraftlinien im Felde, ist durch Schließen und Öffnen eines induzierenden Stromes ebenfalls leicht zu realisieren. Beide Vorgänge lassen sich auf die Grunderscheinung leicht zurückführen, da das Entstehen von Kraftlinien als ein Heranbringen, ihr Verschwinden als ein plötzliches Entfernen von solchen aufgefaßt werden kann. Insbesondere für eine von einem Leiter umschlossene Fläche läßt sich das Gesetz auch so darstellen, daß Induktionsströme entstehen, wenn die Menge der durch die Fläche gehenden Kraftlinien vermehrt oder vermindert wird. Und zwar gilt hierfür die MAXWELLSche Regel: Blickt man in der Richtung der Kraftlinien durch den Stromkreis, so fließt

1) Eine vollkommene Vorrichtung mit Leitschienen, die den Kraftlinien eines Hufeisenmagnets entsprechen, bei PFAUNDLER, Z. U. I 53 und SZYMANSKI, Z. U. VII 10 und VIII 339. Ähnlich mit einem Elektromagneten bei GRIMSEHL, Z. U. VI 240. Eine Versuchsanordnung, bei der die Leitung minimalen Widerstand hat und der induzierte Strom unmittelbar auf eine Magnetnadel wirkt, beschreibt GRIMSEHL, Z. U. XX 9, L. § 459; man vgl. dazu RUDEL, Z. U. XX 246; ferner F. A. HINTZE, Z. U. XVI 254 und MASCHKE, Z. U. XVII 157.

der induzierte Strom bei Abnahme der Kraftlinienzahl im Sinn des Uhrzeigers, bei Zunahme der Kraftlinien entgegen dem Uhrzeiger.

3. Die quantitative Beziehung der durch Induktion erzeugten elektromotorischen Kraft zu der Zahl der vom Leiter geschnittenen Kraftlinien ist von FARADAY auf experimentellem Wege gefunden worden¹⁾, allerdings noch ohne daß ihm eine präzise Definition der Kraftlinienzahl zu Gebote stand. Der von FARADAY eingeschlagene Weg der Rotation eines zwischen Pol und „Äquator“ eines Magnetstabes im Bogen herumgelegten Leiterstückes scheint für den Unterricht nicht verwertet worden zu sein. Am meisten dürfte sich die Benutzung eines homogenen Feldes (zwischen langgestreckten Polschuhen eines Hufeisenmagneten) eignen, die von SZYMANSKI (Z. U. VII 10) angegeben ist, oder auch die Benutzung des Erdfeldes. Die Abhängigkeit von der Zahl der Kraftlinien läßt sich hier dadurch demonstrieren, daß ein zwischen den Schienen senkrecht zu den Kraftlinien gleitendes Leiterstück einmal in verschiedener Länge, dann auch in schräger Stellung gegen die Kraftlinien benutzt wird. Als Stromanzeiger dient ein ballistisch wirkendes THOMSONSches Galvanometer. Die Proportionalität mit Feldstärke \mathfrak{H} , Leiterlänge l , Geschwindigkeit v kann an dieser Vorrichtung gut demonstriert werden. Das Produkt $\mathfrak{H}lv$ bedeutet die Anzahl der in 1 Sek. geschnittenen Kraftlinien.

Auch die Drehung eines rechteckigen Leiters zwischen den Polen eines Magneten läßt sich benutzen, um die Abhängigkeit der erzeugten *EMK* von der Zahl der geschnittenen Kraftlinien zu demonstrieren. Man sieht leicht, daß in diesem Fall die Zahl der in die Fläche des Leiters ein- oder austretenden Kraftlinien maßgebend für die *EMK* des erzeugten Stromes ist (ROSENBERG, L. § 210). Zur Veranschaulichung kann die Betrachtung eines Lichtstrahlenbündels dienen, das eine Fläche unter rechtem oder schiefem Winkel trifft. Ein drehbarer Leiter dieser Art ist von GRIMSEHL (Z. U. VI 240 und L. § 447) angegeben und läßt sich auch an dem Apparat von SZYMANSKI leicht anbringen. Eine besonders praktische Form solcher rechteckiger Leiter beschreibt EHRHARDT (Z. U. XII 63); es kommen zwei Exemplare zur Verwendung, bei dem einen sind die Drahtenden zu zwei auf der Achse liegenden Schleifringen geleitet (Wechselstrom), bei dem anderen zu zwei einander gegenüberstehenden Halbringen (Gleichstrom). Die Induktionsströme haben die größte Stärke, wenn die Rechtecksseiten die Kraftlinien senkrecht schneiden. (Man vgl. auch ROSENBERG II 395.)

Es kann sich hier sofort die Anwendung auf den Doppel-T-Anker anschließen, den man erhält, wenn man die Windungszahl vervielfacht

1) FARADAY, Exp. Res. Art. 3070 ff.

und den leeren Raum durch einen Anker aus weichem Eisen ausfüllt. Als Demonstrationsobjekt ist der Lätinduktor von SIEMENS sehr zu empfehlen (Z. U. XVI 253).

4. Ehe die Dynamomaschinen mit ihren gewaltigen Energieumsetzungen näher betrachtet werden, dürfte eine kurze theoretische Erörterung über die Beziehung der Induktionserscheinungen zum Energieprinzip am Platze sein. Es sei hier ein Ausspruch von MÜLLER (T. 305) besonders hervorgehoben: „Eine aprioristische Ableitung der Gesetze der Induktionsströme aus dem Satz von der Erhaltung der Energie ist unmöglich, wenschon es manche Lehrer und Bücher auf dem Wege des Zirkelschlusses ganz nett fertigbringen. . . . Die allerdings tatsächlich vorhandene Übereinstimmung der Induktionsgesetze mit dem Energiegesetz ist eine Kenntnis a posteriori, welche die Hypothese von der Allgemeingültigkeit des Energiesatzes kräftig stützt. Eine Einsicht in den inneren Mechanismus der Induktion haben wir zurzeit überhaupt noch nicht.“ Man kann hinzufügen, daß eine solche Einsicht auch durch Aufdeckung des energetischen Zusammenhangs nicht gewonnen wird. Man wird aber doch nicht umhin können, die Erscheinungen unter dem Gesichtspunkt einer vorausgesetzten Gültigkeit des Energieprinzips zu betrachten.

Um den Arbeitsbegriff auf diese Erscheinungen anzuwenden, geht man auf das BIOT-SAVARTSche, besser LAPLACESche Gesetz zurück. Die Wirkung eines Magnetpols m auf ein kurzes Leiterstück l , das sich im Abstand r senkrecht zur Verbindungslinie befindet, ist durch $k = \frac{mli}{r^2}$ dargestellt. Hierin bedeutet m/r^2 die von dem Magnetpol hervorgebrachte Feldstärke \mathfrak{H} an der Stelle des Leiterstücks. Hieran wird sich nichts ändern, wenn die Feldstärke \mathfrak{H} auf irgendeine andere Weise hervorgebracht ist. In einem homogenen Felde wird überdies die Länge l beliebig groß sein können. Man kann dann sagen: Ein vom Strom i durchflossener Leiter von l cm Länge erfährt in einem magnetischen Felde von der Feldstärke \mathfrak{H} eine Kraft

$$k = \mathfrak{H}li.$$

Die Benennung ist Dyn, wenn \mathfrak{H} und i in absoluten Einheiten gemessen sind.

Es sei nun zunächst eine von MACH (O. § 339) gegebene Herleitung mitgeteilt. (Sie ist die elementare Umschreibung einer von HELMHOLTZ in seiner berühmten Abhandlung über die Erhaltung der Kraft angestellten Betrachtung.) In einem homogenen magnetischen

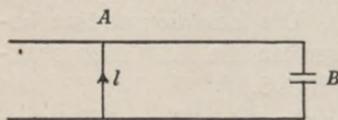


Fig. 35.

Kraftfelde von der Stärke \mathfrak{H} befinde sich ein rechteckig gebogener Leiter (Fig. 35) ABC , der durch eine Batterie mit Strom versorgt wird und

dessen einer Teil l als Gleitstück ausgebildet ist. Die Stromrichtung sei ABC , die Kraftlinien senkrecht zur Zeichenebene von vorn nach hinten gerichtet. Dann wird das Leiterstück l unter dem Einfluß des Kraftfeldes nach links getrieben, und dabei wird eine gewisse Arbeit pro Sekunde geleistet, die durch $\mathfrak{H}lv$ dargestellt ist, wenn v die Geschwindigkeit des Leiterstücks l senkrecht zur Kraftlinienrichtung bedeutet. Diese Arbeit kann nur auf Kosten der Stromenergie ei geliefert werden, es ist also, wenn i die Stromstärke während der Bewegung, wi^2 die im Stromkreise erzeugte JOULESCHE Wärme bedeutet,

$$ei = wi^2 + \mathfrak{H}lv,$$

woraus

$$i = \frac{e - \mathfrak{H}lv}{w},$$

während bei ruhendem Gleitstück $i_0 = \frac{e}{w}$ wäre.

Durch die gleichförmige Bewegung des Gleitstücks von rechts nach links wird also eine von der Stromstärke unabhängige elektromotorische Kraft $\mathfrak{H}lv$ entgegen dem Uhrzeigersinn induziert, die auch beim Fehlen des Batteriestroms den Strom $\frac{\mathfrak{H}lv}{w}$ ergeben würde und bei Umkehrung des Bewegungssinns und Verbrauch von mechanischer Arbeit ebenfalls ihre Richtung umkehrt.

Diese fein ersonnene Herleitung leidet, abgesehen davon, daß sie das Energiegesetz voraussetzt, an dem Fehler einer *petitio principii*, da sie das Auftreten von Induktionsströmen auch in dem Fall, wo kein Batteriestrom vorhanden ist, postuliert; für diesen Fall gilt aber die vorausgesetzte Anwendung des LAPLACESCHEN Gesetzes nicht mehr, daher auch nicht die gezogene Folgerung; der mathematische Fehlschluß besteht darin, daß die Division durch i in dem Fall $i = 0$ nicht zulässig ist. Auch die Unabhängigkeit des Ausdrucks $\mathfrak{H}lv$ von i kann daran nichts ändern. (Ein Analogon bietet die Unabhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit.)

Hingegen gestaltet sich die unmittelbare Ableitung der induzierten *EMK* aus dem Energieprinzip einfacher, wie folgt, indem man nur einen durch ein Gleitstück l geschlossenen Leiter, der keine Stromquelle enthält, voraussetzt. Es werde das Leiterstück senkrecht gegen die Kraftlinien des magnetischen Feldes mit der Geschwindigkeit v verschoben, die durch die induzierte *EMK* hervorgerufene Stromstärke sei i , dann ist die pro Sekunde geleistete Arbeit

$$A = \mathfrak{H}lv;$$

andererseits ist die hierdurch hervorgebrachte elektrische Leistung gemessen durch $A' = ie$. Aus der Gleichheit beider ergibt sich

$$e = \mathfrak{H}lv \text{ elektromagn. Einh.}$$

Während also die Versuche nur die Proportionalität mit ξlv lehrten, ergibt diese Ableitung die Gleichung $e = \xi lv$ selber. Wird v in Volt gemessen, so erhält man, da 1 Volt = 10^8 elektromagn. Einheiten ist,

$$e = 10^{-8} \xi lv \text{ Volt.}$$

Hiernach würde die EMK von 1 Volt erzeugt werden, wenn man einen Leiter von 1 cm Länge mit der Geschwindigkeit 1 cm/sec in einem Felde von der Stärke 10^8 senkrecht zu den Kraftlinien bewegt. Daß die so gemessene Größe des Volt mit der auf anderem Wege gemessenen übereinstimmt, liefert erst die Bestätigung dafür, daß die Anwendung des Energieprinzips in dem vorliegenden Falle zulässig war.

5. Die eben erwähnte Bestimmung des Volt ist so fundamental, daß man wünschen muß, auch im Unterricht davon einen Begriff geben zu können.

GRIMSEHL hat folgendes Verfahren hierfür vorgeschlagen.¹⁾ Durch eine in Kreisringform gewickelte Drahtspirale von 100 Windungen und 31,4 cm Radius fließt ein Strom von 5 Amp. und erzeugt im Mittelpunkt der eingeschlossenen Kreisfläche ein Feld von 10 magn. Einh. Sieht man das Feld innerhalb eines konzentrischen Kreises von 17,8 cm Radius als homogen an, so umschließt dieses Feld, da seine Fläche 1000 cm^2 beträgt, 10000 oder 10^4 Kraftlinien. Ein radialer Metallarm, der diese Fläche in einer Sekunde einmal durchfährt, muß daher an seinen Enden eine Potentialdifferenz von 10^{-4} Volt zeigen. Dies ist nachweisbar, wenn man den erzeugten Induktionsstrom entgegengesetzt zu einem Strom von ebenfalls 10^{-4} Volt schaltet, der durch Abzweigung von dem Stromkreis eines Akkumulators gewonnen wird.

Die hierbei gemachte Voraussetzung eines homogenen Feldes ist von MÜLLER (Z. U. XX 371) angefochten worden. Die Abweichung von der Homogenität beträgt, wie MÜLLER auf experimentellem Wege festgestellt und später (Z. U. XXIV 226) mathematisch begründet hat, im Mittel ca. 12%. Man kann daher in der Tat nicht von einer quantitativen Bestätigung sprechen und die beschriebene Methode, wie auch GRIMSEHL selbst (Z. U. XX 376) zugeben muß, nur als Erläuterung der Definition des Volt gelten lassen, die einer sorgfältigen kritischen Bearbeitung bedarf, wenn nicht falsche Vorstellungen entstehen sollen.

Exakter dürfte für denselben Zweck die Benutzung des Erdinduktors sein. ROSENBERG (II 363) empfiehlt nur qualitative Versuche an einem Modell, MÜLLER (T. 313) verwendet einen von ihm beschriebenen Apparat auch zu Messungen. Statt der sonst üblichen ringförmigen Spule ist hier eine leichte Holztrommel benutzt, auf deren Mantel 200 Windungen eines dünnen besponnenen Drahtes aufgewickelt sind, deren

1) GRIMSEHL, S.-H. II 29, Lehrb. § 460.

Fläche möglichst genau je 200 cm² beträgt. Die senkrecht zur Trommelachse gelegte Drehungsachse ist mit der Hand oder durch einen Motor drehbar und an einem Ende mit Kommutator versehen, von dem der Strom durch Schleiffedern abgenommen wird. Die *EMK* des Induktors ist gleich dem Produkt aus Intensität des Erdfeldes, Windungsfläche, Windungszahl und vierfacher Umdrehungszahl pro Sekunde. Bei fünf Umdrehungen um die vertikal gestellte Drehungsachse und der Horizontalintensität 0,18 wird die *EMK* = 144000 absoluten Einheiten oder 1,44 Millivolt. Diese Größe kann an einem auf Spannung geeichten Galvanometer gemessen werden. Auf diese Art ist endlich auch der Nachweis für die Gültigkeit des Energieprinzips im vorliegenden Fall und für die Richtigkeit der oben angegebenen theoretischen Ableitung des Volt einwandfrei geführt.

6. Ehe zu den elektrischen Generatoren übergegangen wird, sind noch erst besondere Fälle der Erzeugung von Induktionsströmen zu betrachten, nämlich Selbstinduktion und *FOUCAULT*ströme.

Für die Demonstration der Selbstinduktion können die von *FARADAY* selbst ersonnenen sinnreichen Versuche (*GRIMSEHL*, L. § 465) dienen, noch wirkungsvoller ist die Verwendung von Morsetaster und Glühlampe.¹⁾ Selbstverständlich ist, daß man den Öffnungsfunken zeigt und womöglich auch die physiologische Wirkung (*ROSENBERG* II 364). Man findet häufig in Lehrbüchern die Sache so dargestellt, als ob nur die Induktion der Windungen einer Drahtspule aufeinander Selbstinduktion hervorrufe; es ist aber zu beachten, daß selbst in einer einzigen Windung, ja selbst in einem genügend langen geraden Draht Selbstinduktion nachweisbar ist. Vom Standpunkt des Energieprinzips erfordert die Erzeugung des den Leiter umgebenden Feldes einen Energieaufwand, während diese in Feldenergie verwandelte Arbeit bei Öffnung des Stroms sich gleichsam wieder in den Leiter zurückzieht.

Wie *M. KOPPE* (*Z. U.* II 232) gezeigt hat, ist die Unsymmetrie der Extraströme von wesentlichem Einfluß auf die Erhaltung der Schwingungen bei den verschiedenen Arten von Selbstunterbrechern.²⁾

Auf die quantitativen Verhältnisse bei der Selbstinduktion einzugehen empfiehlt sich erst, wenn man bei der Theorie der Wechselströme und der elektrischen Schwingungen Anlaß hat, davon Gebrauch zu machen. Wie bei der Induktion überhaupt, ist auch hier die erzeugte *EMK* der Änderung der Stromstärke proportional zu setzen, also $e = L \frac{di}{dt}$. Die Proportionalitätskonstante *L* ist der Selbstinduktionskoeffizient und kann elementar erklärt werden als die Größe der *EMK*,

1) *SPIES*, *Z. U.* XI 276; *GRIMSEHL*, *S. H.* I 1, 32; andere Anordnungen sind bei *ROSENBERG* II 364 zusammengestellt.

2) Vgl. auch *P. SPIES* über die *ROGETS*che Spirale, *Z. U.* X 29.

die erzeugt wird, wenn sich die Stromstärke pro Sekunde um 1 Ampère ändert. Ist die erzeugte $EMK = 1$ Volt, so ist L gleich der „Einheit der Selbstinduktion“ (1 Henry).

Die Erscheinung, daß die Selbstinduktion in beiden Fällen dem ablaufenden Vorgang entgegenwirkt, „verliert ihr Paradoxes, wenn man sie vergleicht mit dem Anlauf und Endlauf jeder nach dem Trägheitsgesetz sich bewegenden Masse (speziell eines Schwungrades); im Anlauf setzt die Masse der beschleunigenden Kraft einen Widerstand entgegen, als ob sie das Beschleunigen hindern wollte; im Endlauf setzt sie der Verzögerung einen Widerstand entgegen, als ob sie das Verzögern hindern wollte“ (HÖELER, Ph. 487).

Für die FOUCAULTSchen Wirbelströme kann der Versuch von ARAGO über die Ablenkung einer Magnetnadel durch eine rotierende Kupferscheibe die historische Einleitung bilden. Der wichtigste Versuch aber ist der mit WALTENHOFENS Pendel oder mit dem zwischen kräftigen Magnetpolen rotierenden Kupferwürfel (ROSENBERG II 366). Namentlich das erstere ist ein ausgezeichnetes Mittel, die durch das Magnetfeld vermittelte Energieverwandlung in sinnfälligster Weise zu veranschaulichen, und sollte im Unterricht nie übergangen werden.

Daß die solcherart übertragene Energie in Wärme verwandelt wird, ist an rotierenden Kupferscheiben oder einem mit Äther gefüllten kupfernen Hohlzylinder zu zeigen.¹⁾ Die Anwendung zur Dämpfung schwingender Magnetnadeln verdient ebenfalls Erwähnung und läßt sich am besten an einem Spulengalvanometer demonstrieren.

Ein Hinweis auf die bei Ankern von dynamoelektrischen Maschinen notwendige Unterteilung der Eisenkerne kann recht passend schon hier gegeben werden.

7. Man wird nun die Betrachtung der elektrischen Maschinen nicht länger hinausschieben dürfen und dagegen insbesondere den Induktionsapparat mit den wunderbaren durch ihn vermittelten Erscheinungen lieber an den Schluß des Gebiets stellen. Nirgends ist die Schwierigkeit, gegenüber den großartigen Leistungen der Technik das rechte Maß im Unterricht einzuhalten, so groß wie hier. Auch das Interesse der Jugend kommt gerade diesen Dingen in so hohem Maße entgegen, daß man dem gern so weit als möglich nachgeben wird. Andererseits kann der Unterricht doch nur die großen leitenden Gedanken herausheben und darf sich nicht zu sehr in das Detail verlieren; er darf vor allem auch nicht zu weit auf Gebiete übergreifen, die sich zurzeit noch in der Entwicklung befinden und wo das heute Geltende oft morgen schon durch Besseres verdrängt wird. In diesem Sinn ist die folgende, nur als das Minimum des Darzubietenden anzusehende Stoffübersicht gemeint.

1) GRIMSEHL, L. § 472; ROSENBERG II 370; MÜLLER, T. 317.

Es wird mehrfach empfohlen, zur Einleitung in dieses Gebiet an RITSCHIES magnetelektrischen Motor anzuknüpfen. Der Apparat ist ohne Zweifel auch heut noch lehrreich und für den Unterricht brauchbar, doch ist es fraglich, ob man auf diesem Gebiet der technischen Anwendungen sich allzusehr an den historischen Gang halten soll. Auch die Anknüpfung an das BARLOWSche Rad verzögert nur das Eindringen in das Verständnis der heute im Vordergrund stehenden Maschinenformen.¹⁾ Dagegen wird man von dem bereits in Nr. 3 vorgeführten SIEMENSSchen Doppel-T-Anker ausgehend sofort in medias res eintreten können. Da man aber meist für die Demonstration nur fertige Modelle zur Verfügung haben wird, so ist gerade hier auch der Gebrauch von Wandtafeln, die das Wesentliche zunächst in guten schematischen Abbildungen zeigen, wohl am Platze.²⁾

Das erste sich aufdrängende technische Problem ist die Verwandlung des beim Doppel-T-Anker auftretenden Wechselstroms in Gleichstrom. Die Einrichtung des Kommutators (vgl. ROSENBERG II 395) ist durch Modelle und Tafeln leicht verständlich zu machen. Der so erhaltene Gleichstrom hat aber eine variable Intensität, die während einer Umdrehung nach dem Sinusgesetz zweimal vom Maximum auf Null sinkt. Die Aufgabe, einen gleichförmigen Gleichstrom herzustellen, ist durch den Trommelanker von HEFNER-ALTENECK gelöst. Dieser heute fast allgemein angewandte Anker verdient genauere Besprechung. Nur bei ganz flüchtigem Überblick wird man sich damit begnügen dürfen, daß man ihn aus einer Anzahl von rechteckigen Leiterstücken zusammengesetzt vorstellt, die im Kreise rings um den zylindrischen Eisenkern angeordnet sind (O. Fig. 405). Welch ein bewundernswerter Scharfsinn die Trommelwicklung zustande gebracht hat, erkennt man erst, wenn man die Führung der Drähte an der Stirnfläche genauer verfolgt. Zum Verständnis hiervon pflegt selbst eine gute Zeichnung oder ein Pappmodell nicht zu genügen. Am meisten empfiehlt es sich, die Wickelung an einfachen Modellen in den Übungsstunden, oder auch in einer Unterrichtsstunde, von den Schülern selbst ausführen zu lassen. Eine Anweisung hierfür bei MÜLLER, T. 328, wo auch die weitere didaktische Behandlung musterhaft durchgeführt ist. Ebenda ist auch ein brauchbares Modell mit auswechselbarem Ring- und Trommelanker innerhalb eines Magnetsystems wie dem des SIEMENSSchen Lätinduktors

1) Man wird allerdings vielfach von den in der Sammlung vorhandenen Apparaten abhängig sein und danach den Gang einzurichten haben. FR. C. G. MÜLLER empfiehlt für diesen Zweck den von ihm konstruierten Erdinduktor, bei dem man das Feld durch vorgelegte Magnete oder in die Trommel gebrachte Eisenbleche verstärken kann.

2) Vgl. C. STERNSTEIN, Elektrotechnische Wandtafeln (Creutzsche Verlagsbuchhdlg. in Magdeburg), 12 Tafeln. — A. KADESCH, Die elektrischen Strommaschinen, Wiesbaden, J. F. Bergmann, 10 Tafeln.

beschrieben. Vervollständigt man diesen Apparat noch durch einen einzelnen rechteckigen Leiter und einen Doppel-T-Anker, so hat man einen kleinen Universalapparat, der mit Akkumulatoren auch als Motor betrieben werden kann.

An ein solches magnetelektrisches Modell schließt sich dann sofort das dynamoelektrische Prinzip von SIEMENS, von dessen Anwendung „der Siegeslauf der modernen Technik datiert“.

Ein Eingehen auf die heute kaum noch verwendete Form des GRAMMESCHEN Ringankers kann bei knapp bemessener Zeit unterbleiben. In den Lehrbüchern hat dieser Anker wegen seiner leichtverständlichen Wicklung lange als Haupttypus figurirt, heute wird man darauf kein so großes Gewicht mehr legen dürfen und nur etwa, wo ein Modell dafür vorhanden ist, die Schüler damit bekannt machen. Dann sind auch die Nachteile des GRAMMESCHEN Ringes gegenüber dem Trommelanker auseinanderzusetzen. (Vgl. aber auch S. 198.)

Im Zusammenhang mit dem Dynamoprinzip ist auch der Unterschied von Hauptstrom- und Nebenschlußmaschine zu erläutern und womöglich an einer kleinen Nebenschlußmaschine für Handbetrieb zu demonstrieren. Hat man Starkstrom zur Verfügung, so wird man die Maschine durch einen dazu passenden Motor in Gang setzen. Nicht versäumen darf man, *EMK* und Stromstärke unter verschiedenen Bedingungen zu messen und danach die Leistung der Maschine in Watt zu bestimmen.

An die Gleichstromdynamos schließen sich als Umkehrung die Gleichstrommotoren, worauf oben schon hingewiesen ist. Hier ist besonders wichtig der Nachweis der durch Induktion im Anker erzeugten Gegenspannung, der die Stärke des in die Maschine geleiteten Arbeitsstroms herabsetzt (MÜLLER, T. 310). Einen Versuch hierzu mit eingeschalteter Glühlampe hat GRIMSEHL (S. H. I 1, 23) angegeben. Vgl. auch O. § 144, 5. Genauere messende Versuche unter Berücksichtigung der im Anker auftretenden JOULESCHEN Wärme bei MÜLLER, T. 311. Über die Regelung zwischen dem Lauf eines Motors und eines Generators bei wechselnder Beanspruchung vgl. GRIMSEHL, L. § 475.

8. Bei der Entwicklung der Wechselstrommaschinen ist nicht die Stromerzeugung durch mechanische Arbeit, sondern das Problem der Übertragung elektrischer Energie das treibende Moment gewesen. Der Wechselstrom hat vor dem Gleichstrom den großen Vorzug, daß alle durch Kommutatoren veranlaßten Verluste vermieden werden, und daß seine Transformation in unbewegten Apparaten erfolgen kann. Die alte Unterscheidung von feststehenden Feldmagneten und rotierendem Anker verliert hier ihre Geltung; man spricht besser von Stator und Rotor; in der Regel liegen auf letzterem die Feldmagnete, auf ersterem die Ankerwicklungen, so daß der erzeugte Strom ohne Schleiffedern direkt in die Leitung übergeführt werden kann.

Für die didaktische Einführung in dieses Gebiet ist RITSCHIES schon erwähnter Magnetinduktor, wo er etwa vorhanden ist (oder auch die STÖHRERSche Maschine), recht geeignet; andernfalls auch der von GRIMSEHL (L. § 476) angegebene, aus zwei Elektromagneten zusammengesetzte Apparat. Da indessen das Prinzip der Wechselstromgeneratoren nichts wesentlich Neues enthält, genügt auch die Demonstration eines Wechselstromdynamomodells, wie es z. B. WEINHOLD (D 893) beschrieben hat.¹⁾

Der Verwendung eines Wechselstromgenerators als Motor stellen sich die bekannten Schwierigkeiten entgegen, denen durch die Erfindung des mehrphasigen Wechselstroms oder Drehstroms begegnet ist. An die Auseinandersetzung des Prinzips desselben, das erst die Übertragung der Energie von Wechselstromgeneratoren möglich gemacht hat, kann sich eine Demonstration an den von WEINHOLD (Z. U. VI 7 u. D 916) angegebenen Apparaten anschließen. Für den Kurzschlußanker der Drehstrommotoren beschreibt MÜLLER (T. 318) eine sehr brauchbare Demonstrationsvorrichtung.

9. Das für die Kraftübertragung bedeutsame Prinzip der Transformation von niedergespanntem in höhergespannten Wechselstrom läßt sich am leichtesten mit Glühlampen demonstrieren, die bei niedriger Spannung dunkel brennen, bei höherer hell leuchten.²⁾ In Ermanglung einer Wechselstrommaschine können dazu auch zwei Induktorien dienen, die hier ohne näheres Eingehen nur als Induktionsspulen eingeführt zu werden brauchen; der hochgespannte Strom des ersten wirkt kaum auf ein Hitzdrahtinstrument, während eine kleine Glühlampe im dickdrähtigen Stromkreis des zweiten hell leuchtet. Unterbrecher und Kondensator des zweiten Induktoriums sind dabei auszuschalten.

Weiteres Material, wie es die Lehrbücher bieten, mag je nach Zeit und Umständen Verwendung finden. Es handelt sich hier namentlich um das ausgedehnte Gebiet der Wechselstromtechnik, das größtenteils außerhalb der Grenzen des Schulunterrichts fällt.

An die Kraftübertragung kann sich endlich auch als ein spezieller Fall noch die Telephonie anschließen, namentlich auch in ihrer Ausgestaltung zur Überwindung großer Entfernungen, wobei die Transformation in hochgespannten Sekundärstrom von wesentlicher Bedeutung ist. „Für den denkenden und richtig angeregten Schüler ist es von höchstem Interesse, den vielfachen Wandel der schallübertragenden Wellen im Geiste zu verfolgen. Kein Wunder der Neuzeit kann sich mit der Telephonie messen. Der Alltagsmensch hat davon freilich keine Ahnung. Erst der Physikunterricht lehrt es verstehen und würdigen“ (MÜLLER 324).

1) Andere Maschinen bei ROSENBERG, II 396 f. FR. C. G. MÜLLER (T. 330) befürwortet besonders die Anschaffung einer Trommelankermaschine, die auch für zweiphasigen Wechselstrom eingerichtet ist.

2) SPIES, Z. U. XI 275, MÜLLER, T. 319.

§ 50. Elektrische Schwingungen und Wellen.

Dieses modernste Gebiet der Elektrizitätslehre wird auch im Unterricht zweckmäßig den Abschluß bilden. Es bezeichnet einen Höhepunkt nicht nur in der Anwendung der Physik auf die Bedürfnisse des Weltverkehrs, sondern vor allem einen Höhepunkt in bezug auf die Einsicht in den Zusammenhang der Naturkräfte. Die elektrischen Wellen haben es ermöglicht eine Brücke zwischen den Gebieten der Elektrizität und der Optik zu schlagen, ja sie haben uns an das Geheimnis der Entstehung der Lichtwellen herangeführt. Darum wird sich an diesen Abschnitt am besten ein zusammenfassender Rückblick auf die ganze Physik anschließen.

In didaktischer Hinsicht ist der Stoff noch nicht durchgängig so weit bearbeitet, daß es möglich wäre, alle wesentlichen Tatsachen in Unterrichtsversuchen vorzuführen. Wo solche Unterrichtsversuche vorhanden sind – wie die Demonstrationen mit der BRAUNschen Röhre – überschreiten sie doch zumeist, schon durch die Anforderungen, die ihre Vorbereitung an die Zeit des Lehrers stellt, die Grenzen dessen, was sich im Unterricht leisten läßt. Man wird sich daher zum großen Teil auf die historische Form der Darstellung beschränken müssen.

Bei genauerem Eingehen auf die theoretischen Grundlagen würde zweckmäßig an die Wechselströme anzuknüpfen sein. Sieht man von dieser theoretischen Grundlegung ab, wie es die Regel sein wird, so beginnt man wohl am besten mit den Schwingungen an Leidener Flaschen, dabei wird auch der Begriff der Kapazität, wenn er früher übergangen war, nunmehr zur Erörterung kommen müssen. Der Induktionsapparat dürfte auch am besten in diesem Zusammenhang eine Stelle finden, da er hier am meisten zur Anwendung kommt. Bedient man sich des Funkeninduktors zur Ladung der Leidener Flaschen, so wird auch die Identität von statischer und strömender Elektrizität deutlich zur Erscheinung kommen.

1. Der Funkeninduktor stellt zunächst nur eine Anwendung der im vorigen Abschnitt behandelten Induktionsgesetze dar; der Induktor ist nichts anderes als ein Transformator. Die höhere Spannung des Öffnungsstroms gegenüber der des Schließungsstroms wird aus der kurzen Dauer des Öffnungsfunkens gegenüber dem durch Selbstinduktion verzögerten langsamen Anstieg des Stroms bei

der Schließung erklärlich. Messungen der Spannung mit dem Elektrometer ergeben immer an dem einen Pol, nämlich dem, der durch den Öffnungsstrom + geladen wird, eine höhere Spannung als an dem andern, weil die entgegengesetzte Spannung des Schließungsstroms weit geringer ist. Die Sekundärspule hat also einen positiven und einen negativen Pol. Auch liefert bei Entladung der Sekundärspule durch eine Funkenstrecke nur der Öffnungsstrom die kräftigen Funken.

Bei dieser Gelegenheit erfordert auch der Kondensator nähere Erörterung, wovon in den vorliegenden Lehrgängen innerhalb der Elektrostatik (§ 43) noch abgesehen wurde. Man wird hier die bekannten Versuche über die Abhängigkeit des Potentials der Kondensatorladung von der Kapazität einschalten können. Der einfache VOLTASche Kondensator (oder ein KOHLRAUSCHScher, falls solcher vorhanden) in Verbindung mit einem Elektrometer genügt, um die Abhängigkeit der Spannung von der Kapazität zu demonstrieren.¹⁾ Über die Herstellung eines Blattkondensators sehe man MÜLLER T. 237. Die Gleichung $Q = VC$ ist als Definitionsgleichung für die Kapazität C aufzufassen. Die Wirkungsweise des Kondensators beim Funkeninduktor erklärt sich aus der Verminderung von V infolge des hohen Wertes von C ; die daher rührende Verkleinerung des Funkens hat eine Verkürzung der Dauer des Öffnungsfunkens und eine Erhöhung der durch die Stromunterbrechung induzierten Spannung zur Folge.

2. Die elektrostatische Ladung der Pole des Funkeninduktors kann dazu dienen, eine Leidener Flasche ebenso zu laden, wie mittelst einer Elektrisiermaschine. Es lassen sich hier die Versuche anschließen, um die mit denen des galvanischen Stroms identischen Wirkungen des Entladungsstroms einer Leidener Flasche zu erweisen. Vor allem aber hat sich unser Augenmerk jetzt auf den Entladungsfunken zu richten. Die oszillatorische Natur des Funkens hat zuerst FEDDERSEN nachgewiesen; die Anzahl der Schwingungen betrug bei seinen Versuchen etwa 20 000 bis 500 000 in der Sekunde.²⁾

Eine experimentelle Demonstration dieses wichtigen Vorgangs hat W. KÖNIG (Z. U. XII 293) gegeben. Durch Verbindung mit der Sekundärspule des zur Ladung dienenden Induktoriums gelang es die Schwingungszahl auf 98 bis 338 herabzusetzen. Die einzelnen Schwingungen

1) Vgl. auch H. LOHMANN, Z. U. XIII 310.

2) Vgl. KIRCHHOFF, Ges. Abh. S. 175.

wurden dadurch sichtbar gemacht, daß man die Entladungsfunken auf eine rasch rotierende Hartgummischeibe übergehen ließ und diese nach dem Funkenübergang mit einem Schwefel-Mennige-Gemisch bestäubte, so daß LICHTENBERGSche Figuren von abwechselnd + und - Vorzeichen und abnehmender Stärke entstanden. Nach den Angaben KÖNIGS müßte es ausführbar sein, diesen Versuch zum Unterrichtsversuch zu gestalten.

Ein anderes Verfahren zum allerdings indirekten Nachweis der oszillierenden Entladung hat P. SPIES (Z. U. XIV 292) beschrieben. Die äußeren Belegungen zweier Leidener Flaschen sind miteinander und mit dem einen, z. B. negativen Pol einer Funkenstrecke I verbunden, die an eine Influenzmaschine angeschlossen ist; die inneren Belegungen sind durch die Funkenstrecke II getrennt, die durch eine feuchte Schnur überbrückt ist. Die Schnur hindert nicht, daß beide innere Belegungen auch bei raschem Drehen der Maschine auf gleiches Potential geladen werden. Sobald aber in I ein Funken überspringt, geht auch in II ein Funke über. Die Erklärung ist darin zu finden, daß das Potential der zunächst an I liegenden Belegung durch die oszillierende Entladung in I vorübergehend hohe negative Werte annimmt; dadurch wird die Spannung in der Funkenstrecke II so erhöht, daß eine Entladung eintritt.¹⁾

Der oszillierende Charakter der Entladung kann endlich auch durch die Magnetisierung einer Stahlnadel nachgewiesen werden, die je nach der Natur der letzten Partialladung in einem oder anderem Sinne erfolgt. (Man vergleiche auch MÜLLER, Z. U. XXV 102.)

3. Schon der Versuch von W. KÖNIG zeigt, daß eine im Stromkreis vorhandene Selbstinduktion verlangsamernd auf die Schwingungen wirkt. Andererseits muß auch die Kapazität der Leidener Flasche von Einfluß sein. Theoretische Betrachtungen (die im Unterricht wohl nicht auseinandergesetzt werden können, vgl. aber GRIMSEHL L. § 481) führen zu der Gleichung für die Schwingungsdauer

$$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}.$$

Wenigstens eine Verdeutlichung des Sinnes dieser Gleichung kann gegeben werden, indem man sie mit der Gleichung für elastische Schwingungen

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

vergleicht, worin m die Masse, k die Kraft bedeutet. Der Masse m entspricht als bewegungshemmendes Moment die Selbstinduktion L , der

1) Eine Modifikation dieses Verfahrens nach KNOCHENHAUER - v. OETTINGEN bei WEINHOLD D. 705 und bei ROSENBERG II 283, wo auch noch andere Versuche angeführt sind. Eine photographische Fixierung des oszillatorischen Funkenbildes bei einem Tesla-Instrumentarium beschreibt GRIMSEHL (Z. U. XXI 6). Andere Versuche, wie der von W. HOLTZ, Z. U. VII 116, zeigen nur die disruptive Entladung.

Kraft k als treibendes Moment die Größe $1/C$, die als reziproker Wert der Kapazität gemäß der Gleichung $Q = V \cdot C$ der durch eine bestimmte Ladung Q erzeugten Potentialhöhe proportional ist. Kurzgefaßt, es stellt L den Beharrungsfaktor, $1/C$ den Kraftfaktor dar.¹⁾ Man kann sich von dem Einfluß der Selbstinduktion bei einer Leidener Flasche leicht überzeugen, wenn man in die Entladungsbahn eine Spirale einschaltet; die Schwingungen werden dadurch soweit verlangsammt, daß man sie in einem rotierenden Spiegel an der Zerteilung des Funkenbildes erkennen kann (ROSENBERG II 403). Die Abhängigkeit von der Kapazität wird am einfachsten durch den nun folgenden Resonanzversuch zur Anschauung gebracht.

4. Der oszillatorische Charakter der Entladung wird dadurch bestätigt, daß die dabei auftretenden elektrischen Schwingungen auch fähig sind, Resonanz zu erzeugen. Zu erinnern ist dabei an die Erscheinung der akustischen Resonanz, am besten an die Resonanz, die eine Stimmgabel in dem Luftraum eines abgestimmten Gefäßes hervorruft. Die zuerst von H. HERTZ nachgewiesene elektrische Resonanz (vgl. O. § 148, 2) wird durch den bekannten Vorlesungsversuch nach LODGE sehr sinnenfällig demonstriert.²⁾ Besser als durch das schwache Fünkchen kann die Resonanz durch das von NOACK (Z. U. XV 95) vorgeschlagene knieförmig gebogene Vakuumröhrchen nachgewiesen werden.

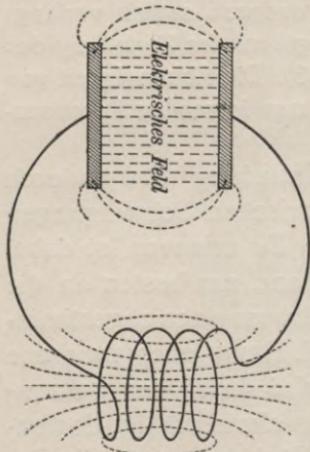
Verdoppelt man nun (nach SPIES) die Kapazität des primären Stromkreises durch Anschaltung einer zweiten gleichgroßen Leidener Flasche, so muß man die Selbstinduktion des sekundären Schließungskreises (also die vom Strom umflossene Fläche) ebenfalls verdoppeln, um wieder Resonanz herzustellen. Die Schwingungszahl hängt demnach von dem Produkt der beiden Größen L und C ab. Ähnlich wird bei einer Stimmgabel die Schwingungszahl durch die Masse der Stimmgabelzinken und ihre Elastizität an den Knotenstellen beeinflusst.

Einen weiteren Ausbau dieses Versuchs verdankt man E. GRIMSEHL (Z. U. XXI 4 und L § 508). Von zwei bügelförmigen metallischen Leitern ist der eine durch eine Funkenstrecke an ein Induktorium angeschlossen, der andere mit einer GEISSLERSchen Röhre versehen; Kapazität und Selbstinduktion können durch eine besondere Art von Hartgummi-Kondensatoren (Z. U. XXI 3) und deren Verschiebung geändert werden. Die Versuche gelingen mit größerer Schärfe und Sicherheit als bei Leidener Flaschen.

1) SPIES in JOCHMANN'S Lehrbuch § 219.

2) P. SPIES, Z. U. XIV 292; ROSENBERG II 403, WEINHOLD, D. 945.

Es ist übrigens der Hinweis nicht zu unterlassen, daß die schwingende Entladung nicht in jedem Schließungskreis eintritt, sondern nur dann, wenn der Widerstand nicht zu groß ist [$R < \sqrt{4L/C}$]; andernfalls wird gleich beim ersten Zurückströmen der Ladung die Energie ganz in Wärme verwandelt. Ähnliches zeigt die Analogie, die der Ausgleich zwischen zwei Wassergefäßen von verschiedenem Niveau darbietet.



Magnetisches Feld

Fig. 36.

Ein lehrreiches Bild zum Verständnis des Vorgangs in einem aus Selbstinduktion und Kapazität bestehenden Schließungskreise liefert O. LEHMANN in Fricks Physikalischer Technik 7. Aufl. II 698. Es werde in der Spule durch Einschieben eines Magnetstabes ein magnetisches Feld erregt (Fig. 36). Die in diesem aufgespeicherte Energie setzt sich in einen Strom um, der die Kapazität ladet, von dieser wieder in die Spule zurückschwingt und so fort. Der Vorgang ist vergleichbar der Bewegung eines Pendels; wie dieses in den höchsten Punkten seine Energie in Form potentieller Energie aufspeichert, so speichert der Strom seine Energie abwechselnd

in Form von magnetischer und elektrischer Feldenergie auf.

5. Die raschen Schwingungen in einer mit einer Funkenstrecke verbundenen Drahtrolle sind von Tesla zur Erzeugung von Wechselströmen enorm hoher Frequenz und Spannung benutzt worden. Zu ihrer Demonstration sind Apparate von HIMSTEDT (mit Ölisolation) und von ELSTER und GEITEL (ohne Ölisolation) angegeben.¹⁾ Daß bei diesen Versuchen zwischen primärer Spule (Selbstinduktion) und sekundärer Spule ebenfalls eine Abstimmung vorhanden sein muß, wenn kräftige Wirkungen erzielt werden sollen, läßt sich bei veränderlich angeordneter Selbstinduktion leicht zeigen. Unter den zahlreichen Versuchen ist am bemerkenswertesten der Impedanzversuch, der auf dem durch Selbstinduktion stark vermehrten Widerstand eines metallischen Leiters beruht. Daß hierbei die Erzeugung des magnetischen Kraftfeldes von der Größe der vom Wechselstrom umflossenen Fläche abhängt, wird sehr schön durch Versuche von EYKMANN (Z. U. XVI 29)

1) Über die Versuche vgl. ROSENBERG II 380, WEINHOLD, D. 928; ELSTER und GEITEL in Z. U. IX 139, X 57; über einen selbst herstellbaren Hochspannungstransformator GRIMSEHL Z. U. XIII 92; über eine von demselben herührende Anordnung mit veränderlicher Selbstinduktion Z. U. XXI 5.

und von L. KANN (Z. U. XX 247, ROSENBERG II 381) dargetan. Für den Nachweis, daß die Teslaströme hauptsächlich nur an der Oberfläche des Leiters sich bewegen, hat ZILLICH (Z. U. XX 386) eine Versuchsanordnung angegeben.

Die Lichterscheinungen in elektrodenlosen Vakuumröhren, die man mit Teslaströmen zu zeigen pflegt, weisen schon auf die Ausbreitung der Schwingungen durch den Raum hin. Ehe man zu diesen übergeht, wird aber die Ausbreitung in ein angeschlossenes Leitersystem hinein zu betrachten sein.

6. Die Schwingungen eines Schwingungskreises können durch direkte (elektrische oder galvanische) Koppelung auf einen angeschlossenen Leiter übertragen werden, diesen also zum Mitschwingen veranlassen, wenn dessen Eigenschwingungen mit denen des ersten Kreises übereinstimmen. Dies zeigen die interessanten Versuche mit den SEIBTSchen Spulen (Z. U. XV 352, XVI 60), deren Anordnung von einer von OUDIN (1896) angegebenen nicht wesentlich verschieden ist. Eine Demonstrationsvorrichtung für den gleichen Zweck hat GRIMSEHL (Z. U. XXI 8) beschrieben. Es ist bemerkenswert, daß diese Versuche mit den Bemühungen, geeignete Sender für drahtlose Telegraphie (F. BRAUN, vgl. Z. U. XV 353) zu konstruieren, zusammenhängen.

Auch bei den LECHERSchen Versuchen (ROSENBERG II 405) wurden die Drahtwellen durch direkte (elektrische) Koppelung unter Zwischenschaltung von Luftkondensatoren hervorgerufen. Diese allerdings erst durch die klassischen Entdeckungen von HERTZ veranlaßten Demonstrationsversuche leiten zu den Erscheinungen der Ausbreitung elektrischer Wellen durch den Raum über. Die Anwendung zweier parallel gespannter Drähte erleichtert das Zustandekommen stehender Schwingungen, doch handelt es sich dabei nicht sowohl um die Ausbreitung der elektrischen Schwingungen im Draht, als vielmehr um die periodische Änderung des magnetischen Feldes zwischen den Drähten. Daher liefern auch die an LECHERSchen Drähten gemessenen Wellenlängen denselben Wert der Ausbreitungsgeschwindigkeit, wie die Messungen im freien Raum. Über den Zusammenhang vgl. z. B. GRAETZ E, 296). Über Abänderungen des LECHERSchen Versuchs durch ARONS und durch GRIMSEHL vgl. man ROSENBERG II 406.

7. Nunmehr ist alles vorbereitet für das Verständnis der Entdeckungen von HEINRICH HERTZ über die Ausbreitung der elektrischen Schwingungen im Raum. Zur Demonstration der

Versuche dient heute allgemein der von BRANLY erfundene Kohärer oder Fritter (dessen Wirkungsweise bisher nur mangelhaft erklärt ist), der aber in der drahtlosen Telegraphie schon keine Rolle mehr spielt, da er durch den Wellendetektor ersetzt ist. Über die Versuche vgl. man ROSENBERG II 407, MÜLLER T 333 u. a. Der bei diesen Apparaten nach dem Vorgang von HERTZ benutzte Oszillator hat eine weit geringere Kapazität als die Leidener Flasche, dementsprechend ist die Schwingungsdauer eine sehr viel kleinere. Für die fundamentalste seiner Entdeckungen, den Nachweis der Identität der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen mit der des Lichtes hat HERTZ bekanntlich die Bildung stehender Wellen in einem durch eine Wand begrenzten Raum von 15 m Länge benutzt; die Wellenlänge betrug 9,6 m. Mit Wellen von $\lambda = 8$ bis 9 cm hat V. VON LANG durch Benutzung der Interferenz in einem Gabelrohr die Messung ausgeführt (O. § 149, 4). Doch ist das Verfahren nach einer Mitteilung von FR. C. G. MÜLLER für einen Unterrichtsversuch nicht geeignet.

In der Regel wird man sich mit dem Nachweis der Reflexion und Brechung der elektrischen Wellen, und mit der Vorführung der Gitterversuche, die das Analogon zur Polarisation des Lichtes bilden, begnügen.¹⁾

Die große didaktische Bedeutung dieser Entdeckung liegt ja in der Erschließung der Identität von Lichtwellen und elektrischen Wellen. Eine lehrreiche Übersicht über die Wellenlängen der Ätherschwingungen in den verschiedenen Gebieten hat B. KOLBE²⁾ nach Mitteilungen von P. LEBEDEW zusammengestellt.

8. Die Anwendung der elektrischen Wellen zur drahtlosen Telegraphie bietet in didaktischer Hinsicht keine Schwierigkeiten, soweit nur der Nachweis der Fernwirkung auf den Kohärer bzw. den Wellendetektor in Frage kommt. Hierfür sind zahlreiche Versuchsanordnungen beschrieben worden. Die Theorie der Schwingungskreise und der abgestimmten Telegraphie ohne Draht geht über die Grenzen des Schulunterrichts hinaus. Erwähnt sei, daß K. BANGERT (Z. U. XXI 32) eine Modellstation für Wellentelegraphie angegeben hat, die dem System Telefunken nachgebildet ist.³⁾

9. Anhangsweise möge hier gelegentlich der Beziehungen der Elektrizitätslehre zur Optik noch ein Gebiet erwähnt werden, das mitten in

1) ROSENBERG II 411, WEINHOLD D 953.

2) B. KOLBE, Elektrizitätslehre II (2) S. 184 und 202, vgl. auch POSKE O. § 149.

3) Neuerdings auch G. LEIMBACH, Z. U. XXVII 141 u. a.

die aktuellsten Fragen der heutigen Forschung hineinreicht: die Lumineszenzerscheinungen in Vakuumröhren, für die der Funkeninduktor die geeignetste Elektrizitätsquelle ist. Hier drängen sich Probleme über Probleme auf, im Unterricht muß ein Ausblick auf das ungewein ausgedehnte Gebiet genügen.

Die Änderungen der Erscheinungen mit abnehmendem Druck zeigt man am besten unter Anschluß an eine gute Vakuumpumpe oder mit der von MÜLLER-URI in den Handel gebrachten CROSSschen Vakuumskala. Besonderes Interesse beanspruchen die Kathodenstrahlen, die zur Besprechung der Elektronen führen. Im Unterricht schon bei den vorhergehenden Abschnitten von der Elektronentheorie Gebrauch zu machen, wie manche Lehrbücher bereits angefangen haben, empfiehlt sich bei der Neuheit der Sache nicht, wohl aber an dieser Stelle (wie auch in § 47) ein Blick auf die neuen Erklärungsmöglichkeiten, die sich damit eröffnen.

Auch die Röntgenstrahlen als sekundäre Wirkung der Kathodenstrahlen schließen sich hier an, die Ionisation der Luft durch die Röntgenstrahlen, die mittelst der Entladung eines Elektroskops sichtbar gemacht wird, leitet endlich zu der Wunderwelt der radioaktiven Stoffe über, von denen eine Vorstellung etwa durch ein Spinthariskop zu geben trotz der schwierigen, nur durch Einzelbeobachtung im Dunkeln möglichen Demonstration wünschenswert ist.¹⁾

Hiermit zusammenhängende Hinweise auf die neuesten Forschungen bilden den passenden Abschluß dieses ganzen Abschnittes und der Elektrizitätslehre überhaupt und zugleich ein typisches Beispiel wissenschaftlicher Hypothesenbildung.²⁾

F. Zur Himmelskunde.

§ 51. Die Stellung der Himmelskunde innerhalb des physikalischen Unterrichts.

Über die Stellung der Himmelskunde in der gesamten Organisation des realistischen Unterrichts hat sich HÖFLER in Band II dieser Handbücher ausführlich ausgesprochen. Er befürwortet dort eine durch alle Klassen fortgesetzte Pflege der Himmelsbeobachtungen und eine dementsprechend fortschreitende Steigerung der Einsicht in die gesetzmäßigen Zusammenhänge der Himmelserscheinungen. Solche astronomischen Belehrungen will er in den untersten Klassen teils mit der Geographie, teils mit

1) Über die experimentelle Behandlung des ganzen Lumineszenzgebietes vgl. ROSENBERG II 383 ff.

2) Eine vortreffliche Übersicht über Ionentheorie, Radioaktivität und Elektronen gibt unter diesem Gesichtspunkte HÖFLER in seiner Naturlehre für die Oberstufe, 2. Aufl., Anhang S. 414–427.

der Physik, in den Mittelklassen (V und VI der österreichischen Gymnasien) mit der Mathematik verknüpft wissen. Auf der Oberstufe will er die Himmelskunde wieder in nähere Beziehung zur Physik setzen, derart, daß sie einen integrierenden Bestandteil des Unterrichts in der Mechanik (VII. Jahrgang) und in der Optik (VIII. Jahrgang) bildet. Ihm erscheint die NEWTONSche Mechanik ihrer Entstehung nach so eng mit der Gravitationslehre verknüpft, daß er insbesondere den fundamentalen Gegensatz von Phoronomie und Dynamik durch den analogen Gegensatz der rein phoronomischen Astronomie vor NEWTON und der Gravitationsmechanik seit NEWTON illustriert zu sehen wünscht. Man findet diesen Plan durchgeführt sowohl in HÖFLERS Physik als in dessen „Naturlehre für die Oberstufe“¹⁾, er schließt sich übrigens auch eng an die österreichischen Lehrpläne für Gymnasien an, die allerdings auf der VII. Klasse die Zentralbewegung, KEPLERSche Gesetze, NEWTONS Gravitationsgesetz usw. an das Ende der Geomechanik setzen; HÖFLER dagegen schiebt zwei Paragraphen über irdische und allgemeine Gravitation sofort hinter der Behandlung der Kräfte bei Zentralbewegungen ein, hierbei gelangen auch die KEPLERSchen Gesetze und das NEWTONSche Gesetz gleich mit zur Besprechung.

Ich habe mich nicht überzeugen können, daß diese an sich überaus sinnvolle Einordnung auch an unsere reichsdeutschen Schulen übertragbar ist.²⁾ Bei dem gänzlichen Mangel an astronomischer Vorbildung, der selbst bei den Schülern der obersten Klassen die Regel ist, lassen sich die zu einem solchen Vorgehen erforderlichen Vorbegriffe nicht im Laufe einiger Wochen in die Köpfe hineinbringen, es bedarf dazu einer völligen Neufundamentierung; eine solche würde aber wieder den Aufbau der eigentlichen Mechanik in recht störender Weise unterbrechen und überdies die dieser zugemessene Zeit unverhältnismäßig verkürzen. Selbst HÖFLER muß unter Voraussetzung der von ihm befürworteten, durch Jahre fortgesetzten astronomischen Anleitungen noch damit rechnen, daß das, was bis zur Heranführung der Schüler an die Gravitationslehre erforderlich ist, einen Zeitaufwand von drei bis vier Wochen erfordert (a. a. O. S. 292), eine ebenso lange Zeit würde zur Behandlung dieser Lehre selbst er-

1) Man sehe auch A. HÖFLER, Entwurf zu künftigen physikalischen Lehrplänen für Mittelschulen, Z. U. XXII 215.

2) Hierzu das Nachwort von A. HÖFLER, S. 407.

forderlich sein, wenn sie in dem von HÖFLER vorgeschlagenen Umfange vorgenommen werden soll. Da den vier Wochenstunden der österreichischen VII. Klasse nur zwei Wochenstunden in unserer Unterprima, bzw. Obersekunda, gegenüber stehen, so würde für die Himmelskunde allein nahezu ein volles Semester erforderlich werden, jedenfalls ein zu großer Zeitraum, als daß dafür noch innerhalb des Kursus der Mechanik Platz zu finden wäre. Ich bin aber auch nicht der Meinung, daß in die erste Einführung in die Mechanik die kosmischen Erweiterungen notwendig hineingehören. Allerdings ist bei NEWTON die Darstellung mehrfach mit Hinweisen auf die kosmischen Vorgänge durchsetzt, aber späterhin hat sich die Mechanik davon soweit freigemacht, daß eine Anknüpfung an jene Vorgänge an keiner Stelle unumgänglich erfordert ist.

Vor allem aber scheint es mir der Würde und Größe des Gegenstandes mehr zu entsprechen, wenn man die „Himmelsmechanik“ nicht als einen Bestandteil des Systems der Mechanik, sondern als ein besonderes Anwendungsgebiet der Mechanik behandelt, auf dem die Gültigkeit der Gesetze der irdischen Mechanik für das Weltall dargelegt wird. Kann es eine großartigere Aufgabe geben? Und hat nicht gerade dieser Umstand der NEWTONSchen Mechanik im Zeitalter VOLTAIRES einen so ungeheuren Einfluß auf die Gemüter verschafft? Was GALILEI begonnen, als er die Gleichartigkeit der Gestirne mit unserem Weltkörper mutmaßte, das ist durch NEWTON und die an ihn anschließende Entwicklung der Mechanik zu einem glänzenden Triumph der neueren Forschung geworden, der nur noch übertroffen wurde, als die Spektralanalyse auch die Einheit der Welt hinsichtlich ihrer materiellen Beschaffenheit erschloß. Daß die Himmelsmechanik einen didaktischen Höhepunkt bilden soll, spricht auch HÖFLER (a. a. O. S. 305) aus. Es heißt nur diesem Gesichtspunkt Rechnung tragen, wenn man, wie in den preußischen Lehrplänen vorgesehen, die Himmelsmechanik einem abschließenden Kursus in der obersten Klasse zuweist. Für ein solches Herausheben aus der übrigen Physik sprechen auch die anderen von HÖFLER in § 18 seiner Didaktik angeführten Gründe, so der Umstand, daß hier ein besonders eindrucksvolles Beispiel aus der Geschichte der Wissenschaften und zugleich eine wertvolle Aufklärung über die Methodenlehre der Forschung gegeben werden kann. Die schönen

Anleitungen, die HÖFLER in dieser Richtung gibt, sollen auch bei unserer Anordnung ihre volle Gültigkeit behalten.

Zuzugeben ist freilich, daß es ein arger didaktischer Mangel wäre, wenn man auf der obersten Stufe des Unterrichts gleichzeitig die elementarsten Vorbegriffe und die feinere theoretische Durcharbeitung darbieten wollte, wie es an der Hand der preussischen Lehrpläne nicht selten der Fall gewesen sein mag. Hier ist aufs dringendste zu wünschen, daß HÖFLERS wohlervogene Vorschläge zu einer allmählich aus eigener Anschauung erworbenen Kenntnis der Himmelserscheinungen verwirklicht würden. Ferner wird auch auf der Oberstufe die Mathematik einen Teil der erforderlichen Vorbereitung übernehmen können. Es ist schon bei den heute in Preußen geltenden Lehrplänen durchführbar, daß an der Stelle, wo die Grundlehren der sphärischen Trigonometrie behandelt werden, also in UI, ein repetitorischer Kursus der Astronomie eingeschaltet wird, in dem alles, was sich auf die geozentrischen Bewegungen der Himmelskörper (O. § 151–157) bezieht, in zusammenfassender Form zur Sprache kommen kann. Für den abschließenden Kursus bliebe dann das kopernikanische Weltsystem, die NEWTONSche Gravitationsmechanik und die physische Beschaffenheit der Weltkörper (O. § 158–170) übrig. Was endlich HÖFLER in § 22 seiner Didaktik über die „Astronomie fürs Leben“ sagt, sei auch an dieser Stelle der Beachtung des über sein Fach hinausblickenden Lehrers empfohlen.

In betreff der Einzelheiten sei auf HÖFLERS Werk verwiesen, sowie auf des Verfassers Oberstufe der Naturlehre. Nur über die Stellung des Gravitationspotentials mögen noch einige Bemerkungen Platz finden. Die Meraner Lehrpläne (s. Teil IV) haben diesen Gegenstand zusammen mit dem NEWTONSchen Gesetz der Oberprima zugewiesen. Im systematischen Gang der Mechanik würde er an einer früheren Stelle, im Anschluß an den Arbeits- und Energiebegriff, zu stehen kommen. Mir scheinen indes die Meraner Pläne das Richtige getroffen zu haben. Das Gravitationspotential stellt eine so weitgehende Verallgemeinerung dar, daß man im Anfang der Mechanik damit noch nicht viel machen kann. Auf der obersten Stufe dagegen bietet sich sofort die Möglichkeit, mit Hilfe dieses Begriffs und des Energiesatzes die KEPLERSchen Gesetze aus den NEWTONSchen abzuleiten (HÖFLER P., Leitaufgabe 63). Mit dem Nachweis, daß die Form der Planetenbahnen die eines Kegelschnitts und zwar je nach den besonderen Bedingungen eine Parabel, Ellipse oder Hyperbel ist, dürfte das Äußerste an zusammenfassender

Erkenntnis erreicht sein, bis wohin der Unterricht auf diesem Gebiet zu führen vermag.¹⁾

Bei dieser späten Ansetzung des Gravitationspotentials begibt man sich freilich der Möglichkeit, das magnetische und elektrische Potential von vornherein als Analogieen zu dem ersteren aufzufassen. Aber es ist methodisch ebenso berechtigt, den Begriff des Kraftfeldes erst an den magnetischen und elektrischen Erscheinungen zu entwickeln, um dann gleichsam das Urbild dieser Spezialgebilde in dem Begriff des Gravitationsfeldes zu erkennen.

Nachwort von A. Höfler zu § 51.

Wenn an den „reichsdeutschen Schulen ein gänzlicher Mangel an astronomischer Vorbildung . . . selbst bei den Schülern der obersten Klassen die Regel ist“, so liegt hierin allein schon eine mehr als volle Bestätigung dessen, was uns zur Aufnahme eines eigenen Bandes „Didaktik der Himmelskunde und astronomischen Geographie“ in den Rahmen unserer „Didaktischen Handbücher für den realistischen Unterricht“ veranlaßt hat. Einig sind wir ja darüber, daß solcher „gänzlicher Mangel“, unverblümt gesagt, eine Schande für jedes System eines realistischen Unterrichtes ist und daß, um einen so grellen Mißstand zu beheben, man das Übel an der Wurzel anfassen muß: also schon in den untersten Klassen, in denen man nicht den Kindern vom Kopernikanischen System vorreden darf, sondern sie vor allem die wechselnden Sonnenstände muß sehen und ihre Wirkung für Beleuchtung und Erwärmung der Heimat muß verstehen lehren; was ohne Frage bei weitem leichter und zugleich nützlicher ist als jenes dogmatische Gerede von „wirklichen Bewegungen“.

Die Meinungsverschiedenheit zwischen POSKE und mir bezieht sich also überhaupt nicht auf alle übrigen Jahrgänge, sondern nur auf den obersten. Sollte es bei der durch POSKE befürworteten Beibehaltung der bisherigen Anordnung möglich sein, nicht erst „auf der obersten Stufe des Unterrichtes gleichzeitig die elementarsten Vorbegriffe und die feinere theoretische Durcharbeitung darbieten“ zu müssen, so mögen der didaktische Versuch und Gegenversuch durchgeführt werden, ob die Behebung des bisher üblich gewesenen „argen didaktischen Mangels“ besser in der bisherigen reichsdeutschen oder in der von HÖFLER für die österreichischen Schulen durchgesetzten Anordnung gelingt.

Differierend bleiben allerdings auch dann noch die Ansichten über

1) Über die Ableitung des NEWTONSchen Gesetzes aus den KEPLERSchen vgl. HÖFLER, Z. U. V 70, SCHÜLKE, Z. U. VI 149; über die umgekehrte Ableitung der KEPLERSchen Gesetze aus dem NEWTONSchen H. PÜNING, Z. U. IX 26, 111, 311; H. TEEGE, Z. U. XXIII 207, XXIV 287; P. KIRCHBERGER, Z. U. XXIV 23.

die richtigste Stelle des NEWTONSchen Anziehungsgesetzes. HÖFLER will die Eingliederung schon in die ersten Teile der Mechanik, weil u. a. auch das Auseinandertreten der Begriffe „Gewicht“ und „Masse“ erst durch diesen Schritt von GALILEI zu NEWTON geschichtlich möglich geworden und auch im ersten wissenschaftlichen Mechanikunterricht recht drastisch zu machen ist.

Mögen also verschiedene Rücksichten auf die bisher in Preußen übliche Stundenverteilung für nicht so tiefgehende Neuerungen in der Verteilung der Himmelskunde sprechen, wie sie jetzt in Österreich angeordnet sind, so würde dies nur ein Grund mehr sein, daß jene Verteilung an den preußischen Schulen sich der österreichischen anzunähern hätte, wie es z. B. die preußischen Lehrpläne 1891 an die österreichischen von 1849 getan hatten. — Es sei aber als für das alte Thema von Ideal und Wirklichkeit auch in Didaktik, zumal der astronomischen, nicht uninteressant mitgeteilt, daß auch in Österreich die 1908 und 1909 verordneten Lehrpläne noch immer nicht allgemein den Weg aus der gedruckten Verordnung in die Praxis der Schulzimmer gefunden haben. Zwar wird die Beschränkung der einst so sehr gefürchteten und verhaßten „mathematischen Geographie“ in den zwei untersten Klassen des Geographieunterrichtes auf die Behandlung der Sonnenstände über dem eigenen und über fremden Horizonten schon recht allgemein als eine große didaktische Wohltat begrüßt und ausgeübt. Aber mit dem wirklichen Beobachten des Mondes und des Fixsternhimmels auf der Unterstufe des Physikunterrichtes der nächsten Jahrgänge geben sich immer nur erst noch diejenigen wenigen Lehrer (auch Schulinspektoren) ab, die selbst angeleitet und gewöhnt worden waren, solche Blicke zum Himmel hinaufzutun. Eben weil diese altererbten Mängel an den Lebensnerv eines wirklichen Anschauungsunterrichtes rühren, sind sie nicht durch das bloße Verordnen neuer Lehrpläne zu beheben. Wie tief aber diese Krankheit sitzt, nicht nur in den Unterlassungen unseres realistischen Unterrichtes, sondern in den unnatürlichen Lebensbedingungen des Großstädtlers, schildern drastisch die folgenden Worte von UEXKÜLL in seinen „Bausteine zu einer biologischen Weltanschauung“ (erschienen 1913, gleichzeitig mit unserem Band II „Didaktik der Himmelskunde“, in dem auf S. 10 verwandte Klagen des Kulturhistorikers JAKOB BURCKHARDT wiedergegeben sind):

„Am schlimmsten haben die Astropomen mit ihrer Popularisierungswut gehaust. Was ist aus den heiligen Sternen geworden, aus deren Gang der Chaldäer das Geheimnis der Zukunft erriet und aus deren stillem Rhythmus Pythagoras die Sphären-Harmonie erlauschte? — Eine völlig gleichgültige Gesellschaft leuchtender Massenteile, deren Licht so und so viele Hunderte von Jahren, Monaten und Wochen braucht, um bis zu uns zu gelangen. Es sind Objekte geworden, die sich in völlig

sinnloser Weise um uns drehen. Sinnlos deshalb, weil nur die Beziehungen zum Subjekt den Dingen irgendwelchen Sinn verleihen.

Einen Sinn haben die großen astronomischen Entdeckungen nur für denjenigen, der Schritt für Schritt durch eine eigene Beobachtung zu ihnen hingelenkt wird. Nur derjenige, dessen Wissensdurst und Phantasie unbefriedigt bleibt von dem ästhetischen Eindruck stiller Erhabenheit, den der Sternenhimmel bietet, der aus den Grenzen der gegebenen Anschauung hinausdrängt, ist fähig und auch würdig, die Geheimnisse des Himmels kennen zu lernen. Für den Normalmenschen aber, in dessen Merkwelt sich niemals die Planeten von der großen Fixsternebene losgetrennt haben, um einsam und frei im leeren Raum ihre unsichtbare Straße zu ziehen — für ihn werden alle astronomischen Entdeckungen nichts sein als unverständliche Rechenexempel, die er unbesehen glaubt, weil sie ihm nicht das geringste Interesse abnötigen.

Das einzige, was man durch Popularisierung der Himmelskunde bei den meisten Menschen erreicht, ist ein verständnisloses Hinstarren auf diese hellen Punkte, die man berechnen kann.

Dadurch hat man eine Quelle der reinsten und erhabensten Gefühle, die wir Menschen besitzen, zum Versiegen gebracht, — denn der Sternenhimmel ist den meisten Menschen zu einer greulichen verworrenen Rechenmaschine geworden, die ihnen einfach ekelhaft ist.“

Dieses höchst beklagenswerte Resultat wird von einigen Fanatikern noch als großer Erfolg gepriesen. So rief der französische Arbeitsminister VIVIANI begeistert aus: „*Avec un geste magnifique nous avons éteint tous les astres du ciel!*“

Die „Himmelslichter auslöschen“ — ein „magnifiques“ Programm der „tristen atheistischen Halbnacht“, von der wir GOETHE sprechen hörten zu Ende unserer „Didaktik der Himmelskunde“ (S. 340). Es darf uns in diesen gewaltigen und gewaltsamen Tagen (Ende 1914) interessieren, daß VIVIANI nun als Ministerpräsident Frankreichs alle öffentlichen Gebete verboten hat, während unser Kaiser Wilhelm seine Deutschen Gott danken heißt. . . Wird es einer Didaktik der Himmelskunde zusammen mit einer der Physik noch gelingen, Augen und Herzen wieder zu erheben zu den „heiligen Sternen“?

Vierter Teil.

Die Gestaltung des Lehrplans.

§ 52. Die Stellung der Physik im Ganzen des naturwissenschaftlichen Unterrichts.

Schon in den vorausgehenden Abschnitten ist mehrfach das Verhältnis der Physik zu den übrigen Naturwissenschaften berührt worden. Wenn dort die didaktischen Beziehungen im Vordergrund standen, so handelt es sich hier um die Frage der gesamten Organisation des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Es ist ein oft beklagter Mißstand, daß die einzelnen naturwissenschaftlichen Fächer zumeist unvermittelt nebeneinander stehen und der Regel nach in den Händen verschiedener Lehrer liegen. Der große Gedanke eines durchgängigen Zusammenhangs aller dieser Fächer und die einheitliche Aufgabe des Unterrichts in ihnen kommt dabei oft kaum zum Bewußtsein, geschweige denn zur Geltung.

Auf der Unterstufe erscheint eine Verbindung der verschiedenen naturwissenschaftlichen Fächer am leichtesten durchführbar. Hier ist, wie auch LANDSBERG in seiner Didaktik des botanischen Unterrichts vorschlägt, die Hereinziehung einfacher chemischer und physikalischer Erscheinungen in die Betrachtung der Vorgänge in den lebenden Wesen leicht ausführbar. Die neuen badischen Lehrpläne enthalten bereits eine Vorschrift in derselben Richtung. Hierbei muß indessen vor zwei Abwegen gewarnt werden. Der eine besteht in einer allzu spielerischen Behandlung physikalisch-chemischer Gegenstände, wobei gewisse interessante Einzelversuche vorgeführt werden, ohne daß eine der Unterrichtsstufe angemessene Bearbeitung des Stoffes erfolgt. Vielmehr soll auch bei solcher Gelegenheit vor allem das Nachdenken der Schüler angeregt werden, wofür FARADAYS Naturgeschichte einer Kerze ein oft angeführtes mustergültiges Beispiel ist. Andererseits hat man sich auch vor der Gefahr zu hüten, durch ein buntes Allerlei einer allzu eklektischen Anhäufung von Unter-

richtsstoff Vorschub zu leisten. Der Gedanke der didaktischen Einheit soll auch auf dieser Stufe richtunggebend sein, derart, daß die herangezogenen physikalischen und chemischen Erscheinungen stets auf Probleme Bezug nehmen, die im naturgeschichtlichen Unterrichtsgang selbst auftreten. —

Der erwähnte Mißstand des unvermittelten Nebeneinander fällt auf der Mittelstufe der preußischen Realanstalten besonders grell in die Augen. In O III des Realgymnasiums sollen in zwei Wochenstunden nebeneinander Naturbeschreibung und Physik getrieben werden, entweder jedes mit einer Wochenstunde, oder alternierend je in einem Semester mit zwei Wochenstunden; dabei soll aus der Physik das ganze Gebiet der Mechanik fester, flüssiger und gasförmiger Körper nebst der Wärmelehre zur Bearbeitung gelangen. In U II ist bei vier Wochenstunden der Lehrstoff gar auf die drei Fächer: Naturgeschichte, Physik und Chemie verteilt. Daß die drei Fächer in eine Hand gelegt werden, wird sich nur selten ermöglichen lassen; und selbst dann bleibt ein unerfreuliches Durcheinander heterogener Unterrichtsgebiete bestehen, bei dem kein einzelnes Fach zu seinem Rechte kommt. Und doch liegt ein Ausweg nahe, der auf österreichischen Schulen sich längst als gangbar und zu gutem Ziele führend erwiesen hat. Man lasse das Nebeneinander der Fächer fallen und weise die verfügbare Stundenzahl nur je einem bzw. zwei Fächern zu, also die zwei Stunden in O III ganz der Physik, die vier Stunden in U II ganz der Naturgeschichte und der Chemie. Damit wäre auch die Möglichkeit gegeben, den naturwissenschaftlichen Unterricht jeder Klasse ganz in eine Hand zu legen.

Allerdings wäre der Ausfall, den die Physik bei diesem Vorgehen erfährt, dadurch auszugleichen, daß der Anfang des Physikunterrichts schon nach U III verlegt wird, die Physik also dort an die Stelle der Naturgeschichte tritt. Dieser Vorschlag ist bereits in der Unterrichtskommission der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte gemacht worden, ohne indes dort die Mehrheit der Stimmen für sich zu gewinnen, da man von der Unterbrechung in U II für die Physik nachteilige Folgen befürchtete.¹⁾ Daß diese Gefahr nicht besteht, lehren die Erfahrungen in Österreich, wo sogar eine zweijährige Unterbrechung des Physikunterrichts (in den Klassen V und VI) stattfindet. Mit dem Wiederver-

1) Vgl. A. GUTZMER, Die Tätigkeit usw. S. 117.

lorengehen des Gelernten hat man auch bei dem jetzigen ununterbrochenen Betrieb der Physik zu kämpfen, um so mehr als zwischen der Behandlung desselben Gebiets auf der Unter- und der Oberstufe in der Regel ein Zwischenraum von mehr als einem Jahr liegt. In dieser Hinsicht würde also durch die vorgeschlagene Ordnung nichts Wesentliches geändert werden. Andererseits aber hat es außerordentlich viel für sich, den Physikunterricht schon ein Jahr früher als bisher beginnen zu lassen. Dafür spricht das große Interesse, das heute bereits jüngere Schüler der Physik entgegenbringen, während der Sinn für die Naturgeschichte in den Mittelklassen nachläßt. Auch hier wieder sprechen die Erfahrungen in Österreich, wo die Physik bereits mit dem 13. Lebensjahr einsetzt, für die Einrichtung, die an den Berliner sechsklassigen Realschulen seit vielen Jahren verwirklicht ist und neuerdings auch in die bayerischen Oberrealschulen Eingang gefunden hat (s. § 53).

Daß ein in U III der reichsdeutschen Schulen einsetzender Physikunterricht mit einem propädeutischen Chemiekursus verbunden werden könnte, sei hier nur angedeutet; es würde das der schon für die Unterstufe vorgeschlagenen Verknüpfung der Unterrichtsfächer entsprechen.

Für die Gymnasien einerseits, die Oberrealschulen andererseits würde eine entsprechende Lehrplangestaltung zu entwerfen sein, worauf aber hier nicht näher eingegangen werden soll. —

Für die Oberstufe der Realanstalten hat A. MAURER¹⁾ Vorschläge gemacht, die völlig in die im Vorhergehenden gekennzeichnete Richtung fallen. Er empfiehlt, aus den drei Stunden Physik und drei Stunden Chemie (der Oberrealschule) sechs Stunden Naturlehre zu machen, d. h. also, diesen Unterricht in eine Hand zu legen und ihn damit gleichzeitig als ein Hauptfach zu qualifizieren. Dazu gehört allerdings, daß die Verbindung der Lehrbefähigungen für Physik und Chemie in einer Hand häufiger stattfindet, als es zurzeit unter dem Einfluß der herrschenden Prüfungsordnungen vorkommt. Der Regel nach ist heute die Physik mit der Mathematik verbunden und auch die Vorschläge der „Unterrichtskommission“²⁾ haben dieser Verbindung Vorschub

1) Die Notwendigkeit einer besseren Ausgestaltung des naturwissenschaftlichen Unterrichts an höheren Schulen, mit besonderer Rücksicht auf die Physik. *Natur und Schule* V (1906), 377.

2) A. GUTZMER, *Die Tätigkeit* usw. 275, 288, 293.

geleistet; doch ist von dieser Kommission bereits anerkannt worden, daß auch die Verbindung Physik—Chemie gewisse Vorzüge habe; es könne nicht zweifelhaft sein, daß Physik und Chemie nur zwei Seiten eines im Grunde einheitlichen Gegenstandes vorstellen, es scheine daher sehr erwünscht, daß es Kandidaten gibt, welche ihre mathematisch-physikalischen Studien nach der chemischen Seite – oder auch umgekehrt ihre chemisch-biologischen Studien nach der physikalischen Seite hin – eingehend vervollständigen. Ein Bedürfnis nach derartig vorgebildeten Kandidaten habe sich insbesondere an größeren Anstalten herausgestellt.

Soll indessen hier wirklich ein Wandel geschehen, so muß noch entschiedener mit der traditionellen Verknüpfung von Physik und Mathematik gebrochen werden. Wie A. MAURER ausführt, ist diese Verbindung der Physik nicht zum Segen geworden. Das deduktive Denken des Mathematikers hat dem induktiven des Physikers geschadet. „Der Lehrbuchphysiker freut sich am meisten, wenn er deduktiv verfahren, wenn er beweisen kann. Das Wesen der Physik als einer Erfahrungswissenschaft wird damit verdunkelt und ihr Bildungswert beeinträchtigt. Und die Chemie ist dabei auch nicht gut gefahren; sie ist vielfach aufgegangen in rein technischen Dingen oder in einem Mosaik von Einzelheiten und hat es versäumt, die großen Ideen herauszukehren, wie sie gerade in der Chemie auf Grund der Tatsachen entstanden sind. Die BOYLE, DALTON, DAVY waren Chemiker und Physiker in einer Person.“¹⁾

Erst wenn solche Lehrkräfte, die Physik und Chemie zugleich beherrschen, in größerer Zahl zur Verfügung stehen; wird sich der Gedanke von A. MAURER, dem ich durchaus beistimme, verwirklichen lassen. Neben der Naturlehre müßte dann noch eine angemessene Zahl von Lehrstunden für die Naturgeschichte angesetzt werden, die, wenn möglich, in derselben Hand liegen sollten, wie die Naturlehre.

An den Gymnasien wird es freilich bei der herkömmlichen Verbindung von Mathematik und Physik sein Bewenden haben; immerhin könnte darauf geachtet werden, daß an Gymnasien vorwiegend solche Mathematiker angestellt würden, denen die Physik nicht bloß angewandte Mathematik, sondern wirkliche Naturwissenschaft ist, während die „reinen“ Mathematiker mehr an den Realanstalten ihr Tätigkeitsfeld suchen sollten.

1) A. MAURER, a. a. O. S. 384.

In betreff des Lehrplans der österreichischen Mittelschulen enthalte ich mich des eigenen Urteils und verweise auf das, was HÖFLER in Z. U. XXII 215 und an anderen Stellen dargelegt hat.

§ 53. Lehrpläne.

Bei der Mannigfaltigkeit der Lehrpläne schon innerhalb des reichsdeutschen Gebiets ist ein Eingehen auf die Einzelheiten der Lehrpläne hier nicht angängig. Ich beschränke mich darauf, zwei Lehrpläne mitzuteilen, auf die in neuerer Zeit besonders oft Bezug genommen worden ist, nämlich den Lehrplan der Unterrichtskommission der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte (Meraner Lehrplan) vom Jahre 1905 und den Lehrplan für die bayerischen Oberrealschulen vom Jahre 1907.

Der Meraner Lehrplan für Physik will, ebenso wie die anderen Lehrpläne der Unterrichtskommission, nur als ein Beispiel gelten, durch das hauptsächlich der Umfang des zu behandelnden Stoffes gekennzeichnet werden soll. Dagegen sollte hinsichtlich der Anordnung im einzelnen, die von besonderen didaktischen Erwägungen und Rücksichten abhängig bleibt, keine Vorschrift gegeben werden. Dementsprechend ist auch in der vorliegenden Didaktik, bei prinzipiellem Anschluß an den Meraner Lehrplan, doch in der Anordnung vielfach von diesem abgewichen worden. Nur auf einen Punkt, der in den vorhergehenden Abschnitten noch nicht berührt worden ist, soll hier noch eingegangen werden; dies ist die Stellung der Mechanik auf der Oberstufe. An den Realanstalten wird es angängig sein, gemäß dem Meraner Lehrplan den Anfang der Mechanik in die O II zu verlegen. An den Gymnasien dürfte auf dieser Stufe die mathematische Vorbildung der Schüler zumeist noch nicht soweit gediehen sein, daß man die Elemente der Mechanik auf Grund des Infinitesimalbegriffs mit Erfolg behandeln kann. In diesem Falle wird es ratsam sein, den Beginn der Mechanik auf U I zu verschieben, und dafür nach O II neben der Wärmelehre die Akustik und den ersten Teil der Optik zu legen. Das Nötigste über den Arbeits- und Energiebegriff, soweit es nicht schon auf der Unterstufe erledigt ist, würde dann dem Kursus der Wärmelehre einzufügen sein, damit diese bereits unter dem Gesichtspunkte des Energiebegriffs behandelt werden kann. —

Der bayerische Lehrplan für Oberrealschulen ist dadurch gekennzeichnet, daß in ihn durchweg Schülerübungen nach

den Vorschlägen von K. T. FISCHER eingeordnet sind. Diejenigen Gegenstände, bei denen Schülerübungen angezeigt erscheinen, sind in dem nachfolgenden Abdruck des Originaltextes mit einem Sternchen * bezeichnet. Auch mit diesem Lehrplan ist indessen das Ideal eines physikalischen Lehrplans noch keineswegs verwirklicht. Um nur eins hervorzuheben, so ist es sehr anfechtbar, daß die Mechanik der Bewegung an den Schluß des Physikunterrichts in O I gestellt ist. Hier dürfte mehr die Tradition als sachliche Beweggründe im Spiel gewesen sein.

1. Meraner Lehrplan.

A. Unterstufe.

Erstes Jahr.

Einleitendes über die Aggregatzustände und einige Erscheinungen der Schwere. — Aus der Mechanik fester Körper: Bewegungsercheinungen, Fall auf der schiefen Ebene und freier Fall. Die Kräfte als Ursachen von Bewegungen und von Druck oder Zug. Zusammensetzung und Zerlegung von Bewegungen und von Kräften. Der mechanische Zusammenhang der Körper (Festigkeit, Elastizität, Kohäsion). Vorrichtungen für mechanische Kraftübertragung (Rolle, Flaschenzug, Hebel usw.) Lehre vom Schwerpunkt, einiges über Wage und Pendel.

Aus der Mechanik flüssiger Körper: Die Gesetze des hydrostatischen Druckes; hydraulische Presse, kommunizierende Gefäße. Archimedisches Prinzip, Bestimmung des spezifischen Gewichts, das Schwimmen.

Aus der Mechanik gasförmiger Körper: Die Luftpumpe; der Luftdruck und seine Größe; das Barometer. Die Spannkraft der Luft. Gewichtsverlust und Auftrieb in der Luft; der Luftballon.

Aus der Wärmelehre: Wärmezustand und Wärmemenge; Thermometer. Ausdehnung fester, flüssiger und gasförmiger Körper durch die Wärme. Schmelzen und Erstarren, Verdampfen, Sieden und Kondensieren; Prinzip der Dampfmaschine. Ausbreitung der Wärme durch Leitung, Strömung und Strahlung. Quellen der Wärme.

Zweites Jahr.

Vom Magnetismus: Grundgesetze der magnetischen Erscheinungen (Magnetpole, magnetische Verteilung, magnetisches Kraftfeld). Der Kompaß. Magnetisierung durch das magnetische Kraftfeld der Erde.

Aus der Elektrizitätslehre: Elektrische Körper, Elektrisierung durch Mitteilung; gute und schlechte Leiter. Elektrisierungsgrad und Ladungsmenge; Elektrometer. Die Reibungs-Elektrisierungsmaschine. Sitz der Ladung an der Oberfläche der Leiter; elektrische Influenz; Spitzen-

wirkung; Leidener Flasche, Influenz-Elektriermaschine. Wirkungen der Entladung. Elektrische Erscheinungen in der Atmosphäre. — Das galvanische Element; der elektrische Strom, seine Wärme-, Licht-, physiologischen und chemischen Wirkungen. Die magnetischen Wirkungen des Stroms, Elektromagnetismus; elektrische Klingel, MORSE-Telegraph, Mikrophon und Telephon.

Aus der Akustik: Erregung des Schalles; Schwingungen von Saiten, Stäben, Platten und Pfeifen. Das menschliche Stimmorgan. Ausbreitung und Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles; Reflexion; Resonanz und Mittönen; das Einfachste vom Bau des Ohres und vom Hören.

Aus der Optik: Licht und Lichtstrahlen, Dunkelkammer ohne Linse; Schatten; Beleuchtungsstärke. Reflexion an ebenen Spiegeln. Brechung des Lichts an einer ebenen Fläche. Durchgang des Lichts durch Platten und Prismen. Bilder an Sammellinsen. Wirkung der Zerstreuungslinsen. Das Einfachste vom Bau des Auges und vom Sehen; Akkommodation; Sehwinkel.

(Aus der Astronomie: Elementarste Begriffe der astronomischen Geographie im Anschluß an die eigene Anschauung der Schüler; die Bewegungen von Sonne und Mond in bezug auf die Erde und auf den Fixsternhimmel; erste orientierende Einführung in die Kopernikanische Lehre.)

B. Oberstufe.

Erstes Jahr (O II).

Mechanik: Phoronomie des Punktes: Geschwindigkeit, Beschleunigung; Bewegung freifallender und geworfener Körper; Zentripetalbeschleunigung. — Dynamik des Punktes: Kräfte und Massen; Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften mit gemeinsamem Angriffspunkt; Anwendung auf die schiefe Ebene und die zwängläufige Bewegung in krummliniger Bahn (Zentrifugalkraft). Mechanische Arbeit und lebendige Kraft. Verwandlung und Erhaltung mechanischer Energien. — Mechanik starrer Systeme: Schwerpunkt; Kraftmoment; Arbeit an starren Systemen. — Hydro- und Aero-Mechanik: Vertiefung des Pensums der Unterstufe. BOYLESCHES GEsETZ. Dichteverteilung in hohen Gassäulen; Bewegungserscheinungen bei Flüssigkeiten und Gasen. — Mechanik der Molekularwirkungen, insbesondere Kapillarerscheinungen und Diffusion.

Wärmelehre: Wärmegrad, Thermometrie; Wärmemenge, spezifische Wärme. — Gesetz von BOYLE-GAY LUSSAC. Schmelzen und Sieden; Dämpfe und Gase; kritischer Punkt. — Mechanisches Äquivalent der Wärme. Dampfmaschine und Gaskraftmaschine. — Wärmeausbreitung, Wärmequellen, Wärmevorgänge in der Atmosphäre.

Zweites Jahr (U I).

Mechanik: Kreisbewegung und schwingende Bewegung; das einfache Pendel. — Rotation starrer Systeme; Trägheitsmoment; zusammengesetztes Pendel. — Wellenbewegung in Punktreihen (Seilwellen); Superposition und Reflexion; stehende Wellen. Wellenausbreitung nach zwei und drei Dimensionen. Kugelwellen und ebene Wellen, HUYGENSSches Prinzip.

Akustik: Die physikalischen Grundlagen der Musik; Zusammenhang von Tonhöhe und Schwingungszahl; Gesetze schwingender Saiten, Stäbe und Platten; Klangfarbe und Teiltöne. Die Ausbreitung des Schalls nach der Wellentheorie; Geschwindigkeit, Reflexion und Brechung, Beugung und Interferenz des Schalls. Schwingungen von Luftsäulen; Mittönen und Resonanz. Bau und Funktion des Gehörorgans.

Optik: Wiederholung der Gesetze der Reflexion und Brechung, Anwendung auf sphärische Spiegel und Linsen, Bau und Leistung des Auges, optische Instrumente. — Das Spektrum; optische, thermische und chemische Wirkung der Strahlen, Körperfarben und Absorption. — Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes, Abnahme der Lichtstärke mit der Entfernung, Photometrie. — Elemente der Wellentheorie des Lichts; Beugung und Interferenz des Lichts. Erklärung der Reflexion und Brechung aus der Wellentheorie; Wellenlängen und Schwingungszahlen der verschiedenen Strahlengattungen. — Emission und Absorption des Lichts, Spektralanalyse, Phosphoreszenz und Fluoreszenz. — Einige Erscheinungen der Polarisierung des Lichts. — Wärmestrahlung. Zusammenfassung der Strahlungserscheinungen.

Drittes Jahr (O I).

Magnetik und Elektrik: COULOMBS Gesetz für magnetische Kräfte; magnetisches Potential und Kraftlinien; das magnetische Kraftfeld der Erde; absolute magnetische Maße. — COULOMBS Gesetz für elektrische Kräfte; elektrisches Potential, Ladungsmenge und Kapazität; Potential und elektrischer Strom. — Wirkung von Strömen auf Magnete: elektromagnetisches Maß der Stromstärke; das OHMSche Gesetz. — Stromarbeit und Wärme: kalorische Maß der Stromstärke. — Chemische Arbeit des Stroms: chemisches Maß der Stromstärke. — Magneto- und Elektro-Induktion; Maßbestimmungen für Induktionsströme; Generatoren für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom; Kraftübertragung. — Beziehungen zwischen Elektrizität und Licht: Kathodenstrahlen und Röntgenstrahlen. Elektrische Wellen. Drahtlose Telegraphie.

Kosmische Mechanik: KEPLERSche Gesetze, NEWTONS Gravitationsgesetz und das Gravitationspotential; Rotation der Weltkörper, FOUCAULTS Pendelversuch, Präzession der Nachtgleichen; physikalische Eigenschaften der Weltkörper; Weltbildungshypothesen.

Zusammenfassender Rückblick auf die Gesamtheit der physikalischen Erscheinungen unter dem Gesichtspunkt der Energieverwandlung.

2. Der Lehrplan der bayerischen Oberrealschulen.

A. Unterstufe. Klasse IV–VI.

IV. Klasse (3 Stunden wöchentlich).

Beobachtungstatsachen und Ordnungselemente der Wärmelehre (Temperatur und Wärmemenge): Der Siedepunkt des Thermometers.* Verdampfen und Kondensieren von Wasser. Ausdehnung der Körper durch die Wärme (feste Körper, Flüssigkeiten, Gase). Der Schmelzpunkt.* Spezifische Wärme.* Verbrennungswärme. Flamme.* Flammengase.

Elemente der Mechanik der Ruhe (Länge, Kraft, Arbeit): Messung von Längen, Flächen und Körperinhalten.* Die Federwaage zur Einführung des Kraftbegriffes.* Das spezifische Gewicht.* Parallelogramm der Kräfte.* Schiefe Ebene. Keil. Stabiles, labiles und indifferentes Gleichgewicht. Der Hebel.* Die Waage. Die feste und bewegliche Rolle.* Drehmoment. Arbeitsbegriff. Goldene Regel der Mechanik.

Elemente der Zeitmessung: Das Fadenpendel, Einfluß der Amplitude, der Länge und des Materials.*

Kräftegleichgewicht in Flüssigkeiten und Gasen. Elastizität: Die Druckfortpflanzung in Flüssigkeiten und Gasen. Der Druckbegriff. Bodendruck. Kommunizierende Röhren.* Kapillarität.* – Das Barometer. Luftfeuchtigkeit. MARIOTTESches Gesetz.* Luftpumpe. Elastizität fester Körper. Torsionskraft.

Entstehung des Schalles: Lochsirene. Saite. Tonhöhe.

V. Klasse (3 Stunden wöchentlich).

Elektrostatik: Reibungselektrizität, Elektrisiermaschine. Das COULOMBSche Gesetz. Das ODSTRICLSche Pendel. Das Elektroskop.* Elektrische Spannung. Potential. Influenz. Elektrophor.*

Magnetismus: Kompaß. COULOMBSches Gesetz. Magnetische Waage.* Kraftlinien. Erdfeld.*

Galvanismus: Galvanisches Element. Strömende Elektrizität, ihre Äußerung im Voltmeter (Elektrolyse, Galvanoplastik), durch ihr Magnetfeld (elektrische Klingel, Torsionsgalvanometer), durch die JOULESche Wärme (Glühlampe).* Das Ampère als Stromstärke (mit Voltmeter definiert). Das Ohm als elektrischer Widerstand (mit Quecksilbersäule definiert). OHMSches Gesetz. Das Volt. Substitutionsmethode.* Das Watt. Thermoelektrizität.*

VI. Klasse (3 Stunden wöchentlich).

Elektromagnetische Induktion: Telephon. Mikrofon. Der Elektromotor (im Anschluß an Repetition).

Geometrische Optik: Geradlinige Ausbreitung des Lichtes. Photometrie.* Spiegelung an ebenen Flächen und Hohlspiegeln. Das Brechungsgesetz.* Das Spektrum. Sammell- und Zerstreuungslinsen.* Das Auge. Fernrohr.* Opernglas. Mikroskop.*

Physikalische Vorgänge als Energieumwandlungen betrachtet: Das Licht als Energieform; Überleitung zum Satz von der Erhaltung der Energie. Licht- und Wärmestrahlen.* Verdampfungs- und Schmelzwärme als Beispiele „verborgener Arbeitsvorgänge“. Satz von der Erhaltung der Energie. Der freie Fall und senkrechte Wurf. Das Pendel.

B. Oberstufe. Klasse VII–IX.

VII. Klasse (3 Stunden wöchentlich).

Exaktere Messungen. Die physikalischen Maßbegriffe und gebräuchlichen Maßeinheiten: Die chemische Wage.* Genaue Bestimmung des spezifischen Gewichts nach verschiedenen Methoden.* – Das Gasthermometer. Wärmeäquivalent. c_p und c_v für Gase. Adiabatische Veränderung eines Gases.* Gasverflüssigung. Messung der Schmelz- und Verdampfungswärme.* Luftfeuchtigkeit.* Kritische Temperatur. – Messung eines magnetischen Kraftfeldes durch Schwingungen (GAUSSsche Methode).*)¹⁾ Definition der elektromotorischen Kraft durch Induktion im cm-gr-sec-Maß. Definition der Stromstärke mit Tangentenbussole.* Das Watt. OHMSches Gesetz.* KIRCHHOFFSches Gesetz.* WHEATSTONESche Brücke.*

VIII. Klasse (3 Stunden wöchentlich).

Gesetze und Anwendungen der elektrostatischen und elektromagnetischen Induktion: Elektrostatische Induktion. Die Influenzmaschine. Dielektrizitätskonstante. Kapazität.* Gesetze der elektromagnetischen Induktion. Das Induktorium. Gasentladungen. Dynamomaschine. Wechselstrom. Selbstinduktion. Elektromotor.

Wellenlehre und Akustik: Allgemeines aus der Wellenlehre. DOPPLERS Prinzip. Longitudinal- und Transversalschwingungen. Resonanz.* KUNDTsche Röhre.* Pfeifen. Die Tonleiter. Das Sprech- und Gehörorgan. Interferenzerscheinungen des Schalles.

Physikalische Optik: Wellentheorie des Lichtes. HUYGHENS Prinzip. Brechungsgesetz theoretisch erklärt. Interferenz- und Beugungserscheinungen.*

1) Da mit Rücksicht auf den mathematischen Lehrplan die Dynamik erst in der IX. Klasse exakt behandelt werden kann, genügt es hier 1 Dyn. als $\frac{1}{980,6}$ Gr. = Gewicht für 45° geogr. Breite, d. i. angenähert das Gewicht eines Milligrammstückchens als Kräfteinheit einzuführen.

IX. Klasse (3 Stunden wöchentlich).

Zusammenhang zwischen Licht und Elektrizität. Polarisation des Lichtes an Glasplatten. HERTZsche Versuche. Prinzip der drahtlosen Telegraphie. Übersicht über die sämtlichen Strahlungsvorgänge der Physik.

Mechanik der Bewegung: Geschwindigkeit. Versuch mit fallender Platte als Schülerversuch.* Beschleunigung.* Die NEWTONSchen Gesetze. Freier Fall. Wurf.* Der Massenbegriff als abgeleiteter Begriff. gr-Gewicht und Dyn. Anwendungen des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte. Gleichförmige Bewegung auf einem Kreis. Das Pendel. Schwingungen von Magnetnadeln. Gravitationsgesetz. Die KEPLERSchen Gesetze.

Der Energiesatz, als Hauptresultat zusammenfassender Betrachtung. Die Hypothese als Mittel der Forschung.

Anhang I.

Literaturübersicht

enthaltend die vollständigen Titel von Werken, die im Text des Buches nur verkürzt angeführt sind.

- A. BERLINER, Lehrbuch der Experimentalphysik in elementarer Darstellung. 2. Aufl. Jena, G. Fischer, 1911.
- FR. BREMER, Leitfaden der Physik für die oberen Klassen der Realanstalten. Leipzig, B. G. Teubner, 1904. (2. Aufl. 1913.)
- W. BUDDE, Physikalische Aufgaben für die oberen Klassen höherer Lehranstalten nebst Lösungen. 4. Aufl. von P. JOHANNESSEN. Braunschweig 1908.
- O. D. CHWOLSON, Lehrbuch der Physik. In 4 Bänden. Braunschweig, Vieweg u. Sohn, 1902ff.
- F. DANNEMANN, Der naturwissenschaftliche Unterricht auf praktisch-heuristischer Grundlage. Hannover, Hahn, 1907.
- F. DINGELDEY, Sammlung von Aufgaben zur Anwendung der Differential- und Integralrechnung. Teil I. Leipzig, B. G. Teubner, 1910.
- E. DÖHRING, Logik und Wissenschaftstheorie. Leipzig, Fues, 1878.
- , Kritische Geschichte der allgemeinen Prinzipien der Mechanik. 3. Aufl. Leipzig, Fues, 1887.
- K. T. FISCHER, Neuere Versuche zur Mechanik der festen und flüssigen Körper. Leipzig, B. G. Teubner, 1902.
- J. FRICKS Physikalische Technik oder Anleitung zu Experimentalvorträgen usw. 7. vollkommen umgearbeitete und stark vermehrte Auflage. 2 Bde. mit je 2 Abteilungen. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1904.
- E. GRIMSEHL, Die elektrische Glühlampe im Dienste des physikalischen Unterrichts. Abhandl. z. Didakt. u. Philos. d. Naturw. Bd. I, Heft 1. Berlin, Julius Springer, 1904.
- , Experimentelle Einführung der elektromagnetischen Einheiten. Abhandlungen z. Didakt. u. Philos. d. Naturw. Bd. II, Heft 2. Berlin, Julius Springer, 1907. [Bez. Sonderheft II, 2.]
- , Didaktik und Methodik der Physik, vgl. S. 3. [D.]
- , Lehrbuch der Physik, zum Gebrauch beim Unterricht, bei akademischen Vorlesungen und zum Selbstunterricht. 2. Aufl. Leipzig, B. G. Teubner, 1912.
- A. GUTZMER, Die Tätigkeit der Unterrichtskommission der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte. Leipzig, B. G. Teubner, 1908.

- H. v. HELMHOLTZ, Wissenschaftliche Abhandlungen, Bd. 1. Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1882.
- , Vorträge und Reden. 2 Bde. 5. Aufl. Braunschweig 1903.
- G. HEYMANS, Die Gesetze und Elemente des wissenschaftlichen Denkens. Ein Lehrbuch der Erkenntnistheorie in Grundzügen. 2. Aufl. Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1905.
- A. HÖFLER, Zur gegenwärtigen Naturphilosophie. Abhandl. zur Didaktik und Philosophie der Naturwissenschaft. Bd. I, Heft 2. Berlin, J. Springer, 1904.
- , Physik, mit Zusätzen aus der angewandten Mathematik, aus der Logik und Psychologie und mit 230 Leitaufgaben. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1904. [Ph.]
- , Naturlehre. Ausgabe für die Oberstufe der Gymnasien und Reformrealgymnasien. 2. Aufl. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1910. [O.]
- A. HÖFLER und E. MAISS, Naturlehre für die unteren Klassen der Mittelschulen. Wien, Carl Gerolds Sohn, 1897.
- H. KEFERSTEIN, Physik an höheren Schulen, vgl. S. 3. [Ph.]
- P. JOHANNESSEN, Physikalische Mechanik. Berlin, Julius Springer, 1900.
- , Physikalische Grundbegriffe. Berlin, Julius Springer, 1902.
- G. KIRCHHOFF, Gesammelte Abhandlungen. Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1882.
- B. KOLBE, Einführung in die Elektrizitätslehre. I. und II. 2. Aufl. Berlin, Julius Springer, 1904.
- A. KUNDT, Vorlesungen über Experimentalphysik, herausg. von K. SCHEEL. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1903.
- E. MACH, Grundriß der Naturlehre für die oberen Klassen der Mittelschulen. Ausgabe für Gymnasien. Prag, Wien, Leipzig, F. Tempsky, 1891.
- , Die Prinzipien der Wärmelehre historisch-kritisch entwickelt. Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1896.
- , Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung. 2. Aufl. Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1906. [E. u. I.]
- , Die Geschichte und Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit. Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1909.
- , Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch betrachtet. 4. Aufl. Leipzig, Brockhaus, 1901.
- , Populär wissenschaftliche Vorlesungen. Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1910.
- E. MACH u. JOH. ODSTRCIL, Grundriß der Naturlehre f. d. unteren Klassen der Mittelschulen. Prag, F. Tempsky, 1887. (Bespr. Z. U. I 39.)
- A. MEINONG, Über die Erfahrungsgrundlagen unseres Wissens. Abhandl. zur Didaktik und Philosophie der Naturwissenschaft, Bd. 1, Heft 6. Berlin, Julius Springer, 1906.

- FR. C. G. MÜLLER, Technik des physikalischen Unterrichts. Berlin, Otto Salle, 1906. [T.]
- MÜLLER-POUILLETS Lehrbuch der Physik und Meteorologie. 10. Aufl. von LEOPOLD PFAUNDLER. In 4 Bänden. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1906 ff.
- L. v. PFAUNDLER, Die Physik des täglichen Lebens. 2. Aufl. Deutsche Verlagsanstalt. (3. Aufl. 1913.)
- F. POSKE, Oberstufe der Naturlehre. 3. Aufl. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1911. [O.]
- , Unterstufe der Naturlehre. Ausgabe A. 4. Aufl. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1912. [U.]
- , Die Zentrifugalkraft. Abhandl. zur Didaktik und Philos. der Naturwissenschaft. Bd. II Heft 3. Berlin, Julius Springer, 1909.
- A. RIEHL, Humanistische Ziele des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts. Berlin, Weidmann, 1900.
- K. ROSENBERG, Experimentierbuch, vgl. S. 5.
- BASTIAN SCHMID, Der naturwissenschaftliche Unterricht usw. Leipzig, B. G. Teubner, 1907.
- A. SCHULTE-TIGGES, Philosophische Propädeutik auf naturwissenschaftlicher Grundlage. 2. Aufl. Berlin, G. Reimer, 1904.
- H. TIMERDING, Die Mathematik in den physikalischen Lehrbüchern. Abhandl. der Internation. mathem. Unterr.-Kommission, Bd. III Heft 2. Leipzig, B. G. Teubner, 1910.
- G. VAILATI, Scritti. Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1911.
- J. VIOLLE, Lehrbuch der Physik I, 1 und 2; II, 1 und 2. Berlin, Julius Springer, 1892 ff.
- P. VOLKMANN, Erkenntnistheoretische Grundlagen der Naturwissenschaften und ihre Beziehungen zum Geistesleben der Gegenwart. 2. Aufl. Leipzig, B. G. Teubner, 1910.
- , Fragen des physikalischen Schulunterrichts. Leipzig, B. G. Teubner, 1913.
- A. WEINHOLD, Physikalische Demonstrationen. Anleitung zum Experimentieren im Unterricht an Gymnasien, Realgymnasien, Realschulen und Gewerbeschulen. 4. Aufl. Leipzig, Quandt & Händel, 1905. [D.]
-

Anhang II.

Die Einheiten und Formelzeichen des AEF.

Vor mehreren Jahren ist von einer Reihe wissenschaftlicher und technischer Vereinigungen ein Ausschuß (AEF) eingesetzt worden, dem die Aufgabe gestellt war, einheitliche Benennungen, Bezeichnungen und Begriffsbestimmungen für wissenschaftliche und technische Einheiten und sonstige in Formeln vorkommende Größen festzusetzen, sowie die Zahlenwerte wichtiger Konstanten aufzustellen.

Die wichtigsten bis zum Schluß des Jahres 1914 von dem AEF gefaßten Beschlüsse sind in folgenden Sätzen und Tabellen zusammengestellt:

Satz I. Der Wert des mechanischen Wärmeäquivalents.

1. Der Arbeitswert der 15⁰-Grammkalorie ist $4,189 \cdot 10^7$ Erg.
2. Der Arbeitswert der mittleren (0⁰ bis 100⁰)-Kalorie ist dem Arbeitswert der 15⁰-Kalorie als gleich zu erachten.
3. Der Zahlwert der Gaskonstante ist:
 $R = 8,316 \cdot 10^7$, wenn als Einheit der Arbeit das Erg gewählt wird;
 $R = 1,985$, wenn als Einheit der Arbeit die Grammkalorie gewählt wird.
4. Das Wärmeäquivalent des internationalen Joule ist 0,23865 15⁰-Grammkalorie.
5. Der Arbeitswert der 15⁰-Grammkalorie ist 0,4272 kgm, wenn die Schwerkraft bei 45⁰ Breite und an der Meeresoberfläche zugrunde gelegt wird.

Satz II. Leitfähigkeit und Leitwert.

Das Reziproke des Widerstandes heißt Leitwert, seine Einheit im praktischen elektromagnetischen Maßsystem Siemens; das Zeichen für diese Einheit ist S.

Das Reziproke des spezifischen Widerstandes heißt Leitfähigkeit oder spezifischer Leitwert.

Satz III. Temperaturbezeichnungen.

1. Wo immer zugänglich, namentlich in Formeln, soll die absolute Temperatur, die mit T zu bezeichnen ist, benutzt werden.
2. Für alle praktischen und viele wissenschaftlichen Zwecke, bei denen an der gewöhnlichen Celsiusskala festgehalten wird, soll empfohlen werden, lateinisch t zu verwenden, sofern eine Verwechslung mit dem Zeitzeichen t ausgeschlossen ist.

Wenn gleichzeitig Celsiustemperaturen und Zeiten vorkommen, so soll für das Temperaturzeichen das griechische ϑ verwendet werden.

Satz IV. Die Einheit der Leistung.

Die technische Einheit der Leistung heißt Kilowatt. Sie ist praktisch gleich 102 Kilogrammster in der Sekunde und entspricht der absoluten Leistung 10^{10} Erg in der Sekunde. Einheitsbezeichnung *kW*.

Formelzeichen.

Länge	<i>l</i>	Reibungszahl	μ
Masse	<i>m</i>	Widerstandszahl für Flüssig-	
Zeit	<i>t</i>	keitsströmung	ξ
Halbmesser	<i>r</i>	Temperatur, absolute	<i>T</i>
Durchmesser	<i>d</i>	„ vom Eispunkt aus	<i>t</i>
Wellenlänge	λ	„ „ „ „	
Fläche	<i>F</i>	(mit der Zeitzusammentreffend)	ϑ
Körperinhalt, Volumen	<i>V</i>	Wärmemenge	<i>Q</i>
Winkel, Bogen.	α, β, \dots	Mechanisches Wärmeäquivalent	<i>J</i>
Voreilwinkel, Phasenverschie-		Entropie	<i>S</i>
bung	φ	Spezifische Wärme	<i>c</i>
Geschwindigkeit	<i>v</i>	„ „ bei konstan-	
Winkelgeschwindigkeit	ω	tem Druck	c_p
Umlaufzahl, Drehzahl (Zahl der		Spezifische Wärme bei konstan-	
Umdrehungen in der Zeit-		tem Volumen	c_v
einheit)	<i>n</i>	Wärmeausdehnungskoeffizient.	α
Schwingungszahl i. d. Zeiteinheit	<i>n</i>	Verdampfungswärme	<i>r</i>
Fallbeschleunigung	<i>g</i>	Heizwert	<i>H</i>
Kraft	<i>P</i>	Brechungsquotient	<i>n</i>
Druck (Druckkraft durch Fläche)	<i>p</i>	Hauptbrennweite	<i>f</i>
Elastizitätsmodul	<i>E</i>	Lichtstärke	<i>J</i>
Arbeit	<i>A</i>	Magnetisierungsstärke	\mathfrak{S}
Energie	<i>W</i>	Stärke des magnetischen Feldes	\mathfrak{H}
Moment einer Kraft	<i>M</i>	Magnetische Dichte (Induktion)	\mathfrak{B}
Leistung	<i>N</i>	Magnetische Durchlässigkeit	
Wirkungsgrad	η	(Permeabilität)	μ
Trägheitsmoment	<i>J</i>	Magnetische Aufnahmefähigkeit	
Zentrifugalmoment	<i>C</i>	(Suszeptibilität)	κ
Schubmodul	<i>G</i>	Elektromotorische Kraft	<i>E</i>
Normalspannung	δ	Stromstärke, elektrische. . . .	<i>I</i>
Spezifische Drehung	ε	Widerstand, elektrischer	<i>R</i>
Schubspannung	τ	Elektrizitätsmenge.	<i>Q</i>
Schiebung (Gleitung)	γ	Induktivität (Selbstinduktions-	
Spezif. Querkontraktion		koeffizient)	<i>L</i>
$\nu = 1/m$ (<i>m</i> Poissonsche Zahl)	ν	Elektrische Kapazität.	<i>C</i>

Zeichen für Maßeinheiten.

Meter m	Kubikmeter . . . m ³	Ampere A
Kilometer . . . km	„ dezimeter . dm ³	Volt V
Dezimeter . . . dm	„ zentimeter . cm ³	Ohm Ω
Zentimeter . . . cm	„ millimeter . mm ³	Siemens . . . S
Millimeter . . . mm	Tonne t	Coulomb . . . C
Mikron μ	Gramm g	Joule J
Ar a	Kilogramm . . . kg	Watt W
Hektar ha	Dezigramm . . . dg	Farad F
Quadratmeter . m ²	Zentigramm . . . cg	Henry H
„ kilometer . km ²	Milligramm . . . mg	Milliampere . . mA
„ dezimeter . dm ²	Stunde h	Kilowatt . . . kW
„ zentimeter . cm ²	Minute m	Megawatt . . . MW
„ millimeter . mm ²	Min. alleinstehend min	Mikrofarad . . μF
Liter l	Sekunde s	Megohm MΩ
Hektoliter . . . hl	Uhrzeit:Zeichen erhöht	Kilovoltampere . kVA
Deziliter dl	Celsiusgrad . . °	Amperestunde . Ah
Zentiliter cl	Kalorie cal	Kilowattstunde . kWh
Milliliter ml	Kilokalorie . . . kcal	

Da die Formelzeichen des AEF erst während der Drucklegung dieses Bandes endgültig festgestellt und eingeführt worden sind, so hat im Text darauf noch keine Rücksicht genommen werden können.

Die Erörterung darüber, wie weit die Bezeichnungen für den Unterricht als maßgebend anzusehen sind, ist noch nicht abgeschlossen. Bei grundsätzlicher Anerkennung der Liste wird doch der Vorbehalt zu machen sein, daß in einzelnen Fällen neben den vorgeschlagenen Zeichen auch andere verwendet werden können, soweit dies für den Unterricht erforderlich oder wünschenswert erscheint. So wird für Geschwindigkeit neben v auch c nicht zu entbehren sein; für Kraft wird neben P auch etwa G zu gebrauchen sein, wenn es sich um Gewichtsdruck handelt, so daß der allgemeinen Gleichung $P = mb$ die besondere $G = mg$ entspricht. Für Masse ist neben m auch M , als Bezeichnung einer Gesamtmasse, wünschenswert; und da dies mit dem Zeichen M für 'Moment einer Kraft' gelegentlich zugleich auftritt, würde für letzteres besser D gesetzt werden. Solche Abweichungen werden dem Unterricht förderlich sein, ohne daß davon für den künftigen Techniker eine Verwirrung zu befürchten ist.



Sachverzeichnis.

- Adhäsion 118
 Aeromechanik 132, 275
 Aggregatzustände 101
 Akustik 149 ff., 295
 Allgemeine Eigenschaften 100
 Apparate, deren Benutzung 73
 Arbeit, mechanische 107, 117, 124, 235 ff.
 Arbeit und Wärme 149, 283
 Archimedisches Gesetz 131
 Atomtheorie 32
 Aufgaben, physikalische 80
 Auge und Sehen 160, 330 ff.
 Beharrungsgesetz 120, 228
 Beugung des Lichtes 325 ff.
 Bewegung 118 ff.
 Bewegungsgesetze, Newtonsche 227
 Bogenlicht 372
 Brechung des Lichtes 156, 310
 Chemische Wirkungen des galv. Stroms 373
 Coulombsche Gesetze 350, 355
 Dämpfe 285
 Dampfdruck 148
 Deduktion 33
 Dispersion des Lichts 24, 213
 Drehmoment 8
 Drehmomentensatz 243
 Dynamomaschinen 392 ff.
 Elastizität 118
 Elektrische Influenz 186
 Elektrische Schwingungen 396
 Elektromotor 198
 Elektrostatik 178 ff.
 Elektrostatische Maßbestimmungen 350 ff.
 Energetische Naturauffassung 11
 Energie 124, 235 ff.
 Energieprinzip 208
 Experiment 20, 22, 72
 Experimentum crucis 25
 Extrastrom 391
 Fallbewegung 28, 119, 209
 Fallmaschine 222
 Faradaysche Gesetze 374 ff.
 Faradaysche Zahl 376
 Farben dünner Blättchen 323 ff.
 Flaschenzug 105
 Foucaultscher Pendelversuch 274
 Foucaultsche Wirbelströme 392
 Funkeninduktor 396
 Galvanische Elemente 192, 377
 Galvanismus 190 ff.
 Geschichtliches im phys. Unterr. 90
 Geschwindigkeit 77
 Gesetze 9; beschreibende und erklärende 10; vgl. 17.
 Gewicht 102
 —, spezifisches 102, 131
 Gleichgewichtslagen schwerer Körper 115, 246
 Glühlampen 372
 Gravitation 31
 Hebel 8, 51, 111, 242
 Heber 137
 Heuristisches Verfahren 40
 Himmelskunde 403
 Hohlspiegel 155, 309
 Hydromechanik 126, 274
 Hypothese 31
 Induktion, elektrische 200 384 ff.
 Induktives Verfahren 14 ff., 208
 Infinitesimalrechnung 79, 272
 Influenzelektrischer Maschine 190
 Interferenz des Lichtes 323
 Kalorimetrie 281
 Kalorische Maschinen 289
 Kapazität, elektrische 184
 Kausalbegriff 8
 Kausalprinzip 10
 Keil 108
 Körper, Begriff 100
 Körperfarben 339
 Kräftepaar 247
 Kraft 30, 52, 78, 103, 122, 220 ff.
 Kraftlinien 379 ff.
 Kreiselproblem 46, 273
 Ladungsgrad und Ladungsmenge 184
 Lehrbuch 87
 Leidener Flasche 188
 Leistung 239
 Linsenbilder 159
 Luftdruck 23, 42, 133

- Magnetismus 160 ff.
 Magnetische Maßbestimmungen 354 ff.
 Magnetische Polstärke 355
 Magnetisches Kraftfeld 378 ff.
 Maschinen, einfache 104
 Masse 102, 220 ff., 224 ff.
 Maßsysteme 206, 227
 Materie, Begriff der 29
 Mathematisches i. ph. U. 76, 203
 Mechanische Naturauffassung 11
 Meteorologie 292
 Ohmsches Gesetz 196, 263 ff.
 Optik 152 ff., 307 ff.
 Optische Instrumente 330 ff.
 Parallelogramm der Bewegungen 121
 — der Kräfte 109, 233
 Pascals Paradoxon 128
 Pendel 68, 123, 259 ff.
 Polarisation des Lichtes 327 ff.
 Polarisationsstrom 378
 Potential 77, 192, 350 ff.
 Prisma 158
 Reflexion des Lichtes 309
 Regenbogen 318
 Reibung 120, 235
 Röntgenstrahlen 403
 Rolle 105
 Saiten, schwingende 296
 Schallfortpflanzung 301
 Schiefe Ebene 117, 217
 Schmelzwärme 146
 Schraube 108
 Schriftliche Arbeiten 83 ff.
 Schülerübungen 56 ff.
 Schwerpunkt 114, 246
 Selbstinduktion 391
 Spannkraft der Luft 137
 Spannung, elektrische 193
 Spiegelbilder 154
 Spektralanalyse 23, 342 ff.
 Spezifische Wärme 145
 Statik 99
 Strahlungsenergie 339 ff.
 Stromstärke 194, 354 ff.
 Stromwärme 370
 Telephonie 395
 Temperatur 141, 142, 278
 Thermometer 142
 Torricellis Versuch 23, 42, 134
 Trägheitsmoment 54
 Undurchdringlichkeit 101
 Verdampfungswärme 147
 Wärmeäquivalent 284
 Wärmeeinheit 144
 Wärmeleitung 145, 290
 Wärmemenge 141, 143, 281
 Wärmestrahlung 146
 Wärmetheorie 285
 Wellenlehre 295
 Wellentheorie des Lichtes 321
 Widerstand, elektrischer 265
 Wurfbewegung 121, 209 ff.
 Zentrifugalkraft 123, 247 ff.
 Zentrifugalpendel 256
 Zerlegung der Kraft 28, 109 f., 233 f.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin
auf dem Gebiete der
Mechanik und Physik

ANG = Aus Natur und Geisteswelt. Sammlung.

BZmnU = Beihefte zur Zeitschrift für mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht.

FMW = Fortschritte der mathematischen Wissenschaften in Monographien.

MB = Mathematische Bibliothek.

MPL = Sammlung mathematisch-physikalischer Lehrbücher.

MVG = Mathematische Vorlesungen an der Universität Göttingen.

NB = Naturwissenschaftliche Bibliothek.

NT = Naturwissenschaft und Technik.

TS = Teubners Sammlung mathematischer Lehrbücher.

TUML = Teubners Unterrichtsbücher für Maschinentechnische Lehranstalten.

WH = Wissenschaft und Hypothese.

Mechanik.

a. Prinzipien. Geometrische Grundlagen, Massengeometrie und Kinematik sowie graphische Statik.

Denizot, A., das Foucaultsche Pendel und die Theorie der relativen Bewegung. Mit 19 Fig. IV, 76 S. gr. 8. 1913. geh. n. *M.* 3.—

Föppl, A., das Fachwerk im Raume. Mit zahlreichen Fig. und 2 lithographischen Tafeln. VIII, 156 S. gr. 8. 1892. geh. n. *M.* 3.60, geb. n. *M.* 4.40.

Henneberg, L., die graphische Statik der starren Systeme. Mit 394 Fig. XV, 732 S. gr. 8. *TS* 31. 1911. geb. n. *M.* 24.—

Ostenfeld, A., technische Statik. Vorlesungen über die Theorie der Tragkonstruktionen. Deutsch von D. Skouge. Mit 336 Fig. auf 33 Tafeln. VIII, 456 S. gr. 8. 1904. geb. n. *M.* 12.—

Poincaré, H., die neue Mechanik. 2. Aufl. 22 S. gr. 8. 1913. geh. n. *M.* —60.

Schlink, W., Statik der Raumbauwerke. Mit 214 Fig. und 2 Tafeln. XIV, 390 S. gr. 8. 1907. geb. n. *M.* 9.—

Stein, A., die Lehre von der Energie. 8. 1909. *ANG* 257. geh. n. *M.* 1.—, geb. n. *M.* 1.25.

Study, E., Geometrie der Dynamen. Die Zusammensetzung von Kräften und verwandte Gegenstände der Geometrie. Mit 46 Fig. und 1 Tafel. XIII, 603 S. gr. 8. 1903. geh. n. *M.* 21.—, geb. n. *M.* 23.—

Timerding, H. E., Geometrie der Kräfte. XII, 381 S. gr. 8. 1908. *TS* I. geb. n. *M.* 16.—

— Theorie der Kräftepläne. Eine Einführung in die graphische Statik. Mit 46 Fig. VI, 99 S. 8. 1910. *MPL* 7. geh. n. *M.* 2.60, geb. n. *M.* 3.—

— die Fallgesetze, ihre Geschichte und ihre Bedeutung. Mit 20 Fig. IV, 48 S. 8. 1912. *MB* 5. kart. n. *M.* —80.

Volkman, P., Einführung in das Studium der theoretischen Physik, insbesondere in das der analytischen Mechanik. Mit einer Einleitung in die Theorie der physikalischen Erkenntnis. 2. Aufl. XVI, 412 S. gr. 8. 1913. geh. n. *M.* 13.—, geb. n. *M.* 14.—

Weber, H., und J. Wellstein, Encyclopädie der Elementar-Mathematik. Ein Handbuch für Lehrer und Studierende. In 3 Bänden. Mit Textfiguren. gr. 8. geb.

Band I: Elementare Algebra und Analysis. Von H. Weber. 3. Auflage. XVIII, 531 S. 1909. n. *M.* 10.—

„ II: Elemente der Geometrie. Von H. Weber, J. Wellstein und W. Jacobsthal. 2. Auflage. XII, 536 S. 1907. n. *M.* 12.—

„ III: Angewandte Elementar-Mathematik. Von H. Weber, J. Wellstein und R. H. Weber. 2. Auflage. In 2 Teilen.

I. Teil: Mathematische Physik. Mit einem Buche über Maxima und Minima von H. Weber und J. Wellstein. Bearbeitet von R. H. Weber. 2. Auflage. XII, 536 S. 1910. n. *M.* 12.—

II. Teil: Darstellende Geometrie, graphische Statik, Wahrscheinlichkeitsrechnung, politische Arithmetik und Astronomie. Von J. Wellstein, H. Weber, H. Bleicher und J. Bauschinger. 2. Aufl. XIV, 671 S. 1912. n. *M.* 14.—

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

b. Umfassende Darstellungen der Mechanik.

Mechanik, unter Mitwirkung von M. Abraham, C. Cranz, P. u. T. Ehrenfest, S. Finsterwalder, O. Fischer, L. Föppl, Ph. Forchheimer, Ph. Furtwängler, M. Grübler, M. Grüning, E. Hellinger, L. Henneberg, K. Heun, G. Jung, Th. v. Kármán, A. Kriloff, H. Lamb, A. E. H. Love, R. v. Mises, L. Prandtl, H. Reißner, A. Schoenflies, P. Stäckel, O. Tedone, H. E. Timerding, A. Timpe, A. Voß, G. T. Walker, K. Wieghardt, G. Zemplén, red. von F. Klein und C. H. Müller. A. u. d. T.: Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften. Bd. IV, in 4 Teilbänden. Siehe Sonderprospekt.

Vollständig erschien bisher:

- I. Teilband. XVI, 691 S. 1901/08. geh. n. *M.* 20.40, geb. n. *M.* 24.—
III. „ XI, 593 S. 1901/08. geh. n. *M.* 17.60, geb. n. *M.* 20.60.

Mécanique. Rédigé sous la direction scientifique de P. Appell et publié sous celle de J. Molik avec la collaboration de H. Beghin, A. Boulanger, E. Carvallo, E. Cosserat, F. Cosserat, F. Gossot, J. Hadamard, E. Hahn, G. Königs, P. Langevin, A. Lecornu, L. Lévy, M. Lévy, R. Liouville, L. Marchis, H. Poincaré, E. Vallier. 7 vol. grand in-8°. A. u. d. T.: Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées. Tome IV. Siehe Sonderprospekt.

v. Brill, A., Einführung in die Mechanik des materiellen Punktes und der starren Systeme. ca. 250 S. gr. 8. [In Vorbereitung.]

Föppl, A., Vorlesungen über technische Mechanik. 6 Bände. Mit vielen Fig. gr. 8. geb.

- I. Band. Einführung in die Mechanik. 4. Aufl. XV, 424 S. 1911. n. *M.* 10.—
II. „ Graphische Statik. 3. Aufl. XII, 419 S. 1911. n. *M.* 8.—
III. „ Festigkeitslehre. 5. Aufl. XVIII, 438 S. 1914. n. *M.* 12.—
IV. „ Dynamik. 4. Aufl. X, 436 S. 1914. n. *M.* 12.—
V. „ Die wichtigsten Lehren der höheren Elastizitätstheorie. XII, 391 S. 1907. n. *M.* 10.—
VI. „ Die wichtigsten Lehren der höheren Dynamik. XII, 490 S. 1910. n. *M.* 12.—

Fuhrmann, A., Aufgaben aus der analytischen Mechanik. Ein Übungsbuch und Literaturnachweis für Studierende der Mathematik, Physik, Technik usw. In 2 Teilen. Mit Holzschn. im Text. gr. 8.

- I. Teil. Aufgaben aus der analytischen Statik fester Körper. 3., verb. u. verm. Aufl. XII, 206 S. 1904. geb. n. *M.* 3.60.
II. „ Aufgaben aus der analytischen Dynamik fester Körper. 2., verb. u. verm. Aufl. VI, 222 S. 1882. geb. n. *M.* 4.20.

Graßmann, H., gesammelte mathematische und physikalische Werke. Auf Veranlassung der mathematisch-physischen Klasse der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften herausg. von Fr. Engel. In 3 Bänden. Mit zahlreichen Fig. gr. 8. geh.

- I. Bd. 1. Teil: Die Ausdehnungslehre von 1844 und die geometrische Analyse. Mit Bildnis Graßmanns. XVI, 435 S. 1894. n. *M.* 12.—
2. „ Die Ausdehnungslehre von 1862. VIII, 511 S. 1896. n. *M.* 16.—
II „ 1. „ Die Abhandlungen zur Geometrie und Analysis. X, 452 S. 1904. n. *M.* 16.—
2. „ Die Abhandlungen zur Mechanik und zur mathematischen Physik. VIII, 266 S. 1902. n. *M.* 14.—
III „ 1. „ Theorie der Ebbe und Flut. Prüfungsarbeit 1840 und Abhandlungen zur mathematischen Physik aus dem Nachlasse. III, 353 S. 1911. n. *M.* 18.—
2. „ Graßmanns Leben. Geschildert von Fr. Engel nebst einem Verzeichnisse der von Graßmann veröffentlichten Schriften und einer Übersicht des handschriftlichen Nachlasses. XIII, 400 S. 1911. n. *M.* 18.—

Hamel, G., elementare Mechanik. Ein Lehrbuch, enth.: Begründung der allgemeinen Mechanik; Mechanik der Systeme starrer Körper; die synthetischen und die Elemente der analytischen Methoden sowie eine Einführung in die Prinzipien der Mechanik deformierbarer Systeme. Mit 265 Fig. XVIII, 634 S. gr. 8. 1912. geh. n. *M.* 16.—, geb. n. *M.* 18.—

Heun, K., die kinetischen Probleme der wissenschaftlichen Technik. Mit 18 Fig. VI, 123 S. gr. 8. 1900. geh. n. *M.* 4.—

Kirchhoff, G., Vorlesungen über Mechanik. Mit Fig. 4. Aufl. von W. Wien. X, 464 S. gr. 8. 1897. geh. n. *M.* 13.—, geb. n. *M.* 15.—

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

- Klein, F., und A. Sommerfeld, über die Theorie des Kreisels.** 4 Hefte. gr. 8.
 I. Hft. Die kinematischen und kinetischen Grundlagen der Theorie, 2., durchgesehener Abdruck. VIII, 196 S. 1914. geh. n. *M.* 5.60, geb. n. *M.* 6.60.
 II. „ Durchführung der Theorie im Falle des schweren symmetrischen Kreisels. IV, 315 S. 1898. geh. n. *M.* 10.—, geb. n. *M.* 11.—
 III. „ Die störenden Einflüsse. Astronomische und geophysikalische Anwendungen. IV, 247 S. 1903. geh. n. *M.* 9.—, geb. n. *M.* 10.—
 IV. „ Die technischen Anwendungen der Kreiselschwertheorie. IV, 205 S. 1910. geh. n. *M.* 8.—, geb. n. *M.* 9.—
- Lorenz, H.,** Dynamik der Kurbelgetriebe mit besonderer Berücksichtigung der Schiffsmaschinen. Mit 66 Fig. V, 156 S. gr. 8. 1901. geh. n. *M.* 5.—
- Marcolongo, R.,** theoretische Mechanik. Deutsch von H. E. Timmerding 2 Bde. gr. 8. I. Band: Kinematik und Statik Mit 110 Fig. VIII, 346 S. 1911. geh. n. *M.* 10.—, geb. n. *M.* 11.— II. Band: Dynamik und Mechanik der deformierbaren Körper. Mit 38 Fig. VIII, 344 S. 1912. geh. n. *M.* 10.—, geb. n. *M.* 11.—
- Perry, J.,** Drehkreisel. Deutsche Ausgabe von A. Walzel. 2. Aufl. Mit 62 Fig. und 1 Titelbild. VIII, 130 S. 8. 1913. geh. n. *M.* 2.40.
- Routh, Ed. J.,** die Dynamik der Systeme starrer Körper. Autor. deutsche Ausgabe von A. Schepp. Mit Vorwort von F. Klein. In 2 Bänden mit zahlreichen Beispielen. gr. 8. 1898. geh. n. *M.* 24.—
 I. Band: Die Elemente. Mit 57 Fig. XII, 472 S. n. *M.* 10.—
 II. „ Die höhere Dynamik. Mit 38 Fig. X, 544 S. n. *M.* 14.—
- Stephan, P.,** die technische Mechanik. Elementares Lehrbuch für mittlere maschinentechnische Fachschulen und Hilfsbuch für Studierende höherer technischer Lehranstalten. 2 Teile. gr. 8. *TUMI* 5 u. 6.
 I. Teil: Mechanik starrer Körper. Mit 255 Fig. VIII, 344 S. 1904. geh. n. *M.* 7.—
 II. „ Festigkeitslehre und Mechanik der flüssigen und gasförmigen Körper. Mit 200 Fig. VIII, 332 S. 1906. geh. n. *M.* 7.—
- Tesar, L.,** die Mechanik. Eine Einführung mit einem metaphysischen Nachwort. Mit 111 Fig. XIV, 220 S. gr. 8. 1909. geh. n. *M.* 3.20, geb. n. *M.* 4.—
- Webster, A. G.,** the Dynamics of Particles, and of rigid, elastic, and fluid Bodies, being Lectures on mathematical Physics. 2. Aufl. Mit zahlr. Fig. XII, 588 S. gr. 8. 1912. *TS II*. geh. n. *M.* 14.—
 — Lehrbuch der Dynamik, als Einführung in die theoretische Physik. In 2 Tln. Deutsche Ausgabe von C. H. Müller. Mit zahlr. Fig. gr. 8. [In Vb.]
 I. Teil: Dynamik des Punktes und des starren Körpers.
 II. „ Potentialtheorie und Dynamik der deformierbaren Körper.
 c. Elastizität, Aëro- und Hydrodynamik.
- v. Brill, A.,** Vorlesungen zur Einführung in die Mechanik raumerfüllender Massen. Mit 27 Fig. X, 236 S. gr. 8. 1909. geh. n. *M.* 7.—, geb. n. *M.* 8.—
- Burkhardt, H.,** Entwicklungen nach oszillierenden Funktionen und Integration der Differentialgleichungen der mathematischen Physik. Bericht, erstattet der Deutschen Mathematiker-Vereinigung. XII, III u. 1804 S. gr. 8. 1908. In 2 Halbbänden geh. je n. *M.* 30.—
- Föppl, A.,** Vorlesungen über technische Mechanik. 6 Bde. Mit vielen Fig. gr. 8. geb. Band III. Festigkeitslehre. 5. Auflage. XVIII, 438 S. 1914. n. *M.* 12.—
 — V. Die wichtigsten Lehren der höheren Elastizitätstheorie. XII, 391 S. 1907. n. *M.* 10.—
 — VI. Die wichtigsten Lehren der höheren Dynamik. XII, 490 S. 1910. n. *M.* 12.—
- Forchheimer, Ph.,** Hydraulik. X, 566 S. gr. 8. 1914. geh. n. *M.* 18.—, geb. n. *M.* 19.—
- Hertz, P.,** Lehrbuch der statistischen Mechanik (mechanische Grundlagen der Thermodynamik.) ca. 500 S. gr. 8. *TS*. [In Vorbereitung.]
- Korn, A.,** über freie und erzwungene Schwingungen, eine Einführung in die Theorie der linearen Integralgleichungen. IV, 136 S. gr. 8. 1910. geh. n. *M.* 5.60.
- Lamb, H.,** Lehrbuch der Hydrodynamik. Deutsche autorisierte Ausgabe, nach der 3. englischen Auflage besorgt von Joh. Friedel. Mit 79 Fig. XIV, 788 S. gr. 8. 1907. *TS 26*. geh. n. *M.* 20.—
- Lanchester, F. W.,** Aërodynamik. Ein Gesamtwerk über das Fliegen. 2 Bde. Aus dem Englischen übersetzt von C. und A. Runge.
 I. Band: Mit Anhängen über die Geschwindigkeit und den Impuls von Schallwellen, über die Theorie des Segelfluges usw. Mit 162 Fig. und 1 Tafel. XIV, 360 S. gr. 8. 1909. geh. n. *M.* 12.—
 II. „ Aerodynamik. Mit Anhängen über die Theorie und Anwendung des Gyroskops, über den Flug der Geschosse usw. Mit 208 Fig. und 1 Titelbild. XIV, 327 S. gr. 8. 1911. geh. n. *M.* 12.—

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

- Lorentz, H. A.**, Abhandlungen über theoretische Physik. In 2 Bdn. Bd. I. Mit 40 Fig. IV, 459 S. gr. 8. 1907. geh. n. *M.* 16.—, geb. n. *M.* 17.— [Band II in Vorb.]
- Love, A. E. H.**, Lehrbuch der Elastizität. Autorisierte deutsche Ausgabe unter Mitwirkung des Verfassers besorgt von A. Timpe. Mit 75 Fig. XVI, 664 S. gr. 8. 1907. *TS* 24. geh. n. *M.* 16.—
- v. Mises, R.**, Elemente der technischen Hydromechanik. In 2 Teilen. I. Teil. Mit 72 Fig. VII, 212 S. 8. 1914. *MPL* 17, 1. geh. n. *M.* 5.40, geb. n. *M.* 6.— [II. Teil in Vorb.]
- Treffitz, E.**, über die Kontraktion kreisförmiger Flüssigkeitsstrahlen. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde. IV, 56 S. gr. 8. 1914. geh. n. *M.* 2.—
- Volterra, V.**, drei Vorlesungen über neuere Fortschritte der mathematischen Physik. Mit Zusätzen und Ergänzungen des Verfassers. Deutsch von E. Lamla. Mit 19 Fig. u. 2 Tafeln. IV, 84 S. gr. 8. 1914. geh. n. *M.* 3.—

Physik.

a. Allgemeine Darstellungen.

- Die Kultur der Gegenwart, ihre Entwicklung und ihre Ziele** Herausg. von P. Hinneberg. In 4 Teilen: die geisteswissenschaftlichen, die naturwissenschaftlichen und die technischen Kulturgebiete. Lex.-8. geh. u. geb. In Halbfranz gebunden jeder Band M. 2.— mehr.
- Teil III. Abt. III: Anorganische Naturwissenschaften. Unter Leitung von E. Lecher.
- Band 1. **Physik.** Red. von E. Warburg. Unter Mitarbeit von E. Wiechert, F. Auerbach, E. Warburg, L. Holborn, F. Henning, H. Rubens, W. Jäger, E. Dorn, A. Einstein, W. Wien, F. Richarz, E. Lecher, H. A. Lorentz, P. Zeeman, R. Gans, E. Gumlich, M. Wien, F. Braun, H. Starke, W. Kaufmann, E. Gehrke, O. Reichenheim, J. Elster, H. Geitel, E. v. Schweißler, St. Meyer, O. Lummer, O. Wiener, F. Exner, F. Hasenöhr, M. Planck, W. Voigt. Mit 106 Abbildungen. X, 762 S. 1915. geh. n. *M.* 22.—, geb. n. *M.* 24.—
- Physik.** Unter Mitwirkung von M. Abraham, L. Boltzmann †, G. Bredig, G. H. Bryan, P. Debye, H. Diesselhorst, Fr. Emde, R. Gans, F. W. Hinrichsen, E. W. Hobson, H. Kamerlingh-Onnes, W. H. Keesom, P. Langevin, M. Laue, Th. Liebisch, H. A. Lorentz, L. Mamlock, G. Mie, H. Minkowski †, O. Mügge, J. Nabl, F. Pockels †, L. Prandtl, R. Reiff †, C. Ränge, A. Schoenflies, M. Schröter, E. Study, K. W. Wagner, A. Wangerin, W. Wien, J. Zenneck, redigiert von A. Sommerfeld. A. u. d. T.: Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften. Band V. In 3 Teilen. Siehe Sonderprospekt.
- Physique.** Rédigé sous la direction scientifique de P. Langevin et de J. Perrin et publié sous celle de † J. Molk avec la collaboration de E. Bauer, E. Bloch, M. Dufour, L. Dunoyer, Ch. Fabry, G. Gouy, Ch. Ed. Guillaume, E. Hahn, M. Joly, Ch. Maurain, M. Moulin, P. Th. Müller, C. Raveau, E. Rothé, J. Roux, F. Wallerant. 6 vol. grand in-8°. A. u. d. T.: Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées. Tome V. Siehe Sonderprospekt.
- Sammlung mathematisch-physikalischer Lehrbücher.** Herausgegeben von E. Jahnke. In Bänden zu je etwa 120 S. *MPL*. kart. u. geb. Bis jetzt erschienen 17 Bände. Siehe Sonderprospekt.
- Taschenbuch für Mathematiker und Physiker.** III. Jahrgang. Hrg. von F. Auerbach und R. Rothe. Mit einem Bildnis Friedrich Kohlrauschs. X, 463 S. 8. 1913. geh. n. *M.* 6.— Siehe Sonderprospekt.

- Auerbach, F.**, Physik in graphischen Darstellungen. 1373 Fig. auf 213 Tafeln mit erläuterndem Text. gr. 8. 1912. geh. n. *M.* 9.—, geb. n. *M.* 10.—
- Cohn, E.**, Physikalisches über Raum und Zeit. 2. Aufl. 24 S. gr. 8. 1913. geh. n. *M.* —.80.
- Ebert, H.**, Lehrbuch der Physik. Nach Vorlesungen, gehalten an der Technischen Hochschule München. In 2 Bänden. I. Band: Mechanik. Wärmelehre. Mit 168 Fig. XX, 661 S. gr. 8. 1912. *NT*. geh. n. *M.* 14.— [II. Band erscheint im Juni 1915.]
- Fredholm, J.**, die Integralgleichungen und ihre Anwendung auf die mathematische Physik. gr. 8. *TS*. geb. [In Vorbereitung.]
- Grimsehl, E.**, Lehrbuch der Physik. Zum Gebrauche beim Unterricht, bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium. 3. Auflage. In 2 Bänden. I. Band: Mechanik, Akustik und Optik. Mit 1063 Fig. und 2 farbigen Tafeln. XII, 966 S. gr. 8. 1914. kompl. geh. n. *M.* 15.—, geb. n. *M.* 16.— [Band II erscheint im Sommer 1915.]

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

- Keferstein, J.**, große Physiker. Bilder aus der Geschichte der Astronomie und Physik. Für reife Schüler, Studierende und Naturfreunde. Mit 12 Bildnissen auf Tafeln. IV, 233 S. 8. NB 4. 1911. geb. n. M. 3.—
- Kirchhoff, G.**, Vorlesungen über mathematische Physik. 4 Bände. Mit Fig. gr. 8. geh. n. M. 39.—, geb. n. M. 47.—
- I. Band. Mechanik. 4. Auflage von W. Wien. X, 464 S. 1897. geh. n. M. 13.—, geb. n. M. 15.—
- II. „ Optik. Hrsg. von K. Hensel. Mit dem Bildnis Kirchhoffs. VIII, 272 S. 1891. geh. n. M. 10.—, geb. n. M. 12.— [Anastat. Neudruck.]
- III. „ Theorie der Elektrizität u. des Magnetismus. Hrsg. v. M. Planck. X, 228 S. 1891. geh. n. M. 8.—, geb. n. M. 10.— [Anastat. Neudruck.]
- IV. „ Theorie der Wärme. Herausg. von M. Planck. X, 210 S. 1894. geh. n. M. 8.—, geb. n. M. 10.—
- Kohlrausch, F.**, Lehrbuch der praktischen Physik. Mit 389 Fig. 12. Aufl. In Gemeinschaft mit H. Geiger, E. Grüneisen, L. Holborn, W. Jaeger, E. Orlich, K. Scheel, O. Schönrock herausgegeben von E. Warburg. XXXI, 742 S. gr. 8. 1914. geb. n. M. 11.—
- kleiner Leitfaden der praktischen Physik. 2., vermehrte Auflage. Mit zahlreichen Fig. XVIII, 286 S. gr. 8. 1907. geb. n. M. 4.—
- Lecher, E.**, Lehrbuch der Physik für Mediziner und Biologen. Mit 499 Fig. VII, 451 S. gr. 8. 1912. geh. n. M. 8.—, geb. n. M. 9.—
- Lorentz, H. A.**, Abhandlungen über theoretische Physik. In 2 Bdn. I. Bd. Mit 40 Fig. IV, 489 S. gr. 8. 1907. geh. n. M. 16.—, geb. n. M. 17.—. [Band II in Vorb.]
- Minkowski, H.**, gesammelte Abhandlungen. Unter Mitwirkung von A. Speiser und H. Weyl herausgegeben von D. Hilbert. 2 Bände. gr. 8. geh. I. Band. Mit einem Bildnis H. Minkowskis und 6 Fig. XXXI, 371 S. 1911. n. M. 14.—
- II. „ Mit einem Bildnis H. Minkowskis, 34 Fig. und einer Doppeltafel. IV, 466 S. 1911. n. M. 16.—
- Poincaré, H.**, sechs Vorträge über ausgewählte Gegenstände aus der reinen Mathematik und mathematischen Physik. Gehalten zu Göttingen vom 22.—28 April 1909. Mit 6 Fig. IV, 60 S. gr. 8. 1910. MFG IV. n. M. 1.80.
- Rebenstorff, H.**, physikalisches Experimentierbuch. In 2 Teilen. I. Teil: Anleitung zum selbständigen Experimentieren für jüngere und mittlere Schüler. Mit 99 Fig. VI, 230 S. 8. NB 1. 1911. geb. n. M. 3.— II. Teil: Anleitung zum selbständigen Experimentieren für mittlere und reife Schüler. Mit 87 Fig. VI, 178 S. 8. NSB 2. 1912. geb. n. M. 3.—
- Voigt, W.**, Lehrbuch der Kristall-Physik (mit Ausschluß der Kristall-Optik). Mit 213 Fig. und 1 Tafel. XXIV, 964 S. gr. 8. TS 34. geh. n. M. 30.—, geb. n. M. 32.—
- Volkman, P.**, Einführung in das Studium der theoretischen Physik, insbesondere in das der analytischen Mechanik. Mit einer Einleitung in die Theorie der physikalischen Erkenntnis. 2. Aufl. XVI, 412 S. gr. 8. 1913. geh. n. M. 13.—, geb. n. M. 14.—
- Weber, R. H.**, und **R. Gans**, Repertorium der Physik. 2 Bände. Mit vielen Textfiguren. 8. geb. Band I: Mechanik und Wärme. I. Teil: Mechanik, Elastizität, Hydrodynamik und Akustik. Von R. Gans und F. A. Schulze. XII, 435 S. 1915. In Leinwand geb. n. M. 8.—. II. Teil: Wärme, Kapillarität, kinetische Gastheorie, statistische Mechanik. [Erscheint im Sommer 1915.] Band II: Elektrizität, Magnetismus, Optik.
- Wien, W.**, Vorlesungen über neuere Probleme der theoretischen Physik. Mit 11 Fig. IV, 76 S. gr. 8. 1913. geh. n. M. 2.40.
- Wüllner, A.**, Lehrbuch der Experimentalphysik. In 4 Bänden. Mit über 1100 Fig. gr. 8. 1895/1907. Bei gleichzeitigem Bezuge aller 4 Bände ermäßigt sich der Preis geh. auf n. M. 32.—, geb. auf n. M. 40.— Jeder Band ist auch einzeln käuflich:
- I. Band. Allgemeine Physik und Akustik. 6. Auflage, bearbeitet von A. Wüllner und A. Hagenbach. XIV, 1058 S. 1907. geh. n. M. 16.—, geb. n. M. 18.—
- II. „ Die Lehre von der Wärme. 5. Auflage. XI, 936 S. 1896. geh. n. M. 12.—, geb. n. M. 14.—
- III. „ Die Lehre vom Magnetismus und von der Elektrizität mit einer Einleitung: Grundzüge der Lehre vom Potential. 5. Auflage. XV, 1415 S. 1897. geh. n. M. 18.—, geb. n. M. 20.—
- IV. „ Die Lehre von der Strahlung. 5. Auflage. XII, 1042 S. 1899. geh. n. M. 14.—, geb. n. M. 16.—

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Aus Natur und Geisteswelt (geh. je n. M. 1.—, geb. n. M. 1.25):

- Auerbach, F., die graphische Darstellung. 1914.
Ichak, Das Perpetuum mobile. 1914.
Keller, H., Werdegang der modernen Physik. 1911.
Schulze, F. A., die großen Physiker u. ihre Leistungen. Mit 5 Bildnissen. 1910.
Speitkamp, Physik in Küche und Haus. 1915.

b. Grundlagen der Physik.

- v. Brill, A., das Relativitätsprinzip. Eine Einführung in die Theorie. 2. Aufl. IV, 33 S. gr. 8. 1914. geh. n. M. 1.20.
Einstein, A., und M. Großmann, Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation. 38 S. gr. 8. 1913. geh. n. M. 1.20.
Frank, Ph., Relativitätstheorie. ca. 320 S. 8. WH. [In Vorbereitung.]
Lorentz, H. A., das Relativitätsprinzip. Drei Vorlesungen gehalten in Teylers Stiftung zu Haarlem. Deutsch von W. H. Keesom. 52 S. gr. 8. 1914. BZmU I. geh. n. M. 1.40.
— A. Einstein u. H. Minkowski, das Relativitätsprinzip. Eine Sammlung von Abhandlungen. Mit Anmerkungen von A. Sommerfeld und Vorwort von O. Blumenthal. IV, 89 S. gr. 8. 1913. FMW 2. geh. n. M. 3.—, geb. n. M. 3.60.
Minkowski, H., zwei Abhandlungen über die Grundgleichungen der Elektrodynamik. Mit einem Vorwort von O. Blumenthal. 82 S. gr. 8. 1910. FMW 1. geh. n. M. 2.40.
Planck, M., das Prinzip der Erhaltung der Energie. 3. Auflage. XVI, 278 S. 8. 1913. WH 6. geb. n. M. 6.—
Volterra, V., drei Vorlesungen über neuere Fortschritte der mathematischen Physik. Mit Zusätzen und Ergänzungen des Verfassers. Deutsch von E. Lamla. Mit 19 Fig. und 2 Tafeln. IV, 84 S. gr. 8. 1914. geh. n. M. 3.—

Aus Natur und Geisteswelt (geh. je n. M. 1.—, geb. n. M. 1.25):

- Auerbach, F., die Grundbegriffe der modernen Naturlehre. 3. Auflage. 1910.
Mie, G., Moleküle, Atome, Weltäther. 3. Auflage. 1911.

c. Molekularphysik.

- Byk, A., Einführung in die kinetische Theorie der Gase. 2 Bändchen. 8. Mit Fig. MPL 10, 1 u. 2. I: Die idealen Gase. V, 102 S. 1910. geh. n. M. 2.80, geb. n. M. 3.20. II. In Vorbereitung.
Hertz, P., Lehrbuch der statistischen Mechanik (mechanische Grundlagen der Thermodynamik) ca. 500 S. gr. 8. TS. [In Vorbereitung.]
Hilbert, D., und E. Hecke, Vorlesungen über kinetische Gastheorie. In 2 Bdn. ca. 288 S. gr. 8. MFG. [In Vorbereitung.]
Kelvin, Lord, Vorlesungen über Molekularphysik und Theorie des Lichtes. Deutsch herausgegeben von B. Weinstein. Mit 132 Fig. XVIII, 590 S. gr. 8. geb. n. M. 18.—
Lorentz, H. A., Abhandlungen über theoretische Physik. In 2 Bdn. I Bd. Mit 40 Fig. IV, 489 S. gr. 8. 1907. geh. n. M. 16.—, geb. n. M. 17.— [II. Band in Vorb.]
v. Smoluchowski, M., grundsätzliche Fragen der Gastheorie. ca. 190 S. gr. 8. FMW. [In Vorbereitung.]
Vorträge über die kinetische Theorie der Materie und der Elektrizität von M. Planck, P. Debye, W. Nernst, M. v. Smoluchowski, A. Sommerfeld, H. A. Lorentz, mit Beiträgen von H. Kamerlingh-Onnes und W. H. Keesom, einem Vorwort von D. Hilbert und 7 in den Text gedruckten Fig. IV, 196 S. gr. 8. 1914. MFG VI. geh. n. M. 7.—, geb. n. M. 8.—

d. Wärmelehre.

- Bryan, G. H., Thermodynamics. An introductory Treatise dealing mainly with first Principles and their direct Applications. XIV, 204 S. gr. 8. 1907. TS 21. geb. n. M. 7.—
Burkhardt, H., Entwicklungen nach oszillierenden Funktionen. [Näheres siehe S. 3 unter c.]
Hilbert, D., und E. Hecke, Vorlesungen über kinetische Gastheorie. In 2 Bdn. ca. 288 S. gr. 8. MFG [In Vorbereitung.]
Lorentz, H. A., les théories statistiques en thermodynamics. ca. 64 S. gr. 8. [Unter der Presse]

Aus Natur und Geisteswelt (geh. je n. M. 1.—, geb. n. M. 1.25):

- Alt, H., die Kälte, ihr Wesen, ihre Erzeugung und Verwertung. 1910.
Börnstein, R., die Lehre von der Wärme. 1907.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

e. Akustik.

- Burkhardt, H., Entwicklungen nach oszillierenden Funktionen. [Näheres siehe S. 3 unter c.]
- Kalähne, A., Grundzüge der mathematisch-physikalischen Akustik. 2 Teile. 8. *MPL II*, 1 u. 2. I. Teil. Mit 19 Fig. VII, 130 S. 1910. geb. n. *M.* 3.20, geb. n. *M.* 3.60. II. Teil. Mit 57 Fig. X, 225 S. 1913. geb. n. *M.* 5.40, geb. n. *M.* 6.—
- Kielhauser, E., die Stimmgabel, ihre Schwingungsgesetze und Anwendungen in der Physik. Eine auf fremden Untersuchungen fußende Monographie. Mit 94 Fig. VIII, 188 S. gr. 8. 1907. geb. n. *M.* 6.—

f. Optik.

(Elastische und geometrische Optik, einschließlich optischer Instrumente.)

- Burkhardt, H., Entwicklungen nach oszillierenden Funktionen. [Näheres siehe S. 3 unter c.]
- Debye, P., optische Untersuchungen über Lichtdruck, Regenbogen und andere Beugungserscheinungen. Ein Beitrag zur Behandlung optischer Fragen im Sinne von Randwertaufgaben. ca. 100 S. gr. 8. [Unter der Presse.]
- Gleichen, A., Lehrbuch der geometrischen Optik. XIV, 511 S. gr. 8. 1902. *TS* 8. geb. n. *M.* 20.—
- Goldhammer, D., Dispersion und Absorption des Lichtes in ruhenden isotropen Körpern, Theorie und ihre Folgerungen. Mit 28 Fig. VI, 144 S. 8. 1913. *MPL* 16. geb. n. *M.* 3.60, geb. n. *M.* 4.—
- Poekels, Fr., Lehrbuch der Kristalloptik. Mit 168 Fig. und 6 Doppeltafeln. X, 519 S. gr. 8. 1906. *TS* 19. geb. n. *M.* 16.—
- Scheffer, W., Wirkungsweise und Gebrauch des Mikroskops und seiner Hilfsapparate. Mit 89 Fig. und 3 Blendenblättern. VII, 116 S. gr. 8. 1911. geb. n. *M.* 2.40, geb. n. *M.* 3.—
- Schuster, A., Einführung in die theoretische Optik. Autor. deutsche Ausgabe. Übersetzt von H. Koenen. Mit 2 Tafeln und 185 Fig. XIV, 413 S. gr. 8. 1907. geb. n. *M.* 12.—, geb. n. *M.* 13.—
- Steinheil, A., u. E. Volt, Handbuch der angewandten Optik. 3 Bände. I. Band. Voraussetzung für die Berechnung optischer Systeme und Anwendung auf einfache und achromatische Linsen. Mit Fig. und 7 Tafeln. VI, 314 S. gr. 8. 1891. geb. n. *M.* 12.— Hierzu besonders: Beilagen. [109 S.] geb. n. *M.* 3.— [Fortsetzung erscheint nicht.]
- Wood, R. W., physikalische Optik. Dtsch. v. E. Prüm m. ca. 400 S. gr. 8. [U. d. Pr.]

Aus *Natur und Geisteswelt* (geh. je n. M. 1.—, geb. n. M. 1.25):

- Graetz, A., das Licht und die Farben. 3. Auflage. 1910.
- Hartwig, Th., das Stereoskop und seine Anwendungen. 1907.
- Lehmann, H., die Kinematographie, Grundlagen und Anwendungen. 1911.
- Prelinger, O., die Photographie. 1914.
- v. Rohr, M., die optischen Instrumente. 2. Auflage. 1911.
- das Auge und die Brille. 1912.
- Scheffer, W., das Mikroskop. 2. Aufl. 1914.
- Warstat, W., die künstlerische Photographie. 1913.

g. Elektrizitätslehre, einschließlich elektromagnetischer Theorie des Lichtes.

- Abraham, M., Theorie der Elektrizität. In 2 Bänden. gr. 8. geb.
- I. Band: Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität. Mit einem einleitenden Abschnitte über das Rechnen mit Vektorgrößen in der Physik. Von A. Föppl. 4. umgearbeitete Auflage von M. Abraham. Mit 11 Fig. XVIII, 410 S. 1912. n. *M.* 11.—
- II. „ Elektromagnetische Theorie der Strahlung. Von M. Abraham. 3. Auflage. Mit 11 Fig. X, 402 S. 1914. n. *M.* 11.—
- Brion, G., Leitfaden zum elektrotechnischen Praktikum. Mit 380 Fig. XIII, 404 S. gr. 8. 1910. geb. n. *M.* 10.—, geb. n. *M.* 11.—
- Bucherer, A. H., mathematische Einführung in die Elektronentheorie. Mit 14 Fig. II, 148 S. gr. 8. 1904. geb. n. *M.* 3.20.
- Burkhardt, H., Entwicklungen nach oszillierenden Funktionen. [Näh. s. S. 3 unter c.]
- Diesselhorst, H., elementare Elektrizitätslehre. Theoretische Elektrizitätslehre. Je ca. 190 S. gr. 8. [In Vorbereitung.]

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

- Ferraris, G., wissenschaftliche Grundlagen der Elektrotechnik, deutsch von L. Finzi. Nach den Vorlesungen über Elektrotechnik im R. Museo Industriale zu Turin. Mit 161 Fig. XII, 358 S. gr. 8. 1901. geb. n. *M.* 12.—
- Fleming, J. A., elektrische Wellen-Telegraphie. Vier Vorlesungen. Autorisierte deutsche Ausgabe von E. Aschkinaß. Mit 53 Fig. IV, 185 S. gr. 8. 1906. geb. n. *M.* 4.20, geb. n. *M.* 5.—
- Föppl, A., Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität, siehe: Abraham, Theorie der Elektrizität.
- Gans, R., Einführung in die Theorie des Magnetismus. Mit 40 Fig. VI, 110 S. 8. 1908. *MPL* I. kart. n. *M.* 2.40, geb. n. *M.* 2.80.
- Goldhammer, D., Dispersion und Absorption des Lichtes in ruhenden isotropen Körpern. (Siehe oben unter: Optik.)
- Kohlrausch, F. u. L. Holborn, das Leitvermögen der Elektrolyte, insbesondere der Lösungen. Methoden, Resultate und chemische Anwendungen. Mit Fig. und 1 Tafel. XVI, 211 S. gr. 8. 1898. geb. n. *M.* 5.—
- Lorentz, H. A., the Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat. A course of lectures delivered in Columbia University, New York, in March and April 1906. IV, 332 S. gr. 8. 1909. *TS* 29. geb. n. *M.* 8.—, geb. n. *M.* 9.—
- die Elektronentheorie und ihre Anwendung auf die Erscheinungen des Lichtes und der strahlenden Wärme. Vorlesungen, gehalten an der Columbia-Universität in New York im März und April 1906. Aus dem Englischen übersetzt. gr. 8. *TS*. geb. [Erscheint im Frühjahr 1915.]
- Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. III, 138 S. gr. 8. 1906. geb. n. *M.* 3.20.
- Meyer, Stefan, und E. von Schweidler, Radioaktivität. gr. 8. geb. *NT*. [Erscheint Sommer 1915.]
- Minkowski, H., zwei Abhandlungen über die Grundgleichungen der Elektrodynamik. Mit einem Vorwort von O. Blumenthal. 82 S. gr. 8. 1910. *FMW* I. geb. n. *M.* 2.40.
- Orlich, E., die Theorie der Wechselströme. Mit 37 Fig. IV, 94 S. 8. 1912. *MPL* 2. geb. n. *M.* 2.40, geb. n. *M.* 2.80.
- Pockels, Fr., Lehrbuch der Kristalloptik. Mit 168 Fig. und 6 Doppeltafeln. X, 519 S. gr. 8. 1906. *TS* 19. geb. n. *M.* 16.—
- Richarz, F., neuere Fortschritte auf dem Gebiete der Elektrizität. In wissenschaftlich-gemeinverständlicher Weise dargestellt. 2. Auflage. Mit 97 Fig. VI, 128 S. gr. 8. 1902. geb. n. *M.* 1.50.
- Anfangsgründe der Maxwell'schen Theorie verknüpft mit der Elektronentheorie. Mit 69 Fig. IX, 246 S. gr. 8. 1909. geb. n. *M.* 7.—, geb. n. *M.* 8.—
- Schaefer, C., die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität und des Magnetismus. Mit Bildnis Maxwells und 32 Fig. VIII, 174 S. 8. 1908. *MPL* 3. kart. n. *M.* 3.40, geb. n. *M.* 3.80.
- Starke, H., experimentelle Elektrizitätslehre, verbunden mit einer Einführung in die Maxwell'sche und die Elektronentheorie der Elektrizität und des Lichts. 2., auf Grund der Fortschritte der Wissenschaft umgearbeitete Auflage. Mit 334 Fig. XVI, 662 S. gr. 8. 1910. geb. n. *M.* 12.—
- Thomson, J. J., Elektrizitäts-Durchgang in Gasen. Deutsche autor. Ausgabe, unter Mitwirkung des Autors besorgt und ergänzt von E. Marx. Mit 187 Fig. VII, 587 S. gr. 8. 1906. geb. n. *M.* 18.—, geb. n. *M.* 19.—
- Voigt, W., Magneto- und Elektrooptik. Mit zahlreichen Fig. XIV, 396 S. gr. 8. 1908. *MVG* III. geb. n. *M.* 14.—
- Volkmann, P., Vorlesungen über die Theorie des Lichtes. Unter Rücksicht auf die elastische und die elektromagnetische Anschauung. Mit Textfiguren. XVI, 432 S. gr. 8. 1891. geb. n. *M.* 11.20.
- Weber, R., Beispiele und Übungen aus Elektrizität und Magnetismus. Nach dem Manuskript der französischen Auflage. Mit 74 Fig. VIII, 330 S. 8. 1910. geb. n. *M.* 4.80, geb. n. *M.* 5.25.
- Wiechert, E., Grundlagen der Elektrodynamik. 112 S. gr. 8. 1899. geb. n. *M.* 3.60.
- Wien, W., über Elektronen. Vortrag, gehalten auf der 77. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte in Meran. 2., die Fortschritte der Wissenschaft berücksichtigende Aufl. 39 S. gr. 8. 1909. steif geb. n. *M.* 1.40.
- Aus *Natur und Geisteswelt* (geh. je n. *M.* 1.—, geb. n. *M.* 1.25):
- Börnstein, R., Einleitung in die Experimentalphysik, Gleichgewicht und Bewegung. 1912.
- und W. Marckwald, sichtbare und unsichtbare Strahlen. 2. Aufl. 1910.
- Centnerszwer, M., das Radium und die Radioaktivität. 1913.
- Köhn, Die elektrische Kraftübertragung. 1914.

S-96

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299011