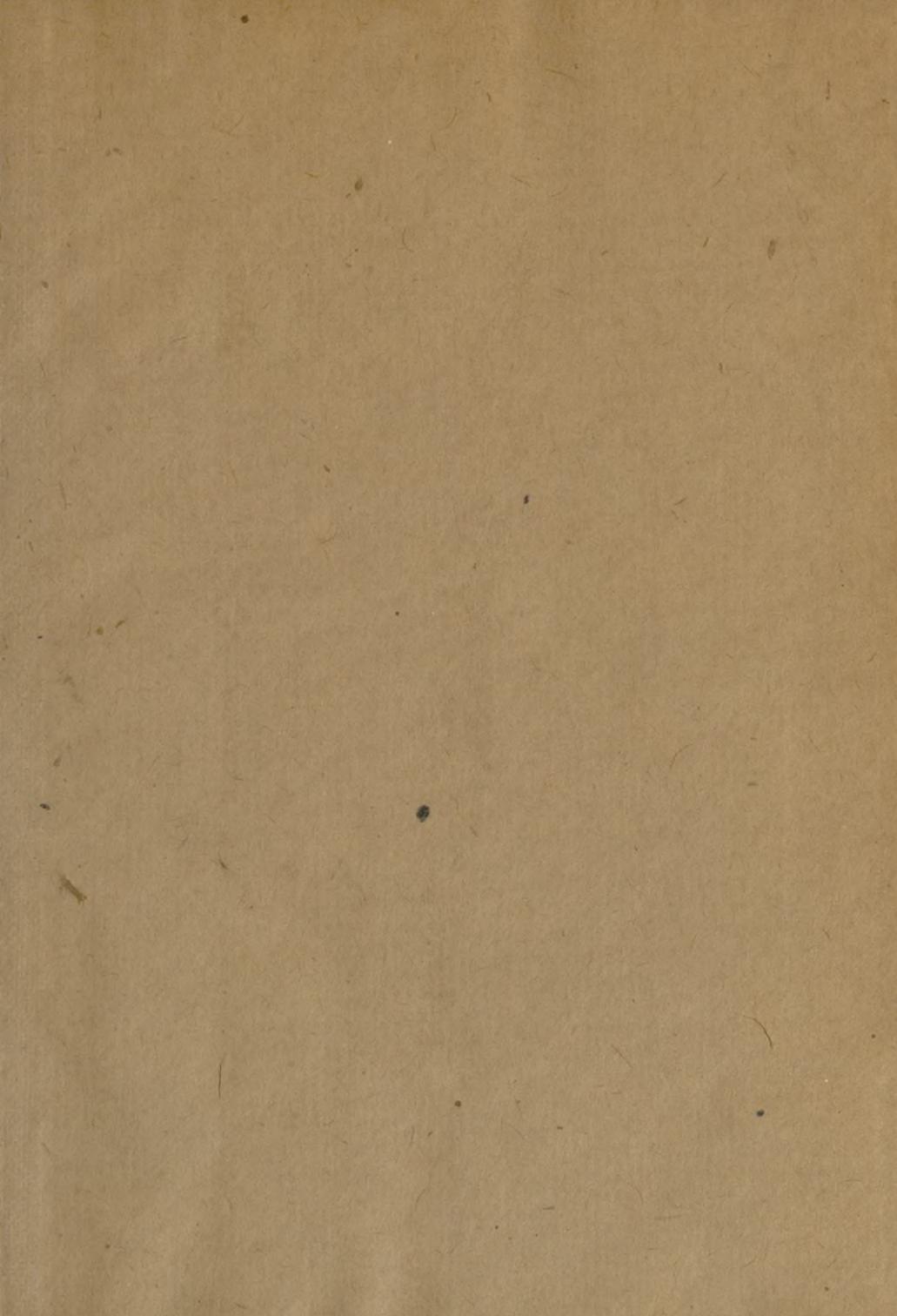
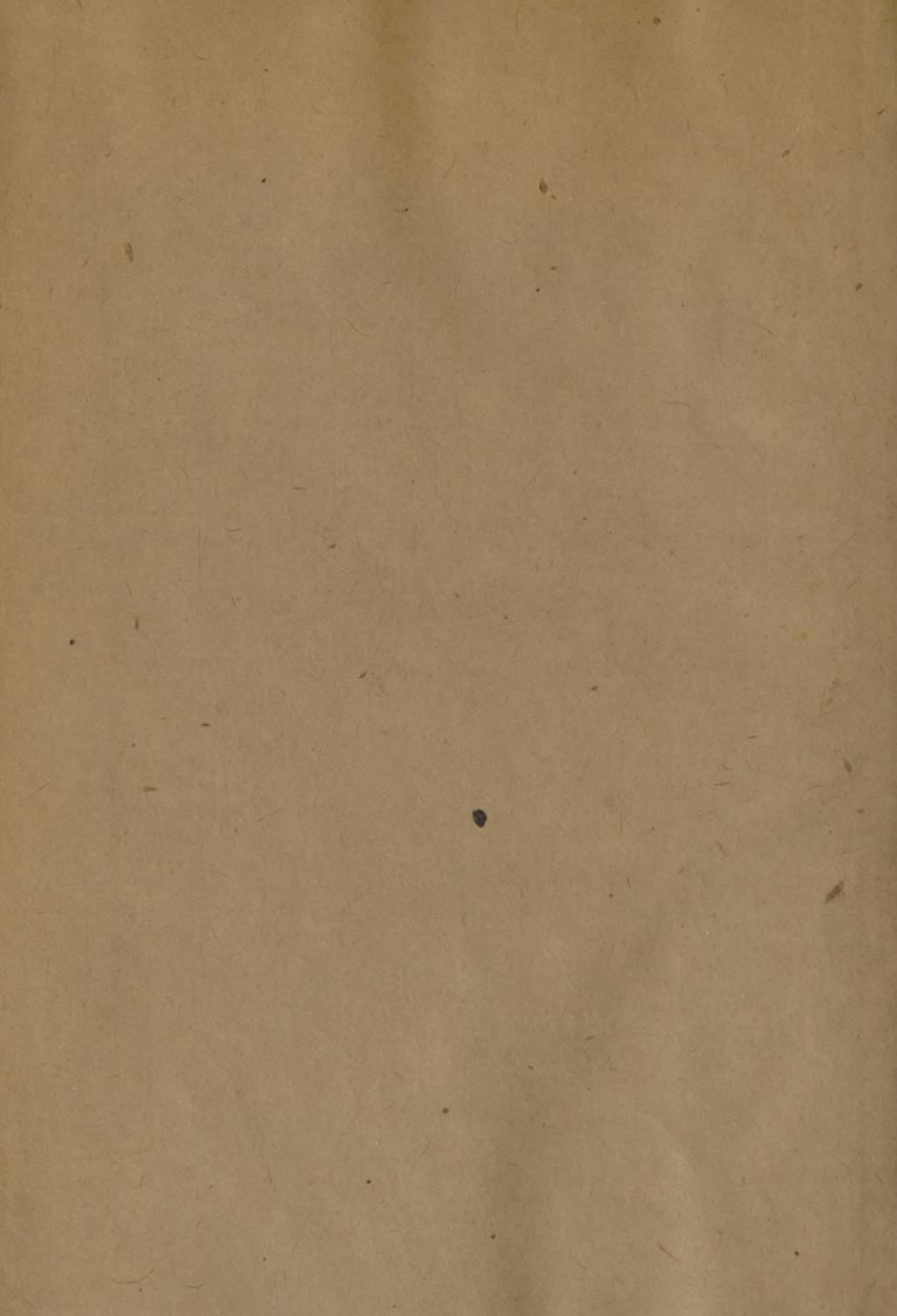


Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000295995





21

Neue Bahnen

Illustrierte Monatshefte für Erziehung und Unterricht. Herausgeg. von F. Lindemann und R. Schulze. Organ der Pädagogischen Literaturgesellschaft Neue Bahnen.

Die Zeitschrift „Neue Bahnen“ stellt ihre Kräfte in den Dienst des besonnenen Fortschritts auf dem Gebiete der Pädagogik. Außer der Erörterung wichtiger pädagogischer Fragen aus allen Gebieten will sie dem Lehrer Mittel für seine Fortbildung zu billigstem Preise zur Verfügung stellen und sucht dies Ziel durch Herausgabe guter Bücher, die von Männern der Wissenschaft geschrieben sind, zu erreichen.

Für den Preis von nur M. 6.— jährlich erhalten die Abonnenten:

1. Zwölf Hefte der reich illustrierten pädagogischen Monatschrift „Neue Bahnen“.
2. Dazu zwei Bücher aus den „Ordentlichen Veröffentlichungen“ der Literatur-Gesellschaft Neue Bahnen.
3. Die Berechtigung, die „Außerordentlichen Veröffentlichungen“ der Gesellschaft zu wesentlich ermäßigten Preisen zu beziehen.

Wünscht der Bezieher die Buchbeigaben gebunden zu erhalten, so erhöht sich der Bezugspreis auf M. 7.20.

Bei alleinigem Bezug der Zeitschrift (ohne Bücher) ist der Jahrespreis nur M. 5.—.

Wir bezeichnen der Einfachheit halber diese drei verschiedenen Lieferungsarten wie folgt:

Ausgabe A. Zeitschrift Neue Bahnen mit zwei ungebundenen Buchbeigaben M. 6.—.

Ausgabe B. Zeitschrift Neue Bahnen mit zwei gebundenen Buchbeigaben M. 7.20.

Ausgabe C. Zeitschrift Neue Bahnen ohne Buchbeigaben M. 5.—.

..... Probehefte und Verzeichnisse werden kostenlos versandt.

Buchveröffentlichungen der „Neuen Bahnen“.

A. Ordentliche Veröffentlichungen.

(Kostenlose Beigaben zum 23.—28. Jahrgang der Zeitschrift „Neue Bahnen“. Für später hinzutretende Abonnenten sind sie zu den beigefügten ermäßigten Preisen beziehbar.)

Ehrmann, Grundzüge einer Entwicklungsgeschichte der Tierwelt Deutschlands. Von Seminaroberlehrer P. Ehrmann. Mit 30 Abbildungen und 1 Tafel

Graebner, Die Entwicklung der deutschen Flora. Von Prof. Paul Graebner. Mit 37 Abbildungen und 4 Karten

Hauser, Der Roman des Auslandes seit 1800. Von Otto Hauser

Hauser, Das Drama des Auslandes seit 1800. Von Otto Hauser

Hauser, Die Lyrik des Auslandes seit 1800. Von Otto Hauser

Lamprecht, Einführung in das historische Denken. Von Geh.-Rat Prof. Dr. Karl Lamprecht f. Mit 36 Bildern

Lindemann, Beiträge zur Geschmacksbildung. Von Seodor Lindemann, Lehrer an der städt. Gewerbeschule, Leipzig. Mit 56 Abbildungen

Lipshütz, Stoffwechsel und Energiewechsel des Menschen. Von Dr. Alexander Lipshütz. Mit 17 Abbildungen

Literarische Jahresschau aus dem Gebiete der Pädagogik für 1912 u. 1913

Löbmann, Volkslied und musikalische Volkserziehung. Ein Um- und Ausblick. Von Dr. Hugo Löbmann, Schuldirektor in Leipzig

Ladenpreis		Preis für Bezieher der Neuen Bahnen	
Ungeb.	Geb.	Ungeb.	Geb.
2.—	2 60	1,50	2 10
2.—	2 60	1,50	2 10
2.—	2 60	1,50	2 10
2.—	2 60	1,50	2 10
2.—	2 60	1,50	2 10
2.—	2 60	1,50	2 10
3.—	4.—	2,40	3 20
2.—	2 60	1,50	2 10
— 75	—	— 60	—
2 50	3 20	1 90	2 60

Verlag der Dürr'schen Buchhandlung in Leipzig.

A. Ordentliche Veröffentlichungen.

(Kostenlose Beigaben zum 23.—28. Jahrgang der Zeitschrift „Neue Bahnen“. Für später hinzutretende Abonnenten sind sie zu den beigesetzten ermäßigten Preisen beziehbar.)

	Ladenpreis		Preis für Bezieher der Neuen Bahnen	
	Un- geb.	Geb.	Un- geb.	Geb.
Reinisch, Gesteins- und Mineralschätze des deutschen Bodens. Von Prof. Dr. R. Reinisch. Mit 20 Abbildungen	2.—	2.60	1.50	2.10
Schmidt, Das Schulkind nach seiner körperlichen Eigenart und Entwicklung. Von Prof. Dr. S. A. Schmidt, Bonn. Mit 23 Abbildungen und 4 Tabellen	2.—	2.60	1.50	2.10
Schneider, Das Werden des Erdanfluges. Ein Handbüchlein für Geographen und Naturfreunde. I. Band. Mit 29 Abbildungen und Karten	3.—	4.—	2.40	3.20
Tews, Grundzüge der deutschen Schulgesetzgebung. Von J. Tews	2.—	2.60	1.50	2.10
Witkowski, Die Entwicklung der deutschen Literatur seit 1850. Von Prof. Dr. Georg Witkowski, Leipzig	2.—	2.60	1.50	2.10
Wulffen, Kriminalpädagogie. Ein Erziehungsbuch. Von Staats- anwalt Dr. Erich Wulffen	2.—	2.60	1.50	2.10
Wundt, Einführung in die Psychologie. Von Geh.-Rat Prof. Dr. Wilhelm Wundt, Leipzig	3.—	4.—	2.40	3.20
Wünsche, Die deutschen Kolonien. Für die Schule dargestellt von Dr. Alwin Wünsche. Mit 22 Figuren im Text, 12 Einschalttafeln mit 28 Bildern und einer farbigen Karte	2.—	3.—	1.50	2.40

B. Außerordentliche Veröffentlichungen.

Anthes, Heinz Hauser. Ein Schullehrerleben. Roman v. Otto Anthes	3.—	4.—	2.25	3.25
Bloß, Wortgeschichten. Für Schule und Haus erzählt v. Robert Bloß	2.40	3.—	1.80	2.40
Bloß, Die Grundlagen der Rechtschreibung. Eine Darstellung des Verhältnisses von Sprache und Schrift von Robert Bloß	1.20	1.80	— .90	1.50
Srenkel, Die Hobelbanarbeit in Verbindung mit dem Linear- zeichnen. Ein Lehrgang des Arbeitsunterrichts für Schulen, Schüler- werkstätten und Erziehungsanstalten. Von R. Srenkel, Lehrer bei den staatlichen Handfertigkeitskursen in Berlin. Mit zahlreichen Abbildungen im Text und 52 Tafeln	—	4.60	—	3.70
Kaiser, Aus der Vorzeit. Mit 75 Abbildungen im Text. Von Ober- lehrer E. Kaiser	2.60	3.40	2.10	2.90

C. Lebensvoller Unterricht.

Eine Sammlung von Handbüchern für den Unterricht.

1. Gansberg, Der freie Aufsatz. Seine Grundlagen und Möglichkeiten. Ein frohliches Lehr- und Lesebuch. Von Fritz Gansberg, Lehrer in Bremen	5.50	6.50	4.50	5.40
2. Rüttgers, Die Dichtung in der Volksschule. Ein Handbuch für Leh- rende. Von Severin Rüttgers, Lehrer in Düsseldorf	7.—	8.—	5.60	6.70
3. Löbmann, Der Schulgesang. Eine Gesangslehre für Schulen aller Art unter Berücksichtigung einfacherer Schulverhältnisse. Von Dr. Hugo Löbmann, Schuldirektor in Leipzig	3.50	4.25	2.80	3.55
4. Gerlach, Lebensvoller Rechenunterricht. Vorschläge und Beispiele für eine Fortentwicklung des Rechenunterrichts im Sinne der Arbeits- schule. Teil I. Einführung und Unterstufe. Mit 19 Abbildungen	3.50	4.25	2.80	3.55
5. Allsinger, Lebensvolle Sprachübungen in Sachgruppen des Alltags. Ein Versuch, den Deutschunterricht zu einem Wirklichkeitsunterricht im Sinne der Arbeitsschulidee umzugestalten.	4.—	5.—	3.20	4.—

Im Druck:

Röhger, Elementarunterricht. (Das 1. und 2. Schuljahr.) Von K. H. Röhger. Eine Ein-
führung in seine praktische Durchführung. Mit zahlreichen Abbildungen.

Aus dem Leben soll der Unterricht schöpfen, für das Leben soll er bilden. Nach Stoff
und Plan, nach Ziel und Weg soll ihn der Spruch leiten:

Aus dem Leben für das Leben.

**Ausführliche Verzeichnisse durch den Verlag
Dürr'sche Buchhandlung in Leipzig.**

Ordentliche Veröffentlichung der „Pädagogischen Literatur-Gesellschaft Neue Bahnen“

Das Wesen der Materie

Nach dem neuesten Stande unserer
Kenntnisse und Auffassungen dargestellt

von

Felix Auerbach

Mit 15 Abbildungen



Dürr'sche Buchhandlung in Leipzig 1918



W. 49

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

I 423

Akc. Nr. 4247/49

Vorwort.

Vor etnigen Jahren habe ich an der hiesigen Universttät eine gemeinverständliche Vorlesung über das Wesen der Materie gehalten. Als daher die Pädagogische Literaturgesellschaft „Neue Bahnen“ mit dem ehrenvollen Auftrage an mich herantrat, ihr für ihre regelmäßigen Veröffentlichungen ein kleines Buch zu schreiben, schlug ich das genannte Thema vor und fand damit auf der anderen Seite vollen Beifall. Leider mußte infolge der Kriegsläufe das damals größtenteils fertiggestellte Manuskript einige Jahre liegen bleiben und, da inzwischen auf dem beregten Gebiete viel Neues hinzugekommen war, stark umgearbeitet werden. Ich gehe dabei in systematischer Weise vom Einfachsten aus, um schließlich in die modernste Forschung und ihre Ergebnisse einzumünden. Sind doch unsere Vorstellungen vom Wesen der Materie mit einem großen Teile der physikalischen und chemischen Erscheinungen aufs engste verknüpft, und all das mußte mit herangezogen werden. Ich glaube daher, daß das Büchlein trotz der großen Beschränkung, die ich mir naturgemäß auferlegen mußte, ein vielseitiges und anregendes Bild von dem Gegenstande zu liefern geeignet ist. Und somit wünsche ich ihm viele bestrebte und aufmerksame Leser.

Jena, Pfingsten 1918.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

I.	1. Einleitung. Was ist Materie?	1
	2. Konkret und abstrakt. Sinnesempfindungen	3
	3. Raum. Gestichts- und Luftraum	5
	4. Zeit. Dauerkonfiguration. Gegenstand und Widerstand .	8
	5. Körper. Trägheit. Masse. Wahre und scheinbare Masse. Kinetiche Masse	11
	6. Ponderable Körper. Gewicht	15
	7. Masse und Kraft. Dichte und spezifisches Gewicht	16
	8. Verschiebung und Drehung. Trägheitsmoment	23
II.	9. Elastizität. Volumen- und Gestaltsmodul. Aggregatzustände	25
	10. Kristalle. Flüssige Kristalle	31
	11. Flüssigkeiten. Kapillarität. Lockere Massen	34
	12. Temperatur. Ideale und wirkliche Gase. Kritischer Zustand	37
	13. Wärme. Spezifische Wärme. Energie. Arbeit	42
	14. Erhaltung des Stoffes. Erhaltung der Energie	45
	15. Chemische Umwandlungen. Elemente und Verbindungen	47
III.	16. Molekulartheorie. Atomistik. Molekeln. Äquivalentzahlen	49
	17. Atome. Dissoziation	53
	18. Kinetiche Gastheorie. Variationskurve. Loschmidtsche und Avogadro'sche Zahl	56
IV.	19. Lösungen. Osmotischer Druck	63
	20. Flüssigkeiten. Feste Körper. Molekulartheorie der Kristalle	67
	21. Röntgenstrahlen. Atommodelle	71
	22. Kristalloide und Kolloide. Emulsionen. Kolloidale Lösungen. Brown'sche Bewegung	75
V.	23. Strahlung. Schwarzer Körper. Strahlungsgesetze. Quanten- theorie	83
	24. Kinetiche Theorie. Atomwärme und Molekularwärme .	87

25.	Dulong-Petit'sches Gesetz. Periodisches System der Elemente. Spezifische Wärme. Wirkungsquantum	91
VI. 26.	Elektrizität. Leitung und Strahlung. Ohm'sches Gesetz. Widerstand	96
27.	Lösungen. Elektrolyse. Ionen. Wanderung der Ionen .	103
28.	Gefrierpunktniedrigung und Siedepunktserhöhung. Osmotischer Druck. Dissoziation. Wanderung der Ionen. Elementarquantum	107
VII. 29.	Durchgang der Elektrizität durch Gase. Kathodenstrahlen	114
30.	Ladung und Masse. Elektronen. Elektronenstrahlen. Atomstruktur	119
31.	Elementarquantum. Spektrum. Linienserien	126
VIII. 32.	Radioaktivität. Zerfall der Elemente	132
33.	Phasenlehre. Magnetismus. Weltäther. Relativitätstheorie. Schluß	140

I.

1. Wenn man sein Leben lang in der Lehrtätigkeit steckt, macht man sich allerhand Gedanken, naheliegende und fernliegende, einleuchtende und absonderliche, über Sinn, Methode und Schwierigkeiten des Lehrens. Und da möchte ich hier einen dieser vielen Gedanken herausheben; er betrifft eine Erfahrung, die zweifellos auch sehr viele andere gemacht haben. Alle Aufgaben des Lehrers und selbst ein langer, gewissenhaft und geistvoll ausgearbeiteter Vortrag sind verhältnismäßig leicht gegenüber der Aufgabe, auf eine plötzlich an uns gestellte Frage eine bestimmte Antwort zu geben. Selbstverständlich gibt es auch hier noch recht beträchtliche Unterschiede in der Schwierigkeit der Aufgabe, und zwar besonders je nach der Persönlichkeit des Fragestellers und je nach der Natur dessen, was er wissen will: je ferner er dem Fache steht, und je allgemeiner die Fragestellung ist, desto unangenehmer ist die Antwort. Man weiß eben nicht, wie die Frage gemeint ist, man weiß nicht, was man bei der Antwort als selbstverständlich voraussetzen darf, man weiß nicht recht, was man zu antworten wagen soll (man vergleiche den Ausspruch Mephistos), und schließlich: man weiß die Antwort manchmal überhaupt nicht und möchte es doch nicht recht zugeben. Was z. B. die geringere oder größere Allgemeinheit der Frage bzw. des in ihr enthaltenen Gegenstandes betrifft, so ist es natürlich ziemlich leicht, auf die Frage zu antworten: Was sind gedämpfte Schwingungen? oder: was ist die Gaedesche Molekularpumpe? Bei solchen Fragen kann man entweder sofort Rede stehen oder, worüber man sich keinen Vorwurf zu machen braucht: man muß erklären: ich muß erst nachsehen, kommen Sie morgen wieder! Aber es gibt

Fragen, bei denen ein „Nachsehen“ ausgeschlossen ist, weil sie so allgemeiner und umfassender Natur sind, daß man seine ganze Bibliothek „nachsehen“ müßte und auch dann noch oft vergeblich.

Von dieser Art ist die Frage, die der Leser dieses Buches vielleicht von vornherein zu stellen versuchen wird: Was ist Materie? Glücklicherweise brauche ich diese Frage vorläufig (und eventuell überhaupt) nicht zu beantworten; ich darf sie vorerst gar nicht beantworten; denn das wäre etwa so, wie wenn der Bösewicht in der ersten Szene eines Trauerspiels den Helden ersticht: die ganze Tragödie, in unserem Falle das ganze Buch wäre ja dann überflüssig. Ich mache hier diese Bemerkung, weil es manchmal recht komisch wirkt, wenn ein Buch mit einer umfassenden Definition beginnt, die doch erst am Schlusse und als Ergebnis der ganzen Untersuchung kommen dürfte. Damit ist natürlich nicht gesagt, daß es nicht erlaubt, unter Umständen sogar ganz angebracht ist, mit einer vorläufigen Definition, mit einer Art von ungefährender Orientierung und Verständigung zu beginnen, aber ohne jede Verantwortung und mit aller Freiheit, diese vorläufige Definition vielleicht mit der Zeit als verfehlt zu erkennen und durch eine andere zu ersetzen, wenn nicht gar durch die Erkenntnis, daß es eine allgemeine Definition überhaupt nicht gibt.

Nun gehört ja unser Fall zu einer ganz besonders merkwürdigen Klasse, was die Fragestellung angeht. Der naive Mensch kommt nämlich zweifellos überhaupt nicht auf die Idee, zu fragen: was ist Materie? Aus dem einfachen Grunde, weil er es für selbstverständlich hält, daß jeder instinktiv weiß, was Materie ist; weil diese Materie, dieser Stoff ihm im alltäglichen Leben von allen Seiten und in greifbarer Form umgibt. Und wenn in diesen und ähnlichen Fällen die Wissenschaft sich mit derartigen Fragestellungen und ihrer Beantwortung abmüht, so wird der naive Mensch — und von seinem Standpunkte aus nicht ohne Berechtigung — sich darüber belustigen, wenn nicht gar ärgern, daß die Wissenschaft ihre Zeit damit verbringt, die klarsten und selbstverständlichsten Dinge zu verdunkeln

und zu Gegenständen einer, dem Laien unzugänglichen Aukurenweisheit zu machen.

Und doch liegt die Sache im Grunde noch anders; besser gesagt, sie würde anders liegen, wenn es wirklich naive Menschen gäbe. Aber die gibt es eben in der heutigen Menschheit, die auf mehrere Jahrtausende von Kulturentwicklung zurückblickt, gar nicht mehr. Auch der sogenannte naive Mensch lebt nicht nur auf Grund seiner Wahrnehmungen und Empfindungen, er nimmt, ohne es zu wissen, eine Anmenge von Urteilen, zu denen seine Erfahrungen sich geprägt haben, zu Hilfe und hält infolgedessen Dinge für kompliziert, die in Wahrheit recht einfach sind, und er hält, was uns hier näher angeht, Dinge für selbstverständlich, die in Wahrheit auf einem recht verwickelten und nur noch mit einer gewissen Mühe auffindbaren Gedankengange beruhen. Zu diesen Dingen gehört der Begriff der Materie, und deshalb, aber auch nur deshalb, spielt dieser Begriff in der naiven Welt eine so selbstverständliche und in der nachdenklichen Welt eine so verwickelte Rolle, eine Rolle, bei der die Gegensätze so gewaltsam wie auf wenigen anderen Gebieten aufeinanderplagen und, statt sich zu versöhnen, zu immer neuen und tieferliegenden Widersprüchen und Kontrasten führen.

2. Es gibt ein in manchen Kreisen sehr beliebtes Unterhaltungs- und Anregungsspiel, das Raten beliebiger Sachen, z. B. „die von Amundsen am Südpol geführte norwegische Flagge“ oder die „Heilwirkung des Radiums auf den menschlichen Körper“, durch Fragen, auf die man lediglich die Antworten ja oder nein erhält. Der in diesem Spiele Geübte beginnt, auch wenn er noch im Knabenalter steht, mit der Frage: ist es konkret? oder: ist es abstrakt? Unter konkret ist alles verstanden, was aus Materie besteht, unter abstrakt alles übrige. Abstrakt heißt auf deutsch „abgezogen“ oder „abgeleitet“, es ist also bezeichnend, daß man alles außer der Materie als abgeleitet, diese selbst aber als ursprünglich ansieht; wiederum jener naive Standpunkt, mit dem wir hier abzurechnen haben werden, und der

immer wieder nur verständlich wird durch die Berücksichtigung des Einflusses einer unendlich lange Zeit gesteigerten Anreicherung und Gewöhnung. Und doch ist auch auf der anderen Seite „konkret“ dem Wortsinne nach wiederum nichts Einfaches, da es „zusammengewachsen“ bedeutet, also auf die Vorstellung hinweist, daß Materie nichts Ursprüngliches, sondern aus etwas anderem, als ihren Elementen, abgeleitet sei.

Wir wollen also hier soweit zurückgehen wie möglich, wir wollen versuchen, naiver zu sein als die Naiven, die die Materie als etwas Selbstverständliches und keines Nachdenkens Bedürftiges ansehen; wir wollen überhaupt nichts als selbstverständlich ansehen, außer dem allertiefstliegenden, dem wir ohnehin ratlos gegenüberstehen; und wir wollen versuchen, daraus ein aufgelöstes und trotzdem einfaches und anschauliches Bild des Stoffes zu gewinnen.

Was ist mir noch gegeben, wenn ich von allem absehe, was durch die Ansammlung von Erfahrungen und durch die an sie geknüpften Vorstellungen und Urteile hinzugefügt worden ist? Um das zu ermitteln, muß ich offenbar zunächst, indem ich Beobachtungen an kleinen Kindern anstelle, den Versuch machen, mich in die Zeit zurück zu versetzen, wo ich selbst anfang, Erfahrungen zu sammeln. Aber das reicht noch nicht aus; denn das Kind hat zwar seine individuelle Entwicklung noch vor sich, aber es hat schon eine ungeheure Stammesgeschichte hinter sich; es steht, wie man sagt, zwar ontogenetisch noch am Anfange (was das geistige betrifft), phylogenetisch aber schon stark am Ende. Das Ideal wäre also die Beobachtung eines Wesens, das, wenn wir uns hier den Ausblick auf weitere Gebiete versagen und uns auf das Menschengeschlecht beschränken, zugleich dem Kindesalter und der Urzeit des Menschengeschlechts angehörte. Für unsere Absichten brauchen wir nicht so streng vorzugehen, wir dürfen uns damit begnügen, nach bestem Wissen und Gewissen alles auszuschalten, was wir als sekundäre Hinzufügungen erachten müssen, um nur das Primäre übrig zu behalten.

Dieses Primäre, was ich an mir selbst feststelle, ist nun ohne

Zweifel meine Sinneswahrnehmung und, wie wir gleich hinzufügen wollen, die an sie sich anschließende Sinnesempfindung. „Ohne Zweifel“, ein gefährlicher Ausdruck; denn gerade ein solcher Ausspruch regt den Zweifel mächtig an, und so auch hier nicht ohne Erfolg. Denn es könnte jemand einwenden, daß doch nach den Lehren der Naturwissenschaft Empfindung an Wahrnehmung, Wahrnehmung an Sinnesorgane und diese wieder an den Körper gebunden sind, an den physischen Leib, mit dem ich, das geistige Wesen, in engster Symbiose verbunden bin. Aber auf der anderen Seite bekomme ich von diesem Leibe ebenfalls wiederum nur durch meine eignen Sinnesempfindungen Kunde, und so tritt uns hier jener geschlossene Zirkel entgegen, der, wenn man ihn nicht mit mutiger Hand durchschneidet, der Erkenntnis niemals Eintritt erlauben wird und deshalb zum absoluten Verzicht zwingt. Schneiden wir also den Kreis so auf, daß die Empfindung an den Anfang der Linie zu liegen kommt, und setzen wir die Empfindung als das primäre, als das einzig ursprüngliche und damit als das einzig Reale!

Da ist nun zunächst eine prinzipielle Vielheit von Empfindungsarten festzustellen; denn wir haben eine ganze Anzahl von Sinnesorganen, und jedes operiert auf seine eigene, spezifische Weise. Diese Vielheit der Sinnesorgane ist nun nicht bloß unschätzbar für die Mannigfaltigkeit unseres Lebensbetriebes und Lebensgenusses, sondern auch ein wichtiges Instrument unserer wissenschaftlichen Erkenntnis, indem es uns erlaubt, die Resultate, die wir auf dem Gebiete eines Sinnesorganes gewonnen haben, an denen eines anderen zu kontrollieren und uns auf diese Weise über eine gefährliche Einseitigkeit und Selbsttäuschung zu erheben. Wir können hier dieses Problem natürlich nicht vollständig bearbeiten, wir wollen eine geeignete Auswahl treffen und als Hauptinstrument das Auge wählen, als Kontrollorgan aber den Tastsinn.

3. Wir wollen also feststellen, was wir mit dem Auge wahrnehmen, aber wohlverstanden: mit dem physischen Auge, nur mit

diesem und unter Ausschluß alles dessen, was wir unser geistiges Auge nennen können, und woran Vererbung, Erfahrung, Übereinkunft und vieles andere Anteil hat. Entsprechend der Organisation dieses Instruments, das auf seinem wichtigsten Teile, der Netzhaut, Bilder entwirft, die wir dann nach außen projizieren, sehen wir mit dem Auge und zwar, wie wir zunächst annehmen wollen, mit einem Auge (das andere bleibe geschlossen), eine Fläche; im einfachsten (nie vollständig zu verwirklichenden) Falle eine einheitliche und gleichmäßige Fläche; in Wahrheit aber eine Fläche mit Differenzierung ihrer einzelnen Teile und zwar differenziert in zweierlei Weise: die verschiedenen Flächenstücke sind erstens verschieden hell, und sie haben zweitens verschiedene Farbe; dadurch, daß die Flächenstücke sich voneinander abheben, kommen Linien, nämlich Grenzlinien in das Bild, z. B. die Grenzlinie zwischen einem hellen und einem dunklen oder zwischen einem roten und einem grünen Flächenstücke. Wir haben also hier eine Mannigfaltigkeit vor uns, die erstens in der Ausdehnung eine zwiefache ist, nämlich die des Links-rechts und die des Unten-oben, und die zweitens mit einer zwiefachen Mannigfaltigkeit von Eigenschaften verknüpft ist, nämlich mit der der Intensität (Helligkeit) und der Qualität (Farbe). Was die Intensität betrifft, so machen wir sehr bald die Erfahrung, daß sie nicht immer dem betreffenden Flächenstück angehört, sondern ihm zuweilen von außen eingeprägt wird: wir unterscheiden selbstleuchtende und beleuchtete Flächen; und dabei machen wir die weitere Erfahrung, daß die von außen eingeprägte Helligkeit mit den Umständen wechselt, also nicht, wie beim Selbstleuchten, dem Flächenstück als solchem eigentümlich ist; je nach der „Konfiguration“, wozu auch die Stellung der Fläche selbst gehört, fällt die Helligkeit verschieden aus, und insbesondere gibt es wechselnde Helligkeitskontraste zwischen benachbarten Flächenstücken eines immer wieder als eine Einheit auftretenden Flächenkomplexes. Schon hierdurch werden wir zu einer, zunächst noch unbestimmten Vorstellung geführt, die über das Flächenbild, über den Flächencharakter des Bildes hinauszu-

weisen scheint. Sehen wir uns jetzt das Bild abwechselnd mit dem einen und dem anderen Auge an, so merken wir Verschiedenheiten in der Konfiguration, die uns an einem Flächenbilde unverständlich erscheinen; und wenn wir nun gar beide Augen zugleich spielen lassen, so geraten wir außer Stande, den empfangenen Gesamteindruck mit seinen unvermittelten Helligkeitskontrasten und Linienführungen flächenhaft zu verarbeiten. Diese Schwierigkeit verzehnfacht sich weiter, wenn wir uns selbst in Bewegung setzen und dabei fortwährend das angebliche Flächenbild fixieren. Als ein Beispiel wählen wir das nebenstehende Flächenbild (Fig. 1), das aus drei Flächenstücken besteht, und von dem, je nach Beleuchtung und Standpunkt, bald dieser, bald jener Teil heller oder dunkler, größer oder kleiner erscheint, ja sogar, unter Umständen völlig verschwinden kann. Auch wenn wir ganz naiv wären und von alledem, was wir in Wahrheit längst als eisernen Bestand unserer Kenntnis und Erkenntnis in uns aufgenommen haben, nicht das mindeste wüßten, würden wir hier zweifellos auf eine neue Idee kommen, auf den Gedanken,

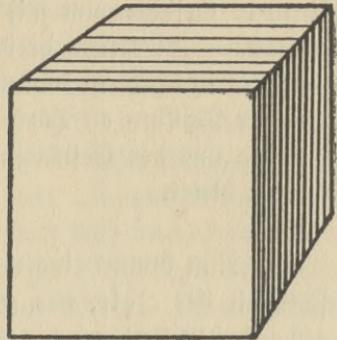


Fig. 1.

daß das Auge unmittelbar nur ein unvollständiges Bild von dem liefert, was wir die Außenwelt nennen, und daß es uns den Rest nur mühselig zu erschließen erlaubt. Das zeigt sich nun bestätigt, wenn wir nunmehr die Kontrolle durch den Tastsinn ausüben. Wir strecken also den Finger immer weiter nach vorn und empfinden schließlich einen Druck, den wir dahin deuten, daß der Finger die Fläche berührt; wir bewegen ihn hin und her und zwar so, daß der Druck sich immer gleich bleibt; aber in dem Augenblicke, wo er die Grenzlinie des größten der drei Flächenstücke, sei es nach rechts oder nach oben, überschreitet, hört der Druck plötzlich auf. Während also die Fläche

sich für das Auge nach rechts und nach oben hin mittelst zweier weiterer Flächen fortsetzt, hört sie für den Tastsinn plötzlich auf und scheint keine Fortsetzung zu haben. Daß sie das schließlich doch tut, zeigt sich bei veränderter Bewegung des Fingers; wird er nämlich noch weiter nach vorn gestreckt, so tritt der Druck auch rechts und oben wieder auf. Wir sagen: die Fläche setzt sich nach hinten fort, wir fügen zu den zwei bisherigen Dimensionen eine dritte Mannigfaltigkeit hinzu, die des Vorn-hinten. Auf diese Weise erhalten wir den dreidimensionalen Rastraum mit seinen Kanten und Ecken; und erst durch Rückschluß ergibt sich alsdann, also auf einem viel indirekteren Wege, auch aus der ursprünglichen Gesichtsfäche der dreidimensionale Gesichtsraum mit seiner Perspektive, seinen Lichtern und Schatten. In diesem dreidimensionalen Raume bewegen wir uns selbst, in ihn ordnen wir nunmehr alle Mannigfaltigkeiten ein, die uns der Tastsinn an Härte und Weichheit, Rundung und Eckigkeit, und die uns der Gesichtssinn an Formen, Farben und Helligkeitswerten bietet.

4. Nun kommt eine neue Mannigfaltigkeit hinzu, die Mannigfaltigkeit der Zeit, des zeitlichen Geschehens. An den Verhältnissen des Gesichtsraumes treten Änderungen auf, aber hier und dort in sehr verschiedenem Grade. Manche Teilstücke sind raschem Wechsel unterworfen (z. B. leuchtet hier plötzlich ein Blitz auf und verschwindet ebenso schnell wieder), bei anderen kann man die Änderung in Ruhe verfolgen (z. B. bei einer Wolke), bei noch anderen geht die Änderung so langsam vor sich, daß es Minuten, ja Stunden, Tage und Monate den Anschein hat, als ob sich überhaupt nichts ändere: hier können wir die Veränderung mit dem Auge wiederum nicht verfolgen, aber nicht deshalb, weil sie zu rasch, sondern im Gegenteil, weil sie zu langsam erfolgt. Wir können doch nicht Monate lang vor einem Blatte stehen bleiben und beobachten, wie es sich aus einem grünen Blatte in ein gelbes verwandelt. Aber selbst wenn wir die ganze Zwischenzeit auslassen und nur im Frühjahr das erste Mal und im

Herbste das zweite Mal vor das Blatt treten, können wir doch feststellen, daß dieser Teil des Gesichtsbildes seiner Lage im Raume nach derselbe geblieben ist, wir können die Identität des Blattes konstatieren. Wir sagen also nicht: anstelle des grünen Blattes befindet sich jetzt ein gelbes, sondern wir sagen: das früher grüne Blatt ist jetzt gelb geworden, aber es ist dasselbe Blatt. Selbst wenn die Veränderung so stark ist, daß wir den Ausdruck „nicht zum Wiedererkennen“ anwenden, zweifeln wir schließlich doch nicht an der Identität.

Wir können hiernach sagen, daß es etwas in unserm Raumgebilde gibt, was wir aus der Mannigfaltigkeit des Seins und Geschehens herausheben und als etwas Besonderes ansehen; und wir können dem zunächst Ausdruck verleihen, indem wir von „Dauerkonfiguration“ sprechen, das will sagen: von Gesichtseindrücken, die lange Zeit hindurch dieselben bleiben oder sich doch so stetig ändern, daß der Zusammenhang gewahrt bleibt. Schon könnten wir geneigt sein, von „Dingen“ oder „Körpern“ oder „Gegenständen“ zu reden, wenn hier nicht unserem Gefühle nach doch noch etwas fehlte, irgend etwas zu ergänzen wäre, um unsere Vorstellung von dem, was wir mit jenen Namen belegen, voll zu erfüllen. Einen Körper muß man nicht bloß sehen, auch gar nicht in erster Linie sehen, man muß ihn „anfassen“ können — wenigstens wollen wir uns vorläufig an diese, gewiß etwas grobe Forderung halten. Sie ist offenbar identisch mit der Forderung, daß wir uns nicht an den Gesichtssinn, sondern an den Tastsinn halten sollen. Und da gibt uns nun die Sprache, diese doppelzüngige Kunst, die uns ebenso oft irreführt wie den Weg weist, im vorliegenden Falle unmittelbare und geradezu verblüffende Auskunft. Ein Gegenstand ist etwas, was sich uns „entgegenstellt“, was unserm Tasten Widerstand leistet; und es ist sehr interessant zu konstatieren, daß in früheren Zeiten die beiden Ausdrücke „Gegenstand“ und „Widerstand“ völlig durcheinander gebraucht worden sind, und daß sich erst ganz allmählich eine reinliche Scheidung vollzogen hat, derart, daß wir jetzt unter Widerstand

eine Eigenschaft, sozusagen eine Tätigkeit des Gegenstandes verstehen. Je mehr Widerstand ein Gegenstand leistet, desto „gegenständlicher“ erscheint er uns; ein Bleiklotz spielt in diesem Sinne eine viel größere Rolle als ein Blatt Papier und eine Wassermenge eine viel größere als eine Luftmenge, welche letztere der naive Beurteiler überhaupt kaum noch aus eigenem Antriebe für einen Gegenstand erklären würde.

Hier ist nun der Ort, um mit Leichtigkeit einzusehen, wie verschieden sich Gesichtsbild und Tastbild verhalten: was an dem einen stark gegenständlich ist, braucht es durchaus nicht bei dem anderen zu sein und umgekehrt. So ist z. B. eine Fensterscheibe ein starker „Gegenstand“ für den Tastsinn, d. h. sie stellt dem tastenden Finger einen kräftigen, nur durch Gewalt zu überwindenden Widerstand entgegen, dem Auge aber so gut wie gar keinen, die Gesichtswahrnehmung läßt sie beinahe ungeschwächt passieren; und umgekehrt ist dichter Nebel ein vollkommenes Hindernis für das Auge, dagegen kaum merklich für den Tastsinn. Und wenn wir hier einmal unsere Betrachtung erweitern, so können wir hinzufügen, daß sich jedes unserer Sinnesorgane anders verhält in bezug auf die Anerkennung und Einordnung des Gegenständlichen, und man könnte, wenn das nicht dem Sprachgebrauche zuwiderliefe, geradezu erklären: es gibt „Tastgegenstände“ (nur solche werden in der üblichen Denk- und Sprechweise anerkannt), es gibt aber auch Gesichtsgegenstände und weiter Gehörs-, Geruchs- und Geschmacksgegenstände, wozu dann der Vollständigkeit halber noch Temperaturgegenstände zu fügen wären. Bekanntlich hat die Wissenschaft noch weitere Phänomene spezifischer Art aus dem Gesamtbilde, das uns die Außenwelt bietet, herausgeschält, insbesondere die Elektrizität und den Magnetismus; da wir für diese aber keine spezifischen Sinnesorgane und folglich auch keine spezifischen Empfindungen besitzen, können sie auch nicht zur Gegenstandsbildung im eigentlichen Sinne führen — alle derartigen Vorstellungen, die bekanntlich in der Geschichte und dem gegenwärtigen Zustande der Wissenschaft eine große Rolle spielen, haben nur die Bedeutung bildlicher Ausdrucksweise und anschaulicher

Formulierung. Ubrigens werden wir später Gelegenheit haben, auf Fragen dieser Art eingehend zurückzukommen.

5. Was also ist denn nun, um der Sache etwas peinlicher auf den Grund zu gehen, ein Körper? Etwas, was fühlbar, sehbar, hörbar usw. ist? Aber ein Schmerz ist fühlbar, ein Blitz ist sichtbar, und der Donner ist hörbar; und doch wird niemand bei einem dieser drei Fälle an einen Körper denken. Es fehlt in dem einen Falle die bestimmte räumliche Projektion nach außen und in dem andern der Charakter der Dauerkonfiguration. Blitz und Donner kann man nicht anfassen und nicht aufbewahren, wie man ein Goldstück aufbewahrt. Dieses kann man aufbewahren, weil es eine bestimmte räumliche Begrenzung hat; und in der Tat wird der naive Mensch diese Eigenschaft der selbständigen Begrenzung von einem Körper fordern, er wird somit die Luft, auch wenn eine bestimmte Menge davon gemeint ist, nicht als Körper ansehen; und doch kann man diese Luftmenge mit Hilfe eines Behälters aufbewahren, auch die Luft hat, gerade wie das Gold, Dauercharakter. Es ergibt sich also die Notwendigkeit, diesem Dauercharakter auf den Grund zu gehen, ihn in möglichst einfacher Weise zu erfassen. Dieser Dauercharakter hängt offenbar mit dem Widerstande zusammen, den der Körper leistet, schon wenn man ihn berührt, noch mehr, wenn man ihn fortbewegen, am schlimmsten, wenn man ihn zerstören will. Offenbar ist dieser Widerstand eine sehr zusammengesetzte Eigenschaft, und es ist durchaus erforderlich, einen elementaren Faktor herauszuschälen. Da wollen wir uns also an den Widerstand gegen Bewegung halten, den der Körper leistet; ein Körper hat eben Dauercharakter auch in dem Sinne, daß er seinen Ort im Raume, wenn wir uns einmal menschlich ausdrücken, nicht zu ändern „wünscht“. Man nennt diese Eigenschaft die Trägheit der Körper — ein Ausdruck, der nun freilich nicht ganz das hält, was er zunächst zu versprechen scheint. Ein Körper hat nämlich nicht bloß die Eigenschaft, von selbst in Ruhe zu bleiben, sondern auch, wenn er von außen

her in Bewegung gesetzt ist, diesen Bewegungszustand zu bewahren, sich also ohne neuen Anreiz weiter zu bewegen, freilich immer nur geradlinig und gleichförmig. Er beharrt, wie schon Newton sagt, in dem Zustande der Ruhe oder der geradlinig-gleichförmigen Bewegung, den er einmal inne hat, er besitzt, wie man nunmehr statt Trägheit sagen wird: Beharrungsvermögen. Indessen würde uns die weitere Verfolgung dieses Gedankens hier zu weit führen, nämlich zu dem Problem, was denn überhaupt der Unterschied zwischen Ruhe und geradlinig-gleichförmiger Bewegung sei, also auf ein Problem, das unter dem Namen des Relativitätsprinzips in ältesten und neuesten Zeiten eine große Rolle spielt und Gegenstand lebhafter Erörterungen bildet. Bleiben wir also bei der Eigenschaft der Trägheit im erweiterten Sinne des Wortes stehen, aber nur um es durch einen anderen, indifferenteren und darum allgemeineren Ausdruck zu ersetzen, der eben ganz allgemein besagen soll, daß der Körper Widerstand gegen Bewegung leistet; wir wollen sagen: der Körper hat Masse, und der Besitz von Masse soll geradezu charakteristisch sein für alles, was wir als Körper, als Gegenstand ansehen wollen; will man in besonderen Fällen noch deutlicher werden, so kann man beide Ausdrücke vereinigen und von träger Masse reden.

Nach der Definition ist es ohne weiteres einleuchtend, daß man die Masse eines Körpers nur erkennen, also erst recht nur messen kann, wenn man ihn in Bewegung setzt; denn solange er ruht, äußert sich seine Masse gar nicht, und es wäre eigentlich streng, wenn man sagte: der ruhende Körper hat gar keine Masse. Man scheut sich nur, das zu tun, weil man dann annehmen müßte, durch die Bewegung entstünde in ihm Masse, und man zieht es daher vor, die Masse als immer vorhanden anzunehmen und die Sache etwa so vorzustellen, daß im Ruhezustande die Masse latent ist und erst durch die Bewegung zum Vorschein kommt. Um trotzdem auch den ruhenden Körper charakterisieren zu können, greifen wir auf das frühere Experiment zurück, bei dem wir den Körper mit dem Finger berührten und beobachteten, daß er auf den Finger einen Druck ausübt. Einen

solchen Druck übt nun der Körper auch auf andere Körper aus, insbesondere auf den größten Körper, mit dem er vergesellschaftet lebt: auf die Erde; und diesen Druck nennen wir sein Gewicht. Das Gewicht ist der Druck des Körpers auf die Waagschale; und indem wir auf die andere Waagschale einen wohldefinierten Normalkörper bringen, können wir das Gewicht des Körpers messen. Das Gewicht ist, wie man sieht, ein Begriff ganz anderer Art wie die Masse, insofern es, außer von dem Körper, auch noch von einem fremden Körper mitbestimmt wird; da aber in dem gewählten Falle dieser andere Körper die Erde ist, wird man einen gewissen Parallelismus zwischen Masse und Gewicht ansetzen dürfen; und man hat dann, wenn man immer dieselbe räumliche Konfiguration beibehält, ein Mittel, die Masse auch im Ruhezustande zu bestimmen. Es zeigt sich dabei (wenn wir von gewissen, sogleich zu erwähnenden Erscheinungen zunächst absehen), daß die Ruhemasse und die Bewegungsmasse von gleicher Größe sind; und weiter, daß die Bewegungsmasse auch immer dieselbe bleibt, gleichviel mit welcher Geschwindigkeit oder Beschleunigung die Bewegung vor sich gehen mag. Die Masse ist also eine charakteristische Konstante des Körpers, die ihn überallhin begleitet, wo er sich bewegt. Indessen sind hierzu doch noch drei Bemerkungen zu machen, die uns einen Ausblick auf eine verallgemeinerte Auffassung gewähren.

Erstens ist Bedingung, daß der Körper bei seiner Bewegung nur seine eigene Masse zu schleppen habe; hat er auch noch fremde Masse mitzuschleppen, so bewegt er sich so, als ob seine eigene Masse vergrößert wäre; er hat, wie wir sagen dürfen, zu seiner wahren Masse noch scheinbare Masse hinzubekommen. So muß ein Unterseeboot (um einen klareren Fall zu nehmen, als ihn das Oberflächenschiff bieten würde) außer seiner eigenen Masse auch noch eine gewisse Wassermasse mitzuschleppen, und das Motorluftschiff eine entsprechende Menge Luft; in solchen Fällen zeigt sich dann auch, daß die Gesamtmasse nicht mehr konstant ist, sondern mit der Geschwindigkeit der Bewegung zunimmt — eine Tatsache, die, wie man

weiß, Verkehrsmittel desto kostspieliger macht, je rascher sie sich bewegen. Das bringt uns nun auf die Idee, daß vielleicht auch in Fällen, in denen wir von einer mitgeschleppten fremden Masse direkt nichts wahrnehmen, doch eine solche im Geheimen mitspielt, besonders wenn sich Anomalien der gedachten Art zeigen; und das ist einer der Wege, auf denen wir dazu gelangen, ein sonst un wahrnehmbares Medium, den Äther anzunehmen, der uns in gewissen Fällen eine scheinbare Masse der durch ihn sich bewegenden Körper vortäuscht. Doch davon später.

Eine scheinbare Masse tritt aber auch in Fällen auf, wo es sich zweifellos ausschließlich um eine Bewegung des in Untersuchung stehenden Körpers ohne Beteiligung fremder Masse handelt. Das faszinierendste Beispiel hierfür bietet ein Kreisel, den man, nachdem man ihn kräftig abgezogen hat, mit seinen beiden Achsenenden unter äußerst geringer Reibung in eine aus zwei Halbkugeln zusammengesetzte Kugel aus Metallblech einschließen kann, so daß man schließlich eine geschlossene Kugel in der Hand hält, in deren Innern ein Kreisel lebhaft rotiert. Wenn man jetzt die Kugel zu verschieben sucht, so spürt man dabei einen Widerstand, der ganz normal ist, nämlich genau der gesamten trägen Masse der Metallmenge entspricht. Dagegen ist man erstaunt, um wieviel größer der Widerstand des Apparates gegen Drehung ist, man hat das Gefühl, daß man die zehnfache Masse in Bewegung setzen müsse, oder daß sich der Apparat nicht in Luft, sondern in einer pechartigen Masse drehen müsse, so widerstandspenstig benimmt sich die Kugel. Zu der trägen oder, wie wir auch sagen können, statischen Masse kommt also hier eine kinetische Masse hinzu, d. h. eine Masse, die uns durch die Bewegung vorgetäuscht wird und die sich geltend macht, wenn wir, was bei Drehung der Kugel doch offenbar geschieht, die Rotationsachse der Kreiselbewegung zu verändern versuchen. Wir werden später ganz entsprechende Erscheinungen kennen lernen, die nicht von mechanischer, sondern von elektromagnetischer Natur sind und unsere Vorstellung vom Wesen der Materie wesentlich zu erweitern geeignet sein werden.

6. Vorläufig kehren wir zur Masse zurück, wie sie sich im Ruhezustande durch das Gewicht der Körper zu erkennen gibt. Träge Körper sind eben immer zugleich auch „ponderable“ Körper, d. h. sie sind wägbare, und wir können, wenn wir uns auf Erscheinungen und Versuche an Ort und Stelle beschränken, getrost die Wage zur Feststellung der Masse auf dem Umwege über das Gewicht benutzen. Allerdings liegen auch hier die Verhältnisse nicht so einfach, wie man gewöhnlich annimmt; auch hier finden verwickelte Beziehungen des wahren Gewichts zu Erscheinungen statt, die durch bestimmte Umstände, insbesondere durch Konfigurationsänderungen und Bewegungen hervorgerufen werden. Es sei in dieser Hinsicht, um nicht zu abstrakt zu bleiben, an einen auch dem Laien aus einfachsten Erfahrungen bekannten Fall erinnert. Nehmen wir an, daß ich mich, um mein Gewicht festzustellen, auf die Schale einer großen Wage stelle, und daß mein Gehilfe auf der anderen Wagschale die Gewichte richtig abgleicht. Sobald ich nun mit meinem Körper Bewegungen ausführe, z. B. Knie- oder Rumpfbeuge mache, wird das Gleichgewicht gestört, es stellt sich aber sofort wieder her, sobald die Bewegung aufhört, und zwar auch dann, wenn die neue Lage meines Körpers von der früheren verschieden ist, wenn ich also beispielsweise in Kniebeuge verharre. Das scheinbare Gewicht meines Körpers wird also nicht etwa durch die statische Konfiguration beeinflusst, sondern lediglich durch den Bewegungszustand und zwar, wie man freilich nicht mit so einfachen Mitteln beweisen kann, auch das immer nur durch eine Änderung in dem Geschwindigkeitscharakter der Bewegung, also durch den Übergang von der Ruhe zur Bewegung, durch Beschleunigung oder Verzögerung der Bewegung und schließlich durch den Übergang von der Bewegung in den Ruhezustand; die gleichförmige Bewegung verhält sich auch hier ganz wie die Ruhe.

Oder ein Fall, in dem die Raumbeziehung der in Betracht kommenden Faktoren wesentlich andersartig ist. Im soeben betrachteten Falle kamen im wesentlichen Vertikalbewegungen in Frage, also Bewegungen in der Richtung derjenigen Kraft, deren Repräsen-

tant eben das Gewicht der Körper ist: der Schwerkraft. Nehmen wir jetzt einen Körper, der sich horizontal bewegt, so finden wir, daß er in diesem Zustande schwächer nach unten drückt als im Ruhezustande, und zwar in diesem Falle auch schon bei gleichförmiger Bewegung. Und daß dieses Verhalten Körper ganz verschiedenen Wesens in ganz gleicher Weise trifft, dafür genügt es, zwei extreme Beispiele anzuführen: den Eisenbahnzug, der über eine Brücke fährt, und den Wind, der die Luft an der Erdoberfläche entlang fegt. In jenem Falle ist die Druckverminderung infolge horizontaler Bewegung groß genug, um unter Umständen zu veranlassen, daß eine morsch gewordene Brücke zwar den fahrenden, nicht aber den stehenden Zug noch erträgt (daß trotzdem das in Amerika in solchen Fällen wiederholt ausgeführte Experiment, einen Zug über eine zweifelhafte Brücke hinwegrasen zu lassen, ein Wagnis ist, liegt daran, daß durch den Zug die Brücke eventuell zu Schwingungen angeregt wird, und daß diese die Katastrophe natürlich eher fördern als verhindern werden). Im Falle des Windes aber, im Vergleiche mit sonst ebenso beschaffener ruhender Luft, können wir die Druckverminderung ohne weiteres an einem uns vertrauten Apparate, dem Barometer, ablesen, das sofort ins Sinken gerät, wenn sich in der bisher ruhigen Luft ohne sonstige Vorkommnisse ein kräftiger Wind erhebt.

7. Nach diesem für die Beurteilung des Gesamtproblems nicht unwichtigen Exkurse kehren wir zur wahren Masse zurück. Was nun diese wahre Masse bzw. das wahre Gewicht, also unter Ausschluß aller Bewegungswirkungen betrifft, so könnte man der Meinung sein, daß man nun am Ende der Analyse und somit bei der größtmöglichen Einfachheit der Formulierung angelangt sei; denn die Masse ist eben der quantitative Repräsentant dessen, was an einem Körper materiell ist, sie ist sozusagen das Maß dessen, was wir Materie nennen. Und doch ist unsere Analyse noch nicht fertig, wir sind noch nicht bis zum einfachsten Elemente durchgedrungen. Das sehen wir sofort ein, wenn wir die Beziehung der Masse eines Körpers zu

seiner Raumerfüllung in Betracht ziehen. Masse soll doch etwas sein, was mit der Raumerfüllung als solcher nichts zu tun hat, denn für diese haben wir doch spezifische Raummaße, nämlich die drei Dimensionen und die in ihnen abzusteckenden Strecken. Stecken trotzdem noch Raumgrößen in unserem Begriffe, so muß er eben — das ist unsere nächste Aufgabe — von diesen gereinigt werden.

Nehmen wir auch hier ein leicht faßliches Beispiel! Wir bestellen, etwa als Inventar für eine Regalbahn, eine Reihe von Kugeln, die aus demselben Holze, aber von verschiedener Größe hergestellt werden sollen. Diese Kugeln haben nämlich die Bestimmung, durch unsere Muskelkraft in Bewegung gesetzt zu werden; und da die Muskelkräfte der verschiedenen Teilnehmer verschieden groß sind, wollen wir für geeignete Abstufung der Massen, d. h. der Bewegungswiderstände sorgen. Man sieht, wir identifizieren hier Masse und Größe, strenger gesagt: Masse und Volumen, und wir nehmen stillschweigend an, daß die Masse mit dem Volumen parallel geht, in wissenschaftlicher Ausdrucksweise: daß die Massen verschieden großer, sonst gleicher Körper proportional sind mit ihren Volumina. Wir können das auch leicht, wenigstens in grober Annäherung, experimentell feststellen; denn wenn wir nacheinander alle Kugeln herannehmen und immer, wofür wir ja ein leidliches, instinktives Gefühl haben, dieselbe Muskelanstrengung ausüben, so finden wir, daß sie verschiedene Geschwindigkeiten annehmen, und zwar derart, daß die doppelt so große Kugel nur die halbe, die dreimal so große nur die drittel Geschwindigkeit annimmt, d. h. die zweite Kugel leistet den doppelten, die dritte den dreifachen Widerstand; wir müssen also jener die doppelte, dieser die dreifache Masse beilegen wie der ersten.

Also, um es zu wiederholen: die Masse ist mit dem Volumen proportional. Dieser Satz, auf dessen erkenntnistheoretische Natur wir hier nicht eingehen wollen (im Obigen ist er als reiner Erfahrungssatz hingestellt worden, man kann aber auch anderer Meinung darüber sein), ist von großer Bedeutung; denn er erlaubt uns, die Masse als etwas aufzufassen, was in dem Körper überall verteilt ist und was

man zerteilen kann, wie man den Körper räumlich in Teile zerlegen kann. Wirklich, wenn man ein Stück Materie mit dem Messer zerschneidet, so kommt auf jedes Teilstück ein seiner Größe entsprechender Massenanteil, und die Summe der einzelnen Massen ist so groß wie vorher die ganze Masse war. Und diesen Prozeß kann man prinzipiell beliebig weit fortsetzen, praktisch kommt man natürlich sehr bald an die Grenze des Ausführbaren. Daß die Masse räumlich verteilt ist, ist durchaus nicht selbstverständlich; denn es gibt viele Eigenschaften, die nicht räumlich verteilt sind und nicht zerteilt werden können, sondern eine unteilbare Einheit bilden, z. B. die Temperatur; es würde uns doch geradezu komisch vorkommen, sollten wir uns vorstellen, bei der Teilung eines Körpers in zwei gleiche Teile käme auf jedes Teilstück die halbe Temperatur! Jeder Teil des Körpers hat vielmehr genau die gleiche Temperatur wie der Körper als Ganzes. Und wieder andere Eigenschaften gibt es, die räumliche Beziehungen haben, aber ganz andere als die Proportionalität mit dem Volumen, z. B. der elektrische Widerstand, der sich zwar in der Richtung des Stromdurchganges so verhält wie die Masse, in der Querrichtung aber gerade umgekehrt, so daß beim Zerschneiden eines Kupferdrahtes in einzelne kürzere, aber gleich dicke Stücke sich auch der Gesamtwiderstand in die entsprechenden Teile zerlegt, beim Zerspalten des Drahtes in dünnere Teilfasern aber jede einzelne Faser allein einen größeren Widerstand hat als der ganze frühere Draht.

Masse ist etwas Kumulatives oder Additives, und man kann ihr daher, während sie selbst ausdehnungslos ist, etwas Ausgedehntes, dessen Attribut sie ist, zuordnen. Auf diese Weise gelangen wir erst recht eigentlich zu dem Begriffe „Materie“ oder „Stoff“ und können nunmehr sagen: Masse ist der Inhalt eines Körpers an Materie. Aber nur in dem hier nach und nach herausgeschälten Sinne besagt dieser Satz etwas Vernünftiges, während er, wenn man ihn, wie es häufig geschieht, an die Spitze eines Buches stellt, völlig bedeutungslos ist, da er zwei Begriffe enthält und von ihnen etwas ausagt, von denen keiner ohne den anderen definiert ist. Der wahre Sinn des

Begriffes Materie ist eben untrennbar von ihrer räumlichen Ausdehnung und liegt in dem, was man ihre Lokalisierung nennen kann, d. h. ihre Beziehung auf bestimmte Raumteile. Nur diese Lokalisierung ermöglicht dann weiter die Einführung der Idee der Bewegung, d. h. der Ortsänderung, die man der „Lokalisierung“ als „Wanderung“ der Materie zur Seite stellen kann. Es hat sich in neuerer Zeit ergeben, daß auch der andere umfassende und in letzter Instanz sogar noch weit umfassendere Grundbegriff der Naturlehre, die Energie, nur real erfaßt werden kann, wenn man ihr ebenfalls die beiden Eigenschaften der Lokalisierung und der Wanderung im Raume beilegt.

Unser Experiment mit den Kugeln bedarf übrigens noch der Ergänzung. Es kann nämlich leicht geschehen, daß wir aus zwei verschiedenen Bezugsquellen zwei gleich große Kugeln zum Regeln bestellen und dann trotzdem die Erfahrung machen, daß sie durch die gleiche Muskelanstrengung recht verschiedene Geschwindigkeiten erhalten, Werte, die sich im äußersten Falle etwa wie 1:3 verhalten; und auf nähere Erkundigung stellen wir fest, daß die eine Kugel aus Buchsbaum, die andere aus Pappelholz angefertigt worden war. Und wenn wir nun gar die eine Kugel aus Holz, die andere, gleich große aus Blei, in Bewegung setzen, so finden wir noch sehr viel größere Kontraste und sehen schließlich ein, daß der Widerstand gegen Bewegung, also die Masse, auch unabhängig von der Raumerfüllung noch eine ungeheure Mannigfaltigkeit von Werten besitzt. Wir sagen: verschiedene Körper bestehen aus verschiedenen Stoffen, wir führen verschiedene Arten von Materie ein und unterscheiden sie zunächst nach ihrer auf die gleiche Raumerfüllung bezogenen Masse. Mißt man Masse nach Grammen, so wollen wir jetzt einen neuen Begriff einführen, den man nach Grammen pro Kubikzentimeter mißt und den wir spezifische Masse, kürzer aber „Dichte“ nennen können; das letztere Wort wollen wir zu unserer Bequemlichkeit auch jetzt schon anwenden, obgleich es bereits Vorstellungen über die innere Konstitution der Materie erweckt, denen

wir erst später nachgehen wollen. Der prinzipielle Unterschied beider Begriffe ist offenbar der, daß die Masse ein Charakteristikum eines bestimmten individuellen Körpers ist, die Dichte dagegen das Charakteristikum einer Stoffart, gleichgültig, einen wie kleinen oder großen Körper man aus dieser Stoffart formt. Natürlich kann man auch hier wieder, um der experimentellen Realisierung näher zu kommen, die Masse durch das Gewicht ersetzen und erhält alsdann den Begriff des spezifischen Gewichts.

Wie man weiß, bestehen zahlenmäßig auf diesem Gebiete ungeheure Unterschiede. Während das Metall Platin 22mal so dicht und so schwer ist wie Wasser, ist dieses wiederum 800mal so dicht wie Luft, und die Luft ihrerseits 14mal so dicht wie Wasserstoff; die Extreme, Platin und Wasserstoff, verhalten sich also rund wie 250000:1, d. h. es gehört ein Viertel Kubikmeter Wasserstoff dazu, um dieselbe Masse zu ergeben wie die eines Kubikzentimeters Platin. In der Fig. 2 ist das in der Weise zur Anschauung gebracht, daß die Länge von Stäben angegeben ist, die sie bei gleichem Querschnitt haben müssen, um gleich viel zu wiegen. Bei den Gas Säulen muß man sich aber diese Längen vertausendfach und beim Wasserstoff sogar verzehntausendfach denken. Und wenn hiermit die natürlichen Kontraste im wesentlichen erschöpft sind, so können wir doch auf künstlichem Wege noch weiter kommen, indem wir ein Gas, z. B. die Luft, mit Hilfe der Pumpe aus dem Raume, den sie einnimmt, zum größten Teile entfernen — ein Verfahren, das in neuester Zeit die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit ganz beträchtlich erweitert hat. Auf diese Weise kann man die Dichte, mit der die Materie den Raum erfüllt, noch weiter auf den millionten Teil normaler Luft oder einen Bruchteil hiervon reduzieren, so daß der Gesamtkontrast schließlich durch das Verhältnis eine Billion zu eins dargestellt wird.

Mit der Feststellung, daß verschiedene Arten von Materie den Raum mit verschiedener Dichte erfüllen, sind wir an einer dunklen Stelle unseres Erkenntnisgebietes angelangt, an einer Stelle, wo eine verschlossene Tür mit der Aufschrift „Geheimfach“ uns das

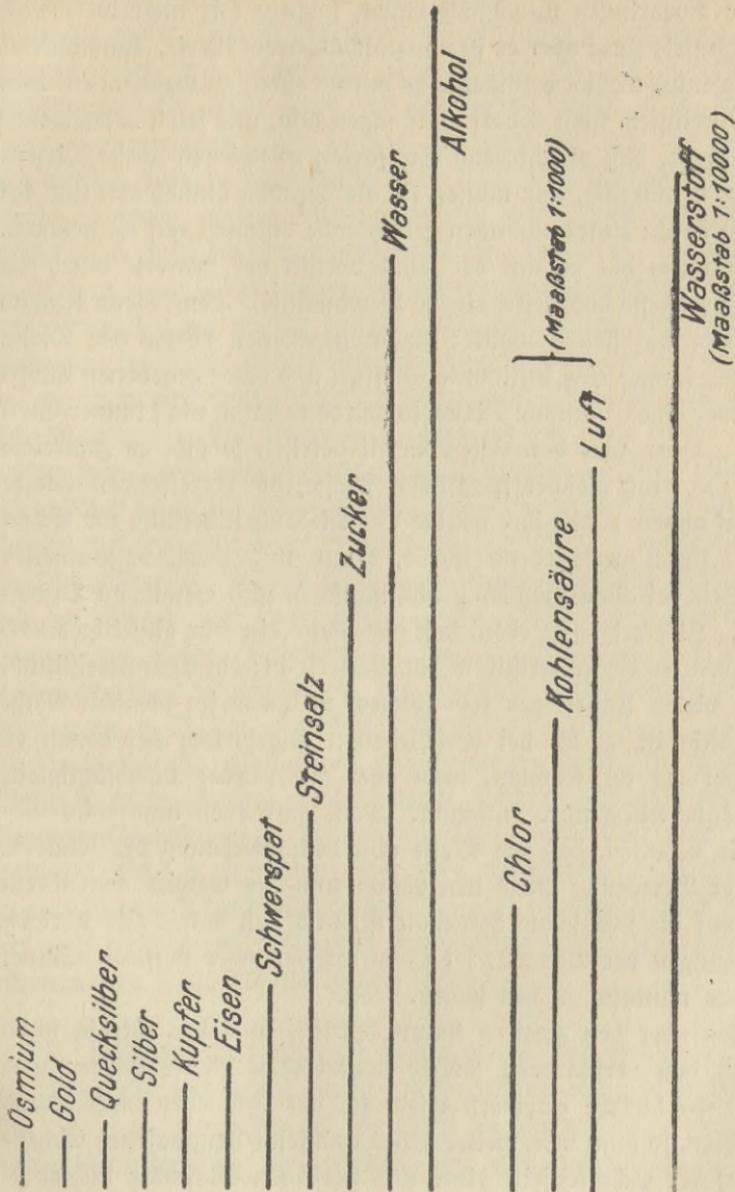


Fig. 2.

weitere Vordringen unmöglich macht, solange wir nicht im Besitze des Schlüssels sind; aber es ist von unschätzbarem Werte, zunächst einmal dasjenige Gebiet vollständig zu durchmessen, zu welchem es eines Geheimschlüssels nicht bedarf. Wir sagen also, uns selbst bescheidend: die Tatsache, daß verschiedene Stoffarten verschieden große Dichten besitzen, ist mystisch, wir müssen sie als gegeben hinnehmen und bei allen weiteren Untersuchungen gebührende Rücksicht auf sie nehmen.

Ubrigens hat es mit der Charakteristik der Materie durch die spezifische Masse doch seine eigene Bewandtnis. Denn wenn jemand die Forderung stellen wollte: einem gegebenen Werte der Dichte entspricht immer eine bestimmte Stoffart und einer gegebenen Stoffart immer eine bestimmte Dichte, so würde er damit nicht immer Glück haben. Denn was den ersten Punkt betrifft, so gibt es zahlreiche Fälle, wo, trotz gleicher spezifischer Masse, die betreffenden Stoffe doch auf andere Weise ihre völlige Verschiedenheit deutlich zur Schau tragen: durch verschiedene Farbe, Härte und durch verschiedenes Verhalten bei allen möglichen physikalischen und chemischen Operationen. Hier zeigt sich eben, daß die Masse ein sehr einseitiges und engbegrenztes Charakteristikum der Materie ist; ein Charakteristikum, das in vielen Fällen gar kein solches, vielmehr im höchsten Maße gleichgültig ist, z. B. bei verschiedenen Glasarten, bei denen es gar nicht auf ihr Gewicht, wohl aber auf Farbe, Durchsichtigkeit, Strahlenbrechung usw. ankommt. Man muß eben immer im Gedächtnis behalten, daß die Masse von dem Verhalten der Materie bei ihrer Bewegung durch den Raum und das Gewicht von ihrem Druck auf die Wagschale hergeholt ist, und daß damit alle übrigen Betätigungen der Materie, sei es im aktiven oder passiven Sinne, nicht das mindeste zu tun haben.

Was aber den zweiten Punkt betrifft, so haben wir ja schon gesehen, daß verschiedene Hölzer verschiedene Dichte haben; und wenn man hierauf erwidern wird: ja, das sind eben verschiedene Stoffarten, so kann man weiter gehen und feststellen, daß das Eichenholz auf der Schattenseite eines und desselben Stammes dichter ist

als auf der Sonnenseite, worauf man freilich nicht ohne Berechtigung antworten wird: Holz ist überhaupt als organisch gewachsener Stoff nicht geeignet, um elementare Definitionen an ihn zu knüpfen. Wählen wir also lieber einen gut definierten Stoff, z. B. Silber, und fragen wir nach seiner Dichte! Da zeigt sich nun, daß es auch hier mit der Angabe einer bestimmten Zahl nicht abgetan ist, da es darauf ankommt, ob das Silber in rohem oder gegossenem oder geschmiedetem Zustande oder aus einer Lösung gefällt ist. Am reinsten erhält man einen Stoff bekanntlich auf dem zuletzt genannten Wege, und wir wollen uns an ihn halten. Aber nun kommt eine neue Erscheinung: die Dichte reinen Silbers ändert sich mit der Temperatur, sie nimmt nämlich mit steigender Temperatur stetig ab und ist bei 800 Graden um fünf Prozent geringer als bei Null Grad. Jetzt müßte man schon noch weiter gehen und sagen: heißes Silber ist ein anderer Stoff als kaltes Silber, ja überhaupt bei jeder anderen Temperatur hat man einen anderen Stoff vor sich — ein Entschluß, der sicherlich wenig Anklang finden würde angesichts des Umstandes, daß im übrigen alle diese Stoffe, diese „Silberarten“ sich gleich, nämlich wie Silber schlechthin verhalten, abgesehen von freilich recht zahlreichen Eigenschaften, die ebenfalls mit der Temperatur sich ändern, z. B. der elektrische Widerstand.

Es bleibt also wirklich gar nichts anderes übrig, als zu sagen: Dichte ist keine absolute Stoffkonstante, sondern abhängig von verschiedenen Umständen, z. B. von der Temperatur oder vom Druck. Natürlich gibt das zu denken; aber ohne vollständige Neufundierung unseres Baues ist da vorläufig weiter nichts zu machen. Wir wollen erst noch weitere auf solche Art verschlossene Türen feststellen, ehe wir uns den Hauptschlüssel geben lassen.

8. Zunächst haben wir noch genug zu tun, das Gebiet, auf dem wir bisher operiert haben, und seine Umgebung völlig zu erschließen. Die Masse, so sagten wir, ist für einen im Raume sich bewegenden Körper charakteristisch; das ist richtig und doch auch wieder nicht all-

gemein richtig. Man muß hier unterscheiden zwischen den beiden großen Arten von Bewegungen, die wir an den Körpern beobachten: Verschiebung und Drehung, oder Translation und Rotation. Bei der Verschiebung, bestimmter gesagt: Parallelverschiebung bleibt irgendeine in dem Körper gedachte Ebene bei der Bewegung sich selbst parallel, bei der Drehung, bestimmter gesagt: Achsendrehung, ändert eben diese Achse ihren Ort im Raume nicht. Daß nun für die Verschiebung die Masse das volle Charakteristikum sei, darüber kann ein Zweifel nicht bestehen. Daß es aber bei der Drehung sich doch etwas anders verhält, läßt sich am besten durch einen sehr einfachen Versuch deutlich machen, der uns ein Stückchen Zauberei vorführt, aber Zauberei auf ganz natürlicher Grundlage; und da das Wort gerade einmal gefallen ist, wollen wir es auch dem Zauberkünstler nachtun und des Rätsels Lösung nicht, wie es sich in der Wissenschaft geziemt, voranschicken, sondern erst zum Schlusse geben. Wir nehmen also zwei Kugeln, gleich groß, gleich schwer, von gleichartiger Oberfläche (etwa schwarz lackiert) und legen sie in die oberen Enden zweier sanft nach unten verlaufender Rinnen; in dem Moment, wo wir sie loslassen, rollen sie hinunter — das ist also ein kombinierter Fall von Verschiebung und Drehung —, aber zu unserem Erstaunen nicht gleich schnell, sondern die eine viel schneller als die andere; und wenn wir die eine vielleicht mit einem Kennzeichen versehen, so finden wir bei Wiederholung des Versuches, daß es immer dieselbe ist, die schneller herabrollt. Und nun die Lösung: daß alle Körper gleichschnell fallen, weiß man seit Galilei, und dazu gehört auch das Herabgleiten auf der schiefen Ebene. Für das Herabrollen dagegen kommt es darauf an, wie die Masse in dem Körper verteilt ist, ob sie dicht um das Centrum herum angehäuft oder in weitem Abstände von ihm verteilt ist; man nennt die Größe, die diese Verteilung zum geeigneten Ausdrucke bringt, das Trägheitsmoment des Körpers; je größer es ist, desto größer ist auch der Widerstand des Körpers gegen Drehung, desto langsamer also wird er herabrollen. Nun ist die eine Kugel massiv, aber aus Aluminium,

die andere ist hohl, aber aus Blei; und die Ausmaße des Hohlraumes sind so abgeglichen, daß beide Kugeln, bei gleicher äußerer Größe, gleiches Gewicht haben. Aber die Hohlkugel aus Blei hat offenbar ein viel größeres Trägheitsmoment, und deshalb rollt sie viel langsamer herunter.

II.

9. Parallelverschiebung und Achsendrehung bilden das Gebiet der allgemeinen Bewegungslehre oder, wie sie wissenschaftlich gewöhnlich genannt wird, der Kinetik starrer Körper. Diesem Gebiete unmittelbar benachbart aber liegt ein Gebiet, dem wir uns nunmehr zuwenden wollen und das uns weitere, überaus interessante Aufschlüsse über das Wesen der Materie gibt. Es ist das Gebiet der Elastizität und alles dessen, was damit zusammenhängt. Bisher haben wir einen Körper lediglich in der Weise beansprucht, daß wir ihn als Ganzes im Raume fortzubewegen suchten; und dabei war seine Masse das entscheidende Charakteristikum. Jetzt wollen wir ihn anders beanspruchen: wir wollen die Lage seiner einzelnen Teile gegeneinander zu verändern suchen; da er sehr viele Teile hat und ihre Lagebeziehung im Raume eine dreifache Mannigfaltigkeit hat, gibt es, wie man sich vorstellen wird, unzählige derartige Veränderungen, und es tut not, einfache und typische Veränderungen herauszugreifen. Da erinnern wir uns nun, daß ein Körper, wie jedes räumliche Gebilde, zwei Grundeigenschaften hat: eine bestimmte Größe und eine bestimmte Gestalt; zwei Körper können sich entweder nur durch ihre Gestalt unterscheiden (dann haben sie das gleiche Volumen) oder nur durch die Größe (dann sind sie einander ähnlich) oder endlich, sie unterscheiden sich in keinem von beidem (dann sind sie einander kongruent). Dementsprechend können wir nun auf den Körper entweder derart einwirken, daß er nur sein Volumen oder so, daß er nur seine Gestalt ändert. In jedem der beiden Fälle wird das Ergebnis kein unbegrenztes sein; auch wenn wir immer weiter auf

den Körper einwirken, wird er doch sehr bald in einen bestimmten neuen Gleichgewichtszustand geraten — ein Beweis, daß er der Einwirkung Widerstand leistet, gerade wie ein starrer Körper der Bewegung im Raume. Entsprechend wie dort die Masse, müssen wir also auch hier Widerstandsmaße einführen, in unserem Falle aber gleich zwei solche, nämlich den Volumenmodul und den Gestaltmodul; jener der Widerstand gegen Änderung des Volumens, dieser der Widerstand gegen Änderung der Gestalt; man kann auch jenen als Kompressionsmodul (die Kompression kann aber auch negativ, d. h. eine Ausdehnung oder Dilatation sein), diesen als Deformationsmodul bezeichnen. Es fragt sich nun, ob in dieser Hinsicht die Materie wiederum so starke Kontraste aufweist wie hinsichtlich der Dichte, und diese Frage ist entschieden zu bejahen. Die Kontraste sind so groß, daß sie schon den naiven Menschen veranlassen, drei verschiedene Zustände der Materie zu unterscheiden, den festen, den flüssigen und den gasigen Zustand. Allerdings spielen diese schon für die Dichte eine große Rolle derart, daß die festen Körper im allgemeinen am dichtesten, die Gase am dünnsten sind, während die Flüssigkeiten in der Mitte stehen; aber daß diese Anordnung nicht allgemein durchgeht, zeigt der extreme Fall des Quecksilbers, das, obgleich eine Flüssigkeit, doch dichter ist, als die große Mehrzahl der festen Stoffe.

Man nennt jene Zustände die Aggregatzustände der Materie und hat also nun die Aufgabe, sie einfach und doch streng zu charakterisieren. Hier begegnet man nun dem nicht eben häufigen Fall, daß die volkstümliche Fassung so vorzüglich ist, daß die Wissenschaft nichts weiter zu tun hat, als sie in die Sprache der exakten Wissenschaft zu übersetzen. Die populäre Fassung lautet nämlich: Feste Körper haben selbständiges Volumen und selbständige Gestalt, Flüssigkeiten haben zwar selbständiges Volumen, aber keine selbständige Gestalt, Gase haben weder das eine noch das andere. Was das praktisch bedeutet, läßt sich am besten veranschaulichen, indem man sich an die frühere Feststellung erinnert, daß Materie etwas ist,

was sich aufbewahren läßt, und dies nunmehr dahin spezialisiert, daß sich feste Körper ohne besondere Hilfsmittel, Flüssigkeiten nur in unten geschlossenen und Gase nur in vollständig geschlossenen Gefäßen aufbewahren lassen. Wie man sieht, knüpft der vollstümliche Ausspruch direkt an die beiden Körpereigenschaften: Volumen und Gestalt an, und es bleibt nur noch übrig, die Maßgrößen dafür, die beiden Moduln, mit dem Satze in Beziehung zu setzen: Feste Körper haben zwei bestimmte — und zwar recht große — Moduln, Flüssigkeiten verhalten sich in bezug auf Volumen und Gestalt ganz entgegengesetzt, indem sie einen sehr großen Widerstand gegen Volumenänderung haben, d. h. praktisch inkompressibel sind, dagegen, wie wir zunächst einmal sagen wollen, gar keinen gegen Gestaltsänderung, also einen Gestaltmodul gleich null; Gase endlich haben gar keinen Modul, das soll besagen: beide Moduln sind null. Aber sofort zeigt sich bei dieser wissenschaftlichen Fassung, daß die Sache in keiner Hinsicht vollkommen ist und in mancher überhaupt nicht stimmt. Denn es ist doch ganz falsch zu sagen, ein Gas habe keinen Widerstand gegen Volumenänderung; man muß vielmehr aus diesem einen Satze deren zwei machen, man muß zwischen Ausdehnung und Zusammenziehung unterscheiden und nunmehr sagen: ein Gas setzt der Ausdehnung gar keinen Widerstand entgegen (es dehnt sich freiwillig und zwar mit großer innerer Kraft aus), dagegen hat es einen gar nicht unerheblichen Widerstand gegen Zusammendrückung. Es kann gar nicht laut genug betont werden, wie merkwürdig und wie bedeutsam diese Einseitigkeit im Verhalten der Gase ist. Es wird darauf zurückzukommen sein; hier sei nur bemerkt, daß dieser Hang zur Zerstreung die Gase auch begrifflich an die Peripherie der Körperwelt rückt und zur Folge hat, daß jener Dauercharakter, den wir als typisch für die materiellen Gebilde erkannten, nach außen hin bei ihnen am wenigsten in geschlossener Form zum Ausdruck kommt.

Dann aber erhebt sich die Frage, ob denn die Aggregatzustände sich wirklich in so einfacher, beinahe grober Weise erfassen lassen;

denn das Märchen von der Einfachheit, die in der Natur walten soll, ist doch längst der Erkenntnis gewichen, daß es sich hier im Gegenteil um eine nie endende Komplikation handelt, und daß die Einfachheit immer nur ein Prinzip unserer Naturauffassung sein kann; gewiß ein durchaus berechtigtes, aber doch ein Prinzip, das sich in geeigneter Weise mit der Komplikation der Erscheinungen selbst abfinden muß. Tatsächlich zeigt sich, daß keine der Teilbehauptungen, die in unserem Satze enthalten sind, streng richtig ist.

Betrachten wir zunächst einmal die Gase, weil bei ihnen die Verhältnisse in gewisser Hinsicht am einfachsten liegen! Hier können wir nämlich den Begriff des idealen Gases aufstellen, d. h. eines Gases, das sich wirklich so einfach wie möglich verhält und somit gewisse typische Gesetze mit Strenge erfüllt. An dieser Stelle können wir zunächst nur das erste dieser Gesetze in Betracht ziehen: Das Volumen eines idealen Gases steht im umgekehrten Verhältnis zum Drucke, den man auf es ausübt; oder umgekehrt (denn dem von außen ausgeübten Drucke entspricht im Gleichgewichtszustande immer eine genau gleiche innere Spannung): Die Spannung eines Gases steht im umgekehrten Verhältnis zu seinem Volumen; oder, noch anders: Das Produkt aus Volumen und Spannung bleibt bei allen Änderungen konstant. In der Fig. 3 ist das graphisch dargestellt: die horizontale Achse (Abszissenachse) gibt die Drucke, die vertikale (Ordinatenachse) die entsprechenden Volumina; die Endpunkte der diese Volumina darstellenden Linien sind zu einer Kurve verbunden, und diese Kurve ist eine gleichseitige Hyperbel. Statt des Volumens einer gegebenen Gasmenge, also statt des spezifischen Volumens, kann man auch die reziproke Größe einführen: die spezifische Masse, kurz Dichte genannt, und erhält dann drei ganz entsprechende Formulierungen: Die Dichte eines idealen Gases ist mit dem äußeren Drucke direkt proportional; oder: Die Spannung eines idealen Gases ist mit seiner Dichte direkt proportional; oder: Das Verhältnis der Dichte zur Spannung ist konstant. In Formeln, wenn c eine konstante Zahl bedeutet:

Bei gleichbleibender Temperatur

$$v = \frac{c}{p}, \quad p = \frac{c}{v}, \quad p \cdot v = c,$$

$$d = \frac{p}{c}, \quad p = cd, \quad \frac{p}{d} = c.$$

Dieses Gesetz heißt nach seinem Entdecker das Boylesche Gesetz, wird aber vielfach auch als Mariottesches Gesetz bezeichnet. Endlich kann

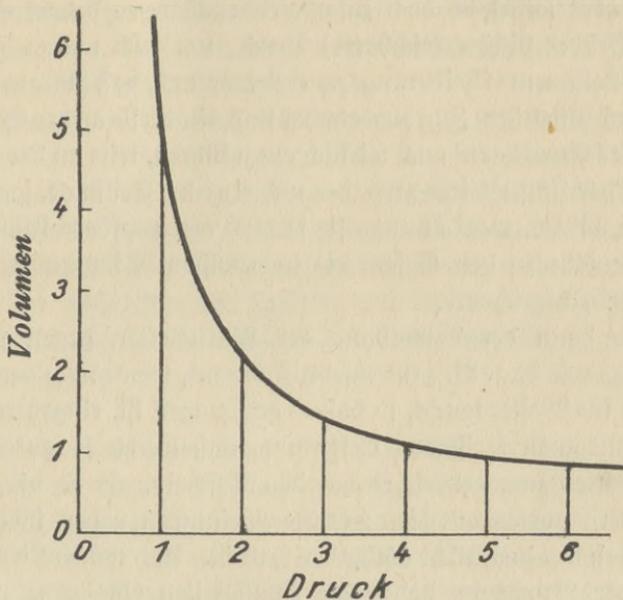


Fig. 3.

man dem Gesetze noch eine letzte Fassung geben, indem man den Elastizitätsmodul, speziell den Volumenmodul (denn einen Gestaltsmodul hat ein Gas gar nicht) einführt. Während dieser Modul für einen festen oder flüssigen Stoff einen bestimmten Wert hat, ist er hier veränderlich, und zwar gilt der Satz: Der Volumenmodul ist immer gleich dem herrschenden Druck. In dieser Fassung erscheinen

die Gase also als die komplizierteren Stoffe gegenüber den festen und flüssigen. Soweit die idealen Gase. Die wirklichen Gase weichen von ihnen mehr oder weniger ab, das Boyle'sche Gesetz ist nur annähernd erfüllt, und die Abweichungen werden um so größer, je mehr man sich den Grenzen des gasförmigen Zustandes nähert. Über davon später.

Was ferner die Flüssigkeiten betrifft, so sind sie allerdings sehr schwer, aber schließlich doch zusammendrückbar, es bedarf eben sehr großer (früher nicht erreichbarer) Drücke, um auch nur eine geringfügige Volumenverkleinerung zu erzielen; und daß sie andererseits nicht durch allseitigen Zug ausdehnbar sind, liegt teils an der Schwierigkeit, dieses Experiment auch wirklich auszuführen, teils an der Leichtigkeit, mit der Flüssigkeiten zerreißen und einzelne Teilstücke, sogenannte Tropfen, bilden, weshalb man sie ja auch als tropfbare Flüssigkeiten im Gegensatz zu den Gasen, die in gewissem Sinne auch Flüssigkeiten sind, bezeichnet.

Und dann der Widerstand der Flüssigkeiten gegen Gestaltsänderung, wie er z. B. zum Ausdruck kommt, wenn man den Finger langsam ins Wasser taucht, so daß es gezwungen ist, ringsherum auszuweichen: man weiß aus Erfahrung, daß hierzu so gut wie gar keine Anstrengung gehört, es hat den Anschein, als ob die Flüssigkeit widerstandslos ausweiche; exakte Messungen haben indessen ergeben, daß das doch nicht völlig der Fall ist. Und namentlich im Zustande der Bewegung haben die Flüssigkeiten eine ganz merkwürdige „Zähigkeit“, wie man dieses Verhalten alsdann nennen kann; ja, es gibt einzelne Flüssigkeiten, wie die Öle (von dem extremen Falle des Pechs gar nicht zu reden), bei denen die Zähigkeit so groß wird, daß man sich schon nahe dem Gebiete der festen Substanzen glaubt.

Am seltsamsten aber sind die Verhältnisse — wie sich neuerdings immer deutlicher herausstellt — bei den festen Stoffen, und in gewissem Sinne kann man hier geradezu von Anarchie reden. Während nämlich eine Flüssigkeit, z. B. Wasser oder Quecksilber, natürlich vorausgesetzt, daß es im reinen Zustande untersucht wird, eine ganz

bestimmte Kompressibilität und eine ganz bestimmte Zähigkeit besitzt, fallen die Elastizitätsmoduln eines und desselben festen Stoffes, z. B. des Kupfers, außerordentlich verschieden aus, wenn man sie an verschiedenen Probestücken ermittelt, und selbst ein und dasselbe Stück ist im allgemeinen nicht gleichförmig, ist nicht das, was man „homogen“ nennt; es gehört schon eine ganz besondere Sorgfalt in der Auswahl und Herstellung der Proben dazu, um wenigstens einigermaßen zuverlässige Ergebnisse erwarten zu dürfen — eine Tatsache, die z. B. in der Bau- und Maschinentechnik eine recht unliebsame Rolle spielt. Woran liegt das? Und wenn schon bei diesen einfachsten festen Stoffen, die man, weil sie sich wenigstens in den verschiedenen Richtungen gleich verhalten, als „isotrop“ bezeichnet, derartige Komplikationen auftreten, wie wird das, so könnte man zu fragen geneigt sein, gar erst bei den „heterotropen“ Körpern werden, die sich in verschiedenen Richtungen verschieden verhalten, und unter denen die wichtigsten die Kristalle mit ihrer, eben aus jener Richtungsverschiedenheit sich ergebenden außerordentlich mannigfaltigen Gestaltung sind?

10. Nun, auf diese Frage ist eine verblüffende Antwort zu geben, die noch vor wenigen Jahrzehnten sicherlich kein Naturforscher zu geben sich getraut hätte: gerade bei den Kristallen stellt sich, abgesehen von der für sie charakteristischen Richtungsmanigfaltigkeit, die klarste und strengste Gesetzmäßigkeit heraus, hier bleibt nichts dem Zufall überlassen, jeder Quarzkristall verhält sich genau so wie jeder andere, es gibt keine individuellen Verschiedenheiten (außer solchen, die selbst wieder Gesetzmäßigkeiten darstellen), kurzum: die Kristalle sind nicht kompliziertere Gebilde wie die amorphen Körper — so werden die isotropen auch genannt, weil sie keine Kristallformen bilden — sondern ganz im Gegenteil sehr viel einfacher. Und wenn man das zunächst für nicht recht verständlich erklärt, so höre man weiter, daß, wie schon jenes Verhalten vermuten läßt und die Beobachtung, insbesondere die mikroskopische, bestätigt, die amorphen Körper gar

nicht amorph, sondern ebenfalls kristallinisch sind, aber in der Weise, daß ein Kristall aus lauter gleich gerichteten, ein amorpher Körper aber aus lauter verschieden gerichteten Elementarkristallen besteht; mit anderen Worten: der amorphe Körper ist in seinen Elementen gar nicht isotrop, er macht nur als Ganzes diesen Eindruck, er ist, wie man sagt, quasi-isotrop. Da nun die Anordnung der Elemente im Kristall immer die gleiche, in verschiedenen Proben eines amorphen Stoffes aber individuell sehr verschieden ist, so begreift man jetzt die exakte Gesetzmäßigkeit der Kristallmoduln auf der einen und die vergebliche Mühe, für amorphe Stoffe allgemein gültige Werte der Moduln zu erhalten, auf der anderen Seite. Man kann, um Bilder aus dem Leben der Menschheit heranzuziehen, bei Kristallen von militärischer Disziplin sprechen, bei der alle Teile in Reih und Glied formiert sind, während sich bürgerliche Volksmengen aufstellen und anordnen, wie es jedem einzelnen paßt (wie leicht sind alsdann jene abzuzählen, wie schwer diese!); oder man kann an ein gut zusammenspielendes Orchester und an ein anderes denken, bei dem die Stimmen gegeneinander wirr nachhinken.

Die radikalste Konsequenz aber, die man aus diesen Feststellungen ziehen kann, knüpft daran an, daß doch hiernach die amorphen Körper eigentlich gar keine einheitlichen Körper, sondern Konglomerate von Kristallelementen sind, wodurch sich der Kristallcharakter im günstigsten — beziehungsweise ungünstigsten — Falle vollständig, in anderen Fällen aber nur teilweise verwischt, wie z. B. bei Metallen je nach ihrer Herstellung durch Gießen, Schmieden, Ziehen, Walzen, wodurch doch schon gewisse Richtungen eine ausgezeichnete Bedeutung erhalten. Sieht man also von solchen Körpern, die nicht physikalisch einheitlich und jedenfalls nicht exakt charakterisiert sind, ab, so kann man den zunächst etwas verblüffenden, aber im Grunde unbestreitbaren Satz aufstellen: Feste Körper sind immer Kristalle. Man könnte diesen Satz durch einen zweiten ergänzen und würde das auch zweifellos, wenn man ihn schon vor zwanzig Jahren gekannt hätte, getan haben, durch den Satz: Flüssig-

keiten sind keine Kristalle. Indessen sind eben in diesem Zeitraum Erscheinungen bekannt geworden, die sich, wenn auch nicht völlig unbestritten, als flüssige Kristalle deuten lassen; Erscheinungen, die allerdings nur bei einer sehr kleinen Zahl seltener bzw. schwer herstellbarer Flüssigkeiten auftreten und für die Gesamtheit des Erscheinungsgebietes mit Vorsicht zu verwerten sind.

Was nun die Kristalle als solche betrifft, so müssen hier wenige Bemerkungen genügen. Das wesentliche für die Kristalle sind die Symmetrieverhältnisse, die in ihrem Aufbau und ihren physikalischen Eigenschaften walten. Und zwar sind hier, den Mannigfaltigkeiten des Raumes entsprechend, drei Symmetriefaktoren maßgebend: das Symmetriezentrum, die Symmetrieachse und die Symmetrieebene. In Hinsicht des Zentrums kann es offenbar nur einen einzigen Gegensatz geben: Körper ohne und Körper mit Symmetriezentrum; dagegen kann es zunächst beliebig viele Achsen und Ebenen geben, z. B. zwei-, drei-, vier- usw. zählige Achsen, je nachdem sich die gleichen Verhältnisse rund um die Achse herum bei einem vollen Umlauf zweimal, dreimal, viermal usw. wiederholen. Indessen sind von allen diesen Fällen nur wenige mit dem elastischen Gleichgewicht der Teile vereinbar, und es kann tatsächlich nur vier verschiedene Achsen geben: zwei-, drei-, vier- und sechszählige. Ebenso sind, was die Ebenen betrifft, alle möglichen Fälle erschöpft mit der Annahme einer oder zweier Symmetrieebenen, die man besonders anschaulich auch als Spiegelebenen bezeichnen kann. Immerhin ergibt sich, wie man einsehen, durch Kombination aller dieser Faktoren eine große Mannigfaltigkeit und zwar, wie sich mathematisch exakt nachweisen läßt, nicht mehr und nicht weniger als 31 oder, wenn man die völlige Symmetrielosigkeit einerseits und die völlige Isotropie andererseits mitrechnet, 33 Symmetrieklassen. Daß man diese Klassen dann übersichtlich gruppieren kann, indem man sieben Kristallsysteme, vom triklinen ab bis zum regulären aufstellt, und in jeder von ihnen die nötigen Unterabteilungen macht, das soll hier nicht weiter erörtert werden.

Dagegen müssen wir der elastischen Charakterisierung der festen Körper noch kurz unsere Aufmerksamkeit schenken. Denn ein isotroper Körper ist, wie wir schon wissen, durch zwei elastische Konstanten vertreten, den Volumenmodul und den Gestaltmodul; jenen ermittelt man durch Messung des allseitigen Druckes, den man anwenden muß, um eine Kugel aus dem Material um einen bestimmten Bruchteil ihres Volumens zusammenzudrücken, diesen ermittelt man am einfachsten, indem man einen aus dem Stoffe geformten zylindrischen Stab drillt und zusieht, welche drillende Kraft man aufwenden muß, um den Stab um einen bestimmten Winkel zu drillen. Erhält man auf diese Weise zwei für den Stoff typische Zahlen, z. B. für Stahl im ersten Falle 16000, im zweiten 8000 kg pro qmm, so muß man bei Kristallen natürlich mehrere solche Zahlen angeben, da doch hier eine Richtungsverschiedenheit hinzukommt. In der That hat ein regulärer Kristall schon drei Elastizitätskonstanten, die Anzahl wird dann immer größer, je geringer der Symmetriegrad des Stoffes ist, und beträgt schließlich für einen Körper ohne jede Symmetrie nicht weniger als 21.

11. Gehen wir jetzt zu den Flüssigkeiten über, so müssen wir den Ausspruch, daß sie keine selbständige Gestalt hätten, denn doch in mancherlei Hinsicht berichtigen. Es ist wahr, man kann eine Flüssigkeit „umgießen“ aus einem kugligen Gefäß in ein langes, schmales, zylindrisches; immer schmiegte sie sich den Wänden des Gefäßes an. Wie aber steht es mit der oberen Grenze, mit der freien Oberfläche? Sie ist, wie man zunächst der Kürze halber, und weil diese Formulierung volkstümlich ist, sagen kann, durch die Kräfte bestimmt, die auf die Flüssigkeit wirken, also in erster Reihe durch die Schwerkraft, die zur Folge hat, daß die freie Oberfläche eine horizontale Oberfläche oder, sobald es sich um riesige Flächen, wie bei den Ozeanen handelt, ein Stück einer Kugeloberfläche wird. In zweiter Linie durch die Anziehung des Mondes und der Sonne, die, wie man weiß, die direkt unter diesen Gestirnen befindlichen Teile des Weltmeeres hebt,

die seitlichen aber entsprechend senkt, so daß ein Flutberg und ein Ebbetal entsteht, die in Form einer ungeheuren Welle um die Erde wandern. In dritter Reihe endlich ist die Kohäsion, der innere Zusammenhang der Flüssigkeitsteile, maßgebend und zwar in sehr verschiedener Weise, je nachdem er sich im Felde der Schwerkraft oder aber selbständig geltend macht. Im Felde der Schwerkraft hat die Kohäsion oder, wie man sie im Kleinen auch nennen kann, die Kapillarität eine Fülle von Erscheinungen zur Folge, wie die Bildung von Tropfen und Blasen, von feinen Häutchen (Seifenblasen), das Aufsteigen in feinen Röhrchen bei gewissen Flüssigkeiten, z. B. Wasser (während bei anderen Flüssigkeiten, z. B. Quecksilber, gerade umgekehrt eine Depression der Säule eintritt), und die Bildung einer von der ebenen Form abweichenden Oberfläche, also in den gedachten feinen Röhrchen die Bildung eines sogenannten Meniskus, der beim Wasser die Form eines ausgehöhlten, beim Quecksilber die eines erhabenen Kugelstückes annimmt. Um die Wirkung der Kohäsion für sich studieren zu können, muß man entweder sehr kleine Objekte benutzen, z. B. Quecksilbertröpfchen, die, je kleiner man sie wählt, desto genauer Kugelgestalt annehmen, oder aber: man muß, wenn man mit großen Massen arbeiten will, sie der Schwerkraft entziehen, indem man sie in ein Medium von gleicher Dichte bringt, was sich z. B. mit Hilfe einer geeigneten Ölsorte in einer alkoholischen Mischung gut bewerkstelligen läßt; auch hier sieht man dann das Öl die Form einer Kugel annehmen. Wenigstens, solange das Ganze ruht; versetzt man es jetzt in Rotation um eine senkrechte Achse, so erhält man neue Formen, nämlich das abgeplattete Ellipsoid, eine flache Scheibe und eventuell einen Ring, der aber nur vorübergehend besteht, um alsbald in eine Anzahl einzelner Teile zu zerreißen, deren jeder nun wiederum Kugelgestalt annimmt. Überseht man dieses Experiment aus dem Kleinen ins große, und ersetzt die Kohäsionskräfte durch die im kosmischen Ganzen tätigen Gravitationskräfte (von denen die irdische Schwerkraft ein Spezialfall ist), so gelangt man zur Lehre von den Gleichgewichtsformen der Flüssig-

keiten und zu ihrer Anwendung auf die Vorgänge bei der Bildung und Umformung der Weltkörper.

Immerhin bleibt ein Gegensatz zwischen festen und flüssigen Stoffen bestehen, insofern nämlich die Formen der festen Körper, von all ihrem Reichthum abgesehen, stets durch ebene Flächen, gerade Kanten und scharfe Ecken charakterisiert sind (wie wir bei den Kristallen, den einzigen reinen Vertretern, konstatieren), während es sich bei den Flüssigkeiten immer um rundliche Oberflächen handelt, die von Kanten und Ecken prinzipiell frei sind. Es liegt das eben daran, daß die Flüssigkeiten, woher ja ihr Name stammt, fließen und durch diesen Fluß werden plötzliche Richtungsänderungen der Oberflächen unmöglich gemacht. Unter diesen Umständen ist es ganz interessant, eine Form der Materie zu betrachten, die von den beiden Aggregatzuständen je die eine Eigenschaft übernommen hat und dadurch zu ganz neuen Erscheinungen Anlaß gibt: es sind das die sogenannten lockeren Massen, d. h. Haufen von sehr vielen gleichartigen festen Körpern, von so vielen, daß das Individuum in der Gesamtheit völlig verschwindet. Solche Massen, wie z. B. Sand, Mohnkörner, Glaskügelchen, Bleischrot usw., können zwar in gewissem Sinne auch „fließen“, sie können „umgeschüttet“ werden, man kann den Finger in sie „eintauchen“, in alledem also sind sie Flüssigkeiten ähnlich; aber andererseits gehorchen sie der Schwerkraft durchaus nicht soweit, daß sie horizontale Oberflächen bilden, im Gegenteil, sie bilden, auf geeignete Grundplatten aufgebracht, Gleichgewichtsformen, die mit ihren ebenen Flächen, Kanten und Ecken den Kristallformen in mancher Hinsicht ähnlich, wenn auch im übrigen wieder von eigenem Gepräge sind. Diese Formen sind, wie sich bis ins einzelne zeigen läßt, das Ergebnis eines Kampfes der Kohäsion mit der Schwerkraft, und es ließen sich, wenn der Raum es erlaubte, an die Betrachtung dieses Kampfes manche auch für die Theorie der Materie bedeutsame Erwägungen und Folgerungen anknüpfen.

12. Aber wir dürfen nicht bei Einzelheiten verbleiben, wir müssen darangehen, unsere Vorstellung vom Wesen der Materie zu erweitern; denn mit den bisher betrachteten mechanischen Eigenschaften ist es offenbar nicht getan, und insbesondere die elastischen Erscheinungen lassen sich nicht vollständig beschreiben und noch weniger verstehen, ohne daß man von einem neuen Grundphänomen Notiz nimmt. Ein Körper hat ein bestimmtes Volumen und eine bestimmte Masse, und das Verhältnis beider ergibt seine Dichte. Aber, während seine Masse immer dieselbe bleibt, finden wir durch Messung und sehr oft auch schon durch den einfachen Augenschein, daß das Volumen unter verschiedenen Bedingungen verschieden groß ist. Eine Klasse solcher Bedingungen haben wir ja schon kennengelernt in den elastischen Beanspruchungen, z. B. durch allseitigen Druck, der eine Volumenänderung zur Folge hat. Tatsache ist aber, daß Volumenänderungen auch eintreten, ohne daß, wenigstens bewußterweise, elastische Beanspruchung erfolgt. Die Gesamtheit der hierher gehörigen Beobachtungen führt uns dazu, eine Zustandsmannigfaltigkeit einzuführen, die wir die Temperatur nennen, für die wir allerdings auch unmittelbar ein physiologisches Gefühl (aber doch ein sehr trügerisches) haben, und die wir zu einer exakten Maßgröße eben erst dadurch machen, daß wir die gedachten Volumenänderungen feststellen; darauf beruht bekanntlich das Thermometer.

Wenn wir nun daran gehen, den Einfluß der Temperatur auf die verschiedenen Körperklassen zu untersuchen und seine Gesetze aufzustellen, so müssen wir eine erkenntnistheoretische Grundbemerkung voranschicken. Die Form der zu ermittelnden Gesetze wird natürlich ganz davon abhängen, wie wir die Temperatur definieren und insbesondere, welche Skala und welchen Nullpunkt wir für sie einführen. Die allgemein herrschende Skala ist die Galileische, und als Nullpunkt können wir vorläufig den Schmelzpunkt des Eises wählen. Die Galileische Skala ist alsdann dadurch charakterisiert, daß gleichen Temperaturgraden gleiche absolute Volumenänderungen entsprechen sollen; natürlich muß man einen bestimmten Stoff zugrunde legen,

3. B. den Wasserstoff. Es zeigt sich nun, daß alle idealen Gase sich auch hier, wie hinsichtlich des Boyle'schen Gesetzes, ganz gleich verhalten, daß sich mit steigender Temperatur nicht nur der Wasserstoff gleichmäßig ausdehnt (das ist ja selbstverständlich, weil wir die Grade der Skala so gewählt haben), sondern auch alle anderen Gase. Ja, noch mehr: Sie dehnen sich alle gleich stark aus, der thermische Volumenkoeffizient α ist für alle derselbe, nämlich $\frac{1}{273}$ oder 0,00367 für einen Grad. Und weiter: Wenn man ein Gas in einem geschlossenen Gefäße erwärmt, so daß es sich nicht ausdehnen kann, so steigt dafür seine innere Spannung, und zwar — offenbar eine unmittelbare Konsequenz des Boyle'schen Gesetzes — nach genau demselben Gesetze. In Formel, wenn t die Temperatur bedeutet und v_0, p_0 die Werte von v und p beim Eispunkt sind:

Steigender Temperatur

$$v = v_0 (1 + \alpha t) \quad p = p_0 (1 + \alpha t).$$

Statt des Eispunktes führen wir nun einen neuen Nullpunkt der Temperaturskala ein, indem wir uns vorstellen, wir könnten das Gas beliebig stark abkühlen, und es blieben dann die obigen Formeln immer noch gültig. Bei 273 Grad unter Null wird dann entweder das Volumen oder die Spannung des Gases zu Null geworden sein, und diesen Punkt, der offenbar die äußerste Grenze darstellt, wollen wir den absoluten Nullpunkt der Temperatur nennen. Bezeichnet man die von ihm aus gerechnete Temperatur mit T , setzt also

Wen bei 0 = 1
-273 = 1/273 $\alpha = \frac{1}{273}$ $273 = \frac{1}{\alpha}$

$$T = t + 273 = t + \frac{1}{\alpha}, \quad t = T - 273 = T - \frac{1}{\alpha},$$

so erhält man die obigen Formeln in der neuen Form:

$$v_0(1 + \alpha t) = v_0(1 + \alpha T - \frac{\alpha}{\alpha}) \quad v = v_0 \alpha T, \quad p = p_0 \alpha T.$$

Kombiniert man jetzt beide Formeln, indem man festsetzt: es soll sich entweder nur v oder nur p oder beide, aber jedes nur zu seinem Teile, mit der Temperatur ändern, so erhält man die allgemeine Zustandsgleichung eines idealen Gases in der Form:

$$v p = R T.$$

(Man kann sie auch als Arbeits- oder Energiegleichung der Gase bezeichnen; denn das Produkt links stellt den Energieinhalt des Gases dar.) Dabei ist R die Gasconstante, sie hat, solange man die Gleichung auf ein Gramm Substanz bezieht, für jedes Gas einen anderen, nämlich einen mit der Dichte umgekehrt proportionalen Wert; bezieht man sie nun aber, statt auf ein Gramm, auf eine Gramm-Molekel, d. h. nimmt man von jedem Gase sovielen Gramm wie sein chemisches Äquivalentgewicht angibt, so wird R für alle Gase gleich, also eine universelle Naturconstante und zwar in Erg

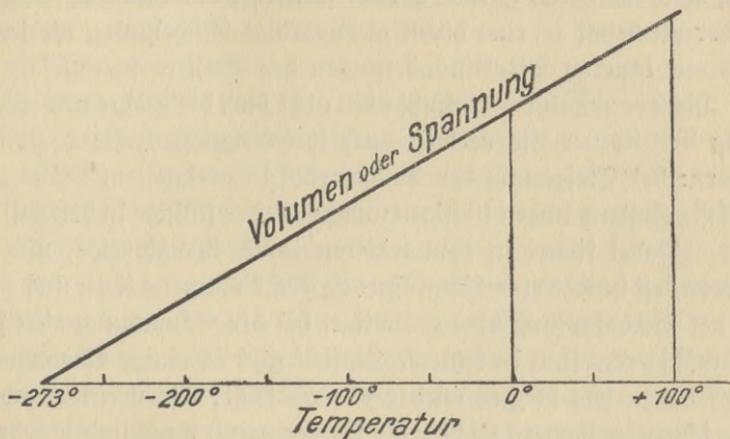


Fig. 4.

ausgedrückt, gleich 83 Millionen, dagegen, wenn v in Litern und p in Atmosphären gemessen wird, gleich 0,082; eine Gramm-Molekel eines idealen Gases nimmt also bei 0 Grad und einer Atmosphäre Druck einen Raum von $0,082 \cdot 273$ gleich 22,4 Litern ein.

Die wirklichen Gase weichen von den idealen Verhältnissen auch hier mehr oder weniger ab, desto mehr, je näher man ihrem Verflüssigungspunkte kommt; und schließlich hören die obigen Gesetze vollständig auf, gültig zu sein, wovon sofort noch die Rede sein wird.

Bei den festen und flüssigen Stoffen ist die Änderung des Volumens mit der Temperatur erstens viel geringfügiger als bei den Gasen, und zweitens in weniger einfacher Weise gesetzmäßig. Insbesondere aber hat hier jeder einzelne individuelle Stoff seine besonderen Eigentümlichkeiten, diese Stoffe sind, sozusagen, nicht wie die Gase, alle über einen Kamm geschoren. Am sonderbarsten aber von allen Stoffen verhält sich das Wasser, das sich zwar bei der Abkühlung von hohen Temperaturen abwärts bis auf 4 Grad mehr und mehr zusammenzieht, hier aber sein Dichtemaximum erreicht und sich nun, ohne sichtbaren Grund, bei der weiteren Abkühlung auf 0 Grad wieder ausdehnt — eine höchst merkwürdige Erscheinung, die jedenfalls auf inneren Strukturänderungen des Wassers beruht.

Die Temperatur beeinflusst aber nicht bloß die Dichte und Spannung der Körper, sie vermag auch ihren Aggregatzustand zu verändern: bei Steigerung der Temperatur in geeignetem Maße geht der feste Zustand in den flüssigen und später der flüssige in den gasigen über. Dabei findet in dem letzteren Falle ausnahmslos, und im ersteren fast immer eine Vergrößerung des Volumens statt, und zwar bei der Verdampfung eine gewaltige, bei der Schmelzung eine sehr viel mäßigere. Und in letzterer Hinsicht gibt es einige Ausnahmen, unter denen das Wasser wieder obenan steht: Eis von 0 Grad ist nicht schwerer, sondern leichter als Wasser von 0 Grad und schwimmt daher auf diesem — eine neue Anomalie, die offenbar mit der vorhin erwähnten in einem gewissen Zusammenhange steht.

Damit haben wir ein weiteres Grundphänomen, das die Materie darbietet, kennengelernt: die Umgestaltung aller ihrer Verhältnisse durch die Temperatur.

Natürlich kann man das neue Phänomen formal auf das alte zurückführen, indem man sich vorstellt, daß bei Temperaturänderung die natürliche elastische Beanspruchung des Körpers sich ändert, man kann vom „thermischen Druck“ sprechen und diesen Gedanken auch wirklich exakt durchführen; aber etwas Besonderes bleibt es trotzdem. Ja, die Analogie geht noch weiter, indem man auf jedem

der beiden Wege nicht bloß das Volumen, sondern sogar den Aggregatzustand beeinflussen kann: durch Drucksteigerung sowohl wie durch Temperaturerniedrigung kann man z. B. ein Gas verflüssigen, und zwar kann man im einzelnen verfolgen, welche Drucksteigerungen man bei einer bestimmten Temperatur, und welche Temperaturerniedrigung man bei einem bestimmten Drucke anwenden muß, um das gewünschte Resultat zu erzielen. Hier aber zeigt sich eine merkwürdige Grenze der Unabhängigkeit beider Faktoren voneinander, die in der Geschichte der Naturlehre eine große Rolle gespielt hat. Wenn nämlich die Temperatur oberhalb eines gewissen Grenzwertes liegt, kann man durch keinen noch so starken Druck Verflüssigung erzielen; und wenn der Druck unterhalb eines gewissen Grenzwertes liegt, kann man die Temperatur noch so sehr erniedrigen, das Phänomen wird ebenfalls ausbleiben. Man nennt jenen Grenzwert, der für jeden Stoff ein anderer ist, die kritische Temperatur und den entsprechenden Druck den kritischen Druck des Stoffes. Bei Wasser liegt die kritische Temperatur sehr hoch, und folglich kann man Wasserdampf bei gewöhnlicher Temperatur einfach durch Druck verflüssigen; bei Sauerstoff dagegen liegt sie sehr tief, und daraus erklärt sich die Erfolglosigkeit der Versuche früherer Zeiten, Sauerstoff bei Zimmertemperatur durch Druck zu verflüssigen; hier ist eben Vorbedingung, daß die Temperatur sehr stark herabgesetzt und gleichzeitig der Druck sehr stark erhöht werde. Den Zustand aber, bei dem der Druck und die Temperatur ihre kritischen Werte haben, nennt man den kritischen Zustand, und sein bezeichnendstes Merkmal ist, daß, während sonst zwischen der Dichte des flüssigen und der des gasigen Zustandes eine starke Differenz besteht, diese hier ganz wegfällt; man kann geradezu sagen: im kritischen Zustande gibt es keinen Unterschied zwischen Flüssigkeit und Gas. Ob es auch einen kritischen Zustand zwischen fest und flüssig gibt, ist noch nicht mit Sicherheit festgestellt und jedenfalls nicht entfernt von ähnlicher Bedeutung.

Aus dem Gesagten folgt, daß weder die Dichte noch der Aggregat-

zustand einem Stoffe an sich eigentümlich ist; einer und derselbe Stoff kann vielmehr je nach Temperatur und Druck sehr verschiedene Dichten haben, und er kann auch verschiedene Aggregatzustände annehmen; so kennen wir das Wasser als Eis, tropfbares Wasser und Wasserdampf. Dabei besteht fast allgemein eine einseitige Tendenz des Temperatureinflusses: steigende Temperatur erhöht sowohl das Volumen (verringert also die Dichte), als auch den Aggregatzustand, wenn wir den flüssigen Zustand dem festen, den gasigen dem flüssigen gegenüber als den höheren bezeichnen. Aber es gibt davon merkwürdigerweise Ausnahmen, und die allermerkwürdigste ist vielleicht die, daß das Wasser sich sowohl beim Schmelzen, als auch weiterhin bei der Erwärmung von 0° auf 4° nicht ausdehnt, sondern im Gegenteil zusammenzieht — eine Tatsache, die man bisher noch auf keine Weise in die allgemeine Vorstellung hat einordnen können.

13. Jedenfalls hat nach alledem die Temperatur einen entscheidenden Einfluß auf den Zustand der Materie, und es handelt sich jetzt darum, diesem Einfluß einen geeigneten Ausdruck zu verleihen. Hierzu ist der Begriff der Temperatur lange nicht so geeignet wie ein anderer, den man aus ihm sozusagen herausdestilliert hat: der Begriff der Wärme, exakter gesagt: der Wärmemenge. Um die Temperatur eines Körpers zu steigern, muß man ihm Wärme zuführen; und die Wärmemenge, die man ihm zuführen muß, um eine bestimmte Temperaturerhöhung zu erzielen, ist für jeden Körper eine andere; derart, daß auch hier wieder die mechanische Masse in Frage kommt, außer ihr aber ein neuer Faktor, den man, in allgemeiner Analogie mit der spezifischen Masse, als spezifische Wärme bezeichnet; wie bei der Bewegung, so handelt es sich auch bei der Erwärmung um einen Widerstand, und zwar hier um den Widerstand, den der Körper der Temperaturerhöhung entgegensetzt. Auch noch anders kann man sich die Sache vorstellen, indem man sagt: die verschiedenen Körper haben eine verschiedene Aufnahmefähigkeit, eine verschiedene „Kapazität“ sowohl für bewegende Kraft als auch

für Wärme; die Kraftkapazität ist die Masse, die andere ist die Wärmekapazität. In beiden Fällen nimmt der Körper etwas in sich auf, verschluckt er etwas; und um die beiden Fälle unter eine höhere Einheit zu bringen, braucht man nur zu bedenken, daß mechanische Arbeit und Wärme wesensgleich, daß sie lediglich verschiedene Formen eines und desselben großen Etwas sind, das den Namen „Energie“ erhalten hat. Ob man einen Körper im Raume bewegt oder elastisch deformiert oder erwärmt, immer führt man ihm Energie zu; er hat also nicht bloß einen passiven, einen Widerstandsinhalt, eine Masse; er hat auch einen aktiven Inhalt, einen Gehalt an innerer Energie. Bei einem sich bewegenden Körper ist diese Energie „aktuell“ oder „kinetisch“, bei einem ruhenden, z. B. einem in einer bestimmten Lage oder Spannung festgehaltenen oder bei einem erwärmten Körper ist sie „potentiell“ oder „statisch“, Ausdrücke, die sich zunächst nur auf die äußerliche Sichtbarkeit oder Unsichtbarkeit der Energie bzw. des energetischen Verhaltens beziehen.

Es ist durchaus notwendig, daß wir über die Bedeutung der beiden Begriffe „Masse“ und „Energie“ und ihr Verhältnis zueinander vollständig klar werden; und diese Klärung kann nur sehr zu Ungunsten der Masse und sehr zugunsten der Energie ausfallen. Denn wenn wir schon früher sahen, daß die Masse eine sehr engbegrenzte Charakteristik der Materie enthält, so wird uns das jetzt in jedem neuen Falle durchaus bestätigt. Man hat in früheren Zeiten wiederholt und mit vollem Rechte festzustellen versucht, ob und um wieviel ein warmer Körper schwerer ist als ein kalter, aber es hat sich niemals ein Unterschied ergeben: Wärme ist kein Stoff und überhaupt kein stoffliches Attribut. Und nun mehren sich die Zeugnisse dieser Art in ungeahnter Weise, die nichtstofflichen Agentien schießen wie die Pilze aus der Erde hervor, und die Materie als solche tritt an Interesse für den Physiker mehr und mehr zurück, wenigstens solange nicht eine gangbare Brücke geschlagen ist zwischen dieser Welt der Imponderabilien und der Materie. Denn auch ein Magnet wiegt deshalb, weil er magnetisch ist, kein Milligramm mehr als er wiegen würde,

wenn er bloß Eisen wäre; ein Versuch, den man ja mit Hilfe eines plötzlich und vorübergehend magnetisch gemachten Elektromagnetkerns in höchst einfacher Weise durchführen kann. Und daselbe gilt von der elektrischen Ladung eines Körpers und von einem stromdurchflossenen Kupferdraht: an alledem ist die Masse völlig unbetheilt. Allerdings das merkwürdige Phänomen der scheinbaren Massensteigerung, wie wir sie beim Schiff im Wasser oder beim Kreisel in der Kugel kennengelernt haben, zeigt sich hier auch wieder, z. B. beim Schwingen eines Pendels, dessen Pendelkörper eine Kupferplatte ist, in dem engen Schlitze zwischen den Polen eines Elektromagneten: solange dieser noch unerregt ist, schwingt das Pendel in normaler Weise, d. h. mit langsam abnehmender Schwingungsweite hin und her, und erst nach dukenden oder hundertern Schwingungen kommt es, wenn es gut aufgehängt ist, zur Ruhe; sobald aber der Elektromagnet erregt ist, ist schon die zweite Schwingung viel enger als die erste, und bei der dritten bleibt das Pendel wie festgebannt stehen, als ob es sich nicht in Luft, sondern in einer pechartigen Masse bewegte. Diese „pechartige Masse“ ist das elektromagnetische Feld, ist die elektromagnetische Energie; die Energie also ist es wiederum, die uns Masse vortäuscht.

Wie man sieht, ist schließlich alles in der Natur durch Energie bedingt und nur sehr wenig durch Masse. Und das bestätigt sich nun auch durch eine Überlegung, die allerdings einem ganz anderen als dem naturwissenschaftlichen Gebiet angehört, aber gerade deshalb die Angelegenheit klar beleuchtet. Man sagt gewöhnlich, und mit vollem Recht, daß es in der Welt zwei Realitäten gebe: Masse und Energie oder, wie man sich auch ausdrücken kann: Stoff und Arbeit. Und das gibt sich am drastischsten dadurch zu erkennen, daß diese beiden Dinge es sind, die Geld kosten, die einen „Wert“ im Sinne unserer menschlichen Wirtschaftsordnung haben. In jedem der beiden Fälle ist die Skala der Werte außerordentlich groß, dort vom Wasser bis zum Radium, hier von der Arbeit der ungeübten Tagelöhnerin bis zum Gesange eines phänomenalen Tenors. Wenn wir

aber nun nicht die Unterschiede innerhalb jedes einzelnen Falles ins Auge fassen, sondern beide Fälle miteinander vergleichen, so erhalten wir ein sehr deutliches Resultat: der Löwenanteil aller Werte entfällt nicht auf den Stoff, sondern auf die Arbeit. Wenn man z. B. ein Fahrrad kauft, so bezahlt man mindestens drei Viertel für die Herstellung und höchstens ein Viertel für das Material und dieses seinerseits ist auch noch nicht Rohmaterial, sondern ebenfalls erst durch Arbeit aus diesem gewonnen, das Metall in den Hütten und Stahlwerken, das Kautschuk in den Plantagen usw.; rechnet man auch dieses noch um, so wird man kaum fehlgehen mit der Behauptung, daß höchstens fünf Prozent auf den Stoff, alles andere auf die Arbeit komme. Ja, man kann, von wenigen besonderen Fällen, unter denen die Edelmetalle am nächsten liegen, abgesehen, im Prinzip geradezu sagen, daß der Stoff an sich überhaupt keinen Wert hat: die Bearbeitung und der Gebrauch schaffen erst einen solchen; und das gilt schließlich selbst in jenen Ausnahmefällen, wie denn der Wert des Goldes wesentlich in seiner Dauerhaftigkeit und Unveränderlichkeit liegt, also in seinem besonderen Verhalten gegenüber den energetischen Vorgängen, denen man die Körper aussetzen kann und fortwährend aussetzt.

14. Und das leitet uns wie von ungefähr zu der letzten Hauptfrage dieses Abschnittes unserer Erörterungen über: zur Frage der Dauerhaftigkeit, der Unverwüstlichkeit, der Unveränderlichkeit von Masse einerseits, Energie andererseits. Die Antwort hierauf geben, wie man weiß, die beiden großen Grundgesetze der Natur: das Gesetz von der Konstanz der Masse oder von der Erhaltung des Stoffes, und das Gesetz von der Erhaltung der Energie. Beides sind Erfahrungssätze, aber doch Sätze von so allgemeiner Erfahrung, daß sie sich längst auf ein höheres Niveau in der Hierarchie der Wissenschaft erhoben haben: zu Prinzipien, in die man unbedingtes Vertrauen setzt, und die man, wo sie dem Anscheine nach vielleicht verletzt werden, durch eine neue Auffassung der Dinge, eventuell sogar durch neue

Forschungen, die dann von entsprechenden Neuentdeckungen gekrönt werden, immer wieder zu retten unternimmt. Stoff kann weder erzeugt noch vernichtet werden, die Masse bleibt immer dieselbe; wo sich die Masse eines begrenzten Systems ändert, z. B. zunimmt, nimmt sie sicher in einem anderen System, das mit jenem in Massenaustausch stand, ab, und zwar um ebensoviel; derart daß in dem System, das aus den beiden bisherigen gemeinsam besteht, die Masse ungeändert bleibt. Und wenn man in dieser Zusammenfassung von Systemen weiter geht, gelangt man schließlich zum Universum, dessen Masse sich also niemals ändern kann. Freilich hat dieser letzte Schluß, auch wenn man ihn auf die naturwissenschaftliche Erkenntnis beschränkt und alles übernatürliche beiseite läßt, den Haften, daß, solange man unter „Universum“ zwar etwas sehr großes, aber doch endliches versteht, sich immer der Verdacht erhebt, daß es noch andere derartige endliche „Universa“ geben möchte; und daß man, wenn man das Universum als unendlich ansieht, sich damit auf ein Gebiet begibt, dem die menschliche Erkenntnis, die stets am Endlichen haftet, nicht gewachsen ist.

Ganz Entsprechendes gilt nun zweitens von der Energie, auch sie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, und alle soeben angestellten Betrachtungen können Wort für Wort übernommen werden.

Daß aber trotzdem beide Prinzipien nicht gleichwertig sind, braucht nach allem früher Gesagten nicht nochmals dargelegt zu werden. Masse ist von ganz speziellem Charakter, und lediglich Energie ist ein universaler Begriff; zwei derartig verschiedene Dinge aber darf man nicht koordinieren. Und sobald man das eingesehen hat, muß man auch gleich noch einen Schritt weitergehen und mindestens die Möglichkeit hinstellen, den Spezialbegriff dem allgemeinen unterzuordnen; ob und wie das gelingt, ist eine andere Frage, es wird das von der Entwicklung unserer tatsächlichen Kenntnisse und der Klärung unserer Auffassung abhängen. Daß bereits Ansätze zu einer Reduktion der Masse auf Energie vorhanden sind, ist schon wiederholt gezeigt worden und wird uns noch weiter beschäftigen; und es gibt zahlreiche Fach-

männer, die der Meinung sind, daß, unbeschadet der Weiterarbeit in dieser Richtung, doch schon jetzt behauptet werden darf, daß Masse restlos in Energie aufgeht. Damit hört dann natürlich auch das Erhaltungsprinzip auf, für den Stoff als solchen zu gelten, gerade wie es auch für die Wärme als solche nicht gilt; denn wenn sich Masse in eine andere Energieform verwandeln oder aus ihr entstehen kann, so kann von Konstanz der Masse nicht mehr die Rede sein; was übrig bleibt, ist dann nur noch das große und einheitliche Gesetz von der Erhaltung der Energie. Damit ist dann, um diesen Rückschluß auf die allgemeine Erkenntnistheorie nur kurz zu streifen, jede Art von Materialismus beseitigt, und durch eine Energetik, in weiterer Analyse durch einen Phänomenalismus und in tiefster Wurzel durch einen nur mit Empfindungselementen rechnenden Subjektivismus ersetzt.

15. Soviel über die Quantität der Materie. Jetzt handelt es sich um ihre Qualität und um die Erscheinungen, bei denen diese sich ändert. Und da kommen wir nun zu jenen zwei großen Klassen von Erscheinungen, die vom Standpunkte der hypothesenfreien Theorie als durchaus mystisch erscheinen müssen: die chemischen Umwandlungen alten Stils und die radioaktiven Umwandlungen neuen Stils. Bei jeder chemischen Umwandlung verschwinden Stoffe, die bisher bestanden, als solche vollständig, sie gehen mit allen ihren Eigenschaften unter; und es entstehen dafür neue Stoffe mit neuen Eigenschaften. Und, was die Hauptsache ist, es besteht dabei gar kein additives oder subtraktives Gesetz, derart, daß man etwa sagen könnte: der Stoff c, der aus den Stoffen a und b entstanden ist, wird wohl Eigenschaften haben, die zwischen denen von a und b liegen, etwa gar in der Mitte; tatsächlich liegen sie weder in der Mitte noch überhaupt dazwischen, noch auch nach bestimmten Gesichtspunkten außerhalb; es sind gänzlich neue Eigenschaften; und das auf allen Gebieten, wo sich Materie äußert: mechanisch und kalorisch, elektrisch und magnetisch, optisch und spezifisch chemisch. Ist doch, um ein besonderes

augenfälliges Phänomen anzuführen, die Farbe des entstehenden Stoffes gänzlich unabhängig von den Farben der Ausgangsstoffe; und es macht einen wirklich zauberhaften Eindruck, wenn beim Zusammengießen zweier farbloser Flüssigkeiten eine kornblaue entsteht oder aus der Vereinigung einer grünen und einer violetten Flüssigkeit eine farblose hervorgeht. Und ebenso verhält es sich mit dem Geruch, dem Geschmack, dem Aggregatzustande und hundert anderen Dingen. Vom Standpunkte der Stetigkeitstheorie, nach der ein Körper ein Continuum von Materie ist, kompakt wie Gold, schmierig wie Butter, gleichförmig wie Wasser, kann man sich von der chemischen Umwandlung gar keine Vorstellung bilden. Und dasselbe Fiasko erleben wir mit allem, was sich weiter daran knüpft, insbesondere hinsichtlich des Unterschiedes zwischen Elementen und Verbindungen; denn es läßt sich nichts von den Elementen aussagen, was sie als etwas Einfacheres hinstellte als die Verbindungen; es besteht lediglich der experimentelle Unterschied, daß wir die Verbindungen zerlegen können, Elemente aber nicht; an sich aber ist eine Verbindung etwas ebenso Einheitliches wie ein Element. Wohl verstanden: eine chemische Verbindung; denn es gibt natürlich auch Substanzen, die eine gröbere Symbiose darstellen, Mischungen, Lösungen, Legierungen, Gemenge. Und dabei drängt sich sofort ein ganz bezeichnender Unterschied auf: solche Mischungen können in beliebigen Verhältnissen vorgenommen werden, Lösungen von — innerhalb eines bestimmten Bereiches — beliebiger Konzentration; Legierungen, an denen die Einzelmetalle beliebigen Anteil haben. Verbindungen dagegen erfolgen nur in ganz bestimmten Verhältnissen, zwar nicht bloß in einem einzigen, aber doch in mehreren, die wieder zueinander in bestimmten Zahlenverhältnissen stehen. Mischungen sind im Prinzip nichts Neues, ihre Eigenschaften stehen wirklich in irgendeiner, wenn auch zuweilen nicht ganz einfachen Beziehung zu den Eigenschaften der Bestandteile; bei den Verbindungen hört das sofort auf. Besonders deutlich zeigt sich das bei den Lösungen und Legierungen, unter deren stetiger Reihe es gewöhnlich einige gibt, die ganz aus der Reihe der übrigen

herausfallen, die z. B. ein abnormes, von dem der Nachbarn ganz abweichendes elektrisches Leitvermögen haben; das sind eben keine Legierungen, sondern chemische Verbindungen. Und was die Elemente selbst betrifft, so wissen wir seit kurzem, daß auch sie nicht beständig sind, daß wenigstens einige von ihnen sich sogar recht schnell verändern, also aufhören, das zu sein, was sie eben noch waren; und einzelne sogar so schnell, daß sie, kaum geboren, auch schon dem Tode verfallen sind: das sind die radioaktiven Elemente, von deren Dasein man erst durch die mit ihrer Umwandlung verbundenen äußeren Wirkungen: Strahlung, Elektrifizierung usw., Kenntnis erhalten hat.

Jetzt hilft es wirklich nichts mehr; wir müssen, so ausgesprochene Phänomenalisten wir auch sein mögen, die Geheimtüren aufschließen, wir müssen uns den Schlüssel geben lassen; und nach dem soeben Erörterten werden wir nicht zweifeln, wo wir ihn finden: seit Jahrhunderten befindet er sich in den Händen der Chemie, die ohne ihn nicht das geworden wäre, was sie heute ist; und ohne den, das kann man ohne Übertreibung sagen, heute auch keine Physik in dem mächtigen Umfange ihres Wirkungsbereiches existierte. Die neue Idee aber, um die es sich handelt, ist die Molekulartheorie oder Atomistik.

III.

16. Die umständliche, schwerfällige und beinahe pathetische Art, wie hier die Atomistik vorbereitet und eingeführt wurde, wird höchstwahrscheinlich manchen Leser seltsam anmuten; er wird sich im stillen sagen: so viel Lärm, um zuletzt etwas so Banales und Selbstverständliches herauszubringen. Gibt es doch andere Bücher, die, weit skrupelloser und angeblich weit natürlicher, mit dem Satze beginnen: Die Materie besteht aus Atomen. Punktum. Nun, gerade das sollte hier durchaus und mit allen Mitteln vermieden werden. Es sollte gezeigt werden, wie weit man ohne eine derartige Hypothese kommt, und es sollte deutlich betont werden, daß es eine Hypothese ist; eine Hypothese aber muß sich ihre Berechtigung erst nachträglich und um-

ständig erkämpfen, sie muß sich einer Prüfung an der Hand des Tatsachenmaterials unterziehen; und diese Prüfung wollen wir jetzt vornehmen. Dabei könnten wir, einem alten und noch immer beliebten Schema entsprechend, mit gewissen, sozusagen groben und zutage tretenden Einzelpänomenen beginnen, die den Gedanken der Unstetigkeit der Materie erhärten; wir wollen das nicht tun, wir wollen diese Zeugnisse noch aufschieben, und wir wollen jetzt sogleich in das Innerste der Angelegenheit einzudringen versuchen.

Der springende Punkt, der unsere Aufmerksamkeit zuerst fesselt, ist offenbar der folgende. Physikalische Mischungen finden, innerhalb gewisser Grenzen, in beliebigen Verhältnissen statt, das ist also ein räumlicher Vorgang. Chemische Verbindung dagegen findet nur in bestimmten Verhältnissen statt, und zwar so, daß mit einer bestimmten Menge des einen Stoffes entweder eine bestimmte Menge des anderen zusammentreten kann oder die doppelte, oder die dreifache usw. Wir haben es also hier mit einer Unstetigkeit zu tun, und zu einer solchen Unstetigkeit könnte eine an sich stetige Materie auf keine Weise Anlaß geben. Stetiges verhält sich eben stetig. Man versuche nur, sich den Vorgang einmal stetig-räumlich klar zu machen: man wird auf jede Weise scheitern, man wird immer auf unüberwindliche Schwierigkeiten stoßen. Es handelt sich bei den Mengen, die in chemische Verbindungen eintreten, gar nicht mehr um „Größen“, sondern um „Ganze Zahlen“ oder „Anzahlen“, und diese sind eben nicht stetig, sondern haben bestimmte, isolierte Werte. Butter kann ich im Laden in beliebiger Menge kaufen, eventuell, wenn der Kaufmann freundlich ist, 1277 Gramm; dagegen kann ich nicht 1277 Gramm Eier verlangen, ich kann nur eine ganze Anzahl Eier kaufen. Die Grundtatsache der Chemie beweist also, daß die Materie aus Anzahlen besteht, und die Individuen, die in dieser Anzahl vorkommen, nennt man Molekeln. Viele Menschen nennen sie allerdings Moleküle, aber das ist eine arge sprachliche Mißbildung; und so gut wie wir Spektakel und nicht Spektakül sagen, wollen wir auch Molekel und nicht Molekül sagen. Noch vorsichtiger entwickelt: die kleinsten Mengen,

in denen Stoffe, die selbst nicht zerlegbar sind (und dann auch alle anderen) in Verbindungen eintreten können, nennt man zunächst — ohne von irgendeiner Hypothese Gebrauch zu machen — Äquivalentzahlen; dann aber, da jene Hypothese ja doch unausbleiblich ist, Molekularmassen oder Molekulargewichte (letzteres in Rücksicht auf den Umstand, daß man sie praktisch mit Hilfe der Wage bestimmt); besser aber Molekularcoeffizienten, weil man damit allgemeiner bleibt, und weil es sich ja doch, wenigstens bis auf weiteres, gar nicht um absolute Massen oder Gewichte, sondern um Relativzahlen handelt. Bei solchen Relativzahlen bleibt natürlich die Bezugseinheit willkürlich, man hat dafür ursprünglich den Molekularcoeffizienten des Wasserstoffs gewählt, den man aus sogleich zu erörternden Gründen gleich 2 setzte, wonach alsdann der des Sauerstoffs gleich 32 würde; später hat sich herausgestellt, daß diese letztere Zahl nicht genau ist, man hat sie aber trotzdem beibehalten, weil sich Sauerstoff als Bezugsstoff besser eignet als Wasserstoff; der Molekularcoeffizient des letzteren wird dann etwas größer, nämlich 2,016. Es ist hieran eine wichtige Bemerkung zu knüpfen. In der Jugendzeit der wissenschaftlichen Chemie hat man geglaubt, die Äquivalentzahlen der Stoffe durch ganze Zahlen ausdrücken zu können; und man hat hierin eine wesentliche Stütze für die Molekulartheorie erblickt, indem man z. B. sagte: mit einer Wasserstoffmolekel treten immer 16 Sauerstoffmolekeln zusammen (an die Stelle der Molekeln sind dann eventuell die Atome zu setzen, und es können auch vielfache oder ganze Bruchtheile jenes Verhältnisses auftreten). Nun hat sich das aber nicht aufrecht erhalten lassen; genauere Bestimmungen der Äquivalentzahlen haben vielmehr ergeben, daß diese zwar in vielen Fällen ganzen Zahlen nahe liegen, aber doch um ganz bestimmte Zehntel und Hundertel von ihnen abweichen; wirklich runde Zahlen sind nur sehr wenige übrig geblieben, z. B. 200 für Quecksilber, 12 für Kohlenstoff und 19 für Fluor; und auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Elemente, deren Zahlen auch nicht annähernd ganzen Zahlen benachbart sind, z. B. Kupfer mit 63,57 oder Chlor mit 35,46. In der ersten Zeit nach dieser

Feststellung war man begreiflicherweise sehr entmutigt und ging vielfach so weit, hierdurch die ganze Grundlage der Theorie für widerlegt zu erklären. Erst bei ruhigerer Überlegung sah man ein, daß das übereilt war, und daß es genügt, zu erklären: so einfach wie wir anfänglich dachten, liegen die Verhältnisse denn doch nicht; und inzwischen hat sich allerdings, wie wir noch erfahren werden, gezeigt, daß sie nicht so einfach, daß sie im Gegenteil recht verwickelt liegen und daß nicht nur die Molekeln, sondern auch die Atome noch lange nicht die elementaren Bausteine der Materie sind.

Ein Blick auf die Äquivalentzahlen der verschiedenen Stoffe gibt uns Aufschluß über die großen, hier zutage tretenden Gegensätze; Gegensätze, die sich dann also auch auf die Massen der Molekeln der verschiedenen Stoffe beziehen, sobald wir unsere Hypothese greifbar ausgestalten. Daß die Sauerstoffmolekel die sechzehnfache Masse der Wasserstoffmolekel hat, will noch nicht gar zu viel besagen; gehen doch die Zahlen für andere Stoffe sehr viel höher hinauf, bis wir zuletzt beim Radium, diesem merkwürdigen Stoffe anlangen, der uns noch eingehender interessieren wird, und dessen Molekularmasse das 226fache von der des Wasserstoffs ist; zu der des Thorium mit 232 und zu der des Urans mit 238. Und wenn man nun gar von den Elementen, d. h. von den zurzeit noch nicht zerlegten Stoffen zu den chemischen Verbindungen übergeht, sieht man jene Verhältniszahlen noch weiter bis in die Tausende wachsen, z. B. für jene Klassen von Stoffen, die, wie das Eiweiß, die Grundlage für den Aufbau der lebendigen Substanz bilden. Trotzdem bleiben aber auch diese wie alle Molekeln sinnlich unwahrnehmbar, sie müssen also, absolut genommen, überaus winzig sein und dementsprechend eine überaus geringe Masse besitzen. Ubrigens folgt ja diese über alle Vorstellung hinausgehende Kleinheit der Teilchen — ihre reale Existenz vorläufig einmal vorausgesetzt — auch aus zahlreichen Erfahrungen, von denen hier nur die fast beliebig weit zu treibende Zerteilung der Riechsubstanzen, die Auswälzung gewisser Metalle zu außerordentlich dünnen Häutchen, die äußerst zarte Konsistenz der Seifenblasen als Beispiele angeführt seien.

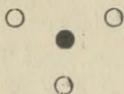
17. Und nun der Schritt von den Molekeln zu den Atomen. Denn daß die Molekeln nicht die einfachen Elemente für den Aufbau der Materie sein können, folgt ja schon aus der Tatsache der Umwandlung chemischer Verbindungen; unsere bei der Einführung der Unstetigkeitshypothese maßgebend gewesene Absicht, die chemischen Tatsachen begreiflich zu machen, würde gar nicht erreicht werden, wenn wir bei den Molekeln stehen blieben. Zunächst wenigstens hinsichtlich der zusammengesetzten Stoffe müssen wir einen Schritt weiter gehen und sagen, daß die Molekeln zusammengesetzt sein müssen und daß sie bei der chemischen Zersetzung in ihre Elemente zerfallen; diese Elemente eben sind die Atome, sie sind so benannt worden, weil sie, wie man annehmen mußte, nicht mehr zerlegt werden können — eine Annahme, die neuerdings freilich hinfällig geworden ist, ohne daß man deshalb den einmal gewählten Namen aufzugeben geneigt wäre. Ubrigens ergibt sich dann sehr bald auch hinsichtlich der unzerlegbaren Stoffe, der Elemente, die Notwendigkeit, ihre Molekeln ebenfalls aus Atomen aufzubauen, weil die Erscheinungen, die sie bei dem Eintritt und dem Ausscheiden aus Verbindungen darbieten, sonst völlig unverständlich bleiben würden. Der Unterschied ist nur der, daß die Atome, aus denen die Molekeln der Elemente bestehen, gleichartig sind, während die Molekel einer Verbindung aus Atomen verschiedener Natur gebildet ist. So besteht z. B. die Wasserstoffmolekel aus zwei Wasserstoffatomen, das Atomgewicht des Wasserstoffes ist also rund eins (und das ist die vorhin angedeutete ursprüngliche Bezugseinheit); das des Sauerstoffs ist genau 16. Ueberhaupt bestehen die Molekeln der meisten elementaren Stoffe aus je zwei Atomen, nur einige wenige, wie das Quecksilber, haben einatomige Molekeln, bei ihnen sind also die Begriffe Molekel und Atom identisch. Ubrigens können auch die zweiatomigen Stoffe unter Umständen in einatomige übergehen, indem sich der Zusammenhang zwischen den beiden Atomen einer Molekel erst lockert und dann ganz aufhört; eine Erscheinung, die man als Dissoziation bezeichnet, und die bei gewissen Stoffarten, nämlich den Gasen und den ver-

dünnten Lösungen, sogar zur partiellen oder vollständigen Regel wird. Andererseits kann auch das umgekehrte Phänomen eintreten, es können mehr als die normale Zahl von Atomen zu einer Molekel zusammentreten, man spricht dann von Polymerisation und erhält zuweilen Stoffe, die ein ganz abweichendes Verhalten offenbaren. So ist beispielsweise das Ozon nichts anderes als reiner Sauerstoff, aber mit dreiatomigen statt mit zweiatomigen Molekeln.

Was nun die Verbindungen ihrerseits betrifft, so kommt es offenbar nicht bloß darauf an, anzugeben, wieviel Atome jeder Art in der Molekel enthalten sind, sondern auch auf ihre räumliche Anordnung; und die Ermittlung dieser Anordnung ist eine der wichtigsten Aufgaben der modernen Chemie geworden. In einfachen Fällen ist ja die Sache sehr schnell erledigt, z. B. beim Wasser, das aus einem Atom Sauerstoff und zwei Atomen Wasserstoff gebildet ist und folglich zweifellos die Molekularstruktur



hat, d. h. von linearem Typus ist. Ist ein Atom der einen Art mit dreien einer anderen Art verknüpft, so gelangt man im allgemeinen offenbar zum flächenhaften Typus



Das Atom der ersten Art liegt in der Mitte des von den drei Atomen der anderen Art gebildeten Dreiecks. Hat man es mit vier Atomen der zweiten Art zu tun, so muß man aus der Ebene in den Raum hinaustreten und das Atom der ersten Art in die Mitte des aus den vier Atomen der zweiten Art gebildeten Tetraeders verlegen. Ferner erhebt sich nicht selten die Frage, ob man die Atome einer Art kettenförmig oder ringförmig anzuordnen habe, also mit offener oder geschlossener Tendenz, und die chemischen Tatsachen werden bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne entscheiden, wie denn z. B.

die Entdeckung des Benzolringes eine der schönsten und folgereichsten Leistungen der modernen Chemie darstellt. Es kann hier auf diese Lehren, die als Typentheorie, Strukturchemie und speziell als Stereochemie bezeichnet werden, nicht näher eingegangen werden; es sollte nur angedeutet werden, ein wie ungeheures Feld sich hier für die Forschung eröffnet; ein Feld, auf dem nicht nur theoretische, sondern ganz besonders auch praktische Früchte eingeheimst werden.

Mit Rücksicht auf die Triumphe, die die Chemie und mit ihr zum Teil auch die Physik unter der Flagge der Atomistik gefeiert hat, könnte man geneigt sein, den Molekeln und den Atomen schon jetzt reale Existenz zuzuschreiben, wie das die Chemiker auch vielfach ganz unbedenklich getan haben. Von einem erkenntnistheoretisch vertieften Standpunkte aus muß man sich aber damit bescheiden zu sagen, daß wir hier ein vortreffliches Bild der Natur hergestellt haben, aber auch nicht mehr als ein Bild; es ist ein Bild, in den einzelnen Zügen reicher als das von der Stetigkeitstheorie hergestellte, aber eben nur ein abstraktes Bild; denn niemand hat die diskreten Teilchen der Körper gesehen oder mit anderen Sinnesorganen wahrgenommen. Wenn nun gar die Materie als solche nichts anderes ist als Dauerkonfiguration von Energie, so versteht es sich von selbst, daß auch die Molekeln nur Konzentrationspunkte von Energie sein können, und die Frage nach der Realisierung des Bildes erledigt sich von selbst, weil Abstraktion und Realität nicht mehr wesensverschieden sind. Hiervon abgesehen wird man es selbstverständlich keinem Forscher und keinem Lehrer verübeln, wenn er im Gange seiner Untersuchungen und Darstellungen mit den Molekeln und Atomen wie mit winzigen Körnchen von Materie operiert, die sich von den sichtbaren Körnchen (die immer noch Anhäufungen ungeheurer zahlreicher Molekeln sind) praktisch nur graduell unterscheiden, ohne daß es doch zunächst möglich wäre, einen Übergang zwischen den beiden Klassen von Gebilden festzustellen. Doch davon später.

Übrigens handelt es sich ja bei der energetischen Auffassung der Materie und ihrer Bausteine nicht um eine allgemeine Phrase,

sondern um eine Feststellung, zu der man durch die Verhältnisse des atomistischen Bildes geradezu gedrängt wird. Denn wie, in ungeheuer vergrößertem Maßstabe, das Sonnensystem ein System darstellt, das infolge der Kräfte zwischen seinen Bestandteilen, infolge der Spannung, die zwischen ihnen herrscht, einen gewaltigen Energieinhalt besitzt, so gilt das gleiche natürlich auch von den in der Molekel festgehaltenen Atomen und von den Molekeln untereinander in ihren gegenseitigen Lageverhältnissen; diese Spannung stellt einen Betrag von potentieller Energie dar, der zur Folge hat, daß nach außen hin ein bestimmter Widerstand geleistet wird, und dieser Widerstand ist doch das, was wir Masse nennen und als Charakteristikum der Materie eingeführt haben. Die Masse und damit die Materie als solche löst sich damit in Molekular- und Atomenergie auf; zunächst in potentielle, nur in Spannungen zum Ausdruck kommende; aber, wie wir sogleich sehen werden, ebenso auch und zwar ganz besonders in aktuelle Energie, nämlich in kinetische, deren Ausdruck wirkliche, wenn auch verborgene Bewegung ist.

18. Denn wenn man jetzt daran geht, die Molekulartheorie auf Erscheinungen der Physik anzuwenden, so findet man sofort, daß man eine, den Tatsachen gegenüber, viel zu arme Welt bilden würde, wenn man die Teilchen eines als solchen ruhenden Körpers deshalb auch selbst als ruhend annehmen wollte. Gibt es doch, um an den einfachsten Fall anzuknüpfen, Stoffe, deren Molekeln einatomig sind, z. B. das schon erwähnte Quecksilber, und die, wenigstens bei genügend hoher Temperatur, den gasförmigen Zustand annehmen, in dem die Kohäsion der Molekeln, also die potentielle Energie, so gut wie null ist; und trotzdem haben diese Stoffe, z. B. Quecksilberdampf, einen hohen Energiegehalt, nämlich eine hohe Temperatur. Auf diese Weise — und auf vielen anderen Wegen, z. B. auf Grund der Diffusionsercheinungen — kommt man völlig zwangsweise dazu, den Molekeln einen Bewegungszustand, und noch dazu einen sehr heftigen, zuzuschreiben; einen Bewegungszustand, der offenbar die

Eigenschaft haben muß, gleichmäßig, aber regellos nach allen Richtungen verteilt zu sein; denn der Körper als Ganzes soll doch im Ruhezustande sein oder doch zu sein scheinen. Eine derartige Bewegung nennt man Schwirrung; man kann daher sagen, daß die Teilchen eines Gases eine heftige Schwirrungsbewegung ausführen, etwa wie die Mücken in einem Mückenschwarme; und daß in der kinetischen Energie dieser Bewegung ihre Temperatur begründet ist; erst im absoluten Nullpunkte der Temperatur — 273 Grad unterhalb des Eispunktes — würde diese Bewegung zur Ruhe kommen.

Es zeigt sich nun, daß diese Vorstellung, die man in ihrer Ausgestaltung die kinetische Gastheorie nennt, zu einer überaus einfachen und dabei doch sehr weitgehenden Beschreibung der Erscheinungen, die sich an Gasen beobachten lassen, sowie zu einem einheitlichen Verständnis der Gasgesetze führt. Daß das Volumen eines Gases mit dem Drucke, unter dem es steht, im umgekehrten Verhältnis steht (Boylesches Gesetz, häufig auch als Mariottesches Gesetz bezeichnet); daß das Volumen in gleichem Verhältnis zunimmt wie die absolute Temperatur (Gesetz von Gay-Lussac); daß die Molekularcoeffizienten und die Dichten der Gase parallel miteinander gehen, oder, anders ausgedrückt, daß alle Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekeln in der Volumeneinheit enthalten (Gesetz von Avogadro); das und noch vieles andere wird erst jetzt recht eigentlich verständlich, wenn nicht gar selbstverständlich. Und da alle diese Gesetze von quantitativem Charakter sind, so ergibt sich die zunächst verblüffende Möglichkeit, aus den Tatsachen direkt die hypothetischen, die Molekeln betreffenden Größen zahlenmäßig abzuleiten. So kann man aus den Druck- und Dichteverhältnissen mit zwingender Notwendigkeit die Geschwindigkeit berechnen, mit der die Molekeln hin- und herschwirren, d. h. man kann sagen: wenn die Theorie überhaupt richtig ist (und eine Theorie, die so glänzendes leistet, ist im höheren Sinne richtig), dann sind auch diese Zahlen für die Molekulargeschwindigkeit sicher richtig. Dabei finden sich nun erstaunlich große Zahlen, z. B.

Boylesches Gesetz - Volumen zu Druck umgekehrt proportional (bei gleicher Temperatur)
Gay-Lussacsches - Volumen proportional T , absolute Temperatur
Avogadro - - Alle Gase enthalten bei gleichem Druck & gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekeln in der Volumeneinheit
aber die Inhalte gleicher Räume verhalten sich um Gevicht wie die Molekulargewichte

für die Geschwindigkeit der Luftteilchen bei 0° Celsius nicht weniger als 485 Meter in der Sekunde, mehr als noch bis vor kurzem die größte Geschwindigkeit war, die man einem Geschosse erteilen konnte, und um die Hälfte mehr als die doch auch schon sehr beträchtliche Geschwindigkeit des Schalles in der Luft. Ubrigens waren doch andererseits wiederum so große Zahlen zu erwarten: ist doch die lebendige Kraft oder, wie wir jetzt sagen, die kinetische Energie aus zwei Faktoren zusammengesetzt, aus der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit; und von diesen beiden Faktoren ist bei einer Molekel der erste jedenfalls überaus klein, es muß also der zweite sehr groß sein, wenn ein dem Wärmehalt des Gases entsprechendes Produkt herauskommen soll.

Wenn soeben die Molekulargeschwindigkeit mit der Schallgeschwindigkeit verglichen wurde, so besteht doch zwischen beiden Größen ein prinzipieller Unterschied. Die Schallgeschwindigkeit nämlich besagt, daß sich jede Schallwelle in der Luft mit einer Geschwindigkeit von 331 Metern in der Sekunde fortpflanzt; dagegen wäre es ganz offensichtlich falsch annehmen zu wollen, daß sich jede Luftmolekel mit 485 Metern in der Sekunde schwirrend bewegt. Diese Zahl ist vielmehr nur ein Mittelwert aus ungeheuer vielen Einzelwerten, und diese letzteren können sehr verschieden sein, es können in einem Schwarm von Luftmolekeln einige sein, die ganz langsam, andere, die sehr schnell schwirren, und in einem anderen Augenblicke kann sich das wieder geändert haben; müssen doch schon allein die fortwährenden Zusammenstöße der Teilchen die Geschwindigkeit ununterbrochen verändern. Wir haben es hier mit einer von der sonstigen ganz abweichenden Betrachtung der Natur zu tun. Während wir sonst bemüht sind, exakte Gesetze aufzustellen, die in jedem einzelnen Falle erfüllt sind, verfahren wir hier nach statistischer Weise, und wir interessieren uns zunächst nur für das, was im ganzen, im Durchschnitt herauskommt, gerade wie eine Lebensversicherungsgesellschaft sich nur für die mittlere Lebensdauer der Versicherten interessiert; daß zufällig der Eine sehr alt wird, der

Andere sehr jung stirbt, ist unerheblich, da es sich im Endergebnis ausgleicht. Es wird dementsprechend auch in unserem Falle Teilchen von sehr verschiedener Geschwindigkeit geben, und für viele Konsequenzen wird das gleichgültig sein. Immerhin hat es doch etwas Unbefriedigendes, den „Zufall“ in die Naturphänomene eingreifen zu lassen; und wir würden es gewiß mit Freuden begrüßen, wenn sich jemand, unserem Kopfschütteln zum Trotz, anheischig machte, uns zu zeigen, daß auch der Zufall Gesetzen unterworfen ist, und daß wir genau angeben können, wie oft die einzelnen, vom Mittelwerte abweichenden Werte der Geschwindigkeit vorkommen. Das ist nun der Fall, es gibt ein Gesetz des Zufalls, es gibt ein Gesetz der Verteilung und Gruppierung der Einzelwerte um den Mittelwert, und zwar nicht bloß in unserem Falle, sondern in jedem, wo die Dinge ähnlich liegen. In der Biologie z. B. nennt man die Erscheinung Variation, und es sei als Beispiel die Körperlänge des Menschen angeführt; eine bestimmte Länge stellt den Mittelwert dar, die Nachbarwerte werden sehr häufig vorkommen, stärker abweichende seltener und sehr stark abweichende nur äußerst selten (Riesen und Zwerge). Am anschaulichsten wird die Sache, wenn man zur graphischen Darstellung schreitet; man erhält dann die „Variationskurve“, mit einem Gipfel in der Mitte, und nach beiden Seiten stetig abfallend. Man kann sie auch als „Wahrscheinlichkeitskurve“ bezeichnen, weil sie angibt, wie wahrscheinlich das Vorkommen jedes Einzelwertes ist. Im Falle der Gasteilchen heißt die Kurve gewöhnlich die Maxwell'sche Kurve, weil dieser große englische Physiker sie entdeckt hat; und das in ihr liegende Gesetz heißt das Maxwell'sche Verteilungsgesetz. Wir können hier nicht näher darauf eingehen; es sollte nur gezeigt werden, daß nach der Molekulartheorie ein Körper kein einheitliches Ganze mehr ist, sondern eine statistische Menge, eine Gesellschaft von unabhängigen Individuen; und daß sich trotzdem nicht bloß das Gesamtverhalten, sondern auch die individuelle Abweichung gesetzlich festlegen läßt.

Die Geschwindigkeit, mit der ein Körper sich bewegt, besagt,

wie man weiß, an sich gar nichts über die Strecke, die er in Wirklichkeit zurücklegt; denn es kommt dafür noch außerdem in Betracht, wie lange er sich ungehindert mit jener Geschwindigkeit bewegt. Bei den Gasteilchen ist es nun möglich, auch die Weglänge und die Zeit zu berechnen, während deren sie sich geradlinig bewegen, ohne anzustoßen und damit eine neue Bahn in anderer Richtung

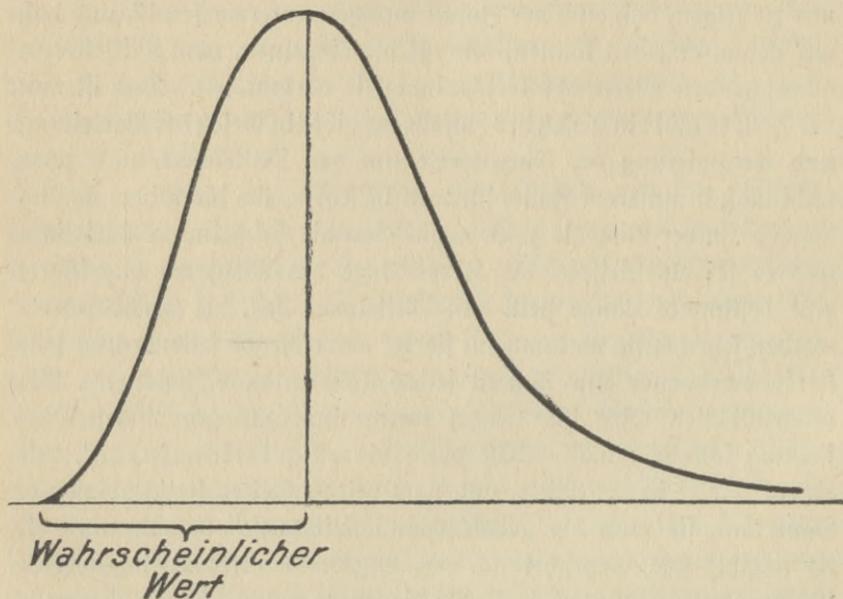


Fig. 5.

und mit anderer Geschwindigkeit zu beginnen. Aus den Erscheinungen und Gesetzen der Reibung, der Wärmeleitung, der Diffusion und der Verdampfung kann man für jene Größen, wenn auch nicht exakte Zahlen, so doch ungefähre Schätzungswerte ermitteln; und es zeigt sich dabei, daß die mittlere Weglänge — denn auch hier wiederum handelt es sich um Mittelwerte — außerordentlich klein ist, nämlich nur einige hunderttausendel eines Millimeters beträgt,

während umgekehrt, was ja nun nicht mehr überraschen kann, die Zahl der Zusammenstöße in der Sekunde, also das, was man in Analogie mit der Schwingungszahl eines Tones als „Schwirrungszahl“ bezeichnen kann, ungeheuer groß wird, nämlich nach Milliarden zählt — sehr viel mehr als die Schwingungszahl der höchsten Töne, aber freilich immer noch sehr viel weniger als die Schwingungszahl des Lichtes. Ubrigens gilt das Gesagte nur unter normalen Druckverhältnissen; verdünnt man das Gas durch kräftiges Auspumpen mit Hilfe einer modernen Luftpumpe, so kann man es leicht dahin bringen, daß die Weglänge bis auf Größen unseres Sinnesbereiches, auf einige Millimeter und selbst Zentimeter, ansteigt, entsprechend der sehr viel zerstreuteren Anordnung, die alsdann die Molekeln im Raume annehmen. Und da einmal von der Luftpumpe die Rede war, so sei noch eine Bemerkung hinzugefügt, die erkennen läßt, daß es sich hier durchaus nicht um eine theoretische Spielerei handelt: hat doch der Physiker Gaede eine seiner neu konstruierten Luftpumpen mit Recht als Molekular-Luftpumpe bezeichnet, weil sie auf der individuellen Bewegung der Luftteilchen beruht.

Sieht man die Lehre von der Molekulargeschwindigkeit als das Erdgeschoss, die Lehre von der Weglänge als das Zwischengeschoss des kinetischen Gebäudes an, so finden wir im Obergeschoss das Problem der Eigenschaften der Molekeln an sich, ihrer Anzahl in einer bestimmten Gasmenge, ihrer Dimensionen, ihres Gewichtes usw. Was die Anzahl betrifft, so kann man dabei entweder die Volumeneinheit, also das Kubikzentimeter zugrunde legen und erhält dann eine universelle Konstante, weil nach dem Gesetze von Avogadro die Anzahl der Teilchen in gleichem Raume — natürlich bei gleichem Drucke und gleicher Temperatur — für alle Gase dieselbe ist; eine Konstante, die man die Loschmidtsche Zahl nennt; oder man bezieht sich auf Gewichtsmengen, muß dann aber, da auf ein Gramm verschiedener Gase offenbar eine sehr verschiedene Anzahl von Molekeln entfällt, dies dadurch ausgleichen, daß man nicht je ein Gramm,

*Zahl
Mole im*

sondern von jeder Substanz eine Gramm-Molekel, d. h. so viele Gramm nimmt, als der mit dem spezifischen Gewichte parallel gehende Molekularcoefficient angibt; diese Zahl ist nun wiederum eine universelle Konstante und wird als Avogadro'sche Zahl bezeichnet. Da z. B. ein Gramm Sauerstoff 700 ccm einnimmt, eine Gramm-Molekel Sauerstoff also $32 \cdot 700 = 22400$, so muß die Avogadro'sche Zahl in diesem Verhältnis größer sein als die Loschmidt'sche. Wie man zu ihrer Schätzung gelangt ist, kann hier vorläufig nur angedeutet werden; es handelt sich eben auch hier nur um Schätzung, richtiger um Einschluß in Grenzen, und zwar mit Hilfe sehr verschiedener Tatsachen: der feinen Verteilung der Materie, wie sie in den Goldblättchen und Seifenblasen vorliegt, der Verflüssigung der Gase, wobei das Volumen auf einen kleinen Bruchteil seines ursprünglichen Wertes zusammenschrumpft; aus der Abweichung der Gase von den oben erwähnten idealen Gasgesetzen, die den holländischen Theoretiker van der Waals zu einer sehr eleganten Formel geführt haben, in der, außer dem Volumen des Gases, die wichtigste Größe der Anteil ist, den an diesem Volumen die Molekeln selbst haben (offenbar ein meistens überaus kleiner Bruch); die modernsten Methoden aber können hier auch nicht einmal angedeutet werden, weil wir ihre Grundlagen erst noch kennenzulernen haben werden. Kurzum, man findet auf diese Weise Werte, die für die Loschmidt'sche Zahl zwischen der 19. und 20., und für die Avogadro'sche Zahl zwischen der 23. und der 24. Potenz von 10, also zwischen Hunderttausendtrillionen und einer Quadrillion liegen; der lineare Abstand zwischen zwei Nachbartheilchen beträgt also rund einmilliontel Zentimeter oder einen Bruchteil davon. Daß man dann hieraus auch die Masse der einzelnen Molekel, ihre Dimensionen und ihre Dichte ableiten kann, sei hier nur nebenbei erwähnt, da uns die Verfolgung dieser Einzelheiten zu weit abführen würde.

Die Gase stellen eine besondere Form der Materie dar, nämlich eine Form starker räumlicher Zerstreuung. Vom molekulartheoretischen Standpunkte aus muß man sagen, daß an den allermeisten

*Molekularcoefficient des Sauerstoffes = 32
 Sauerstoff = 700 ccm enthält y Teile
 enthält H = $\frac{y}{700}$ Teile x = Loschmidt'sche Zahl y = 700 ccm
 = 32 g = 32 x 700 x x Avogadro'sche = $\frac{32 \times 700}{1} = \frac{2}{H}$ = Avogadro'sche*

Stellen eines von einem Gase eingenommenen Raumes nichts vorhanden ist (soweit wir nicht doch noch ein Substrat einführen, um dieses Nichts zu ersetzen), und nur an ganz wenigen Stellen sich Molekeln befinden — etwa in demselben Verhältnis, wie im Welt-raum Weltkörper vorhanden sind, nur alles in ungeheurem Verhältnis verkleinert und mit dem wesentlichen Unterschiede, daß hier, in einem Gase, alle Einzelkörper gleichartig sind, daß es einen Unterschied wie dort zwischen Sonnen, Planeten, Monden und Kometen nicht gibt, wenigstens nicht in normalen Fällen und vorbehaltlich einer späteren Revision dieses Ausspruchs.

IV.

19. Es entsteht nun die Frage, ob es nicht noch andere Formen der Materie gibt, die ebenfalls vom zerstreuten Typus wären; solche Formen würden sich dann ebenso wie die Gase relativ einfach experimentell und rechnerisch behandeln lassen. Es gibt nun wirklich eine zweite solche Körperklasse; und es ist auch von vornherein anzugeben, wie man zu ihr gelangen könne. Denn die Molekeln mit ihren Atomen können gar nicht andersartig sein, sie sind immer die gleichen, also kann das Unterscheidende nur der Raum sein, in dem die Teilchen schweben oder schwirren; dieser Raum darf eben jetzt nicht mehr als leer, sondern muß als erfüllt mit einer Materie angesehen werden, die sich zu den eingebetteten Teilchen in einem gewissen Gegensatz befindet, indem sie beinahe überall vorhanden ist, jene aber, wie gesagt, nur an wenigen ausgezeichneten Stellen. Durch solche Gedanken kommt man zwingend zu der Körperklasse, die man Lösungen nennt; und zwar speziell zu den verdünnten Lösungen. In der Tat geht die Theorie der verdünnten Lösungen, wie sie sich in den letzten Jahrzehnten entwickelt hat, völlig parallel mit der kinetischen Gastheorie, nur mit dem Unterschiede, der dadurch bedingt ist, daß die einzelnen Teilchen eben hier nicht in einem Nichts, sondern in einem Lösungsmittel eingebettet sind, z. B. in Wasser;

aber das ist schließlich ein Unterschied, der höchstens gewisse Widerstände gegen die Bewegung der eingebetteten Teilchen bedingen, an dem Wesentlichen des Phänomens aber nichts ändern würde.

Viel wichtiger ist eine andere Frage, die sich sofort aufdrängt: ja, wie kann man denn Lösungen in Parallele mit Gasen stellen, wo doch jenen die Haupteigenschaft dieser abgeht, nämlich das Bestreben, sich auszudehnen und infolgedessen einen gewaltigen Druck nach außen auszuüben? Wo bleibt denn hier die, alle Erscheinungen und Gesetze bestimmende Größe, die das Analogon zum Gasdruck wäre? Wie berechtigt diese Frage ist, ergibt sich daraus, daß man eine Antwort auf sie, und zwar eine positive, erst seit relativ kurzer Zeit geben kann; erst seit der Entdeckung eines ganz neuen, sehr merkwürdigen Phänomens, das man als Osmose bezeichnet, und dessen typischer Repräsentant der osmotische Druck ist. Merkwürdig, obgleich es eigentlich ganz offen daliegt und in völliger Analogie zum Druck der Gase steht. Denn woher stammt denn der Druck der Gase? Doch, wie eben schon gesagt wurde, aus ihrem Bestreben sich auszudehnen, sich im Raume zu zerstreuen; genauer gesagt, aus der ihnen aufgezwungenen Hinderung, das zu tun. Deshalb wird doch dieser Druck auf die der Ausbreitung hinderlichen Gefäßwände ausgeübt, in zweiter Reihe freilich auch im Innern, weil immer die vorgelagerte Gasschicht der folgenden in der Ausbreitung hinderlich ist; sobald einmal die Wand beseitigt wird und das Gas Freiheit erhält, sich auszudehnen, hört der Druck in ganz entsprechendem Maße auf, die Spannungsenergie verwandelt sich in Bewegungsenergie, und die Zerstreung setzt sich theoretisch bis ins Unbegrenzte fort, praktisch soweit, bis andere, uns hier nicht interessierende Faktoren ins Spiel treten. Nun, genau dasselbe findet bei Lösungen statt. Wenn man in ein Gefäß mit Wasser Zucker schüttet, vielleicht nur ein kleines Häuflein, das sich an einer Stelle des Bodens festsetzt, so hat dieser Zucker das Bestreben, sich in dem Wasser möglichst zu verteilen; und dieses Bestreben hört erst auf, wenn der Prozeß bis zur gleichmäßigen Auflösung des Zuckers fortgeschritten ist; das Wasser spielt hier genau

die Rolle wie bei einem Gase der leere Raum. Und doch ist da ein wesentlicher Unterschied, der demjenigen, der diese Analogie zuerst betrachtet, große Schwierigkeiten macht und, offen gestanden, auch für den Eingeweihten sich nicht in einfacher Weise restlos beseitigen läßt. Denn den Gasdruck kann man auf ganz gewöhnliche Weise messen, indem man die Flasche, in der sich das Gas befindet, mit einem Stöpsel versieht, in den ein Druckmeßrohr, etwa ein U-förmiges Quecksilbermanometer eingefügt ist. Wenn man aber eine Zuckerslösung in entsprechender Weise auf ihren Lösungsdruck hin untersuchen wollte, würde man begreiflicherweise keinen Erfolg haben, der Zucker begnügt sich mit der gleichmäßigen Verteilung in dem vorhandenen Wasser, weiteren Ehrgeiz, sozusagen, besitzt er nicht. Man muß ihm schon goldene Brücken bauen, um diesen anzustacheln; und das geschieht dadurch, daß man die Flasche, in der sich die Zuckerslösung befindet, in ein größeres Gefäß mit reinem Wasser bringt und indem man den Zucker von dieser Tatsache direkt benachrichtigt. Das klingt nun freilich recht seltsam; denn wie soll man so etwas tun? Man kann es tun, indem man einen Teil der Flaschenwandung durch etwas ganz Neues, durch eine poröse Membran ersetzt, von der ganz besonderen Eigenschaft, daß sie den Wasserteilchen, nicht aber den Zuckerteilchen den Durchtritt erlaubt. Solche Membranen gibt es, sie sind zuerst von Moritz Traube als „Niederschlagsmembranen“ hergestellt worden und werden jetzt gewöhnlich nach dem Rezept angefertigt, das der Botaniker Pfeffer auf Grund ausgezeichneter Arbeiten angegeben hat, und das in Folgendem besteht: Man nimmt eine poröse Tonzelle (Filterzelle), entgast sie, füllt sie mit dreiprozentiger Ferrozyankalilösung (Blutlaugensalz) und stellt sie in ein Gefäß mit dreiprozentiger Kupfersulfat- (Kupfervitriol-) Lösung. Es dringen alsdann von beiden Seiten her die Salzlösungen in die Zellwände ein; da, wo sie sich treffen, scheiden sich sehr feine Häutchen von Ferrizyankupfer aus, und diese bilden die Membran — offenbar eine Membran von großer Widerstandsfähigkeit; denn sie ist ja in das Skelett der porösen Zellwandung fest eingebettet.

Eine derartige Membran hat nun eine sehr merkwürdige Eigenschaft: sie läßt die Wasserteilchen durch, nicht aber die Zuckerteilchen; warum sie das tut, ob wegen der verschiedenen Größe der Teilchen oder wegen ihrer verschiedenen Form oder wegen ihrer verschiedenen Anziehungskräfte auf sie oder aus sonst welchen Gründen, darüber sind die Meinungen noch geteilt.

Und nun sollte man denken, daß das ganze Unternehmen zwecklos geworden wäre; denn wenn wir jetzt die Tonzelle mit Zuckerslösung gefüllt in ein Glasgefäß mit reinem Wasser hängen, so haben wir doch dabei die Absicht, dem Zucker Gelegenheit zu geben, sein Zerstreungsbedürfnis zu befriedigen und durch die Membran hindurch in das äußere Wasser einzudringen; und das kann er ja gar nicht, weil die Membran für seine Teilchen undurchdringlich ist; es wird also, so könnte man meinen, überhaupt nichts erfolgen. Da kann man nun einmal an einem schönen Beispiele sehen, daß die Natur denn doch geistreicher und schlauer ist als der geistreichste und schlaueste Mensch: sie hilft sich durch Umkehrung des Verfahrens, es diffundiert zwar nicht Zucker nach außen, wohl aber Wasser nach innen, wozu ihm Gelegenheit gegeben ist, da durch den Stopfen, der die Zelle oben abschließt, ein Steigrohr hindurchgeführt und zuletzt zu einem Druckmesser ausgestaltet ist; und indem Wasser eindringt, wird ja der Zweck, den Zucker zu zerstreuen, die Lösung zu verdünnen, ebenso gut wie auf dem direkten Wege erreicht. Es dringt solange Wasser ein, bis der hydrostatische Druck im Manometer dem osmotischen Drucke in der Lösung gerade das Gleichgewicht hält; man kann den letzteren messen, indem man den ersteren am Manometer abliest, und man kann auch geradezu diesen letzteren als den osmotischen Druck bezeichnen. Nur muß man immer festhalten, daß der osmotische Druck nach außen wirkt; wenn trotzdem ein Einstromen nach innen stattfindet, so ist das eben ein sehr merkwürdiges Phänomen und zwingt uns zu einer Erweiterung unserer Vorstellungen von den in der Natur gegebenen Möglichkeiten.

Indem man nun den osmotischen Druck an die Stelle des Gas-

druckes setzt, kann man der Reihe nach die wichtigsten Gasgesetze auf verdünnte Lösungen übertragen. So ist der osmotische Druck proportional mit der Konzentration (wie der Gasdruck mit der Dichte); oder er ist, wie man statt dessen auch sagen kann, umgekehrt proportional mit der Verdünnung (wie der Gasdruck mit dem Volumen). Ferner: bei gleichem osmotischem Druck (und gleicher Temperatur) sind Lösungen, so verschieden sie auch qualitativ sein mögen, doch immer „äquimolekular“, d. h. sie haben im gleichem Volumen die gleiche Anzahl gelöster Teilchen, wie die Gase die gleiche Anzahl Molekeln. Obgleich sich diese Beispiele leicht noch vermehren ließen, mag es doch dabei sein Bewenden haben. Nur eines sei noch erwähnt: wenn man Gase mehr und mehr komprimiert, also die Gasteilchen mehr und mehr einander nähert, so kommt man schließlich zu einem Zustande, wo diese Teilchen nicht mehr sehr zerstreut sind, sondern einen beträchtlichen Teil des ganzen Raumes einnehmen; und das gleiche gilt von den Lösungen, wenn man ihre Konzentration mehr und mehr steigert. Man wird alsdann nicht mehr verlangen dürfen, daß die bisherigen einfachen Gesetze noch gültig bleiben, die doch auf der weitläufigen Zerstreung der Teilchen beruhen; man wird vielmehr Abweichungen von diesen Gesetzen zu erwarten haben, und tatsächlich treten solche ein. Die Gesetze von Boyle, Avogadro, Gaylussac — wonach bei wachsender Temperatur das Volumen der Gase (bei konstantem Druck) oder ihre Spannung (bei konstantem Volumen) gleichförmig und für alle Gase in gleichem Maße wächst — alle diese Gesetze gelten sehr bald nur noch angenähert, und schließlich werden die Abweichungen so groß, daß das System seinen bisherigen Charakter nicht mehr aufrecht erhalten kann, sondern, wenn es ein Gas war, sich verflüssigt, wenn es eine Lösung war, sich in Form fester Substanz abscheidet.

20. Damit erhebt sich nun die Frage, wie denn die molekulare Konstitution der festen und flüssigen Stoffe beschaffen sei (unter Flüssigkeiten nun nicht mehr Lösungen, sondern einfache Flüssig-

keiten verstanden); eine Frage, auf die ungleich schwerer eine bündige Antwort zu geben ist, als für Gase und Lösungen, so daß man sich nicht wundern darf, wenn trotz geistvoller Versuche diese Antwort zurzeit in endgültiger Form noch nicht gegeben werden kann. Soviel steht fest, daß schon bei den Flüssigkeiten die Teilchen nicht mehr „vagabundieren“, sondern sesshaft geworden sind, d. h. bestimmte Wohnsitze haben, wenn es ihnen natürlich auch frei steht, sich von diesen Wohnsitzen vorübergehend und auf bestimmte Entfernung zu entfernen, um sie herumzupendeln; und gerade diese Pendelung liefert hier die zum Verständnis der Erscheinungen erforderliche innere Energie — wenigstens denjenigen Teil derselben, der kinetischen Typs ist und außer der hier ja allerdings in starkem Maße vorhandenen potentiellen oder Lageenergie auch seinerseits nicht zu entbehren ist. Aber welcher Art jene Pendelung sei, und wie sich dabei die verschiedenen Molekeln gegenseitig beeinflussen, darüber wissen wir nichts Entscheidendes. Und noch viel verwickelter wird die Angelegenheit bei den festen Körpern, die ja, wie wir gesehen haben, immer von kristallischer Natur sind. Hier schiebt sich nun vor die Frage nach der Molekularbewegung die nicht minder wichtige nach der Anordnung der Teilchen bzw. ihren normalen Lagen im Raume, ein Problem, dem wir einige Worte widmen müssen.

Die regelmässigste Anordnung von Punkten im Raume ist offenbar die, wo sie in jeder der drei aufeinander senkrechten Raumrichtungen sich in gleichen Abständen, und zwar in allen drei Richtungen in demselben Abstände, folgen; acht benachbarte Punkte bilden dann miteinander einen Würfel, und in einer geeignet herausgeschnittenen Ebene bilden je vier Punkte miteinander ein Quadrat. Aber schon hier erkennt man eine Mannigfaltigkeit der Anordnung, wenn man eine Diagonalrichtung ins Auge faßt; denn in ihr ist der Abstand zweier Nachbarpunkte zwar auch überall gleich groß, aber nicht derselbe wie in den Achsenrichtungen, sondern größer; und so ist er überhaupt in jeder Richtung ein anderer. Ferner kann man sich statt der eben betrachteten Anordnung eine solche denken, bei

der drei benachbarte Punkte in der Ebene ein gleichseitiges Dreieck miteinander bilden; und so kann es noch sehr viele derartige Anordnungen geben. Das Problem besteht nun darin zu ermitteln, welches sind alle möglichen Anordnungen mit der Eigenschaft, daß sie zwar in sich beliebig sind, sich aber fortwährend nach allen Richtungen in gleicher, wenn auch für jede Richtung in anderer Weise wiederholen. Diese Aufgabe ist begreiflicherweise außerordentlich verwickelt, sie ist daher auch erst in neuerer Zeit gelöst worden, und zwar in mathematisch vollständiger Weise erst von dem Mathematiker Schönflies. Das Gebilde, das man auf diese Weise erhält, heißt ein regelmäßiges Raumgitter, durch seine einzelnen Punkte wird es in lauter Parallelepipeda, also, was die ebenen Schnitte betrifft, in lauter Parallelogramme geteilt. Dadurch bekommt es eine Richtungstendenz, oder, wie man sagen kann: durch die Anordnung werden die einzelnen Teilchen, ohne es von Natur zu sein, „polar“, das ganze ist ein „polarisiertes“ System. Freilich zeigt sich, daß man mit dieser Grundlage nicht auskommt, sie ist zu eng, man muß sie in bestimmter Weise erweitern. Man muß zweierlei Raumgitter, und zwar zwei, die sich zueinander verhalten wie ein Objekt zu seinem Spiegelbilde, und die man als spiegelbildlich gleich bezeichnet, kombinieren in der Weise, daß sie sich vollständig durchdringen, so daß jeder Punkt gewissermaßen zu einem Doppelpunkte wird. Solcher regelmäßiger Doppelgitter oder Punktsysteme gibt es nun eine ungeheure Anzahl, aber doch, wie die Rechnung zeigt, nicht beliebig viele; wenigstens nicht beliebig viele, zur Anwendung auf Kristalle geeignete. Denn die Kristalle unterliegen in ihrem Aufbau, wie die Beobachtung lehrt, gewissen Grundgesetzen, auf die hier nicht eingegangen werden kann, mit denen aber nicht alle Anordnungen der Gitterpunkte verträglich sind. Immerhin gibt es solcher kristallographisch brauchbarer Anordnungen eine sehr große Zahl, nämlich genau 230; und folglich gibt es im Prinzip auch soviele Arten von Kristallen (lediglich ihrem Aufbau nach, ohne Rücksicht auf die physikalische Beschaffenheit). Faßt man nun aber immer diejenigen Typen

zusammen, die sich in der wirklichen Natur nicht leicht auseinander halten lassen, und läßt man diejenigen weg, die keinen realen Wert haben, so kommt man auf die Zahl 32 bzw. 33, die wir schon früher kennengelernt haben.

Das ist, in ihren Grundzügen, die moderne Molekulartheorie der Kristalle, die nun nach allen Seiten hin eine bewundernswürdige Ausgestaltung erfahren hat, so daß man sagen darf: die Physik der isotropen Körper bietet uns bei weitem kein so klares und vertrautes Bild wie die der Kristalle, einfach aus dem Grunde, weil sie nicht so ehernen Gesetzen unterworfen sind wie diese. Isotrope Körper sind eben gar nicht wahrhaft isotrop, sie sind von sehr komplizierter innerer Struktur, und jedes Individuum, z. B. ein Stück Eisen, weicht von einem anderen mehr oder weniger ab; alle Individuen derselben Kristallart dagegen sind einander vollkommen gleich; man vergleiche die schon hierfür früher benutzten Gleichnisse.

Natürlich entstehen bei der Ausarbeitung der Raumgittertheorie und bei ihrer Anwendung auf Einzelfälle noch wesentliche Schwierigkeiten. Es gibt — oder gab, wie wir sehen werden — kein direktes Mittel, die Struktur eines gegebenen Kristalls individuell festzustellen; es gab dafür nur eine indirekte und hypothetische Methode. Hypothetisch war an dieser Methode der von Bravais herrührende Grundgedanke, anzunehmen, daß die am dichtesten mit Molekeln besetzten Kristallflächen den Kristall am häufigsten begrenzen, bei der würfelförmigen Anordnung der Teilchen z. B. sind die Würfelflächen am dichtesten besetzt und kommen daher am häufigsten vor; sieht dagegen außer in den Ecken, noch in jeder Quadratmitte ein Teilchen, so erhält man Oktaederflächen; und wenn in der Mitte des Würfelraumes noch ein Teilchen sieht, Dodekaederflächen. Durch solche und ähnliche Anhaltspunkte, auch gewisse von mehr physikalischem Charakter, so z. B. mit Rücksicht auf das Verhalten des Kristalls zur Temperatur und zur elektrischen Erregung, kann man Schlüsse auf die Konstitution der kristallisierten Materie ziehen.

21. Noch vor wenigen Jahren hätten wir hiermit unsere Betrachtungen über die Kristalle abschließen können; heute müssen — oder vielmehr können — wir etwas hinzufügen, was eine geradezu verblüffende Bestätigung der Strukturtheorie und zugleich auch direkte Aufklärung über ein ganz anderes, bis dahin immer noch rätselhaftes Phänomen schafft.

Unter den in den letzten Jahrzehnten entdeckten und erforschten Strahlen nehmen die Röntgenstrahlen insofern eine isolierte Stellung ein, als man für sie auf Grund der Gesamtheit der Erscheinungen, die sie bieten, von vornherein mehr zu der Vorstellung eines Wellenphänomens, gerade wie die Lichtstrahlen ein solches sind, neigte, während alle anderen Strahlenarten, so die Kathodenstrahlen, die Kanalstrahlen und die Radiumstrahlen, sich als Konvektionsstrahlen erwiesen, d. h. aus tatsächlich von den erzeugenden Körpern fortgeschleuderter und in der Strahlenbahn bewegter Materie irgendwelcher Art bestehen. Immerhin gab es keinen positiven Beweis für die Wellennatur der Röntgenstrahlen; denn das charakteristische einer Wellenbewegung ist das Phänomen der Interferenz und Beugung, das bei Materie niemals vorkommen kann. Materie ist etwas an sich Positives, und Positives addiert sich immer, subtrahiert sich nie, kann also nicht interferieren. Materie und Materie kann sich niemals schwächen, also auch nie aufheben. Wohl aber ist das möglich bei Wellenbewegung, die die gegensätzliche Mannigfaltigkeit von Berg und Tal (oder Verdichtung und Verdünnung oder wie etwa sonst der Gegensatz zum Ausdruck kommen mag) aufweist. Nun braucht man zu Interferenz- und Beugungsbeobachtungen einen engen Spalt oder besser ein aus vielen Spalten bestehendes, sehr feines Gitter, z. B. eines der Gitter, wie sie zuerst der Amerikaner Rowland mit einem sehr exakten Apparat auf gekrümmten Metallflächen hat herstellen lassen, und bei denen auf das Zentimeter bis zu 20000 Striche (Spalte) entfallen; der Strichabstand, die sog. Gitterkonstante, ist also von derselben Größenordnung wie die Wellenlänge des Lichts, und das ist die Vorbedingung

für das Gelingen von Beugungsversuchen. Von den Röntgenstrahlen wußte man nun bereits, daß, wenn sie überhaupt eine Wellenbewegung, und zwar eine regelmäßige, darstellen, die Wellenlänge jedenfalls sehr viel kleiner sein muß, als bei den Lichtstrahlen, wahrscheinlich mehrere tausendmal kleiner; denn alle groben optischen Methoden, diese Wellenlänge zu ermitteln, hatten versagt und somit die obere Grenze für die mögliche Wellenlänge mehr und mehr herabgedrückt. Da sagte sich nun im Jahre 1912 ein junger, damals in München tätiger Physiker, Laue, daß unter diesen Umständen ein noch so feines, mit der Maschine hergestelltes Gitter noch viel zu grob für die Röntgenstrahlen sein müsse, daß man sich hierzu vielmehr eines noch mindestens tausendmal feineren Gitters bedienen müsse; und da verfiel er in einem besonderen erleuchteten Momente auf die Raumgitter, die wir uns im Innern von Kristallen vorstellen. Er hatte also den Mut, an eine rein theoretische Vorstellung anzuknüpfen; gelang aber der Versuch, ergaben sich beim Durchgange von Röntgenstrahlen durch Kristalle wirklich Interferenz- und Beugungserscheinungen, so war zweierlei mit einem Schlage geleistet: es war die Wellennatur der Röntgenstrahlen und die Raumgitternatur der Kristalle nachgewiesen. Man könnte den ganzen Ideengang auch umkehren und sagen: um die Struktur der Kristalle ad oculos zu demonstrieren, darf man nicht gewöhnliche Lichtstrahlen hindurchschicken, die sind viel zu grob; man muß dazu Röntgenstrahlen benutzen. Und der Versuch ergab tatsächlich ein positives Resultat, und zwar lieferte er so schöne Interferenz-Photogramme, daß man daraus auch Schlüsse auf die Wellenlänge, ihrer Größe nach, ziehen konnte und wirklich fand, daß ihrer in ganz runder Zahl zehn auf den Abstand zwischen zwei Kristallmolekeln kommen; und unter Hinzunahme der anderen bekannten Daten ergibt sich nun für den Molekularabstand der Kristalle die runde Mittelzahl: ein hundertmilliontel Zentimeter — eine Zahl, die, wie man durch Vergleich mit früher Festgestelltem findet, nur ein kleiner Bruchteil des Molekularabstandes in Gasen ist und damit unseren Vorstellungen von der konzentrierten Natur

abhand des Kristalle $\frac{1}{100.000.000}$ cm
werden durch Interferenz der Röntgenstrahlen

des festen, gegenüber der zerstreuten des gasigen Aggregatzustandes, sehr gut entspricht.

Aber noch mehr; nicht bloß dieses Zahlenergebnis ist der Gewinn, den uns die Lauesche Entdeckung gebracht hat, wir können auch direkt unsere obigen, bisher mehr oder weniger hypothetischen Schlüsse auf die Konstitution der Kristalle greifbar gestalten; und es sind namentlich die Arbeiten zweier Engländer, Bragg (Vater und Sohn), sowie von Wulff in Deutschland, die dazu uns verholfen haben. Wenn ein gegebener Kristall ein gut bestimmtes Röntgen-Beugungsbild liefert, z. B. um einen kreisförmigen Kern herum kreisförmig angeordnete Striche in

bestimmten Abständen, so kann man daraus zurückschließen auf die Hindernisse, die die Röntgenstrahlen im Innern des Kristalls an den einzelnen Netzebenen des Raumgitters erfahren haben, worauf hier im einzelnen nicht eingegangen werden kann. Es muß ge-

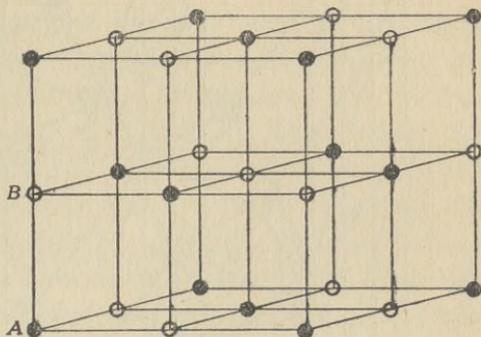
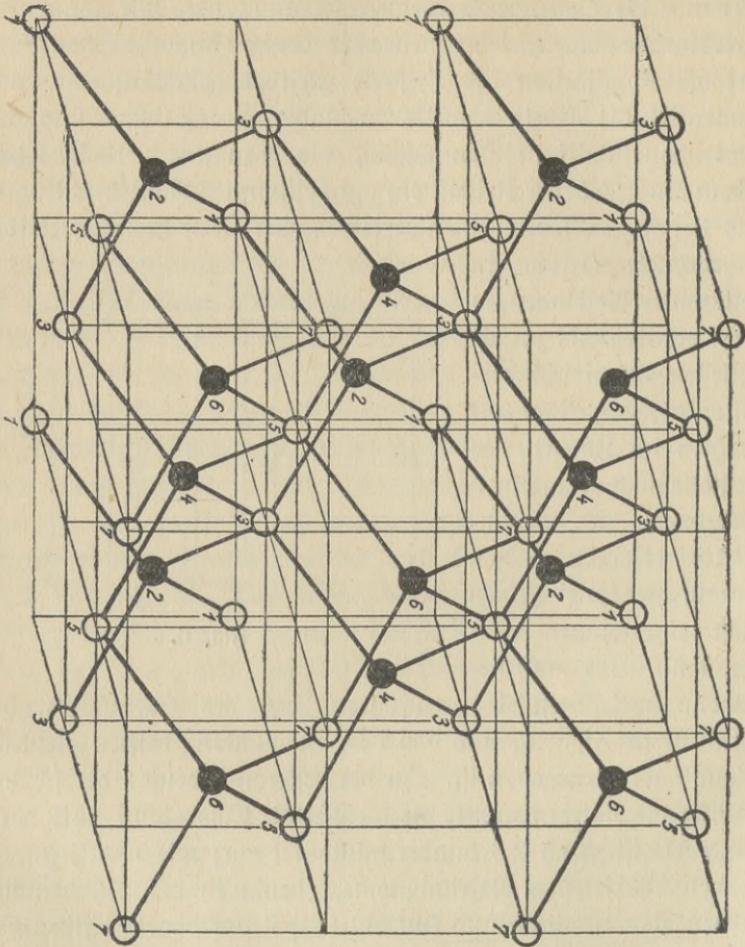


Fig. 6.

nügen, zwei Beispiele anzuführen, das des Steinsalzes, dessen Struktur in Figur 6, und das des Diamanten, dessen Struktur in Figur 7 wiedergegeben ist. In der ersteren bedeuten die schwarzen Punkte die Natriumatome, die weißen die Chloratome, und der Abstand AB ist gleich 2,8 hundertmilliontel cm; wie man sieht, sitzen in den Würfecken Natriumatome, ebenso in den Flächenmitten; in den Kantenmitten und im Würfelzentrum dagegen sitzen Chloratome. Die zweite Figur ist deshalb so interessant, weil sie so große Komplikationen aufweist, obgleich doch der Diamant reiner Kohlenstoff ist, also auch nur Atome einer einzigen Art enthält; aber mit Rücksicht auf die Beschaffenheit der Röntgen-Beugungsfigur muß

man annehmen, daß es zwei Gruppen solcher Kohlenstoffatome gibt, die durch leere und volle Kreise bezeichnet sind; die beigegefügtten Ziffern bedeuten die Vertikalebene, in denen, von vorn gerechnet,

Fig. 7.



die Atome der Reihe nach liegen; diese Ebenen gehen durch die Ecken und die Mittelpunkte der Elementarwürfel; die weißen Kreise haben lauter ungerade, die schwarzen lauter gerade Nummern. Die die

Kugeln verbindenden geraden Linien endlich fallen mit den Diagonalen der Würfel zusammen; durch sie sind die Kohlenstoffatome zu Ringen von je sechs Atomen verbunden. Wenn schon ein so einfacher Körper wie der Diamant solche Verhältnisse aufweist, so beginnt man zu ahnen, wie ungeheuer verwickelt der innere Aufbau der meisten chemischen Stoffe sein wird.

22. Von den Kristallen müssen wir nun noch einmal zu den Lösungen zurückkehren, um die Bekanntschaft einer überaus merkwürdigen Klasse von Körpern zu machen, die schon im Jahre 1862 von Graham in England entdeckt, aber erst in neuester Zeit in ihrer vollen Bedeutung erkannt worden sind und zum Aufbau einer, man möchte beinahe sagen, besonderen Wissenschaft Anlaß gegeben haben. Man wußte schon, daß manche Stoffe aus ihren Stoffen sehr leicht auscheiden und zwar in kristallischer Form, andere dagegen nur schwer und in amorphem Zustande, etwa im Zustande einer Gallert. Graham fand nun, daß mit diesem Gegensatz ein anderer verknüpft ist, indem nämlich jene Stoffe, die sog. Kristalloide, durch gallertartige Scheidewände leicht hindurchtreten, diffundieren, wie man diesen Vorgang wissenschaftlich nennt; während das bei der anderen Klasse, den Kolloiden, nur in geringem Maße oder gar nicht der Fall ist. Im Sinne unserer früheren Betrachtungen können wir sagen, daß bei den Kolloiden das Zerstreungsbestreben und somit auch der osmotische Druck auffallend gering ist, daß die Teilchen im Gegenteil ein gewisses Bestreben haben zusammen zu bleiben, ja kompakte Massen zu bilden; natürlich Massen, die immer noch außerordentlich klein, aber doch schon erheblich größer sind, als eigentliche Molekeln, und die daher unter günstigen Umständen die Möglichkeit offen lassen, sie mit dem Auge wahrzunehmen.

Man wird nun hierbei sofort an andere, noch größere materielle Systeme denken, an die Suspensionen oder Emulsionen, in denen relativ große Körperchen schwebend verteilt sind, z. B. an die Milch, deren im Wasser verteilte Fetttügelchen man ja sehr leicht

wahrnehmen, messen und abzählen kann. Man könnte also die kolloidalen Lösungen hier unmittelbar anreihen, wenn sich nicht doch zeigte, daß sie in gewissen allgemeineren Hinsichten denn doch unzweifelhaft Lösungen sind, nur mit charakteristischen Abweichungen von den normalen Lösungen. Zu den kolloidalen Stoffen gehören nun merkwürdigerweise nicht nur leimartige Stoffe, wie Leim, Gummi, Eiweiß — alle diese Stoffe, im Zusammenhang mit dem vorhin Gesagten, durch große Molekulargewichte ausgezeichnet, ganz besonders das Eiweiß —, sondern auch Metalloxyde, ja sogar, wie sich freilich erst sehr viel später herausgestellt hat, Metalle selbst in einem besonderen Zustande, z. B. das von dem Amerikaner Carey Lea zuerst studierte, sehr merkwürdige kolloidale Silber oder das uns hier besonders interessierende kolloidale Gold. Eine kolloidale Goldlösung, auffallend durch ihre schönen und, je nach der Konzentration, mannigfachen Färbungen, erweist sich ihren Eigenschaften nach als richtiger Typus dieser Körperklasse, und es kommt nur noch darauf an, sie im Innern zu untersuchen; denn mit dem bloßen Auge macht sie einen homogenen, manchmal trüben, aber in vielen Fällen auch völlig klaren Eindruck; und dieser Eindruck bleibt auch bei der gewöhnlichen mikroskopischen Untersuchung bestehen, offenbar, weil die Teilchen, um die es sich hier handelt, „ultramikroskopisch“ klein sind, d. h. mit dem Mikroskop nicht gesehen werden können — also überhaupt nicht, denn ein anderes Instrument zu diesem Zwecke gibt es ja gar nicht. Und doch ist dieser Schluß irrig. Freilich hat das Mikroskop eine bestimmte Grenze seiner Leistungsfähigkeit, es kann von Objekten, die unterhalb einer gewissen Größe liegen, keine Bilder mehr liefern; aber darüber hinaus kann man bei bestimmter Beleuchtungsweise doch noch etwas wahrnehmen, woraus man auf die Existenz jener kleinen Körperchen schließen kann: ihre sog. Beugungsscheibchen, d. h. die winzigen hellen Scheibchen, zu denen kleine leuchtende, punktförmige Objekte durch den Gang der Lichtstrahlen unter gewissen Umständen ausgebreitet werden. Man nennt diese, von Siedentopf und Zsigmondy in Jena ausgebildete Methode

der Beobachtung „Ultramikroskopie“, und es sind dafür von der Firma Carl Zeiß in Jena besondere Apparate gebaut worden. Mit Hilfe dieser Methode ist es nun tatsächlich gelungen, die Teilchen, die in den kolloidalen Lösungen, z. B. in den genannten Goldlösungen, verbreitet sind, zu sehen und sogar, mit Benutzung der für die Beugung des Lichts gültigen Formeln, ihre Größe annähernd zu berechnen. Dabei stellt sich heraus, daß die Teilchen von sehr verschiedener Größe sind, von den relativ ganz groben, die bis zu einem tausentel Millimeter Durchmesser haben, durch alle Abstufungen hindurch bis zu den ganz winzigen, deren Durchmesser nur wenige milliontel Millimeter mißt. Auch diese letzteren sind, wie man sieht, immer noch viel größer als die Molekeln, also jedenfalls ganze Haufen solcher; aber sie nähern sich doch ihren Dimensionen schon recht merklich; und wenn man mit der Ultramikroskopie noch etwas weiter kommen könnte, so würde man wohl auch die einzelnen molekularen Individuen noch erkennen können — aber alsdann hätte man freilich nicht mehr das vor sich, was man eine kolloidale Lösung zu nennen pflegt, überhaupt müssen sich bei soweit in den Mikrokosmos hineinreichender Analyse die üblichen Definitionen und Gegensätze zu ganz neuartigen Vorstellungen auflösen. Immerhin ersieht man aus den gemachten Andeutungen, wie interessant das Kapitel der kolloidalen Lösungen ist, und es könnte, wenn der Raum es erlaubte, davon noch so manches, auch für unser Thema wichtiges erzählt werden.

Haben wir nun schon einige schöne Anzeichen für die Realität der Molekeln — diesen Ausdruck immer unter den früher erörterten erkenntnistheoretischen Vorbehalten genommen — gewonnen, so werden diese doch an verblüffender Deutlichkeit noch weit übertroffen durch ein anderes Zeugnis, dem wir nunmehr unsere Aufmerksamkeit schenken wollen.

Wenn man Teilchen, die mit unbewaffnetem Auge sichtbar sind, in eine Flüssigkeit einbringt, die sie an spezifischem Gewichte nicht erheblich übertreffen, so sieht man, daß sie langsam und gleichförmig fallen und sich schließlich auf dem Boden lagern; je kleiner

die Theilchen sind, desto langsamer sinken sie herab, desto länger können sie sich schwebend erhalten; und wenn sie sehr klein sind, etwa schon mikroskopisch klein, können sie schwebend beinahe dauernd im Gleichgewichte bleiben. Derartige Erscheinungen sind uns ja im großen und, statt in Flüssigkeiten, in der atmosphärischen Luft sich abspielend, von den Phänomenen des Regens, des Schnees und des Nebels her genugsam bekannt; Regen und Schnee fallen herab, jener rasch, dieser langsam, die Nebeltröpfchen aber halten sich dauernd in schwebender Lage.

Wenn man nun aber die Theilchen so klein wählt, daß man, um sie zu beobachten, das Mikroskop — das gewöhnliche, abbildende Mikroskop — zu Hilfe nehmen muß, so macht man eine ganz überraschende Beobachtung: man sieht, daß die Theilchen nicht fallen, auch nicht schweben, daß sie vielmehr eine sehr lebhafte und dabei ganz ungeordnete Bewegung ausführen, bald nach links oder rechts, bald nach vorn oder hinten, bald nach oben oder unten, kurz nach allen möglichen Richtungen; ferner manchmal relativ langsam, manchmal wahnsinnig schnell; es ist ein durch das Überraschende ganz merkwürdiger Anblick. Man nennt die Erscheinung Brownsche Bewegung zur Erinnerung an den englischen Botaniker Brown, der im Jahre 1827 an botanischen Präparaten zuerst diese Beobachtung machte, ohne daß freilich er oder die zeitgenössischen Physiker, ja noch die Physiker der nächsten Generation dem Phänomen besonderes Interesse entgegengebracht hätten: es wurde als eine Sonderbarkeit oder Zufälligkeit angesehen, wie sie dank der ungeheuren Komplikation und Mannigfaltigkeit der Natur, besonders der organischen, eben so und so oft auftrete. Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat man nun das Phänomen wieder hervorgeholt, hat es nach allen Seiten hin und unter möglichster Variation der begleitenden Umstände experimentell und theoretisch erforscht und ist schließlich, nachdem alle anderen Erklärungen als völlig unhaltbar sich herausgestellt hatten, dahin gekommen, anzunehmen, es handle sich hier um einen Ausfluß eigenster innerer Energie, kurzum um etwas,

das, mutatis mutandis, mit der Molekularbewegung ganz analog ist und vielleicht sogar in innerem Zusammenhange steht. Dafür sprechen zunächst alle diejenigen Ergebnisse, die sich ohne große Schwierigkeit gewinnen lassen, vor allem die Tatsache, daß die in Rede stehende Erscheinung sozusagen ewig ist, daß die Bewegung nie aufhört; ferner, daß sie ganz unabhängig ist von äußeren Umständen, daß sie dagegen in ihren Qualitäten abhängig ist von der Natur des Mediums, insbesondere von seiner Zähigkeit (je größer diese, desto schwächer ist die Brownsche Bewegung), sowie von der Größe der Teilchen (je kleiner diese sind, desto lebhafter ist die Bewegung). In der Figur 8 ist eine derartige

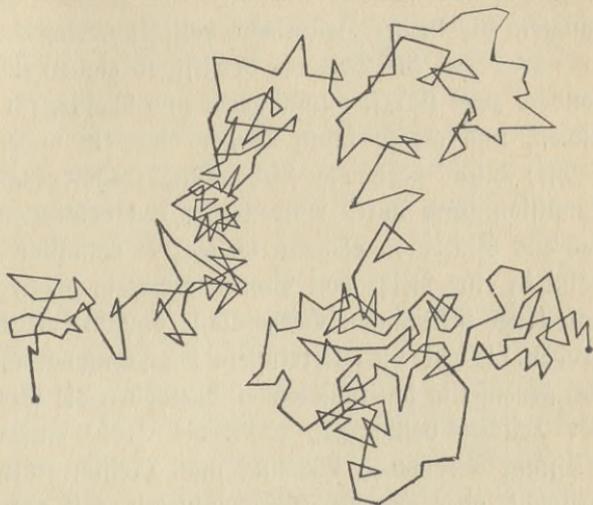


Fig. 8.

Bewegung eines Teilchens wiedergegeben, wie sie aus Beobachtungen von 15 zu 15 Sekunden gewonnen wurde.

Freilich, um nachzuweisen, daß es sich bei der Brownschen^v Bewegung nicht bloß um eine Analogie mit der Molekularbewegung^m handelt, sondern wirklich um etwas ihr innerlich verwandtes und direkt mit ihr im Zusammenhange stehendes, muß man zeigen, daß die Gesetze, die man feststellt, von entsprechendem Charakter, und daß die Zahlengrößen, durch die die Bewegung charakterisiert ist, diejenigen sind, die sie sein müßten, wenn jener innere Zusammenhang wirklich bestünde. Dieser Nachweis ist nun in neuester Zeit

in wahrhaft bewundernswürdiger Weise durch Zusammenarbeiten der Experimentatoren mit den Theoretikern erbracht worden, und zwar überzeugender, als man je hätte hoffen dürfen. Namentlich sind hier die experimentellen Arbeiten von Perrin einerseits und die theoretischen Untersuchungen von Einstein und Smoluchowski andererseits hervorzuheben; auf diese letzteren kann hier aus naheliegenden Gründen nicht eingegangen werden, nur sei betont, daß die beiden Rechner von ganz verschiedenen Voraussetzungen ausgingen, unabhängig voneinander arbeiteten und trotzdem zu Ergebnissen gelangten, die in der Hauptsache völlig übereinstimmten.

Was nun die Versuche betrifft, so eignen sich nach Perrin besonders zwei Harze, Gummigutti und Mastix, für den vorliegenden Zweck, und als Medium Wasser oder ein anderer leicht flüssiger Stoff; durch geeignete Behandlung erhält man die gewünschte Emulsion, und durch Anwendung des bekannten Zentrifugierverfahrens kann man alsdann weiter die Emulsion fraktionieren, das heißt in eine Reihe von Proben zerlegen, deren jede nur Teilchen von einer bestimmten Größtenklasse enthält, die erste nur die ganz groben, die letzte die allerfeinsten. Man kann dann nach verschiedenen, sich gegenseitig kontrollierenden Methoden die Größe und die Masse der Teilchen bestimmen, z. B. die Größe entweder durch direkte Messung oder durch Wägung und Division mit dem spezifischen Gewicht, oder aus der Geschwindigkeit, mit der die Teilchen, abgesehen von ihrer schwirrenden Bewegung, nach und nach zu Boden sinken (wofür der englische Physiker Stokes eine sehr brauchbare und einfache Formel angegeben hat); man erhält auf diese Weise recht gut übereinstimmende Werte, aus denen man schließlich Mittelwerte bildet.

Nun muß man allerdings bedenken, daß das Problem gar nicht so einfach liegt, wie man vielleicht auf den ersten Blick meinen könnte. Denn erstens sind doch die Teilchen, die man hier beobachtet, immer noch relativ massig, sie sind nicht selbst die gesuchten Molekeln, sie werden nur — so muß man sich doch den Vorgang vorstellen —

von den Wassermolekeln bei deren schwirrender Bewegung angestoßen und selbst zum Schwirren veranlaßt, und dabei tritt natürlich entsprechend der größeren Masse eine Verlangsamung der Bewegung ein. Und zweitens haben die Teilchen, eben weil sie doch absolut genommen schon recht fein sind, eine absolut betrachtet sehr erhebliche Geschwindigkeit, so daß man nicht glauben darf, die Bewegungen, die man unter dem Mikroskop wahrnimmt, seien ihre wahren Schwirrbewegungen; es kann sich vielmehr, mit Rücksicht auf die Trägheit des menschlichen Lichtsinns (die erstaunlich klein, aber doch vorhanden ist), nur um die groben Züge der Bewegung handeln, während uns die einzelnen, winzigen Zickzacke der Bewegung völlig entgehen; auch die obige Figur gibt also den Vorgang nur in den groben Zügen wieder. Nach alledem ist es einleuchtend, daß es erst noch erforderlich ist, geeignete Methoden zu ersinnen, um überhaupt zum Ziele zu gelangen, das heißt, um die vermutete Identität zu erweisen. Da ist nun Perrin auf die schöne Idee verfallen, die Verteilung der suspendierten Teilchen in einer vertikalen Wassersäule zu studieren, und zwar in Analogie mit der Verteilung der Luftteilchen in der vertikalen Säule der Atmosphäre. Man weiß, daß in dieser, wenn man sich vom Erdboden erhebt, der Druck und die Dichte immer geringer werden, daß also, atomistisch ausgedrückt, die Anzahl der Luftteilchen in der Volumeneinheit immer kleiner wird; oder umgekehrt ausgedrückt: von oben nach unten hin immer größer wird. Dasselbe muß nun offenbar bei einer wässerigen Emulsion stattfinden, nur in sehr viel stärkerem Maße, entsprechend der sehr viel größeren Masse der Teilchen, um die es sich hier handelt, mit der natürlich auch das Bestreben, in tiefere Schichten herabzusinken, stark zunimmt. Zur Erläuterung kann die umstehende Abbildung dienen, aus der man ersieht, wie groß schon die Unterschiede bei verschiedenen Gasmolekeln sind — Wasserstoff, das leichteste Gas, links, Helium in der Mitte, der verhältnismäßig schwere Sauerstoff rechts —; je schwerer die Teilchen, desto mehr drängen sie sich nach dem Boden hin zusammen; um z. B.

zu einer Schicht mit der halben Dichte (Konzentration der Teilchen) zu gelangen, muß man sich im Wasserstoff nicht weniger als 80 Kilometer, im Sauerstoff dagegen nur 5 Kilometer erheben. Und nun, was für andere Zahlen finden wir bei der Beobachtung der Emulsionen! Hier handelt es sich um ganz minimale Schichten, und schon

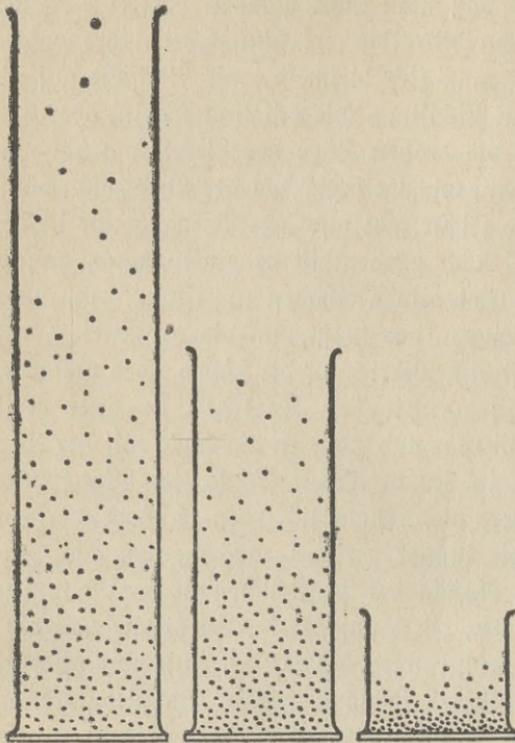


Fig. 9.

in einer Höhe eines zwanzigstel Millimeters ist unter Umständen die Zahl der schwebenden Teilchen nur noch halb so groß; das ist aber der hundertmillionte Teil der Höhe beim Sauerstoff, die Teilchen müssen also hundertmillionenmal so schwer und folglich — alles in ganz groben, runden Zahlen — in der Linear-Dimension fünfhundertmal so groß sein wie jene. Auf diese Weise gelangt man rückwärts für die Sauerstoffmolekeln zu Durchmesser, die fünfhundertmal so klein sind

wie die der Emulsionsteilchen, also, da es sich bei diesen um die Größenordnung eines zehntausentel Millimeters handelt, zu der Größenordnung eines fünfmilliontel Millimeters, also zu einer Zahl, die durchaus im Rahmen der Ergebnisse der Molekulartheorie liegt. Die Zählung der Teilchen erfolgt in flachen

*bestehende Teile von Lösungen aufblasen (in Lsg.)
eine Rückschlüsse auf das Größenverhältnis zu den Atomen der Lösungsmittel
kontrolle der Bewegung auf Grund von Vibrationen, Wellengang, Diffusion (s. S.)*

Schichten, die wie mikroskopische Präparate durch Deckgläschen festgehalten und am besten von der Seite her mikroskopisch beobachtet werden, wobei man die verschiedenen Schichten nach und nach vorbeiziehen läßt. Und nun der entscheidende Schluß: aus den Beobachtungen, aus dem Gefälle der Konzentration bei der Emulsion, im Verhältnis zu dem bei Gasen kann man, im Zusammenhange mit den übrigen Daten, die Avogadro'sche Zahl berechnen, und man findet alsdann im Mittel 0,68 Quadrillionen, eine Zahl, die mit der direkt geforderten ausgezeichnet übereinstimmt. Daraus ergibt sich dann weiter für die Masse des Wasserstoffatoms im Mittel die Zahl von anderthalb quadrilliontel Gramm. Und diese Zahlen sind sogar sehr gute Mittel, d. h. die Einzelwerte weichen gar nicht sehr erheblich davon ab; und auch die anderen Methoden, die man statt der vertikalen Schichtung heranziehen kann (Verschiebungsbewegungen, Drehbewegungen, Diffusion usw.) liefern annähernd gleiche Werte. Mehr kann man wirklich nicht verlangen; und da auch die Begründung der Berechnung durch die Theorien von Einstein und Smoluchowski einwandfrei ist, hat man es hier tatsächlich mit einer glänzenden Bestätigung der Atomistik und zugleich mit einem jener großen Fortschritte der wissenschaftlichen Erkenntnis zu tun, wie sie in deren Geschichte die deutlichen Marksteine bilden.

V.

23. Wir kommen nun zu einem sehr interessanten, aber auch sehr schwierigen Thema, zu einem Komplex von Tatsachen und Ideen ganz modernen und in ihrer Kühnheit verblüffenden Charakters; zu einem Gegenstande, in Hinsicht auf den wir uns, um nicht die hier gesteckten Grenzen zu überschreiten, mit Andeutungen begnügen müssen. Und selbst dann noch müssen wir, um verständlich zu werden, etwas weiter ausholen.

Je weiter eine Wissenschaft fortschreitet, desto mehr verwischen sich die anfangs so deutlichen Grenzen zwischen ihren verschiedenen

Erscheinungsgebieten; Phänomene und Vorstellungen, die ursprünglich gar nichts miteinander zu tun hatten, treten in engste Beziehung zueinander, und diese Beziehung führt entweder ohne weiteres zu einer Übereinstimmung, also zu einer bestätigenden Kontrolle der bisherigen Anschauungen; oder sie führt zu einem Widerspruch, zu einem Konflikt, der sich nur durch Umwälzung dieser Anschauungen, durch Aufstellung eines ganz neuen Zuges im Weltbilde, lösen läßt. Für diesen Gang der Wissenschaft bietet das jetzt zu behandelnde Kapitel ein glänzendes Beispiel.

Eine der wunderbarsten Äußerungen der Materie ist ihre Strahlung. Strahlung ganz allgemein genommen: es kann Strahlung sein, die auf unser Wärmegefühl und das Thermometer wirkt und dann Wärmestrahlung heißt, es kann sichtbare, also Lichtstrahlung sein, es kann endlich Strahlung sein, die nur auf empfindliche chemische Präparate wirkt und daher als chemische Strahlung bezeichnet werden kann; da die sichtbare Strahlung, je nach der größeren oder geringeren Wellenlänge der ihr zugrunde liegenden Wellenstrahlen, vom roten Anfang des Spektrums bis zu seinem violetten Ende reicht, kann man die Wärmestrahlung auch als ultrarote, die chemische auch als ultraviolette kennzeichnen. Alles das zusammengenommen bildet die Gesamtstrahlung; und es entsteht das Problem: anzugeben, wovon die Gesamtstrahlung eines Körpers abhängt. Da zeigt sich nun zunächst, daß man, um die Aufgabe nicht gar zu sehr zu erschweren, eine Körperklasse herausheben muß, für die die Gesetze relativ einfach werden: solche Körper, die, wenn sie nicht als Sender, sondern als Empfänger von Strahlung dienen, die gesamte auf sie fallende Strahlung verschlucken, also keinen Teil von ihr weder zurückwerfen noch durchlassen; einen solchen Körper nennt man den absolut schwarzen Körper, und man behält diesen Namen auch bei für den Fall, daß man den Körper als Sender benutzt, wobei er dann natürlich durchaus nicht schwarz im gewöhnlichen Sinne des Wortes aussieht. Die Energie der Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers für ein qcm seiner Oberfläche hängt nun ausschließlich von

seiner Temperatur ab, und zwar ist sie, wenn man die Temperatur vom absoluten Nullpunkte (273 Grad unterhalb des Eispunktes) aus rechnet, direkt proportional mit der vierten Potenz dieser absoluten Temperatur; ein Gesetz, das von Stefan aus den Beobachtungen abgeleitet und von Boltzmann theoretisch als notwendig erwiesen wurde. Wie man sieht, nimmt die Strahlung mit der Temperatur ganz rapide zu, z. B. bei Verdoppelung der Temperatur schon auf den sechzehnfachen Betrag; und daraus erklärt es sich, daß die Sonne, deren Temperatur überaus hoch ist, eine so gewaltige Strahlung entwickelt.

Aber damit ist es offenbar nicht getan; man muß die Gesamtstrahlung in ihre Bestandteile, geordnet nach den Wellenlängen der beteiligten Strahlenarten, zerlegen und ermitteln, wie sich bei steigender Temperatur der Charakter der Strahlung ändert, welcher Anteil am ganzen jedem Elementarbereich der Strahlung zukommt. Da zeigt sich nun zunächst, als Konsequenz der von Willy Wien entwickelten Theorie, daß mit steigender Temperatur die am meisten beteiligte Wellenlänge genau im umgekehrten Verhältnisse kleiner wird, so daß das Aussehen eines strahlenden Körpers mit steigender Temperatur sich immer mehr ändert: von der Dunkelheit (solange er nur Wärmestrahlen ausschickt) zur Rotglut, Gelbglut und Weißglut. Die letzte und wichtigste Aufgabe ist dann die, das Gesetz anzugeben, nach dem die Intensität irgendeiner Partialstrahlung von den beiden maßgebenden Größen: Temperatur und Wellenlänge, abhängt. Um dieses Gesetz zu finden, muß man ausgehen einerseits von der Wärmetheorie, durch die die Energieverhältnisse aller, also auch der strahlenden Körper geregelt werden, andererseits aber von der Theorie der Punktschwingungen; denn ein strahlender Körper besteht doch aus lauter in heftiger Schwingung begriffenen Teilchen; und da diese Schwingungen gegenwärtig nicht mehr, wie früher, als elastische, sondern als elektrische aufgefaßt werden, muß man eben die Theorie der elektrischen Schwingungen als zweiten Ausgangspunkt nehmen. Und nun der schon angedeutete Widerspruch: die

Formel, zu der man auf diese Weise gelangt, ist mit der Erfahrung nicht nur im Einklange, sie spricht ihr geradezu Hohn, sie liefert nämlich gar nicht für jeden bestimmten Fall ein bestimmtes bevorzugtes Strahlungsgebiet (z. B. für das Lichtspektrum das gelb, für das chemische das ultraviolett), sie liefert vielmehr stets desto mehr Strahlung, je kleiner die Wellenlänge ist, sie schiebt sozusagen alle Strahlungsenergie auf die ultra-ultra-violetten Strahlen ab, und das ohne Ende, so daß ein Strahlungsgleichgewicht überhaupt nicht möglich wäre.

Wenn man sich in einer so üblen Lage befindet, hat man natürlich Veranlassung, den ganzen Weg, auf dem man in sie gekommen ist, noch einmal zu verfolgen und festzustellen, an welcher Stelle man sich verirrt haben könnte. Das haben zahlreiche hervorragende Forscher getan, aber es ließ sich kein Fehler entdecken. Da hatte Planck den Scharfsinn und zugleich, das darf man sagen, die Kühnheit, den einzigen angreifbaren Punkt zu konstatieren. Bei der Untersuchung war nämlich die — allgemein für selbstverständlich gehaltene — Annahme gemacht worden, daß die Strahlung ein stetiger Vorgang ist, daß in jedem noch so kleinen Zeitraum eine bestimmte, wenn auch noch so kleine Energiemenge abgegeben wird. Planck stellte sich nun die Frage, wie sich die Sache gestalten würde, wenn man diese Annahme durch die andere ersetzte, daß die Strahlung ruckweise erfolgt, daß es ein bestimmtes Energiequantum gebe, das nicht mehr teilbar sei (gerade wie das Atom der Materie), und daß eben Ausstrahlung immer nur in solchen Elementarquanten erfolge. Um ein Bild zu brauchen: die Energie soll aus dem Körper nicht abfließen, wie ein Wasserstrahl aus einem Gefäße, sie soll vielmehr abtropfen, wie es das Wasser tut, wenn der Druck klein oder die Öffnung sehr eng ist. Und siehe da: bei der Neuberechnung auf Grund dieser Annahme ergibt sich eine von der früheren völlig abweichende Strahlungsformel, die Plancksche Formel; sie liefert wirklich für jede Temperatur ein einer bestimmten Wellenlänge zugehöriges Optimum, und sie stellt überhaupt die Beobachtungen

in weitem Bereiche der Temperatur und der Wellenlänge ausgezeichnet dar. Das aber, was uns für das in diesem Buche behandelte Thema am meisten interessiert, ist das folgende. In der Formel kommen verschiedene Größen vor, die alle bekannt oder direkt meßbar sind, bis auf zwei: die Avogadro'sche Zahl (vgl. S. 62) und das Elementarquantum der Energie, das mit einem Ruck ausgestrahlt wird und das, was wir hier nicht weiter verfolgen können, mit wachsender Frequenz der Schwingungen der Teilchen seinerseits wächst, so daß man jene Konstante als den Faktor der Frequenz einführen muß. Man hat also eine Gleichung mit zwei Unbekannten; macht man nun aber zwei Strahlungsmessungen bei verschiedener Wellenlänge und Temperatur, so hat man zwei Gleichungen und kann die beiden Unbekannten bestimmen. Und da ergibt sich nun — natürlich unter Berücksichtigung nicht bloß zweier, sondern möglichst vieler Messungen, aus denen dann das Mittel genommen wird —, für die Avogadro'sche Zahl 0,64 Quadrillionen, also eine Zahl, die mit den früheren so vorzüglich stimmt, wie man es bei der Kühnheit der Voraussetzungen und der Verschiedenheit der Ausgangspunkte gar nicht hätte erwarten dürfen. Gleichzeitig ergibt sich für die andere Unbekannte, die Planck'sche Konstante, der Wert 0,0062 Quadrilliontel.

24. Bei aller Befriedigung über ein derartiges Ergebnis wird man sich doch sagen, daß es durchaus erwünscht wäre, noch eine Probe auf das Exempel zu machen und zu sehen, ob sich die Hypothese des Energiequantums auch noch anderwärts bewährt. Gilt doch auch hier der Spruch: durch zweier Zeugen Mund wird erst die rechte Wahrheit kund. Wir könnten uns nun damit begnügen festzustellen, daß tatsächlich dieser zweite Zeuge den ersten vollauf bestätigt, wenn sich nicht bei einem näheren Eingehen auf diesen Fall Gelegenheit böte, einerseits ein neues Erscheinungsgebiet, das der Wärme, zu betreten und andererseits auf Grund dessen unsere Vorstellungen über die Konstitution der Materie und der Molekeln, aus denen sie besteht, wesentlich auszugestalten.

Wir haben bisher den Gasmolekeln, abgesehen von ihren Zusammenstößen, lediglich Schwirrung, d. h. geradlinig fortschreitende Bewegung zugeschrieben. Aber gerade infolge dieser Zusammenstöße müssen diese Körperchen auch Drehbewegungen annehmen, und zwar schon dann, (man denke an Billardbälle), wenn sie genau oder ungefähr kugelförmig sind, noch mehr aber, wenn sie irgendwie längliche oder gar flächenhafte Gestalt besitzen, was doch immer mehr oder weniger der Fall sein wird, wenn sie aus einer Mehrzahl von Atomen bestehen. Dazu kommt dann drittens noch eine innere Bewegung, nämlich die Schwingungsbewegung der Atome innerhalb der Molekel. Man sieht, die Sache ist sehr verwickelt, und sie wird noch viel verwickelter, wenn man sich an der Hand gewisser Tatsachen die Natur jener Zusammenstöße etwas näher analysiert, wobei man dann findet, daß es sich eigentlich gar nicht um Zusammenstöße handelt, daß vielmehr angenommen werden muß, jede Molekel habe um den Raum herum, in dem sich ihre Masse befindet, noch einen sehr viel größeren, masselosen Raum, der eine Art von Schutzhülle, gewissermaßen ein Polster darstellt, an dem die anderen Molekeln, ehe sie anstoßen, abprallen; ein Raum, den man als Molekularsphäre oder Wirkungssphäre bezeichnet.

Nun wollen wir, was wir bisher nur ganz gelegentlich getan haben, den Vorgang betrachten, der darin besteht, daß einem Körper Energie zugeführt und er dadurch erwärmt wird. Die Wärmemenge, in Kalorien ausgedrückt, d. h. auf Wasser als Einheit bezogen, die man zuführen muß, damit die Temperatur des Körpers um ein Grad steige, heißt seine Wärmekapazität (ganz analog der Masse als der Kraftkapazität, vgl. S. 43); und hieraus kann man dann zwei neue, wesentlich einfachere Begriffe bilden, wenn man von dem Körper auf seine Elemente zurückgeht. Und zwar kann man entweder die Masseneinheit, also das Gramm, betrachten und kommt dann zum Begriffe der spezifischen Wärme (s. S. 42); oder man betrachtet die Molekel bzw. das Atom und erhält dann die Begriffe der Molekularwärme bzw. der Atomwärme, d. h. der Wärmemengen, die bei der Er-

wärmung um ein Grad auf eine Molekel bzw. ein Atom entfallen. Natürlich kann man die letzteren selbst zunächst nicht angeben, wohl aber die Größen, die sich auf die Gramm-Molekel bzw. das Gramm-Atom beziehen, und daraus kann man dann jene selbst indirekt ableiten.

*Messung
Wärme
unmöglich
Erwärmung
Atome*

Eine weitere wichtige Unterscheidung ist die folgende. Wenn man einen Körper erwärmt, so dehnt er sich aus, leistet also Arbeit und hierzu wird ein Teil der zugeführten Energie verbraucht. Daraus folgt, daß man durch einen solchen Versuch gar nicht die eigentliche spezifische Wärme findet, sondern eine Größe, die sie um einen bestimmten Betrag übertrifft. Um die reine spezifische Wärme zu bestimmen, müßte man den Körper nicht, wie es hier geschieht, bei konstantem Druck (nämlich gewöhnlich bei Atmosphärendruck), sondern bei konstantem Volumen, also im geschlossenen, starren Gefäß, erwärmen. Wie man sieht, sind zwei Begriffe zu unterscheiden: die spezifische Wärme c_p bei konstantem Druck und die spezifische Wärme c_v bei konstantem Volumen. Ihre Differenz ist uns schon früher begegnet, ohne daß wir damals schon darauf hinweisen konnten. In der Zustandsgleichung der idealen Gase steht nämlich links die Größe $p v$, also die Energie; und wenn wir rechts, wo RT steht, die Anwendung auf ein Grad Erwärmung machen, bleibt gerade die Größe R übrig. Die Gaskonstante stellt also die Arbeit bei der betreffenden Ausdehnung, also die Differenz der beiden spezifischen Wärmen dar, in Formel: $c_p - c_v = R$. Nur muß man hier nicht in Ergs, sondern in Kalorien rechnen, und man erhält dann zahlenmäßig $c_p - c_v = R = 1,985$. Für feste und flüssige Stoffe wird die Beziehung freilich bei weitem nicht so einfach.

Für die spezifische Wärme gelten nun höchst merkwürdige Beziehungen, Regeln und Gesetze. Betrachten wir zunächst wieder die Gase, so läßt sich über das Verhältnis $k = c_p/c_v$ etwas aussagen; und zwar am leichtesten bei denjenigen Gasen, deren Molekel aus einem einzigen Atom besteht, so daß hier die ganze Arbeit in der Vergrößerung der gegenseitigen Entfernung der Molekeln voneinander

besteht. Aus den Grundlagen der kinetischen Theorie folgt nämlich, daß für solche Gase $k = 5/3$ sein muß, und dieser theoretische Schluß ist von der Erfahrung (erste Messung durch Kundt und Röntgen) vollauf bestätigt worden, z. B. für Quecksilberdampf, dessen Molekeln eben einatomig sind. Komplizierter liegen die Verhältnisse bei den mehratomigen Gasen; aber auch hier ist es, nach einigen Fehlschlägen, gelungen, die Beziehung klarzulegen und zu zeigen, daß der Wert von k mit der Anzahl der sog. Freiheitsgrade innerhalb der Molekel, d. h. mit der Zahl der Bewegungsmöglichkeiten n der Atome zusammenhängt gemäß der Formel $k = 1 + 2/n$. Bei einatomigen Molekeln ist $n = 3$ und folglich $k = 5/3$, bei zweiatomigen ist $n = 5$ und somit $k = 1,4$, wie es tatsächlich bei Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff usw. der Fall ist, bei dreiatomigen noch größer und so fort.

Gehen wir nun von der Verhältnisgröße k zur spezifischen Wärme bei konstantem Volumen selbst über, und zwar zur Molekularwärme, so fordert hier die Theorie, daß für einatomige Gase diese Größe (bezogen auf die Gramm-Molekel) mindestens gleich drei Kalorien sein muß; sie kann auch größer sein, dann nämlich, wenn Drehungen der Teilchen oder andere Komplikationen eintreten, aber sie kann unter keinen Umständen kleiner sein. Das stimmt nun wirklich mit der Beobachtung überein, und zwar tritt tatsächlich der Minimalwert 3 ein — ein Beweis, daß keine Drehungen erfolgen, und daß überhaupt die Schwirrbewegung, die die Grundlage der Temperatur ist, ungestört durch andere Vorgänge vorstatten geht. Bei mehratomigen Stoffen kommt nun eine besondere Rotationsenergie hinzu, und zwar bei zweiatomigen mit einem gewissen Bruchteile ihres Maximalwertes, so daß im ganzen mindestens fünf Kalorien verbraucht werden; bei dreiatomigen steigt diese Zahl auf mindestens sechs und dann noch weiter. Auch dies wird durch die Erfahrung bestätigt, und zwar für viele Gase ganz genau, für andere mit gewissen Abweichungen, die sich dadurch erklären, daß hier noch andere innere Energien ins Spiel treten. Insbesondere kommt hier die bei höheren Temperaturen eintretende

Dissoziation in Frage, die aus der einen Molekel mit ihrem Bedarf von fünf Kalorien zwei einfache mit je drei Kalorien schafft, zusammen also einen Wärmeverbrauch von sechs Kalorien erzeugt. Bei drei- und mehratomigen Molekeln endlich geht die Zahl über sechs, zum Teil sehr weit, hinaus, entsprechend den größeren Gefahren für den festen Bestand der Molekel, die ihr in solchen Fällen durch die häufigen Zusammenstöße der Atome drohen.

Wenn das alles in schönster Ordnung ist, so gibt es doch zu denken, daß in den meisten Fällen genau die Minimalwerte der spezifischen Wärme auftreten, und dazu kommen dann noch gewisse Sonderbarkeiten beim Anwachsen der Temperatur. Solche Untersuchungen sind in neuerer Zeit in großem Umfange angestellt worden, und zwar sowohl nach oben hin, wo die spezifische Wärme immer größer, als auch nach unten hin, wo sie immer kleiner wird. Und dabei hat sich nun gezeigt, daß man mit den gewöhnlichen Anschauungen nicht mehr auskommt, wonach sich die Energie stetig ändert. Man muß vielmehr annehmen, die Energieänderung erfolge ruckweise, d. h. in bestimmten endlichen, wenn auch natürlich sehr kleinen Mengen, und so gelangt man auch hier, also von einem ganz anderen Ausgangspunkte aus, zur Quantenhypothese. Berechnet man dann aus den experimentellen Daten das Elementarquantum der Energie, so kommt man aufs neue zu einer schönen Übereinstimmung mit den früheren Befunden.

25. Geht man von den Gasen zu den festen Körpern über, so findet man neue Gesetze, hier aber solche, welche durch ihren schwankenden und unsicheren Charakter besondere Schwierigkeiten machen. Die Atomwärme der festen Körper ist nämlich nach einem berühmten, von Dulong und Petit aufgestellten Gesetze gleich sechs Kalorien, also doppelt so groß wie die der einatomigen Gase. Und das wird verständlich, wenn man bedenkt, daß die Atome der festen Körper nicht bloß kinetische Energie besitzen, sondern auch unter potentieller Energie, d. h. unter gegenseitigen Spannungen stehen, und daß

sich unter gewissen einfachen Voraussetzungen die Beziehung ergibt, wonach die potentielle Energie ebenso groß ist wie die kinetische, also auch die gleiche Zahl von Kalorien beansprucht. Nun ist aber tatsächlich der Zahlenwert der Atomwärme für die meisten festen Elemente nicht genau gleich sechs, er weicht vielmehr nach unten oder oben etwas davon ab; und für einige Stoffe, wie Kohle, Bor, Beryll und Silizium, ist die Abweichung ganz kraß, indem der Wert der Atomwärme nur fünf oder vier oder drei, ja, für Kohlenstoff, gar nur 1,4 beträgt. Worauf das zurückzuführen sei, hat zuerst Richard aufs schönste klargelegt: das Gesetz von Dulong und Petit braucht nur dann genau zu gelten, wenn erstens das Atomgewicht groß, also die Schwingungsbewegung der Atome mäßig ist, und wenn zweitens auch das Atomvolumen groß, also der Abstand der Atome voneinander groß ist, so daß ihre Einwirkung aufeinander nicht allzu erheblich ist. Ist eine dieser Voraussetzungen nicht erfüllt, so werden kleine Abweichungen von jenem Gesetze eintreten; und es werden starke eintreten, wenn beide zugleich nicht erfüllt sind. Das ist nun tatsächlich der Fall bei den vorher genannten Elementen. Um das etwas näher zu erläutern, wollen wir die Gelegenheit benutzen und eine andere Gesetzmäßigkeit einschalten, die in der allgemeinen Chemie seit einem halben Jahrhundert eine große Rolle spielt: das periodische System der Elemente.

Wenn man die Elemente nach ihrem Atomgewicht, das man auf einer horizontalen Abszissenachse verzeichnet, ordnet, und als vertikale Ordinaten die Atomvolumina aufträgt, so erhält man bei der Verbindung der oberen Endpunkte eine Kurve von periodischem Charakter, die in der beistehenden Figur wiedergegeben ist. Wie man sieht, schwankt die Kurve nicht regellos hin und her, sondern sie hat ganz bestimmt ausgeprägte Täden; einige Elemente liegen in den Mulden, andere in den Spitzen, noch andere in den ansteigenden oder absteigenden Ästen, und es hat sich herausgestellt, daß auch noch zahlreiche andere chemische und physikalische Eigenschaften der Elemente mit dieser Lage im Zusammenhange stehen, ja, es hat

sich auf diese Weise ein ganzes System der charakteristischen Eigenschaften der Elemente und Elementgruppen aufbauen lassen. Was nun unsere Frage betrifft, so sieht man, daß Kohle, Bor und Beryll

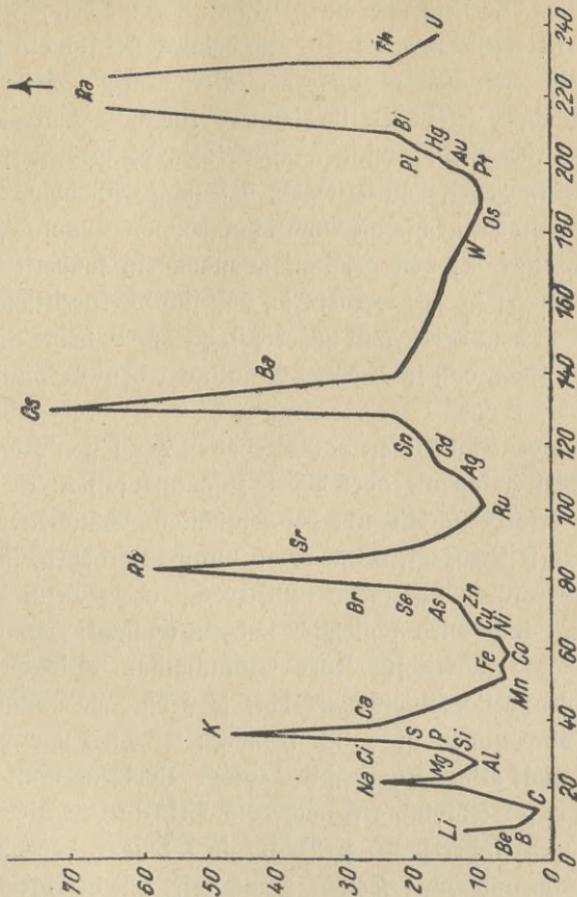


Fig. 10.

in der linken unteren Ecke liegen, also bei weitem die kleinsten Werte sowohl des Atomgewichts wie des Atomvolumens besitzen. Dazu kommt dann noch weiter, daß bei diesen Elementen, wie H. F. Weber

zuerst gefunden hat, die spezifische Wärme sehr stark von der Temperatur abhängt, und zwar in einem Sinne, der zu unserer ganzen Vorstellung von diesen Verhältnissen ausgezeichnet paßt. Daraufhin hat dann Nernst im Verein mit seinen Schülern ausgedehnte Untersuchungsreihen angestellt über die spezifische Wärme der festen Körper bei immer tieferen Temperaturen, und dadurch hat sich ein sehr vollständiges Bild von den energetischen Verhältnissen dieser Körper unter Umständen, in denen ihre innere kinetische Energie immer kleiner und kleiner wird, gewinnen lassen. Nach diesen Untersuchungen kann es keinem Zweifel unterliegen, daß nach dem absoluten Nullpunkte der Temperatur hin die Abweichungen vom Dulong-Petit'schen Gesetze nicht nur bei den genannten anomalen, sondern bei allen Elementen immer größer werden, ja, daß sich die spezifische Wärme schließlich selbst dem Wert null nähert; ist doch z. B. beim Diamanten festgestellt worden, daß sie bei 240 Grad unter dem Eispunkt kleiner ist als 0,01!

Nach alledem kann man das Verhalten der festen Körper vielleicht am besten in die folgenden Worte zusammenfassen: Die Wärmemenge, die erforderlich ist, um bei konstantem Volumen die Temperatur eines festen Stoffes um einen Grad zu erhöhen, ist bei sehr tiefen Temperaturen fast gleich null, wächst aber, wenn die Temperatur steigt und wird schließlich nahezu konstant, nämlich gleich ungefähr sechs Kalorien für jedes Grammatom. Die Grenze der Konstanz wird desto schneller erreicht, je größer das Atomgewicht und das Atomvolumen ist, z. B. beim Blei schon bei etwa -200 , beim Kohlenstoff erst oberhalb $+900$ Grad. Ubrigens kann man das Gesetz auch auf Verbindungen nach dem Prinzip der Überlagerung ausdehnen und findet dann z. B. für den Quarz, der aus einem Teil Silizium und zwei Teilen Sauerstoff besteht, den Wärmeanspruch pro Grad zwar bei mäßigen Temperaturen nur gleich zehn, bei hohen aber gleich achtzehn, so daß wirklich auf jedes Atom sechs Kalorien entfallen.

Schließlich hat Einstein die Frage auch vom Standpunkte der

Quantentheorie behandelt, und er ist auf diese Weise, bei aller Übereinstimmung mit den allgemeinen Betrachtungen von Richarz, doch in mancher Hinsicht noch viel weiter gekommen, und zwar zu Schlüssen, die mit den Tatsachen vorzüglich stimmen und damit eine neue Stütze für die Quantentheorie geschaffen haben.

Hiernach ergibt sich eine ganz neue und nun schon recht präzise Vorstellung von der Konstitution der Molekeln: sie bestehen, eingebettet in eine ausgedehnte Wirkungssphäre, aus Atomen, die mehr oder weniger eng „geköpelt“ sind; und je nach der Zahl der Atome, nach der Zahl der „Freiheitsgrade“, die sich hieraus für die möglichen Bewegungen innerhalb der Molekel ergeben, und je nach der Festigkeit oder Losigkeit der Koppelung der Atome untereinander ergeben sich andere innerenergetische Verhältnisse, die sich schließlich mit der äußeren Schwirrungsenergie der Molekel als eines Ganzen in der gewünschten Weise zusammensetzen. Man hatte in der ersten Zeit den Fehler gemacht, die Atome in der Molekel einfach zu zählen, danach die Zahl der Freiheitsgrade zu bestimmen und hiervon nun alles abhängig zu machen; inzwischen hat man eingesehen, daß die Anzahl allein es nicht macht, daß es auch auf die Innigkeit des Zusammenhanges ankommt; man muß, wie Sommerfeld in Wänderung eines Schiller'schen Wortes treffend sagt, die Freiheitsgrade wägen und nicht zählen. Leicht ist natürlich diese „Wägung“ nicht; aber nachdem einmal der Grund gelegt ist, wird die Lösung im einzelnen um so sicherer gelingen, als auch von rein chemischer Seite manche Hilfe zu erwarten ist.

Ubrigens ist zum Schluß noch eine kurze Bemerkung zu machen, obgleich sie nicht eigentlich mehr das Wesen der Materie betrifft: im weiteren Verfolge der Quantentheorie, besonders in ihrer Anwendung auf die Theorie des Lichts (Lichtquanten), hat sich gezeigt, daß man gut tut, an die Stelle der Energiequanten eine etwas andere Größe zu setzen, die sich durch einen Zeitfaktor unterscheidet und die man passend als das universelle Wirkungsquantum bezeichnet; und dieses repräsentiert dann in sich die Quintessenz der ganzen

neuen, zunächst so verblüffenden und schließlich doch so erfolgreichen Vorstellung von dem Wesen der Energie und der Materie. Und an dieser Stelle werden wir uns gern der von uns aufgestellten Forderung entsinnen, die Materie als wesensgleich mit der Energie aufzufassen, sie in dieser als etwas Übergeordnetem aufgehen zu lassen. Es leuchtet ein, daß die soeben gewonnene Theorie ein wichtiger Schritt auch auf diesem Wege ist.

VI.

26. Das interessanteste Gebiet der ganzen Physik ist zweifellos das der Elektrizität. Interessant nicht allein deshalb, weil die Erscheinungen, die auf ihr beruhen, so überaus glänzend und mannigfaltig sind, nicht allein deshalb, weil diese Elektrizität selbst so völlig rätselhaft ist, sondern auch wegen der Beziehungen, die sie zu allem anderen hat, und so auch zum Stoffe, zu dem uns durch seine Masse und sein Gewicht vertrauten trägen und ponderablen Stoffe, während sie ihrerseits, die Elektrizität, weder träge noch ponderabel ist. Gerade von diesen Beziehungen also dürfen wir erwarten, weiteren und besonders wertvollen Aufschluß nicht bloß über das Wesen der Elektrizität zu erhalten, was uns hier weniger angeht, sondern auch über das Wesen der Materie selbst; und wenn sich schließlich herausstellt, daß diese beiden Fragen sich immer enger verknüpfen und am letzten Ende gar nicht mehr voneinander zu trennen sind, so macht das natürlich die ganze Untersuchung nur um so interessanter.

Wir tun gut, bei dieser Untersuchung, wie schon bei manchen früheren, uns, wenigstens im großen, an die sog. Aggregatzustände der Materie zu halten und mit den festen Körpern zu beginnen. An ihnen beobachten wir eine ganze Reihe von elektrischen Phänomenen, von denen wir die für unseren Zweck wichtigsten herausheben wollen.

Wenn man zwei Körper aneinander reibt, werden sie elektrisch, und zwar in so deutlich kontrastierendem Sinne, daß man sagt:

der eine von ihnen werde dabei positiv, der andere negativ geladen. Man hat es hier, energetisch betrachtet, mit einem sehr einfachen Vorgange zu tun: mit der Umwandlung von mechanischer, nämlich Reibungsenergie in elektrische. Um so geheimnisvoller ist der materielle Vorgang, der, wie wir doch meinen sollten, mit dieser Energieumwandlung verknüpft ist; denn es findet weder eine Änderung der Masse oder des Gewichts, noch eine solche der elastischen oder Festigkeitseigenschaften der beteiligten Körper statt. Die Veränderung ist eben rein elektrischer Natur, wir schweben daher mit unsern bezüglichen Annahmen ganz in der Luft und können für unseren Zweck keinerlei Nutzen aus dem Vorgange ziehen — wenigstens vorläufig nicht.

Noch weniger können wir das hinsichtlich eines anderen Phänomens, bei dem nicht einmal Reibung erforderlich ist, bei dem die einfache, statische Berührung, z. B. zwischen einer Kupfer- und einer Zinkplatte, genügt, um Elektrizität hervorzurufen. Offenbar sind hier irgendwelche, ganz minutiöse Vorgänge mit im Spiele, die sich unserer direkten Wahrnehmung entziehen. Es genüge daher fürs erste, festzustellen, daß, wie dort bei der Reibungselektrizität, so auch hier, bei der Kontaktelektrizität, die Stoffe eine Rangordnung bilden, vom stärksten positiven zum stärksten negativen hinab; nur daß es sich dort und hier um zwei ganz verschiedene Klassen von Stoffen, wovon sofort die Rede sein wird, handelt: Isolatoren und Leiter, und daß es bei diesen letzteren sehr schwer ist, jene Rangordnung einwandfrei aufzustellen — so schwer, daß man gerade für die festen Stoffe, beinahe darauf hat verzichten und seine Zuflucht zu anderen Formen hat nehmen müssen, die man in der Gestalt von Tropfelektroden der Messung unterwirft, und die dann allerdings eine brauchbare Reihe, die Reihe der sog. absoluten Kontaktpotentiale bilden. Wer aber die Träger dieser Potentiale seien, das können wir an dieser Stelle, weil wir im übrigen in dieser Richtung noch ganz unvorbereitet sind, noch nicht erörtern.

Dann käme die Erscheinung der Ausbreitung des elektrischen

Zustandes durch den Raum, genauer gesagt, durch das diesen Raum erfüllende Medium, wobei wir uns hier nicht auf den festen Aggregatzustand zu beschränken brauchen, sondern alle drei zunächst einmal gemeinsam betrachten können. Hier sind nun zwei, uns schon aus anderen Gebieten bekannte Übertragungsarten zu unterscheiden, die Leitung und die Strahlung. Wie die Wärme, so kann auch die Elektrizität, d. h. der elektrische Zustand, von einer Raumstelle zu einer anderen entweder durch Leitung gelangen, nämlich dann, wenn eben das Medium die Eigenschaft eines Leiters besitzt; oder auf eine andere, zunächst recht räthselhafte Weise, so daß man lange Zeit hindurch sich einfach mit dem Ausspruch beholfen hat: es handle sich um eine Fernwirkung, bei der das Medium gar nicht beteiligt ist. Während nämlich bei der Leitung, und zwar sowohl der Wärmeleitung wie der Elektrizitätsleitung, das Medium selbst erwärmt wird, bleibt es bei der Wärmestrahlung kalt, und auch bei der elektrischen Strahlung, wie man wenigstens annahm, unbeeinflusst. Indessen hat sich gerade hier diese Annahme denn doch als irrig erwiesen. Es haben sich nämlich drei Tatsachen herausgestellt, von denen jede allein schon genügen würde, um die Vorstellung einer Fernwirkung unmöglich zu machen; wieviel mehr alle drei zusammen! Erstens wird das Medium durch die Elektrizitätsvermittlung beeinflusst, es gerät in einen Spannungszustand; zweitens übt es seinerseits auf die Stärke der Übertragung einen Einfluß aus, und man kann diesen Einfluß durch eine für jeden Stoff charakteristische Konstante, die Dielektrizitätskonstante, kennzeichnen, die kolossale Verschiedenheiten aufweist (gerade wie die Dichte der Körper in mechanischer Hinsicht) und z. B. für Wasser achtzigmal so groß ist wie für Luft; und drittens erfolgt die Übertragung des elektrischen Zustandes nicht momentan, sie braucht vielmehr Zeit, wenn auch sehr wenig Zeit, aber doch eine genau meßbare Zeit. Allerdings ist hier zu betonen, daß man derartige Fortpflanzungsversuche und Messungen nur in einem an sich komplizierten Falle anstellen kann, nämlich nicht bei der etwaigen Übertragung eines sich immer gleich-

bleibenden elektrischen Ladungszustandes (darüber wissen wir gar nichts), sondern nur bei der Ausbreitung sog. elektrischer Schwingungen, d. h. von Ladungszuständen eines Körpers, bei denen dieser fortwährend und in regelmäßigem Rhythmus geladen und entladen oder, noch besser, immer abwechselnd positiv und negativ geladen wird. Diese Schwingungen erzeugen dann in dem Medium Wellen, und deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist es, die sich exakt, und zwar nach verschiedenen Methoden messen läßt. Dabei ergibt sich denn das überraschende Resultat, daß die Geschwindigkeit der Elektrizität übereinstimmt mit der längst bekannten Geschwindigkeit des Lichts — eine Übereinstimmung, die allein schon den Gedanken nahe legt, das Licht möchte in Wahrheit eben auch eine elektrische Wellenbewegung sein.

Gehen wir nun zu dem anderen Falle der Übertragung von Elektrizität, zu dem Falle der Leitung, über, und beschränken wir uns zunächst hier wieder auf feste Körper und zwar naturgemäß auf Leiter (das sind im wesentlichen die Metalle), so stellen wir hier zunächst die schon erwähnte Grundtatsache fest, daß diese Leiter, während sie ihre Rolle als solche spielen, während also, wie man sagt, ein elektrischer Strom durch sie fließt, erwärmt werden. Es wird elektrische in kalorische Energie und, bei hinreichender Steigerung, sogar in Leuchtenergie umgewandelt — zuweilen, z. B. bei der elektrischen Heizung und der elektrischen Beleuchtung, sehr im Sinne unserer Wünsche, meist aber, wie bei der Energieübertragung (gewöhnlich als Kraftübertragung bezeichnet), diesen Wünschen gerade entgegengesetzt und feindselig, eben weil die elektrische Energie hierdurch stark beeinträchtigt wird. Man drückt das dadurch aus, daß man den Leitern einen elektrischen Widerstand beimißt, also eine Eigenschaft, ganz analog der Trägheit als dem Widerstande gegen die Übertragung von Bewegung; und wie man dort die Beschleunigung erhält, indem man die Kraft durch die Masse dividiert, so muß man hier, um die Stromstärke zu erhalten, die elektromotorische Kraft durch den elektrischen Widerstand dividieren. Das ist das be-

rühmte Ohmsche Gesetz. Nur ist der Widerstand hier sowohl geometrisch wie materiell ganz anders charakterisiert wie dort. Während die Masse mit dem Volumen parallel geht, steht hier der Widerstand im direkten Verhältnis nur zur Länge, zum Querschnitt aber im umgekehrten Verhältnis (gerade wie der mechanische Widerstand eines Wasserrohres gegen den Durchfluß des Wassers); und auch die den verschiedenen Arten von Materie entsprechenden Zahlen, die spezifischen elektrischen Widerstände ordnen sich ganz anders wie dort die spezifischen Massen, also die Dichten: es genügt, als Beispiel dafür Gold anzuführen, dessen Trägheitswiderstand zu den größten, dessen elektrischer Widerstand zu den kleinsten unter allen Metallen gehört.

Wenn die Metalle dem Durchgange des elektrischen Stromes Widerstand entgegensetzen, so ist nun des weiteren die Frage aufzuwerfen, woher denn dieser Widerstand stammt, was an ihm dem Wesen nach etwa allen Metallen gemeinsam, und was jedem von ihnen insbesondere eigentümlich sei. Da gibt es nun eine sehr merkwürdige Tatsache, die uns auf die rechte Spur bringt. Der Widerstand der Metalle nimmt nämlich mit steigender Temperatur zu, und zwar für alle in gleichem Maße, nämlich so, daß für jeden Temperaturgrad der Widerstand um denselben Bruchteil des Wertes, den er bei 0° Celsius hat, zunimmt — kleine Abweichungen von diesem Gesetze, die sogar bei einigen wenigen Metallen, wie dem Eisen, nicht ganz unerheblich werden, ändern nichts an der entscheidenden Wichtigkeit des Gesetzes; und ebensowenig der Umstand, daß es eine Klasse von Metallen gibt, die Legierungen, die ganz aus dem Rahmen herausfallen. Besonders verblüffend aber wirkt der Zahlenwert dieser relativen Zunahme, er beträgt $\frac{1}{273}$. In der Formelsprache nimmt das Gesetz die Form

$$w = w_0 (1 + \alpha t) = w_0 \alpha T$$

an, wo wieder, wie früher, t die vom Eispunkt, T aber die vom absoluten Nullpunkt aus gezählte Temperatur bedeutet, während w der Widerstand bei irgendeiner Temperatur und w_0 sein Spezial-

wert beim Eispunkte ist. Stellt man die Formel graphisch durch eine Kurve dar, so erhält man wegen der Gleichförmigkeit der Zunahme eine gerade Linie, und zwar eine, die, nach links unten ver-

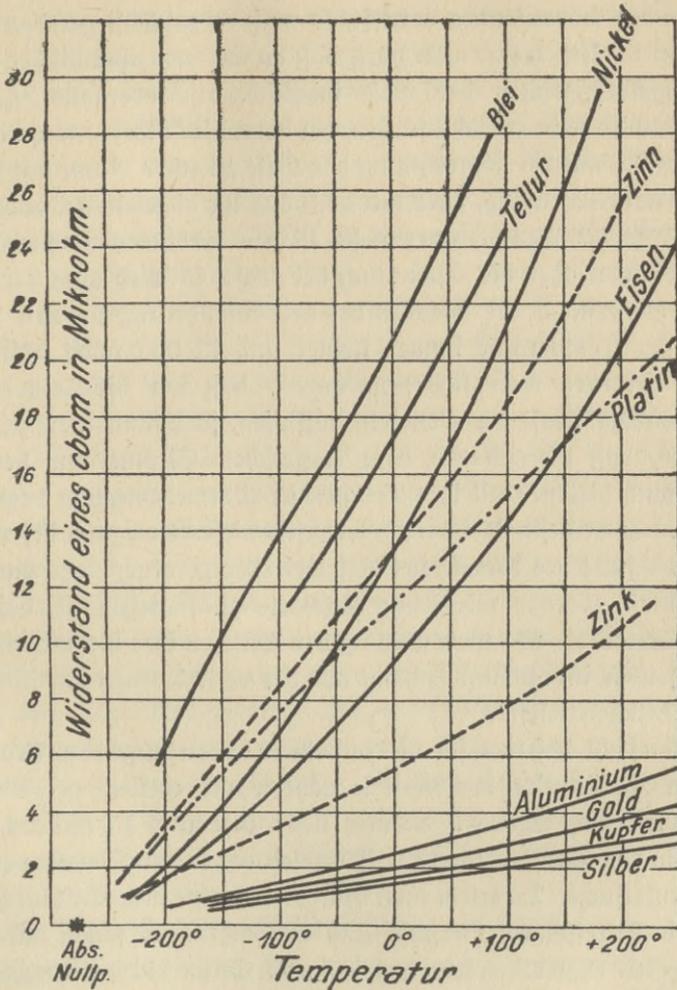


Fig. 11.

längert, auf den absoluten Nullpunkt trifft. Für verschiedene Metalle werden freilich diese Kurven, wegen des verschiedenen Faktors w_0 , verschieden steil, so daß man das Bild der bestehenden Figur erhält. Was nun aber den Zahlenwert von α , also den Temperaturkoeffizienten des Widerstandes betrifft, so muß es zunächst geradezu verblüffend wirken, wenn man hört, daß er mit dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Gase identisch, also ebenfalls $\frac{1}{273}$ ist. Was, so wird man zunächst fragen, hat denn die Widerstandszunahme der Metalle mit der Ausdehnung der Gase zu tun? Nun, mit dieser an sich natürlich nichts, aber mit dem aus ihr abgeleiteten absoluten Nullpunkte der Temperatur, dieser ist das verbindende Glied: wie das Volumen oder die Spannung der Gase, so wird auch der elektrische Widerstand der Metalle bei der Annäherung an den Nullpunkt der Temperatur immer kleiner und in ihm selbst schließlich null. Erinnert man sich nun daran, daß wir die Temperatur als lebendige Kraft der Molekeln auffassen, so kommt man zu dem Schlusse, daß die Metalle dem elektrischen Strome nur deshalb Widerstand bieten, weil ihre Teilchen in Wärmebewegung begriffen sind, und zwar desto stärkeren, je lebhafter diese Bewegung ist; außerdem aber für jedes Metall, bei derselben Temperatur, einen anderen Widerstand, woraus wiederum rückwärts zu schließen ist, daß bei jedem Metall die Wärmebewegung der Teilchen ihre Besonderheiten hat, offenbar im Zusammenhang mit der verschiedenen Konstitution dieser Teilchen selbst.

Man sieht, daß man sich hier auf einem neuen Wege dem Problem von der Konstitution der Materie nähert, und es liegt der Wunsch nahe, diese Angelegenheit dadurch noch wesentlich zu fördern, daß man nun den Mechanismus der Stromleitung in den Metallen etwas näher untersucht. Da erlebt man denn freilich eine arge Enttäuschung, denn die betreffenden Versuche und Beobachtungen fallen durchaus negativ aus. Man kann einen noch so starken Strom durch einen Metalldraht senden, man kann ihn noch so lange Zeit hindurchfließen lassen, Stunden, Tage, Monate lang: das Metall als solches bleibt unver-

ändert; es wird zwar erwärmt, kühlt sich dann aber, wenn der Strom aufhört, in gleichem Maße wieder ab, und irgendwelche innere Veränderung ist nicht eingetreten. Man hat z. B. die Vermutung gehegt, es möchten durch den Strom die Metallteilchen fortgeführt werden, wenn auch natürlich nur sehr langsam; und man hat, um das festzustellen, den Strom der Reihe nach durch verschiedene Metalle, etwa Kupfer und Aluminium, fließen lassen in der Absicht, eine Art von Diffusion der Kupferteilchen in das Aluminium hinein zu konstatieren; aber damit war es nichts, der Vorgang der metallischen Stromleitung bleibt durchaus rätselhaft und durchaus passiv. So sehr passiv, daß man sich sogar eine Zeit lang entschlossen hatte, den Vorgang in ganz neuem Lichte zu betrachten. Man stellte nämlich die berühmte Feldtheorie der elektrischen Erscheinungen auf und erklärte: eine eigentliche Fortleitung der Elektrizität in Metallen findet gar nicht statt, der wahre Vorgang spielt sich vielmehr in der Umgebung des Drahtes ab, also im Felde, und er ist vom Charakter der dielektrischen Ausbreitung, also in den Bereich der Strahlung gehörig; während der Metalldraht nur eine passive, ja negative Rolle spielt, indem er einen Teil der elektrischen Energie aus dem Felde in sich hinein wie in eine Falle zieht und dort sozusagen umbringt, nämlich in Wärme verwandelt. Aber nach allen Richtungen befriedigend ist diese Vorstellung denn doch nicht, und so ist man immer wieder darauf zurückgekommen, sich eine besondere Vorstellung von dem Mechanismus der metallischen Leitung zu bilden. Aber von Erfolg gekrönt wurden diese Bestrebungen erst, nachdem man auf ganz anderen Gebieten greifbare Ergebnisse erzielt hatte; und deshalb müssen wir uns jetzt diesen anderen Gebieten zuwenden, um dann nochmals auf die Metalle zurückzukommen.

27. Das erste dieser Gebiete ist das der Flüssigkeiten, nicht der Flüssigkeiten schlechthin, sondern derjenigen unter ihnen, welche wir schon als eine Klasse für sich kennengelernt haben: der Lösungen, wozu wir auch noch die Säuren und ähnliches fügen können. Da

finden wir denn auch in elektrischer Hinsicht ein von den festen Körpern, insbesondere von den Metallen, völlig abweichendes Verhalten; und zwar sowohl was die Erzeugung als was die Ausbreitung elektrischer Energie angeht. Metalle können zwar durch gegenseitige Berührung Elektrizität erzeugen; aber wenn man aus ihnen einen vollständig geschlossenen Kreis bildet, so gleichen sich alle elektrischen Spannungsdifferenzen aus, und es kommt nichts zustande. Ganz anders, wenn in dem Kreise ein Körper der zweiten Klasse, sei es auch nur ein einziger, sich befindet: ein elektrisches Gleichgewicht kann sich dann nicht herausbilden, es wird fortwährend neue Spannung erzeugt, und die Folge ist ein dauernder, in dem Kreise fließender elektrischer Strom — ein Ausdruck, der natürlich nur bildliche Bedeutung hat, aber doch die eines Bildes, das uns eine vorzügliche Darstellung aller in dem Phänomen enthaltenen Einzelheiten liefert. Da wären wir denn bei dem bekannten und ältesten von den für die Praxis wichtigen Stromerzeugern, den galvanischen Elementen, angelangt, wie sie noch heute, wenigstens in der Schwachstromtechnik, weit und breit benutzt werden. Wählen wir als Beispiel etwa das Daniell'sche Element, das aus Zink in Schwefelsäure und Kupfer in Kupfervitriol (beide Flüssigkeiten, damit sie nicht zusammenfließen, durch eine poröse Tonzelle getrennt) besteht, so findet, wenn der Kreis durch einen äußeren Draht geschlossen wird, gleichzeitig ein chemischer und ein elektrischer Prozeß statt, es wird chemische Energie in elektrische umgewandelt, und zwar auf einem Wege, der sich nicht rückgängig machen läßt, der irreversibel ist; denn am Ende ist das Element zerstört: das Zink ist in der Schwefelsäure aufgelöst, und das Kupfer aus der Lösung ist abgeschieden. Natürlich ist das praktisch sehr ungünstig und für die Verwendbarkeit der Elemente in der großen Technik geradezu entscheidend im negativen Sinne. Man hat sich daher alle Mühe gegeben, galvanische Elemente zu bauen, die umkehrbare Prozesse liefern; die man also laden und entladen und immer wieder laden und entladen kann. Es ist das auch gelungen, aber seltsamerweise nur mit Hilfe eines einzigen Metalls und einer

einzigsten Flüssigkeit: nur das Blei und die Schwefelsäure eignen sich zur Bildung derartiger Elemente, die man bekanntlich Akkumulatoren zu nennen pflegt.

Von allgemeinerer Bedeutung für unser Thema ist die Frage der Fortleitung der Elektrizität durch die Flüssigkeiten, richtiger, wie gesagt: durch die Lösungen. Denn daß das, was wir hier feststellen werden, nicht etwa dem flüssigen Aggregatzustande eigentümlich ist, beweist das Beispiel des Quecksilbers, das sich, obwohl flüssig, doch in jeder Hinsicht wie ein festes Metall verhält, d. h. beim Stromdurchgange, von der Erwärmung abgesehen, keinerlei Veränderung erfährt und mit steigender Temperatur seinen Widerstand entsprechend erhöht. Ganz anders z. B. das Wasser. Allerdings darf man nicht gerade reines Wasser wählen, weil das überhaupt kein Leiter, sondern ein Isolator ist; da aber schon geringe Spuren einer Zutat, z. B. von Schwefelsäure, genügen, um es zum Stromleiter zu machen, wollen wir uns das nicht anfechten lassen und der Einfachheit halber von Wasser sprechen. Da beobachteten wir nun die in die Augen springende Erscheinung der Elektrolyse, das Wasser wird durch den Strom in seine Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, zerlegt, und zwar durch die ganze Ausdehnung der Wasserfäule hindurch; und wo auch immer die Bestandteile sich bilden mögen, sie treten nun in Form von Bläschen eine Wanderung an, und es sammelt sich aller Wasserstoff an dem einen Pole, aller Sauerstoff an dem anderen. Dabei läßt sich sofort konstatieren, daß sich doppelt soviel Wasserstoff bildet wie Sauerstoff, und das will besagen: es findet keine Bevorzugung statt, es werden vielmehr äquivalente Mengen abgeschieden, entsprechend der Formel H_2O ; die zurückbleibende Flüssigkeit ist also immer noch richtiges Wasser. Auch wenn wir andere Stoffe nehmen, z. B. eine Silberlösung oder eine Kupferlösung, erhalten wir, bei gleicher Stromstärke, stets äquivalente Mengen Silber, Kupfer usw. Das ist das berühmte Faradaysche Gesetz, und es will besagen: es besteht ein quantitativer Parallelismus zwischen dem elektrischen und dem rein chemischen Vorgange. Ist

doch dieses Gesetz von derartiger Exaktheit und zugleich Einfachheit, daß man es benutzt hat, um die Einheit der Stromstärke mit seiner Hilfe zu definieren: ein Ampere heißt derjenige Strom, der in der Sekunde 1,118 Milligramm Silber aus seiner Lösung abscheidet.

Daß die Molekeln aus Atomen bestehen, wissen wir bereits; was uns aber hier als etwas ganz Neues entgegentritt, ist die Wanderung dieser Atome, und zwar eine Wanderung in entgegengesetzten Richtungen, also ganz unter dem Zeichen eines gegensätzlichen Kontrastes. Da sich nun weiterhin zeigt, daß hier wirklich, anders wie bei der metallischen Leitung, ein Transport, nicht bloß eine irgendwie geartete indirekte Übertragung von Elektrizität stattfindet, so kommen wir fast zwingend zu dem Schlusse, daß die Atome nicht einfach die Bestandteile der Molekel seien, sondern daß sich an ihnen, sobald sie vom Zwange des Zusammenhanges befreit sind, noch etwas Neues offenbart: ihre elektrische, und zwar das einmal positive, das anderemal negative Ladung. Wohlverstanden: offenbart; denn sie wird ja schon in der Molekel vorhanden und dort nur, weil die positive und die negative gleichstark war, neutralisiert und deshalb nicht in die Erscheinung getreten sein; neutralisiert durch den Zusammenhang der Molekel, die einfach eine Folge der anziehenden Kräfte zwischen ihren entgegengesetzt geladenen Atomen war. Jetzt, wo durch die Tätigkeit einer elektromotorischen Kraft, z. B. der eines galvanischen Elements, etwas Neues auftritt, gelingt es, jenen chemisch-elektrischen Zusammenhalt der Molekel zu überwinden und die Atome frei zu machen zur Wanderung an die Pole. Man nennt die Atome, insoweit sie elektrisch geladen sind, eben dieser Wanderung wegen, *Io n e n*, man unterscheidet stromauf- und stromab-wandernde, also negativ und positiv geladene Atome als Anionen und Kationen; und die Pole, wo sie sich ansammeln und weiteren chemischen Vorgängen unterliegen, heißen *A n o d e* und *K a t h o d e*.

Mit jenem Zusammenhalt der Molekel in sich hat es nun freilich eine eigentümliche Bewandnis. Denn wenn die Atome in der Lösung wirklich noch eine Molekel im vollen Sinne des Wortes

Los- wandernde elektrisch geladene Atome

bildeten, so müßte schon zu ihrer Trennung voneinander, von der Wanderung ganz abgesehen, eine bestimmte Arbeit geleistet werden, es müßte also ein gewisses Strom-Minimum vorhanden sein, ehe die Zersetzung anhöbe; das ist aber nicht der Fall, schon der schwächste Strom ruft eine, wenn auch entsprechend schwache Elektrolyse hervor. Dazu kommen noch andere Bedenken spezifisch elektrischen Charakters. Die Hauptsache aber ist, daß es auch auf anderen Gebieten merkwürdige Erscheinungen gibt, die mit der normalen Konstitution einer Lösung nicht vereinbar sind.

28. Eine der auffallendsten Eigenschaften der Lösungen ist die größere Beständigkeit ihres flüssigen Aggregatzustandes nach beiden Seiten, nach unten und oben, d. h. sie gefrieren schwerer und sie verdampfen schwerer; der Gefrierpunkt wird, im Vergleich mit dem reinen Lösungsmittel, heruntergedrückt, der Siedepunkt wird hinaufgeschoben. So gefriert eine 50%ige Lösung von Chlorkalium in Wasser erst bei -21° , und sie siedet erst bei 108° , sie hat also einen Flüssigkeitsbereich von 129° (29° mehr als reines Wasser). Und selbst Meerwasser z. B., obgleich es doch einen recht geringen Salzgehalt hat, gefriert nicht bei 0° C, sondern erst bei -2° ; und es siedet, unter normalem Atmosphärendruck, nicht bei 100° , sondern erst bei 101° . Die letztere Erscheinung kann man übrigens noch in eine andere Form kleiden, indem man die Spannung des über reinem Wasser und des über einer Lösung befindlichen Dampfes betrachtet: der Dampfdruck ist, bei gleicher Temperatur, über der Lösung kleiner als über reinem Wasser, z. B. bei 100° noch nicht gleich einer vollen Atmosphäre (und eben deshalb findet noch kein Sieden statt). Man nennt jene Erscheinung die Gefrierpunktniedrigung, diese die Siedepunkterhöhung oder, gemäß dem zuletzt Gesagten, auch die Dampfdruckerniedrigung.

Bei dem Studium der Gesetze dieser Erscheinungen machte man allerdings die Erfahrung, daß es wohl leicht war, solche Gesetze, und zwar sogar recht einfache, aufzustellen, daß sich dann aber immer

zeigte, daß sie zwar für einige Klassen oder Gruppen von Lösungen sehr exakt gültig sind, für andere aber nur annähernd oder gar nicht. Und es bedurfte einer von diesen Zweifeln befreienden Tat. Betrachten wir daher zunächst Lösungen, die sich ganz normal verhalten, z. B. Zuckerlösungen; und zwar nicht etwa gesättigte, sondern im Gegenteil sehr verdünnte Lösungen, also mit viel Lösungsmittel und wenig gelöstem Stoff. Da hat nun der französische Forscher Raoult festgestellt, daß der Einfluß der gelösten Substanz quantitativ abhängt von der molekularen Konzentration, daß er also für zwei verschiedene Stoffe — das Lösungsmittel beide Male das gleiche — nicht dann gleich ist, wenn im Liter gleichviel Gramm, sondern dann, wenn im Liter gleichviel Molekeln von beiden Stoffen vorhanden sind. Bei verschieden konzentrierten Lösungen eines und desselben Stoffes ist natürlich hiernach die Wirkung einfach mit der Konzentration proportional, die Erniedrigung des Gefrierpunktes z. B. ist bei einer Zuckerlösung von hundert Gramm auf ein Liter fünfmal so groß wie bei einer von zwanzig Gramm auf das Liter. Aber bei dem Vergleiche zweier verschiedener Stoffe kommt es nicht auf die gewichtsmäßige Konzentration, sondern auf die molekulare an. Auch für verschiedene Lösungsmittel ergeben sich einfache, wenn auch meist nicht durchgängig gültige Beziehungen. Immer vorausgesetzt, daß die Lösung verdünnt sei, daß also höchstens etwa eine Gramm-Molekel auf das Liter entfalle.

Zu einem Verständnis dieser Gesetzmäßigkeiten gelangt man, wie der holländische Physiker und Chemiker van't Hoff gezeigt hat, in höchst einfacher Weise durch Anwendung der Theorie des osmotischen Drucks, die wir schon früher kennengelernt haben. Insbesondere kommt hier das Gesetz in Betracht, wonach jeder gelöste Stoff auf eine Wand, die ihn zurückhält, dem Lösungsmittel aber den Durchtritt erlaubt, einen osmotischen Druck ausübt gleich dem Drucke, den ein Gas von derselben Zahl von Gramm-Molekeln im Liter ausüben würde. Die auf dieser Grundlage durchgeführte Berechnung des osmotischen Drucks und dann weiter der uns hier inter-

effizierenden Größen, Gefrierpunktserniedrigung und Siedepunktserhöhung, führt in der That zu Zahlen, die mit den experimentellen Bestimmungen in vortrefflicher Harmonie stehen.

Wenigstens für Lösungen von Stoffen, die wir bisher als normal bezeichnet haben, die wir aber jetzt, ebenso wie die ihnen gegenüberstehenden abnormen, doch noch näher charakterisieren müssen. Ein typischer Vertreter dieser letzteren Klasse ist eine Kochsalzlösung. Vergleicht man eine Kochsalzlösung mit einer Zuckерlösung, die ebensoviel Molekeln im Liter enthält, und nimmt man zunächst ziemlich kräftige Lösungen beider Gattungen, so findet man zwar nicht völlig gleiche Gefrierpunktserniedrigung, sondern die durch die Salzlösung bewirkte ist etwas größer; aber die Differenz ist nicht erheblich. Je verdünnter man nun aber beide Lösungen wählt, desto größer wird die Überlegenheit der Salzlösung, und bei sehr weitgehender Verdünnung ist die Gefrierpunktserniedrigung bei der Kochsalzlösung gerade doppelt so groß wie bei der Zuckерlösung. Und ähnliches gilt von der Siedepunktserhöhung und vom osmotischen Druck. Kurz, die Kochsalzlösung — und ebenso alle andern, der zweiten Gattung angehörige Lösungen — gehorcht den Gesetzen von van't Hoff, Raoult usw. nicht, sie weicht desto stärker von ihnen ab, je verdünnter sie ist, und bei der äußersten Verdünnung wird die Wirkung genau doppelt so groß, wie sie nach diesen Gesetzen sein sollte.

Gerade dieses zuletzt erwähnte Verhalten gibt uns nun einen deutlichen Fingerzeig für die Enthüllung des uns hier entgegentretenden Geheimnisses; und das ist wohl auch der Ausgangspunkt für die kühne, aber erfolgreiche Theorie, die der Schwede Arrhenius, damals noch ein Jüngling, aufgestellt hat. Denn die genaue Verdoppelung der Wirkung bei äußerster Verdünnung kann doch unmöglich als Zufall gedeutet werden, sie muß doch mit dem Zustande der Lösung in organischem Zusammenhange stehen. Wenn es, wie wir wissen, für die Stärke der Wirkung auf die Anzahl der Teilchen ankommt, nun, so müssen wir eben annehmen, daß die Anzahl der in der verdünnten Lösung vorhandenen Teilchen nicht die ist, die

wir vermuten, sondern die doppelte. Nun sind ja die Teilchen, die in einer Kochsalzlösung eingebettet sind, von Natur nicht einfach, sondern sie bestehen aus je zwei Atomen, einem Chloratom und einem Natriumatom. Wohlverstanden: unter normalen Verhältnissen bilden diese beiden Atome eine wirkliche Einheit, und die innere Gliederung dieser Einheit geht uns nichts an. Hier aber werden wir eben durch die Tatsachen belehrt, daß die Verhältnisse nicht normal sind, daß die beiden Atome keine Einheit mehr bilden, daß jedes von ihnen als selbständige Einheit zur Wirkung gelangt. Und deshalb ist eben die Gefrierpunktserniedrigung usw. jetzt verdoppelt. Natürlich ist dieser extreme Fall nur bei der äußersten Verdünnung erreicht; aber von der stärksten Konzentration abwärts findet ein stetiger Fortschritt in diesem Prozesse, in der Spaltung der Molekeln statt, zufällig die eine und die andere ergreifend; und entsprechend wachsen die Abweichungen von den Lösungsgesetzen. Man nennt die Erscheinung, mit der wir es hier zu tun haben, Dissoziation, und den Zustand, bei dem ein bestimmter Bruchteil aller Molekeln bereits dissoziiert ist, den Dissoziationsgrad der Lösung. In einer verdünnten Kochsalzlösung schwimmen also, so muß man sich das vorstellen, die freien Atome von Chlor und Natrium im Wasser umher, wahrscheinlich noch immer nachbarlich vereinigt, aber doch physikalisch selbständig — eine Vorstellung, die übrigens, so viel Aufsehen sie auch ursprünglich machte, und soviel Widerspruch sie zuerst erregte, doch auch durch rein chemische Tatsachen mancherlei Art kräftig gestützt wird. Übrigens sei bemerkt, daß auch der entgegengesetzte Vorgang in gewissen Fällen eintritt: die Zusammenrottung von Molekeln oder Atomen zu höheren Komplexen, ein Vorgang, den man als Polymerisation bezeichnet; aber das gehört nicht mehr zu unserm jetzigen Thema.

Nun wird man allerdings ganz begreiflicherweise die Frage aufwerfen, warum denn gerade gewisse Stoffe sich in Lösung dissoziieren, z. B. Kochsalz, und gewisse andere, z. B. Zucker, das nicht tun. Es muß zugegeben werden, daß das recht sonderbar ist; und die

Sache wird noch interessanter durch die Feststellung, daß die der Dissoziation unterliegenden Stoffe gerade dieselben sind, die sich noch durch eine andere Eigenschaft vor den übrigen auszeichnen: dadurch, daß sie die Elektrizität leiten und beim Durchgange des Stromes der Elektrolyse verfallen. Hier hat man ein Beispiel für eine in der wissenschaftlichen Forschung sich nicht selten ereignende Konstellation vor sich, bei der das Dunkel unserer Erkenntnis mit einem Schlage aufgeheilt wird durch die Umkehrung der Fragestellung, womit sich dann zugleich auch die Antwort umkehrt. Man muß nicht sagen: diejenigen Lösungen, welche Elektrizitätsleiter sind, haben auch die Neigung zur Dissoziation; sondern: die der Dissoziation unterliegenden Lösungen sind imstande, die Elektrizität zu leiten. Die Leitung des elektrischen Stromes ist geradezu an den dissoziierten Zustand geknüpft; und weil eine Zuckerlösung dieses Zustandes nicht fähig ist, ist sie auch zur Stromleitung nicht fähig. Chlornatrium leitet die Elektrizität ebenso wenig wie Zucker; aber seine Bestandteile, Chlor und Natrium, die sich bei der Dissoziation bilden, sind imstande, ihn zu leiten, und zwar dadurch, daß sie sich selbst auf die Wanderung begeben und ihre Ladung, das eine die positive, das andere die negative, mitnehmen. Deshalb spricht man, um die ganze Vorstellung zusammenzufassen, von elektrolytischer Dissoziation, und der elektrische Strom in Flüssigkeiten ist vom Charakter eines „Konvektionsstromes“, indem die Elektrizität nicht selbständig strömt, sondern die Materie als Beförderungsmittel benutzt. Jedenfalls sieht man ein, daß es nicht exakt ist, zu sagen: der Strom zerlegt die Lösung; denn zerlegt ist sie schon, das Urteil ist, um ein juristisches Bild zu gebrauchen, schon gefällt, und der Strom, richtiger gesagt: die ihn erzeugende elektromotorische Kraft, übt nur noch die Funktion des Gerichtsvollziehers aus.

Was uns aber bei der Wanderung der Ionen, im Sinne einer quantitativen Erkenntnis, am meisten interessiert, das ist die Frage ihrer elektrischen Ladung, also der Elektrizitätsmenge, die

jedes Ion auf seiner Wanderung mit sich führt. Diese Frage wäre von untergeordneter Bedeutung, wenn es sich hier um eine für jeden Stoff andere Menge handelte; nach dem Gesetze von Faraday ist aber gerade das Gegenteil der Fall: die Ladung des Ion ist eine universelle Naturkonstante, es ist das geradezu das Elementarquantum der Elektrizität oder, wenn man einen noch drastischeren Ausdruck will, das Atom der Elektrizität. Dabei bleibt nicht ausgeschlossen, daß unter Umständen eine Ionladung auch ein mehrfaches eines solchen Elementarquantums sein wird; nur kleiner kann sie nicht sein, wie es ja auch bei der Materie keine Bruchteile von Atomen geben kann. Um nun zu dem in Rede stehenden Ziele zu gelangen, müssen wir von der Definition der Einheit der elektrischen Stromstärke ausgehen, welche besagt: Ein Ampere ist derjenige Strom, der in der Sekunde 1,118 Milligramm Silber aus seiner Lösung ausscheidet. Kehren wir diesen Ausspruch um, so erhalten wir den neuen: Eine Silbermenge von 1,118 Milligramm liefert durch den Transport von Elektrizität, den sie übernimmt, in der Sekunde ein Ampere Strom. Und da ein Ampere nichts weiter ist, als die auf die Zeiteinheit bezogene Elektrizitätsmenge, diese selbst aber in „Coulombs“ ausgedrückt wird, so wird der Ausspruch noch einfacher: 1,118 mgr Silber führen eine Ladung von einem Coulomb mit sich, ein Milligramm also eine solche von 0,894, und ein Gramm eine solche von 894 Coulombs. Diese Zahl ist freilich nur für Silber charakteristisch; denn das Gemeinsame der Stromleitung ist ja nicht die frei werdende Grammzahl, sondern die frei werdende Äquivalentzahl. Um also eine universelle Naturkonstante zu erhalten, müssen wir nicht ein Gramm Silber, sondern soviel Gramme betrachten, als dem Äquivalentgewicht des Silbers, 108, entspricht; und dann erhalten wir das Resultat: ein Gramm-Äquivalent Silber, aber auch jedes anderen Stoffes, z. B. ein Gramm-Äquivalent Wasserstoff (bei der Elektrolyse von Wasser) führt 96600 Coulombs elektrische Ladung mit sich. Um dann hieraus das Elementarquantum abzuleiten, brauchen wir nur durch die Zahl der Wasserstoffteilchen

x 297
 552
 Ladung eines Ion = Elementarmenge der Elektrizität (Atom der Elektrizität) = $\frac{1,5}{1000000}$ Coulomb

im Gramm-Äquivalent, also durch die Avogadro'sche Zahl zu dividieren. Erinnerung man sich nun, daß diese Zahl gleich 0,68 Quadrillionen ermittelt war, so erhält man für das Elementarquantum die Zahl $0,142 : 10^{18}$ oder rund den siebenten Teil eines trilliontel Coulomb. Wenn man umgekehrt die Elementarladung direkt bestimmen könnte, so hätte man hier eine neue Möglichkeit, die Avogadro'sche Zahl zu berechnen und das Ergebnis mit den früheren zu vergleichen; wir werden sehr bald dazu Gelegenheit finden.

Zwei Bemerkungen sind dem Gesagten noch hinzuzufügen. Erstens, daß wie schon angedeutet wurde, die Elementarladung nur das Minimum von Elektrizität darstellt, das isoliert vorkommt; es können auch zwei oder mehr, aber immer ganzzahlige solche Einheiten auftreten; und es findet sich, daß das tatsächlich der Fall ist im Zusammenhange mit der chemischen Wertigkeit der betreffenden Stoffe, worauf hier indessen nicht näher eingegangen werden kann. Zweitens ist es für das folgende von erheblichem Interesse, die Ladung in ihrem Verhältnis zu der sie tragenden Masse ins Auge zu fassen, wobei allerdings immer zu bedenken ist, daß das zwei ganz verschiedene Dinge sind, und daß sich das eine, die Ladung, nur in Coulombs, das andre, die ponderable Masse, nur in Grammen ausdrücken läßt. Am leichtesten läßt sich dieses Verhältnis e/m für den Wasserstoff ausrechnen, ja, eine solche Rechnung ist gar nicht mehr erforderlich; denn für das Wasserstoffatom ist ja das Gramm-Äquivalent, das wir oben betrachteten, mit Rücksicht darauf, daß die chemische Äquivalentzahl hier eins ist, mit einem Gramm identisch, und somit stellt die obige Ladung von 96600 Coulombs das gesuchte Verhältnis bereits dar; in Formel:

$$\frac{e}{m} = 96600 \frac{\text{Cb.}}{\text{gr.}}$$

Wir wollen uns das zum Vergleiche mit Ergebnissen, zu denen wir sehr bald auf einem anderen Gebiete gelangen werden, gut merken. Und noch ein Weiteres ist wichtig zu betonen. Das Elementarquantum

ist für alle stofflichen Träger gleich groß, und es ist ferner für die positiven Ionen ebenso groß wie für die negativen, es besteht in dieser Hinsicht also völlige Symmetrie — ein Punkt, der zunächst vielleicht selbstverständlich erscheint, es aber, wie wir sehen werden, durchaus nicht ist.

VII.

29. Bei weitem noch interessanter als die Erscheinungen in Flüssigkeiten sind die beim Durchgange der Elektrizität durch Gase. Außerlich liegt das daran, daß die Gase, sei es an sich, sei es durch Vermittelung der in ihnen schwebenden oder schwirrenden Teilchen, zum Leuchten kommen, so daß sich eine Fülle von Lichterscheinungen einstellt; innerlich daran, daß bei den Gasen die beiden Grundphänomene der Leitung und der Strahlung nicht vollkommen geschieden sind, sondern ineinander übergeführt werden können, und daß jedes von ihnen nicht den einfachen, uns bereits bekannten, sondern mehr oder weniger stark modifizierten Gesetzen unterliegt. So gilt schon das Grundgesetz des elektrischen Stromes, das Ohmsche Gesetz, hier nicht allgemein, sondern nur in einem gewissen Bereiche von Spannungen, nämlich wenn diese vergleichsweise gering sind; unter dieser Voraussetzung steigt allerdings die Stromstärke im Verhältnis der wirksamen Spannung. Dann aber folgt eine zweite Periode, in der die Stromstärke immer langsamer ansteigt und schließlich sogar konstant wird — ein Zustand, in dem man dann vom „Sättigungsstrom“ zu sprechen pflegt. Damit ist die Sache aber noch nicht erledigt, im Gegenteil, bei noch höherer Spannung setzt eine dritte Periode ein, in der die Stromstärke aufs neue stark ansteigt, und zwar schneller, als dem Ohmschen Gesetze entsprechen würde. Die beistehende Figur gibt ein Bild von diesen Verhältnissen.

Von besonderer Bedeutung aber ist die Tatsache, daß die Leitfähigkeit der Gase in hohem Maße von äußeren Einflüssen abhängig ist. An sich ist sie so gering, daß man die Gase beinahe als Isolatoren

ansehen kann; und in der Tat verläßt man sich ja bei allen Versuchen, die man in Luft anstellt, darauf, daß der elektrische Zustand der Körper, die sich in ihr befinden, konserviert bleibt. Aber hier besteht nun, wie man weiß, schon ein großer Unterschied zwischen trockener und feuchter Luft: in letzterer erfolgt die Zerstreung einer Ladung wesentlich rascher. Ganz phänomenal aber ist die Einwirkung von Bestrahlung, insbesondere mit Kathoden-, Radium- oder Röntgen-Strahlen. Durch eine derartige Bestrahlung wird die Leitfähigkeit der Luft, und ebenso die der anderen Gase, in gewaltigem Maße gesteigert, so daß es z. B. genügt, die durch eine einzige Funkenentladung erzeugte Röntgenstrahlung auf ein geladenes Elektroskop fallen zu lassen, um dessen Goldblättchen sofort zum Zusammenklappen zu bringen.

Sieht man sich nun nach einer Erklärung dieser und zahlreicher weiterer, mit ihnen im Zusammenhange stehender Tatsachen um, so denkt man unwillkürlich an den Vorgang der Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten und an die Träger dieses Vorganges, die Ionen; stehen doch, wie wir wissen, die Gase in einem weitgehenden Parallelismus zu den verdünnten Lösungen, und zwar schon im gewöhnlichen Zustande; die verdünnten Gase, wie man sie in Glasröhren durch Auspumpen herstellt, werden also die Verhältnisse in potenziertem Maße aufweisen. Demgemäß nimmt man also an, daß auch die Leitfähigkeit der Gase eine Folge ihrer Dissoziation oder, wie man dafür auch sagen kann, ihrer Ionisierung ist; warum gerade durch Bestrahlung eine so kräftige Ionisierung erfolgt, das ist eine verwickelte Frage, auf die wir hier nicht eingehen wollen. Übrigens ist ja die Bestrahlung nur eine von den vielen Möglichkeiten; eine weitere oder vielmehr die unserem Gedankengange nächstliegende ist die fortschreitende Verdünnung des Gases durch Anwendung der Luftpumpe — ein Prozeß, der, wie wir schon bemerkten, eine potenzierte Dissoziation zur Folge haben wird. Dabei ist es gut, auch hier die beiden Rollen deutlich zu trennen und zu sagen: die Ionisation wird durch die äußere Ursache, Bestrahlung, Verdünnung usw.

bewirkt; was dann die angelegte elektromotorische Kraft bzw. der durch sie erzeugte Strom tut, ist nur dies, daß er die Ionen in Bewegung setzt und an den Elektroden abscheidet.

Natürlich hat man sich auch hier den Vorgang der Ionisation graduell vorzustellen und anzunehmen, daß unter bestimmten Umständen ein gewisser Bruchteil aller Molekeln ionisiert wird. Damit ist aber auch die Möglichkeit gegeben, zu einem Verständnis der drei geschilderten Phasen beim Stromdurchgange durch Gase zu gelangen. In der ersten ist die Zahl der abgeschiedenen Ionen, also auch die Stromstärke, mit der Spannung proportional. In der zweiten nähert sie sich der Konstanz, weil bereits alle überhaupt vorhandenen Ionen abgeschieden werden, eine weitere Steigerung der Spannung also nichts mehr leisten kann. Was aber geschieht in der dritten Phase? Da muß man nun die Vorstellung etwas mehr präzisieren, man muß die Geschwindigkeit der Ionen ins Auge fassen und ihre fortwährende Zunahme bei wachsender Spannung. Dabei werden, ähnlich wie in einem Gase, Zusammenstöße erfolgen, und zwar hier teils zwischen den Ionen untereinander, teils zwischen Ionen und noch vollständigen Molekeln. Nimmt man nun an, daß ein Ion in diesem fortgeschrittenen Stadium die Kraft hat, seinerseits wiederum Molekeln, an die es anstößt, zu spalten, also zwei neue Ionen zu erzeugen, die nun sofort auch wieder in gleichem Sinne aktiv auftreten, so hat man eine neue Quelle für Ionisation festgestellt, und zwar eine so gewaltige, daß sie vollkommen ausreicht, um das jetzt erfolgende weitere und rasche Ansteigen des Stromes während der dritten Phase verständlich zu machen.

Die mannigfaltigen Lichterscheinungen, die auftreten, wenn man in einem Rohre, durch das man den elektrischen Strom leitet, den Gasdruck durch Auspumpen mehr und mehr herabsetzt, können wir hier nicht betrachten, obgleich auch dabei sich mancherlei wertvolles für die Beschaffenheit der Materie ergeben würde. Entscheidend aber für unser Thema ist das, was eintritt, wenn die Verdünnung des Gases sehr weit getrieben wird. Von einer Strömung

im eigentlichen Sinne kann man dann nämlich nicht mehr sprechen; der Vorgang, sichtbarlich charakterisiert durch die betreffende Lichterscheinung, nimmt jetzt einen ganz anderen Verlauf. Während bisher die beiden Elektroden die Endpunkte des Phänomens waren, kommt jetzt die eine von ihnen, die Anode, ganz aus dem Spiel, und von der anderen, der Kathode, geht die Leuchterscheinung in einer Weise aus, die unmittelbar an Lichtstrahlung erinnert, also doch wohl auch ihrerseits als Strahlung, nicht mehr als Strömung, angesprochen werden muß. Es geht nämlich senkrecht von der Kathode und gänzlich unbekümmert um den Ort, wo sich die Anode befindet, ein Büschel aus, parallelstrahlig oder konvergent oder divergent je nach der Form der Kathodenoberfläche, gerade wie bei einem Scheinwerfer. Man bezeichnet das Phänomen als Kathodenstrahlung; und es erhebt sich die Frage, was denn das für ein Phänomen eigentlich sein möge.

Da müssen wir denn noch einmal ganz allgemein das Wesen der Strahlung, von der ja schon die Rede war, ins Auge fassen. Strahlen können von zweierlei ganz verschiedener Natur sein: einmal Konvektionsstrahlen, die aus wirklich fortgeschleudertem Materie bestehen, wie die Wasser- oder Gas-Strahlen; und sodann Phänomene, die nur den äußeren Habitus von Strahlen haben, in Wahrheit aber auf einer Wellenbewegung beruhen, wie die Schall- und Licht-Strahlen. Gehören die Kathodenstrahlen in die erste oder in die zweite Klasse, sind es Konvektions- oder Undulations-Strahlen? Die Antwort auf diese Frage hat im Laufe der Jahrzehnte wiederholt hin und her geschwankt, jetzt aber ist sie in dem Sinne erledigt, daß es sich hier um Konvektionsstrahlen handelt. Zahlreiche Zeugnisse sprechen zwingend dafür, während andererseits gewisse Schwierigkeiten, die dieser Auffassung noch im Wege standen, sich restlos haben beseitigen lassen. Nur ein ganz besonders entscheidender Punkt sei hier angeführt. Kathodenstrahlen können, außer bei dem Durchgange des elektrischen Stromes durch stark verdünnte Gasräume, auch noch auf andere Weise entstehen. So gehen sie

von gewissen rotglühenden, negativ geladenen Dryden sowie von stark erhitzten Metalldrähten aus; sie entstehen bei der Bestrahlung negativ geladener Körper mit Licht, besonders mit ultraviolettem Licht; auch bei gewissen chemischen Reaktionen, die bei gewöhnlicher Temperatur, aber unter Einwirkung einer elektrischen Spannung stattfinden, werden Kathodenstrahlen entwickelt. Besonders interessant aber ist es, daß sie auch in einem Falle auftreten, wo allem Anscheine nach ein elektrisches Feld überhaupt nicht vorhanden ist, nämlich bei den radioactiven Körpern, von denen später noch im besonderen die Rede sein wird. Hier sei nur bemerkt, daß diese Körper verschiedene Strahlenarten aussenden, und darunter auch eine Art, die man als Beta-Strahlen bezeichnet hat, die sich aber ihrem Wesen nach in nichts von den Kathodenstrahlen unterscheiden. In jedem einzelnen dieser Fälle lassen sich nun Einzelheiten und Beziehungen feststellen, die auf die konvektive Natur der Strahlen hinweisen.

Wenn nun die Kathodenstrahlen aus fortgeschleuderten und durch den Raum fliegenden Teilchen bestehen, so erhebt sich die weitere Frage, was denn das für Teilchen sein mögen; also erstens, welchem Stoff sie angehören, und zweitens, welche physische Beschaffenheit sie haben. In ersterer Hinsicht bieten sich zwei Möglichkeiten dar: die Teilchen können entweder dem Material der Kathode, von der sie weggeschleudert werden, entstammen, oder dem gasigen Inhalte des Entladungsrohres; denn, wenn es auch stark ausgepumpt ist, so sind doch natürlich immer noch Milliarden von Teilchen in ihm enthalten. In zweiter Hinsicht handelt es sich darum, ob die Teilchen Molekeln oder Atome und im letzteren Falle, ob sie neutrale oder elektrisch geladene Atome, also Ionen, oder ob sie etwa etwas noch ganz anderes, uns bisher noch nicht entgegengetretenes sein mögen. Zur Beantwortung aller dieser Fragen müssen wir uns natürlich an die Erfahrung halten, wir müssen die Erscheinungen, die die Kathodenstrahlen bieten, studieren, wir müssen sie möglichst vielseitigen Experimenten unterwerfen und deren Ergebnisse in geeigneter Weise kombinieren, um die nötigen Schlüsse ziehen zu können.

30. Um nun den Sinn dieser Experimente und ihrer Resultate zu verstehen, müssen wir etwas weiter ausholen. Die Bewegung eines Körpers ist, wie wir im ersten Teile unserer Betrachtung ausführlich erörtert haben, das gemeinsame Ergebnis eines Aktivums, der Kraft, und eines Passivums, der Masse; und die Stärke der Bewegung hängt vom Verhältnis dieser beiden Größen ab. Beim freien Fall der Körper ist die Sache insofern sehr einfach, aber deshalb auch nur in beschränktem Maße lehrreich, weil hier die Kraft, nämlich das Gewicht, und die Masse, immer identisch sind; das ist ja der Grund dafür, daß alle Körper gleich schnell fallen. Es gibt aber einen sinnreichen Apparat, die Atwoodsche Fallmaschine, bei der man mit Hilfe einer Rolle sowie von Zulage- und Gegengewichten den beiden Größen: Kraft und Masse, verschiedene Werte geben kann und damit in der Lage ist, die Bewegung beliebig zu variieren. Hier, auf unserem Gebiete, sorgt die Natur selbst für die entsprechende Mannigfaltigkeit, und zwar sowohl bei den Flüssigkeitsteilchen wie bei den Gasteilchen: das Aktivum, die Kraft, wird durch die elektrische Ladung, das Passivum durch die träge Masse der Teilchen dargestellt; wir haben, um das Bild anzuwenden, es hier mit natürlichen Atwoodschen Maschinen zu tun. Die Bewegung der Teilchen wird also von dem Verhältnis der Ladung zur Masse abhängen, die Größe e/m ist daher, im Zusammenhange mit der Geschwindigkeit v , das, was uns hier interessiert.

Man hat nun im Laufe der letzten Jahrzehnte eine ganze Anzahl von Methoden ausfindig gemacht, um diese beiden wichtigen Größen im Zusammenhange miteinander zu bestimmen: die Methode der Herzschen elektrischen Schwingungen, die Spannungsmessung, die Messung der Erwärmung, ganz besonders aber zwei Methoden, die den Vorzug haben, daß die bei ihnen benutzten Phänomene unmittelbar in die Augen springen und die Messung daher mit relativ großer Sicherheit durchgeführt werden kann, nämlich die seitliche Ablenkung der Kathodenstrahlen im Magnetfelde und ihre zugleich

seitliche Ablenkung und achsiale Beschleunigung im elektrostatischen Felde. Läßt man nämlich quer zum Verlauf des Strahlenbüschels ein magnetisches Feld wirken, so wird das Büschel abgelenkt, und zwar desto stärker, je weiter die Teilchen auf ihrer Bahn bereits vorgeschritten sind, derart, daß das Büschel nunmehr eine Art räumlicher Spirale bildet. Ganz ähnlich, wenn man quer zum Büschel eine elektrostatische Spannung wirken läßt: auch hier findet eine Ablenkung, nur nach einem etwas anderen Gesetze, statt, außerdem aber wird hier, was dort nicht der Fall war, die Geschwindigkeit der Teilchen gesteigert.

Im ganzen besitzt man hiernach mindestens ein halbes Duzend Methoden, von denen man nur nötig hat, zwei in geeigneter Weise zu kombinieren, um die beiden Unbekannten, das Verhältnis e/m und die Geschwindigkeit v zu ermitteln. Dabei ist man nun zu ganz verblüffenden Ergebnissen gelangt. Zunächst zeigt sich, daß die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlteilchen zwar je nach den Umständen stark variiert, der Größenordnung nach aber jedenfalls ganz ungeheuer ist, nämlich einen mehr oder weniger erheblichen Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit, ein hundertel von ihr bis nahe an sie heran, ausmacht. Das ist deshalb so erstaunlich, weil es sich hier nicht, wie beim Licht, um eine Wellenbewegung, also um eine Art von Stafettendienst handelt, bei dem ja große Geschwindigkeiten eher begreiflich sind, sondern um eine wirkliche Fortschleuderung materieller Teilchen durch den weiten Raum, also um einen persönlichen, ungetheilten Botendienst. Bewegungen von derartiger Behemenz hatte man bis dahin noch gar nicht gekannt, und es war schon hieraus der Schluß zu ziehen, daß es sich jedenfalls um außerordentlich leichte Teilchen handeln müsse. Man muß sich eben vorstellen, daß es sich hier um Geschwindigkeiten handelt, vermöge deren ein Teilchen in einem Bruchteile einer Sekunde einmal um die Erde fliegen würde!

Viel deutlicher aber noch sind die Zeugnisse, die uns die Bestimmung des Verhältnisses der Ladung zur Masse liefert. Dieses Verhältnis ergibt sich nämlich, in erstaunlicher Überein-

stimmung der verschiedenen Methoden, zu 176 Millionen Coulomb auf das Gramm; das will sagen: es ergibt sich 1830mal so groß, als es früher für ein Wasserstoff-Ion aus der Elektrolyse gefunden wurde. Außerdem ist es aber hier nicht wie dort, je nach dem Stoff, um den es sich handelt, verschieden, sondern es hat immer denselben Wert; und zwar kommt es weder auf den Stoff an, aus dem die Kathode besteht, noch auf die Natur des Gases, das in dem Entladungsröhr enthalten ist. Alles das führt doch mit beinahe zwingender Gewalt zu einem Schlusse, den man sonst seiner Kühnheit wegen zu ziehen gar nicht wagen würde. Wenn nämlich der Bruch e/m hier so ungeheuer groß ist, so kann das nur entweder daran liegen, daß hier der Zähler, also die Ladung e , sehr groß, oder aber daran, daß hier der Nenner, also die Masse m , sehr klein ist. Für die erstere Annahme liegt aber nicht der geringste Anhalt oder Grund vor; im Gegenteil, da es sich um das Elementarquantum der Elektrizität handelt, und die Elektrizität ein Substrat für sich ist, wäre gar nicht abzusehen, warum es hier, bei der Gasstrahlung, so ungeheuer viel größer sein sollte als dort bei der Wanderung der flüssigen Ionen. Es bleibt also nur die andere Alternative übrig: daß es sich hier um viel kleinere Träger dieser Ladungen handelt, daß diese Träger also nicht die Ionen sind — denn deren Masse ist uns ja mit Sicherheit bekannt —, sondern winzige Elemente von außerordentlich viel geringerer Masse, die vielleicht einer Art von Urmaterie angehören, aus der sich dann eben alle wirkliche Materie aufbaut. In diesem Sinne spricht man, im Gegensatz zu den vergleichsweise groben Ionen, von den feinen „Elektronen“, ohne daß jedoch hier völlige Einheitlichkeit der Begriffsfassung bestünde: manche Gelehrte verstehen unter Elektronen nur die Ladungen selbst, also die Atome der Elektrizität, andere die mit diesen Ladungen behafteten Uratome der Materie — ein Gegensatz, der übrigens, wie wir gleich sehen werden, viel von seiner Schärfe verliert. Jedenfalls sieht man, wie wir hier einen Schritt, und zwar einen recht bedeutsamen, vorwärts tun bei unserem Eindringen in den Mikrokosmos: das uralte Atom

wird entthront und seines Wesens und Namens („unteilbar“) entkleidet; es wird aufgelöst in eine Vielheit noch kleinerer Elemente, die nunmehr den alleinigen Anspruch auf jenen Namen haben. Eine andere Frage freilich ist die, was dabei gewonnen wird. An Einfachheit jedenfalls nichts, im Gegenteil, das Bild der Materie wird in hohem Maße komplizierter, aber die Vollständigkeit zwingt uns zu diesem Bilde. Im Sinne der Aufgabe aller Naturforschung, die Erscheinungen vollständig und auf die einfachste Weise zu beschreiben, stehen wir also an dieser Stelle vor einem Dilemma, wir müssen ein Opfer der Einfachheit bringen, um die Vollständigkeit zu erreichen.

Bei unserer ganzen bisherigen Betrachtung sind nun aber, und das in wohlervogener Absicht, zwei Punkte außer Acht gelassen worden, die wir jetzt nachtragen müssen, weil sie unsere Schlüsse und damit auch das Bild der Materie, zu dem sie uns führen, wesentlich mitbestimmen. Der erste Punkt betrifft die Frage, ob denn — wie man zunächst annehmen wird — das Gesagte sich in ganz gleicher Weise auf die beiden Arten von Ladung bezieht, die wir kennen, auf die positive und die negative, wie sie bei der Elektrolyse auftreten und sich dort lediglich dadurch unterscheiden, daß sie in entgegengesetzten Richtungen wandern, im übrigen aber, was die Massen- und Ladungswerte betrifft, sich ganz gleich verhalten. Und gerade dieses letztere ist hier nicht mehr der Fall, und zwar nicht etwa bloß nicht genau, sondern überhaupt nicht. Die Kathodenstrahlen bestehen nämlich, wie der Richtungssinn der Ablenkung im magnetischen Felde im Zusammenhange mit den Gesetzen der Anziehung und Abstoßung erweist, einzig und allein aus negativ geladenen Teilchen. Um festzustellen, ob sich positiv geladene, durch den Raum fliegende Teilchen analog verhalten, müßte man Strahlen positiver Elektrizität herstellen. Das ist nun wirklich gelungen, solche Strahlen treten bei einer bestimmten Anordnung im Entladungsrohr auf und heißen dann, je nach den Umständen, Anodenstrahlen oder Kanalstrahlen; und auch von den radioaktiven Stoffen werden sie, neben den nega-

tiven Strahlen, ausgesandt; den Beta=Strahlen stellt man diese positiven als Alpha=Strahlen gegenüber. Aber das Verhalten aller dieser positiven Strahlen ist ein ganz anderes wie das der negativen: ihre Geschwindigkeit ist sehr viel kleiner und durch ein Magnetfeld in der Querrichtung werden sie nur wenig abgelenkt, natürlich außerdem nach der entgegengesetzten Seite. In der Figur ist das schematisch dargestellt, und man erblickt da auch noch ein drittes, von der ablenkenden Wirkung überhaupt nicht betroffenes Bündel, das der Gamma=Strahlen, von denen noch die Rede sein wird. Bestimmt man nun für die positiven Strahlen das Verhältnis der Ladung zur Masse, so findet man genau den aus der Jontheorie der Lösungen bekannten Wert. Hätte man diese Beobachtung vor derjenigen über die negativen Strahlen gemacht, so würde man das für ganz

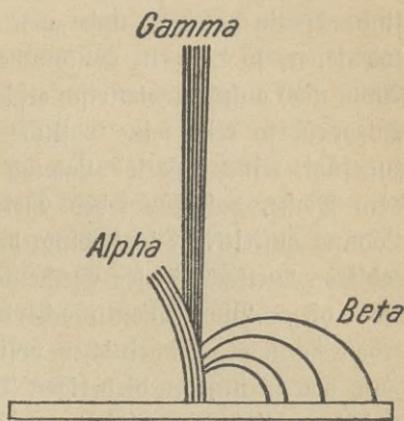


Fig. 12.

selbstverständlich gefunden haben; jetzt, wo die negativen Strahlen etwas ganz Neues ergeben haben, ist dieses Verhalten der positiven Strahlen, obgleich es ganz normal ist oder vielmehr gerade, weil es das ist, eine neue Überraschung. Und weiter: der Wert, der sich hier für e/m ergibt, ist für jedes Gas ein anderer, gerade wie für jede Gattung von Flüssigkeitsionen. Es liegt also hier eine höchst merkwürdige Unsymmetrie vor: die negativen Strahlen sind Elektronenstrahlen, die positiven sind gewöhnliche Ionenstrahlen. Überhaupt ist es auf keine Weise gelungen, positive Elektronen aufzufinden, es scheint vielmehr sicher zu sein, daß die positive Ladung immer an Ionen gebunden ist und bleibt.

Damit bekommen wir nun etwa folgendes Bild von der Ma=

terie: sie besteht aus Molekeln, die ihrerseits wieder aus einem oder mehreren Atomen zusammengesetzt sind. Ein Atom selbst aber besteht aus einem vergleichsweise massigen Körper, den wir uns passend als Zentralkörper vorstellen, und aus einem dieses Zentrum umgebenden Haufen zahlreicher Elektronen, die mit ihm zwar ein Ganzes bilden, aber doch mehr oder weniger leicht von ihm abgetrennt werden können. Der Zentralkörper ist positiv geladen, die Elektronen sind negativ geladen, und zwar zusammengenommen ebenso stark wie jener, so daß ein vollkommener Ausgleich stattfindet und das Atom nach außen unelektrisch erscheint. Werden ihm aber Elektronen entzogen, so tritt seine positive Ladung, werden ihm Elektronen zugefügt, seine negative Ladung in die Erscheinung, und zwar in dem Maße, daß für jedes Elektron ein Elementarquantum von Ladung auftritt. Die Ladung des Atoms ist daher stets ein ganzzahliges Vielfache dieses Elementarquantums. Natürlich muß man dann dieses Bild sinnentsprechend auf die Molekeln ausdehnen und erhält dann ein einheitliches positives Ion, während das negative Ion, das in unserer bisherigen Theorie der Flüssigkeitsleitung eine gleichberechtigte Rolle spielt, nunmehr durch einen Elektronenhaufen bzw. durch einzelne Elektronen zu ersetzen ist — eine Theorie, auf die wir hier ebenso wenig eingehen wollen wie auf die Elektronentheorie der metallischen Leitung, obgleich gerade diese letztere sich bereits in schönen Anfangsstadien ihrer Entwicklung befindet.

Und nun der zweite, bisher vernachlässigte Punkt. Wenn gesagt wurde, das Verhältnis von Ladung zur Masse sei unter allen Umständen konstant, so ist das nicht allgemein richtig. Wenn sich nämlich die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen immer mehr steigert, was bei den Beta-Strahlen der radioaktiven Körper, aber auch sonst in gewissen Fällen vorkommt, dann zeigt sich mit Hilfe von magnetischen Ablenkungsversuchen, daß das Verhältnis e/m schließlich nicht mehr konstant bleibt, sondern mehr und mehr abnimmt; von 176 auf 150, 100 und schließlich, wenn die Geschwindigkeit der Strahlen $11/12$ der Lichtgeschwindigkeit beträgt, nur noch 70 Millionen Cou-

lombs auf das Gramm. Da wir nach allem früheren keinen Grund haben, an der Konstanz von e zu zweifeln, müssen wir, so sehr das auch alle unsere bisherigen Vorstellungen von diesem Begriffe erschüttert, annehmen, daß die Masse m nicht konstant ist, sondern mit wachsender Geschwindigkeit zunimmt, und zwar mit der Tendenz, zuletzt, wenn man sich der Lichtgeschwindigkeit mehr und mehr nähert, unendlich groß zu werden; ein Schluß, aus dem sich natürlich ergibt, daß eben eine derartige Geschwindigkeit, wegen der dann auftretenden unendlich großen Trägheit niemals erreicht werden kann, sondern immer nur die Bedeutung eines äußersten Grenzwertes hat. Man kann also sagen: Masse ist kein feststehendes Charakteristikum der strahlenden Materie, sie ist, sei es nun teilweise oder vollständig, eine Funktion ihrer Bewegung, es handelt sich nicht um wahre, sondern um „scheinbare Masse“, die uns durch Bewegung vorgetäuscht wird, besser aber, da doch solche Ausdrücke immer etwas Mißliches haben, nicht um statische, sondern um „kinetische Masse“.

So verblüffend nun auch dieses Ergebnis auf den ersten Blick sein mag, so bedarf es doch nur einer ganz naheliegenden Überlegung, um es in den Rahmen unserer Gesamtvorstellungen einzuspannen. Denn was ist denn eigentlich Masse im gewöhnlichen, mechanischen Sinne, und wie offenbart sie sich denn? Da ist denn an unsere Betrachtungen von damals zu erinnern und zu betonen, daß auch in der Mechanik ein ruhender Körper eigentlich gar keine Masse hat (er hat ein Gewicht, d. h. er drückt auf die Waagschale, aber das ist ja etwas grundsätzlich ganz anderes); seine Masse offenbart sich erst dann, wenn er in Bewegung gerät, und zwar als Widerstand gegen eben diese Bewegung. Und ein besonders eindringliches Experiment hierüber, das uns die kinetische Masse direkt fühlbar macht, haben wir damals in dem Experiment in dem Kreisel in der Hohlkugel kennengelernt. Gerade wie in diesem Falle wird uns auch hier, bei den Kathodenstrahlen, Masse vorgetäuscht — soweit dieser Ausdruck eben jetzt noch berechtigt ist, wo wir doch den Massenbegriff verallgemeinert haben und deshalb die kinetische Masse als etwas

ebenso „wahres“ ansehen müssen wie die statische. Der Unterschied ist nur der, daß es sich bei dem Kreiseln um rotierende, hier aber um fortschreitende Bewegung handelt; und gerade das regt uns an, noch eine weitere Unterscheidung vorzunehmen, die uns in der Analyse des Massenbegriffs einen neuen Schritt vorwärts bringt. Denn in einem Kathodenstrahlteilchen haben wir einen Körper vor uns, der einerseits seine Translationsgeschwindigkeit, andererseits die Richtung seiner Bahn ändert, man muß also auch zwei verschiedene Widerstände unterscheiden und gelangt dadurch zu den Begriffen der longitudinalen und der transversalen Masse; an dieser Undeutung muß es aber genügen.

31. Dagegen müssen wir nun die erfolgreichen Versuche kennenlernen, noch einen Schritt weiter zu gehen und das elektrische Elementarquantum selbst direkt zu ermitteln. Was man zunächst leicht ermitteln kann, ist die Gesamtladung der in einer Gasmasse enthaltenen Ionen; man braucht sie nur auf eine Platte von gemessener Ladung sich absetzen zu lassen und zu sehen, welcher Teil dieser Ladung dann ausgeglichen wird. Um aber daraus die Ladung eines einzelnen Teilchens abzuleiten, müßte man wissen, wieviel Teilchen in dem Raume vorhanden sind, man müßte also eine „Ionen-zählung“ vornehmen. Das erscheint nun zunächst wohl etwas märchenhaft, da doch die Ionen selbst der mikroskopischen Wahrnehmung nicht zugänglich sind. Da kommt uns nun aber eine sehr merkwürdige Erscheinung zu Hilfe, die an sich einem ganz anderen Gebiete der physikalischen Welt angehört, aber gerade durch die Ionen zu dem unsrigen in Beziehung gesetzt wird. Man weiß seit Jahrhunderten, daß sich ein Gas, z. B. Luft, verflüssigt, also Nebeltröpfchen bildet, wenn Druck und Temperatur bestimmte Werte annehmen. Was man aber erst seit Jahrzehnten weiß, ist dies, daß damit diese Nebelbildung auch wirklich zustande komme, noch eine andere Vorbedingung erfüllt sein muß: es müssen in dem Raume irgendwelche feste Teilchen schweben, an die sich die Nebeltröpfchen

ansehen können; in ganz reiner Luft bildet sich niemals Nebel — eine Tatsache, die wir ja ihrerseits ebenfalls längst kennen und die der Bedeutung von Luftkurorten zugrunde liegt. Derartige „Kondensationskerne“ können von sehr verschiedener Art sein, am häufigsten sind es Staub-, Kohle- oder Salz-Teilchen, wie sie doch in ungezählten Mengen, und besonders zahlreich über Sandboden, in Industriegebieten und über dem Meere vorhanden sind. Aber es gibt noch eine ganz andere Klasse von Kondensationskernen, und gerade diese interessiert uns hier: die Gasionen. Man kann das sehr schön an einem Experimente veranschaulichen, das aus drei Einzelversuchen besteht: zuerst zeigt man in einem Raume, in dem sich Staub befindet (wie fast immer von selbst), die Nebelbildung; dann beseitigt man den Staub und zeigt, daß jetzt, auch wenn Druck und Temperatur die erforderlichen Werte annehmen, trotzdem keine Nebelbildung eintritt; und endlich läßt man auf die Gasmasse eine Bestrahlung, am besten mit Röntgenstrahlen, einwirken, so daß Ionisation erfolgt, sofort bildet sich jetzt wieder Nebel.

Da haben wir nun das gewünschte Zaubermittel, um die Ionen sichtbar zu machen; denn durch die Angliederung des Tröpfchens wird das Volumen des Kerns ver Hundert- oder vertausendfacht, und man kann nunmehr die Tröpfchen, also auch die Ionen zählen. Wie man das macht, kann hier nur angedeutet werden, zumal es bereits eine ganze Reihe von bezüglichen Methoden gibt. Die sozusagen handgreiflichste ist die, daß man die Teilchen, z. B. solche, wie sie die Alpha-Strahlen der radioaktiven Substanzen bilden, auf einen Zinkblendeschirm aufprallen läßt, wobei sich ein Feuerwerk hell aufleuchtender Punkte einstellt. Oder man beobachtet die Geschwindigkeit, mit der ein Tröpfchen einerseits unter der Wirkung der Schwerkraft herabsinkt, andererseits die, mit der es durch eine geeignete elektrische Feldkraft nach oben getrieben wird. Oder man berechnet, nach einem ziemlich sicher bekannten Gesetze, aus der Fallgeschwindigkeit die Größe und damit das Gewicht des Teilchens usw. Ja, man hat die Tröpfchen einem ganz individuellen Studium unter-

zogen und dabei — natürlich mit Anwendung des Mikroskops — festgestellt, daß einige von ihnen fielen, andere stiegen und noch andere eben stillstanden, und weiter, daß sich die Geschwindigkeit eines und desselben Teilchens plötzlich verdoppelt oder verdreifacht usw. Alles das läßt sich nur verstehen, wenn man sich erinnert, daß diese Tröpfchen elektrische Ladungen tragen, und zwar ein Elementarquantum, oder das doppelte, dreifache usw. Und diese Ladung läßt sich nun aus den Beobachtungen direkt ableiten, und zwar mit einer für die Umstände erstaunlichen Sicherheit. Das Ergebnis ist: die Elementarladung beträgt $0,163 \cdot 10^{-18}$, also rund den sechsten Teil eines trilliontel Coulomb. Eine ganz ähnliche Zahl haben wir früher unter Benutzung der Avogadro'schen Zahl gefunden; jetzt können wir, da unsere nunmehrige Berechnung von der Avogadro'schen Zahl ganz unabhängig ist, diese letztere rückwärts ermitteln und finden dann, mit nur ganz geringer Abweichung von dem früheren Werte, 0,59 Quadrillionen. Man sieht, wie gut sich der Ring der Messungen schließt, und wie sehr dadurch unsere Vorstellung von der Konstitution der Materie an Sicherheit gewinnt.

Die Elektronentheorie hat, einmal eingeführt, rasch ihren Siegeslauf durch die verschiedenen Gebiete der Naturlehre angetreten. Leitung und Strahlung, feste, flüssige und gasförmige Medien beherrscht sie in gleicher Weise. Aus diesem Reichtum kann hier nur als ein Beispiel, aber freilich als eines der glänzendsten, das Gebiet der Spektralanalysen herausgegriffen werden; ein Gebiet, auf dem gerade die entscheidenden Fortschritte erst in den allerletzten Jahren, zum Teil erst während der Kriegszeit, gemacht worden sind.

Wenn man ein Bündel von Sonnenstrahlen durch ein Prisma oder ein feines Gitter hindurchschickt, so findet man, daß es — das eine Mal durch Brechung, das andere Mal durch Beugung — zerlegt wird in ein nun nicht mehr einheitliches, sondern auch räumlich in seine Elemente aufgelöstes Bündel; und auf einem weißen Schirme, den man ihm in den Weg stellt, bietet sich uns der Anblick des Spektrums, mit seiner stetigen Aufeinanderfolge reiner Farben, vom

Rot bis zum Violett. Auch künstliche Lichtquellen haben ihre Spektren, aber solche von ganz anderem Habitus: sie sind nicht zusammenhängend, sie bestehen im Gegenteil aus einzelnen hellen, farbigen Linien, jede von ihnen immer an derselben, bestimmten Stelle des Schirmes auftretend, und zwar an derselben Stelle, an der auch im Sonnenspektrum die gleiche Farbe auftreten würde. Nun stellen wir uns die Lichtausbreitung — und wir müssen das nach der Gesamtheit der Erscheinungen tun — als eine Wellenbewegung vor, erzeugt durch die Schwingungen der Lichtquelle, gerade wie die Schallwellen erzeugt werden durch die Schwingungen der Tonquelle. Aber während die Schwingungen dieser letzteren, z. B. eines Punktes einer gespannten Saite, grob sinnlich sind (sie verlaufen allerdings so schnell, daß man sie ohne besondere Kunstgriffe nicht im einzelnen, sondern nur in ihrem Gesamteffekt wahrnehmen kann), sind uns die Schwingungen eines leuchtenden Körpers gänzlich verborgen. Wir nehmen daher an, daß sie überaus fein sind, und daß ihre Träger die feinsten Elemente des Körpers sind. Da wir nun als diese Elemente die Atome ansehen, so kommen wir ganz von selbst auf die Vorstellung, daß es sich hier um Atomschwingungen handelt. Solange man nun ein Atom als ein einfaches, ungeteiltes Wesen auffaßt, muß man ihm eine ganz bestimmte Schwingungsart zuschreiben; und da einer bestimmten Schwingungsart, nämlich einer bestimmten Häufigkeit der Perioden in einer Sekunde, eine bestimmte Farbe entspricht, so müßte jeder Stoff eine bestimmte helle Linie von der seiner Lage entsprechenden Farbe liefern. Das ist nun aber nicht der Fall, vielmehr liefert jeder Stoff eine ganze Anzahl von Linien, teils dicht benachbart, in anderen Fällen aber über das ganze Spektrum verteilt; zuweilen sind es nur ganz wenige, benachbarte, und dann sagt man, der Stoff sende nahezu homogenes Licht aus; bei anderen Stoffen ist aber die Mannigfaltigkeit sehr groß, das Licht aus vielen Elementarfarben zusammengesetzt. Die nächste Vermutung, die man auf Grund dieses Befundes aufstellen wird, knüpft an das an, was wir von den Tonschwingungen wissen, wo ein und derselbe

Körper, z. B. eine Saite, nicht bloß einer einzigen, sondern mehrerer Schwingungsarten fähig ist, deren Frequenzen in bestimmten Verhältnissen zueinander stehen; man spricht in diesem Sinne von Grundton und Obertönen, und etwas Ähnliches könnte auch hier, beim Licht, stattfinden, und findet auch sicherlich statt. Hat man doch schon vor längerer Zeit zwischen den verschiedenen Spektrallinien eines und desselben Stoffes gesetzmäßige Beziehungen aufgefunden, so daß man von „Linienserien“ sprechen kann; und am bekanntesten unter diesen ist die von dem Schweizer Balmer aufgestellte und nach ihm benannte Serie, die ihren Ausgangspunkt von dem Spektrum des Wasserstoffs nahm, geworden. Aber das Gesetz oder die Gesetze, welche diese Linien miteinander verknüpfen, sind doch sehr verwickelt und jedenfalls von ganz anderem Charakter, als er auf Grund der gedachten einfachen Vorstellungen zustande kommen würde — ein Zeichen, daß man hier doch noch nicht tief genug ins Innere der Natur eingedrungen ist. Nun wissen wir ja aber, daß auch in der Tat das Atom gar nicht der elementare Baustein der Materie ist, daß wir zu den Ionen und dann weiter zu den Elektronen vorschreiten müssen, um die Basis für das Verständnis der von der Materie ausgehenden Erscheinungen und hier insbesondere für die Gestaltung des Spektrums zu gewinnen.

Das ist in großen Zügen der Gedankengang, der im Laufe der neuesten Zeit und mit Erfolg, wie gesagt, eigentlich erst seit wenigen Jahren zu einer Elektronentheorie der Spektrallinien geführt hat. Die erste derartige Theorie hat der Engländer Rutherford, die zweite, schon wesentlich erfolgreichere, der Däne Bohr ausgearbeitet, und die letzte und allgemeinste verdankt man dem Münchener Theoretiker Sommerfeld. Wie schwierig derartige Untersuchungen sind, mag man aus folgenden Andeutungen ersehen. Der schwingende Elementarkörper besteht, wie wir wissen, aus einem Kern und einer Anzahl von Elektronen, die ihn umgeben, sich aber nicht im Ruhezustande befinden, sondern den Kern umkreisen — das Ganze ein in den aller-kleinsten Dimensionen gehaltenes Abbild unseres Sonnensystems,

wo die Planeten ebenfalls die Sonne umkreisen. Es kommt also darauf an, wie groß die Zahl dieser Planeten ist, und in was für Bahnen, mit welchen Geschwindigkeiten, Perioden und Phasen sie ihren Umlauf vollziehen. Am einfachsten ist natürlich der Fall eines einzigen Planeten mit Kreisbahn; bei zwei Planeten kommt es schon darauf an, wie sie zueinander gelegen sind, etwa so, daß sie immer gleichzeitig entgegengesetzte Stellen der Kreisbahnen einnehmen usw. Ferner kann man Veranlassung nehmen, die Kreisbahn durch eine andere, z. B. eine elliptische, zu ersetzen (wie ja auch die Planeten des Sonnensystems keine Kreise, sondern Ellipsen

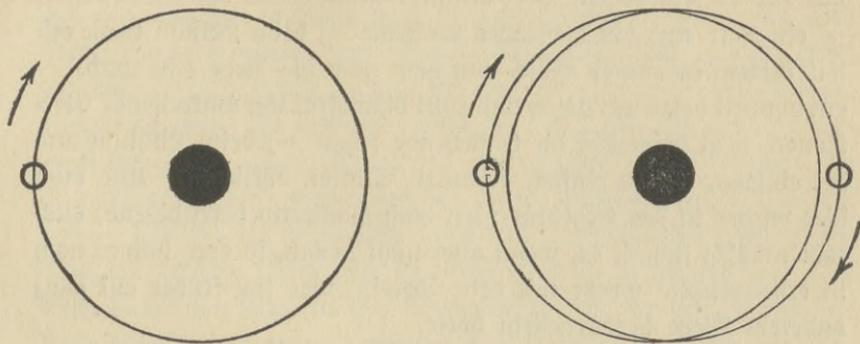


Fig. 13.

beschreiben). Neu ist hier, gegenüber den Verhältnissen am Himmel, die elektrische Ladung, und damit ist eine weitere Mannigfaltigkeit gegeben. Dazu kommen dann aber noch zwei weitere Komplikationen. Erstens die Frage, welche von den so gewonnenen Anordnungen der bewegten Körperchen denn stabil sind, d. h. Aussicht auf Bestand haben — eine Frage, die nur auf Grund der Energielehre beantwortet werden kann, und bei der es sich überdies als durchaus notwendig erweist, die uns schon von anderwärts bekannte Quantentheorie zur Anwendung zu bringen. Und zweitens die Frage, ob es denn auf die absolute Bewegung der Planeten ankommt, oder auf ihre Bewegung relativ zum Kern, in welcher letzterem

Falle, für den man sich aus bestimmten, zwingenden Gründen entscheiden wird, man die Gesetze der modernen Relativitätstheorie zur Anwendung bringen muß, wie sie ja auch hinsichtlich der Bewegung der Himmelskörper, z. B. des Merkur, bereits schöne Früchte getragen hat. Wahrlich, keine leichte Aufgabe, aus diesem Labyrinth von Hypothesen und Mannigfaltigkeiten einen sicheren Ausweg zu finden. Aber dem Scharfsinn der genannten Forscher ist es trotzdem gelungen, die Theorie durchzuführen und zu zeigen, daß und bis zu welchem Grade sie die ungeheure Mannigfaltigkeit der Spektralerscheinungen zum richtigen Ausdruck bringt, sei es auch zunächst nur für die einfachsten Verhältnisse, wie sie etwa beim Wasserstoff — ein Kern und ein kreisendes Elektron —, beim Helium (dem erst seit kurzem bekannten Gase, von dem noch die Rede sein wird) — ein doppelt geladener Kern und zwei diametral ihn umkreisende Elektronen, man vergleiche die heistehende Figur —, beim Lithium und bei einigen, relativ einfach gebauten Stoffen vorliegen. Und auch hier wieder ist das Ergebnis nicht bloß qualitativ befriedigend, auch zahlenmäßig stimmt es, wenn auch nicht genau, so doch immer noch in erstaunlichem Grade mit dem überein, was sich früher auf ganz anderem Wege herausgestellt hatte.

VIII.

32. Verdanken wir sonach den Erscheinungen der Strahlung die allerwichtigsten Aufschlüsse über die Konstitution der Materie, so sind doch damit ihre Verdienste noch nicht erschöpft. Im Gegenteil, sie erlauben uns oder zwingen uns (wie man es nehmen will) einen Schluß zu ziehen, der an den ältesten und geheiligsten Fundamenten der Wissenschaft rüttelt. Zu diesem Ende müssen wir die bisher nur gelegentlich gestreiften Strahlen der radioaktiven Körper etwas näher betrachten.

Im Jahre 1896 machte Becquerel in Paris die Entdeckung, daß

das Uran (ein ziemlich häufig auf der Erde vorkommendes Mineral), und zwar ganz von selbst, ohne jede äußere Erregung, Strahlen aussendet (die z. B. die photographische Platte schwärzen), und daß diese Strahlung sich mit der Zeit ungeschwächt erhält. Das erstaunliche an diesem Phänomen ist, daß diese Strahlung doch ein energetischer Vorgang ist, und daß man nicht weiß und zunächst auch gar nicht ahnen kann, wo denn die Quelle dieser Energie steckt; denn die strahlende Masse bleibt von der Strahlung anscheinend gänzlich unberührt. Auch ist es ganz gleichgültig, in welcher Form das Uran, ob es als Element oder in einer seiner Verbindungen, benutzt wird. Dagegen sind die Bemühungen, die selbsttätige Strahlung auch bei anderen Stoffen nachzuweisen, fast erfolglos geblieben: nur noch beim Thorium erhielt man positive Ergebnisse (und Spuren beim Radium). Es schien also, daß es sich hier um eine engbegrenzte Spezialität handelt. Im übrigen erwies sich die Strahlung aus sehr verschiedenen, sich ganz abweichend verhaltenden Bestandteilen zusammengesetzt; und indem man das weiter verfolgte, stellte man fest, daß es sich hier im wesentlichen um drei Strahlenarten handelt, die man als Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlen bezeichnet hat. Die Alpha-Strahlen bestehen aus positiv geladenen, groben Ionen; die Beta-Strahlen aus negativ geladenen, feinen Elektronen, die Gamma-Strahlen sind überhaupt nicht von konvektivem, sondern vom Wellen-Charakter. Die ersten sind also zwar nicht nach ihrer Entstehung, aber ihrer Natur nach identisch mit den Anoden- oder Kanal-Strahlen, die zweiten mit den Kathodenstrahlen, die dritten mit den Röntgenstrahlen; und die schon früher mitgeteilte Figur, die ein Bild von ihrem Verhalten im Magnetfelde gibt, bezieht sich tatsächlich auf die Strahlen der radioaktiven Körper, für die sie von Kaufmann ermittelt wurde.

Hinsichtlich der Beta-Strahlen ist hiernach nichts mehr hinzuzufügen; denn es gibt ja nur eine einzige Art von Elektronen. Wohl aber gibt es sehr verschiedene Arten von Ionen, und es fragt sich, woraus denn die Alphastrahlen eigentlich bestehen. Um diese Frage

zu beantworten, zählte u. a. Regener die Lichtblitze beim Aufprallen von Alphateilchen auf einen Zinkblendeschirm, und er fand bei einer bestimmten Anordnung 1800 in der Sekunde; andererseits maß er die von diesen Teilchen mitgeführte Ladung und fand sie gleich der Hälfte eines tausendbilliontel Coulomb, so daß sich für die Ladung eines einzelnen Teilchens reichlich ein Viertel eines trilliontel Coulomb ergibt. Dieselbe Zahl wurde von Rutherford und Geiger, in guter Übereinstimmung hiermit, zu knapp einem Drittel trilliontel Coulomb ermittelt. Das ist aber ziemlich genau das Doppelte einer Elementarladung. Da nun das Äquivalentgewicht zwei ist, erhält man als Atomgewicht vier, und das ist gerade das Atomgewicht des von Lord Rayleigh und Ramsay entdeckten Stoffes, des Helium. Die Alpha-Teilchen sind also zweifellos Helium-Atome mit zwei positiven Ladungen — ein Ergebnis, das dann auch noch auf anderem Wege bestätigt worden ist.

Alle diese Feststellungen ließen sich aber mit einiger Sicherheit erst machen, als man das in der ursprünglichen Form sehr schwache Strahlungsphänomen mächtig zu verstärken gelernt hatte, und das kam so: Frau Curie, eine mit dem französischen Physiker Curie verheiratete Polin, machte die sonderbare Beobachtung, daß eine und dieselbe Uranverbindung sehr viel stärker strahlt, wenn sie aus der Natur, also aus dem Erdboden entnommen, als wenn sie auf chemischem Wege hergestellt war; und sie schloß daraus, daß in dem natürlichen Uran als eine Art von Gesellschafter noch ein anderer, bisher unbekannter Stoff enthalten sein müsse, der als der eigentliche Träger der Aktivität anzusehen sei. Das hat sich denn auch mit Hilfe sinnreicher chemischer Methoden vollauf bestätigt, nur daß sich nicht ein solcher Stoff, sondern deren zwei fanden, die die Namen Radium (wegen der starken Strahlung) und Polonium (zu Ehren des Vaterlandes der Entdeckerin) erhielten. Nach dem ersteren, weitaus wichtigeren von ihnen heißen dann die Strahlen in ihrer Gesamtheit Radiumstrahlen (nebenbei, nach ihrem ersten Beobachter, auch Bequerelstrahlen), und das ganze Phänomen wird als Radioaktivität

bezeichnet. Ubrigens sind dann im Laufe der Jahre noch einige andere, mehr oder weniger schwach radioaktive Stoffe entdeckt worden.

Das Radium ist ein richtiges chemisches Element, es hat das sehr hohe Atomgewicht von 226 (nur Uran und Thorium haben noch etwas höhere); es strahlt zweimillionenmal so stark wie das Uran, und es bildet zahlreiche Verbindungen, die aber sämtlich nicht mehr und nicht weniger stark strahlen, als es ihrem Radiumgehalte ent-

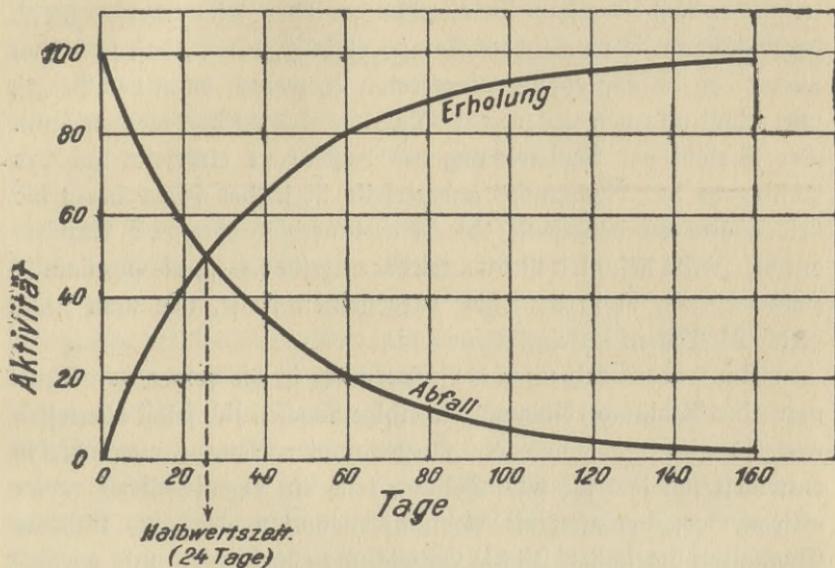


Fig. 14.

spricht. Es handelt sich also hier zweifellos nicht um eine chemische Erscheinung im bisherigen Sinne; nicht die Molekel, sondern das Atom ist der Sitz des Vorganges, in ihm müssen sich innere Prozesse abspielen. Auf dem Wege, um die Natur dieser Prozesse zu enträtseln, hat man nun eine große Reihe merkwürdiger Tatsachen festgestellt, von denen hier zunächst die folgende angeführt werden möge. Durch geeignete chemische Behandlung kann man aus einer

Uransalzlösung einen Rückstand abscheiden und dann die Restlösung wieder eintrocknen, so daß man nun zwei völlig getrennte Stoffe vor sich hat. Wären es gewöhnliche chemische Stoffe, so würden sie sich also jetzt ganz selbständig verhalten. Das ist aber nicht der Fall; ihre Strahlungsercheinungen stehen vielmehr in einer ganz gesetzmäßigen Beziehung zueinander: erstens hat das Rest-Uran seine Alphastrahlung fast vollständig behalten, seine Betastrahlung aber fast vollständig an den Rückstand abgegeben; und zweitens gewinnt das Rest-Uran seine Betastrahlung mit der Zeit wieder, während der Rückstand sie in gleichem Tempo einbüßt, derart, daß schließlich wieder der Anfangszustand eingetreten ist, worauf dann der Prozeß wiederholt und von neuem ein Rückstand abgeschieden werden kann. Der Verlauf der Reaktivierung des Rest-Urans einerseits und des Abklingens des Rückstandes andererseits ist in der Figur durch die beiden Kurven dargestellt; die Zeit, innerhalb deren die Aktivität auf die Hälfte gesunken ist bzw. wieder angestiegen ist, die sogenannte Halbwertszeit, ist in dem hier dargestellten Falle, wie man sieht, gleich 24 Tagen.

Eine andere bedeutsame Beobachtung ist die folgende. Wenn man eine Radiumverbindung, die einige Wochen sich selbst überlassen war, in einem geschlossenen, ausgepumpten Raume ausglüht, so entwickelt sich aus ihr teils Helium, teils ein eigentümliches radioaktives Gas, das man als Radium-Emanation oder auch kurz als Emanation bezeichnet. Ist die Entwicklung abgeschlossen und wiederholt man den Versuch nach einigen Wochen, so tritt von neuem Helium und Emanation auf.

Faßt man nun diese beiden und noch zahlreiche andere Beobachtungen zusammen, so gelangt man zu dem zwingenden Schluß, daß es mit der seit alten Zeiten angenommenen Unwandelbarkeit der Atome nichts ist, daß es vielmehr Elemente gibt (und vielleicht sind es alle?), deren Atome teilweise zerfallen, und die sich auf diese Weise in andere chemische Elemente umbilden. Der Verlauf dieser Umbildung ist, was sein Gesetz angeht, immer derselbe, er ist, wie

man das mathematisch ausdrückt, exponentiell, d. h. in gleichen Zeiten verschwinden nicht etwa gleiche Mengen des Stoffes, es verschwindet vielmehr immer der gleiche Bruchteil der eben noch vorhandenen Stoffmenge, so daß also z. B. nach einem Monat nur noch die Hälfte, nach 2 Monaten nur noch ein Viertel, nach 3 Monaten nur noch ein Achtel vorhanden ist. Gänzlich „alle werden“ kann also ein Stoff streng genommen überhaupt nicht oder doch nur, wie man sagt, asymptotisch, d. h. erst nach unendlich langer Zeit; aber praktisch wird er doch als verschwunden zu betrachten sein, wenn nur noch ein winziger, nicht mehr wirksamer und nicht mehr feststellbarer Rest vorhanden ist. In diesem Sinne spricht man von der „Lebensdauer“ eines radioaktiven Stoffes; sie steht, wie man leicht begreift, in einem bestimmten Verhältnis zu der bereits eingeführten Halbwertszeit.

Das Tempo freilich, in dem sich der Umwandlungsprozeß vollzieht, ist für die verschiedenen Ausgangsstoffe, und innerhalb eines jeden von ihnen für die Stoffe, die der Reihe nach aus ihm entstehen, sehr verschieden; und es gibt wenig physikalische Eigenschaften, die so ungeheure Gegensätze aufweisen wie diese. Während es Zwischenprodukte in der Umwandlungsreihe gibt, deren Lebensdauer nach Sekunden oder Minuten, nach Tagen oder Wochen mißt, bleiben andere Jahrhunderte, Jahrtausende, Jahrmillionen beständig; und es wird jetzt klar, warum wir einerseits viele von diesen Stoffen bisher noch gar nicht gekannt haben, andere aber umgekehrt als absolut beständig angesehen haben; jene sind eben die kurzlebigen, diese die langlebigen. Wer am interessantesten sind natürlich gerade die in der Mitte stehenden Elemente, die zwar so lange leben, daß man sie in aller Ruhe studieren kann, die aber doch immerhin sich so schnell verändern, daß man ihren Zerfall persönlich erfahren kann.

Von besonderer Bedeutung ist dabei — außer vielem anderen — noch zweierlei: erstens, daß, wie schon erwähnt, die radioaktiven Stoffe besonders hohe Molekulargewichte haben; und zweitens, daß das Helium, mit dem kleinen Molekulargewicht von vier, ein

Erzeugnis des radioaktiven Zerfalls ist. Beide Tatsachen lassen sich zusammenfassen, indem man sich vorstellt, daß es eine Stala chemischer Elemente gibt, die, mit dem Uran und seinem Molekulargewicht 238 ansehend, durch Abstoßung je eines Heliumteilchens in Stufen von je vier sich zu Elementen mit abnehmendem Molekulargewicht anordnet. Natürlich stimmt das nicht immer genau, manchmal auch nicht annähernd; aber man muß eben bedenken, daß immer nur ein Teil der Atome zerfällt, ein anderer aber Jahre oder Aonen lang beständig bleibt, und daß wir es daher wahrscheinlich nie mit wirklich reinen und einheitlichen Stoffen zu tun haben.

Wie sich im einzelnen die Umwandlung vollzieht, das wissen wir gegenwärtig nur zu einem kleinen Teile; aber für die wichtigste Zerfallsreihe, die des Uran (die beiden anderen sind die des Thoriums und die des Aktiniums), läßt sich doch schon ein recht anschauliches Bild geben, das in der folgenden Tabelle zusammengefaßt ist.

Element	Halbwertszeit	Element	Halbwertszeit
1. Uran	5.10 ⁹ Jahre	8. Radium-A	3 Minuten
2. Radio-Uran	2.10 ⁶ Jahre	9. Radium-B	27 Minuten
3. Uran-X	24,6 Tage	10. Radium-C	21 Minuten
4. Uran-Y	1,5 Tage	11. Radium-D	16 Jahre
5. Zonium	2.10 ⁵ Jahre	12. Radium-E	5 Tage
6. Radium	1780 Jahre	13. Polonium	136 Tage
7. Radium-Emanat.	4 Tage		

Betrachten wir zunächst das Uran und das Radium, so haben wir die Atomgewichte 238 und 226, also einen Unterschied von zwölf, der der Abspaltung von drei Heliumatomen entspricht, also die Vermutung nach Zwischenstufen nahelegt; und solche Zwischenstufen sind, wie man sieht, tatsächlich vorhanden. Die eine von ihnen, das Zonium, ist sogar ein schon recht gut studierter Stoff. Uran-X und Uran-Y sind kurzlebig; andererseits sind Uran, Radio-Uran und Zonium praktisch so gut wie von ewigem Leben; in der Mitte aber steht das

Radium, dessen Lebensdauer sich in den uns aus der Geschichte des Menschengeschlechts vertrauten Grenzen hält. Daraus folgt aber, daß von dem zur Zeit, als die Erde sich bildete, vorhandenen Radium jetzt nichts mehr existieren kann, daß vielmehr alles Radium, das gegenwärtig existiert, im Laufe der letzten beiden Jahrtausende sich gebildet haben und daher auch mit seiner Muttersubstanz immer zusammen vorkommen muß. Und daß diese Muttersubstanz das Uran ist, kann keinem Zweifel unterliegen, seitdem sich gezeigt hat, daß das Radium nicht nur mit ihm vergesellschaftet vorkommt, sondern auch in immer gleichbleibendem Mengenverhältnis, entsprechend dem Umstande, daß schon seit längerer Zeit sich hier ein Gleichgewichtszustand herausgebildet hat, indem immer ebenso viel Radium sich aus dem Uran bildet, wie es sich seinerseits in weitere Elemente umbildet.

Was dann diese weiteren Zerfallsprodukte des Radiums betrifft, so stehen in der Tabelle nur ganz kurzlebige sowie ein etwas, aber auch nicht viel dauerhafteres, das Radium-D. Am meisten interessiert uns das letzte Glied der Reihe, das Polonium, weil es anscheinend das Endprodukt ist. Aber jedenfalls nur anscheinend, denn es zerfällt ja auch sehr rasch. Das Produkt seines Zerfalls ist aber jedenfalls nicht radioaktiv, und deshalb von praktisch unbegrenzter Dauerhaftigkeit. Die Wahrscheinlichkeit spricht dafür, daß dieses wirkliche Endprodukt der Reihe ein uns sehr vertrauter und altbekannter Stoff ist: das Blei. Denn es kommt in Uranerzen aus älteren Schichten immer in gleichen Mengen vor, und es hat das Atomgewicht 206, würde also durch Abspaltung von fünf Heliumatomen sich aus dem Radium ergeben. Sicher ist das ja keineswegs, aber es ist jedenfalls interessant, sich das Blei, und eventuell auch noch andere, gegenwärtig verbreitete Elemente als die Endprodukte von Zerfallsreihen vorzustellen.

Was aber vielleicht nicht überflüssig zu bemerken ist, das ist dies. Es liegt nahe, bei derartigen Betrachtungen, die die Lehre von der Unveränderlichkeit der Elemente über den Haufen werfen,

an die Bestrebungen der einstigen, jetzt längst in Mißkredit gekommenen Kunst der Goldsucher, an den Stein der Weisen, an die Alchimie überhaupt zu denken; ja, die Hoffnung zu hegen, es möchte ihr nunmehr ein neues Leben beschieden sein. Das wäre jedoch eine Verkennung der Grundtatsache der radioaktiven Umwandlungen; der Tatsache, daß sie einzig und allein von selbst erfolgen, daß sie gänzlich unbeeinflusst bleiben durch äußere Eingriffe, sei es nun Druck oder Temperatur, seien es elektrische Kräfte oder chemische Reaktionen: ein Beweis, daß hier von außen nicht das mindeste zu machen ist; daß wir es hier mit einer Naturerscheinung zu tun haben, die nur Naturerscheinung ist und eine Überführung in die Technik prinzipiell nicht zuläßt. Es ist ja immer mißlich, negative Prophezeiungen auszusprechen, und man fügt vielleicht am besten vorsichtigerweise hinzu: sie besteht zurecht, so lange das zurzeit bekannte Tatsachenmaterial maßgebend bleibt; was etwa an ganz Neuem sich im Schoße der Zukunft birgt, darüber läßt sich natürlich nicht das Mindeste sagen.

33. Mit dem Vorstehenden ist die Mannigfaltigkeit dessen, was über die Materie zu sagen ist, selbstverständlich bei weitem nicht erschöpft. Es gibt noch eine große Anzahl von Problemen, Tatsachen und Theorien, welche geeignet erscheinen, das gewonnene Bild auszugestalten, ja sogar, es in einzelnen Zügen abzuändern. Nur zwei können und sollen hier kurz erwähnt werden. Erstens die Phasenlehre, die Gesamtheit der Versuche und Betrachtungen über das Zusammenbestehen von Materie in verschiedenen Formen, namentlich also in ihren verschiedenen Aggregatzuständen. So kann beispielsweise das Wasser entweder für sich als Eis, oder für sich als flüssiges Wasser, oder für sich als Dampf existieren. Es kann aber auch Eis mit Wasser zusammen bestehen, oder Eis mit Dampf, oder Wasser mit Dampf; und endlich können auch alle drei Formen in Berührung miteinander sich vertragen. Nur kommt es darauf an, die Bedingungen, unter denen das möglich ist, festzustellen und zum Charakter von allgemeinen Gesetzen zu erheben — eine Aufgabe, die in den

leichtvergangenen Jahrzehnten in reichem Maße gefördert worden ist. Die beistehende Figur wird das besser als viele Worte veranschaulichen. Wir haben hier eine Achse der Temperaturen (horizontal) und eine Achse der Drücke oder Spannungen (vertikal); wir sehen den „dreifachen Punkt“ oder Tripelpunkt, entsprechend der Möglichkeit des Zusammenbestehens aller drei Formen des Wassers (oder auch eines anderen Stoffes); um ihn herum aber

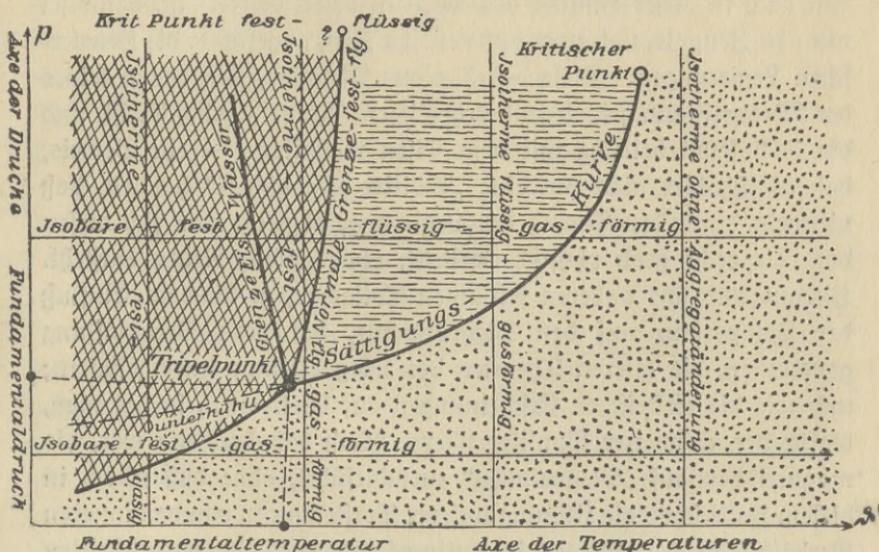


Fig. 15.

gruppieren sich die zweifachen und schließlich die einfachen Gebiete; von dem kritischen Punkt, wo flüssig und gasförmig ineinander übergehen, war schon früher die Rede.

Das andere Phänomen ist der Magnetismus der Materie. Daß einige wenige ihrer Vertreter, namentlich das Eisen, diesen Zustand in hohem Maße annehmen können, weiß man seit alten Zeiten; aber erst im Laufe des letzten Jahrhunderts hat man fest-

gestellt, daß es sich hier durchaus nicht um eine Spezialität, sondern um eine allgemeine Eigenschaft der Materie handelt, nur daß auch hier quantitativ die größten Unterschiede und außerdem qualitativ insofern Gegensätze bestehen, als es auch hier zwei Arten gibt, den positiven und den negativen Magnetismus, die man hier gewöhnlich als Paramagnetismus und Diamagnetismus bezeichnet, wozu dann noch, für die besonders kräftig erregbaren Stoffe, der Name Ferromagnetismus als dritter Typus hinzukommt. Wie geheimnisvoll auch in dieser Hinsicht das Verhalten der Materie ist, dafür sei nur ein Zeugnis, und zwar aus neuester Zeit, angeführt: die Heusler'schen Legierungen. Diese bestehen aus Metallen, von denen keines der Magnetisierung in irgend erheblichem Grade zugänglich ist, und die doch selbst beinahe mit dem Eisen wetteifern — ein Beweis, daß es sich hier nicht um eine „additive Eigenschaft“ handelt, daß vielmehr durch den Prozeß der Legierung, obgleich man sich diesen doch als recht grob physisch vorstellt, etwas völlig Neues entsteht. Hieraus und aus anderen seltsamen Tatsachen, z. B. dem Einfluß der Temperatur auf den Magnetismus, hat man Veranlassung genommen, die älteren Theorien des Magnetismus umzugestalten; und wie die elektrischen Erscheinungen auf Elektronen, so hat man, wofür der Schweizer Physiker Pierre Weiss bahnbrechend war, die magnetischen auf „Magnetonen“ zurückgeführt, ohne daß jedoch in diesem Falle schon die Klärung unserer Vorstellungen von den inneren Verhältnissen der Körper in entsprechendem Maße vorgeschritten wäre wie dort. Es möge daher an diesen Andeutungen genügen.

Über ein Problem gibt es doch noch, an dem wir, ehe wir unsere Betrachtungen abschließen, unmöglich vorbeigehen können, obgleich es nicht eigentlich die Materie betrifft, sondern etwas, wovon man vielleicht die Materie als einen besonderen Fall betrachten darf. Man spricht von Substraten oder Substanzen, Agentien oder Imponderabilien — alles das Namen für hypothetische Gebilde, die man im Laufe der Naturforschung einzuführen für gut fand. Sie sind meistens wieder von der Bildfläche verschwunden. Eine ent-

scheidende und noch jetzt nicht erledigte Rolle hat von ihnen nur eines gespielt: der Weltäther. Schon von Aristoteles seinem Weltbilde zugrunde gelegt, von Hüngens als Träger der Wellenbewegung, die wir Licht nennen, benutzt, hat er dann seinen Geltungsbereich immer mehr erweitert, und in neuerer Zeit die ganze große Mannigfaltigkeit der elektrischen, magnetischen und Strahlungsercheinungen beherrscht. Und das, obgleich man ihm zu diesem Zwecke die sonderbarsten Eigenschaften zuschreiben mußte: man mußte sagen, er gehöre dem festen Aggregatzustande an, und doch mußte man ihn über alle Vorstellung hinaus dünn annehmen; man mußte ihn als eine stetige Raumverteilung auffassen und doch auch wieder von Ätherteilchen sprechen; man mußte ihn zu absoluter Ruhe verurteilen und doch andererseits wieder tätig in die Prozesse eingreifen lassen — alles höchst unbefriedigende und anscheinend unlösbare Widersprüche. Mit der Zeit wurde aus dem Äther ein solches Uding, daß die Entschlosseneren unter den Naturforschern ihn kurzer Hand entthronten und überhaupt nichts mehr von ihm wissen wollten. Insbesondere gilt das von den Anhängern der uns schon begegneten Relativitätstheorie, die ja geradezu verbietet, von einem absolut ruhenden Äther zu sprechen. Andere wieder, besonders die Experimentatoren, können bei den Vorstellungen, zu denen sie die Ergebnisse ihrer Versuche verarbeiten, auch jetzt noch nicht vom Äther los, den sie als den Kitt ansehen, der die Körperelemente beziehungsweise die Elektronen zusammenhält und die Vermittlung zwischen ihnen übernimmt.

Will man völlig vom Äther loskommen, so bleibt nichts anderes übrig, als sich auf den Standpunkt der Energetik zu stellen und zu sagen: es gibt überhaupt nichts Reales außer der Energie. Alles andere muß auf sie zurückgeführt werden, also auch die Materie (davon war schon einmal die Rede) und ebenso der Äther. Wo wir vom reinen oder freien Äther reden, da haben wir normale Konfiguration von Energie; an den Stellen, wo Besonderheiten auftreten, denken wir uns Materie konzentriert. Alles läuft dann auf

ein räumliches Feld hinaus, indem die Energie mit der Zeit ihr Spiel treibt. Es gehört allerdings schon ein gut Teil persönliche „Energie“ dazu, sich dieses Weltbild als real vorzustellen; die große Mehrzahl selbst der eifrig bemühten Jünger der Naturforschung wird das Gefühl der Unbefriedigung nicht los werden, daß sich auf diese Weise Alles ins Abstrakte verliert, daß wir nichts Greifbares mehr in der Hand behalten. Aber so ist der unerbittliche Lauf der Dinge in der Geschichte der Wissenschaft: entweder, man bleibt beim Greifbaren stehen und verfolgt es bis in die verborgensten Schlupfwinkel des Mikrokosmos, dann bekommt man zwar ein anschauliches Bild der Welt, aber es wird über alle Maßen verwickelt; oder man stellt das Postulat der Einfachheit und Geschlossenheit in den Vordergrund, wie es die Energetik tut, dann hat man trotz allem, was einem über die Realität der Energie gesagt wird, doch das Gefühl, sich in einen abstrakten Formalismus zu verlieren.

Indessen wird sich kein verständiger Mensch, der ohnehin weiß, daß uns die letzten Dinge verschlossen sind und bleiben, hierdurch abhalten lassen, das Naturganze zu lieben und zu bewundern, und zu seinem Teile mitzuarbeiten an seiner Erfassung, Entschleierung und Bemeisterung.

Register.

- | | | |
|---|---|--|
| <p>Abstrakt 3.
 Äquivalentzahlen 51.
 Äther 143.
 Aggregatzustände 26.
 Alphastrahlen 133.
 Anton 106.
 Anode 106.
 Anodenstrahlen 122.
 Arbeit 44.
 Atom 53.
 Atomgewicht 92.
 Atomistik 49.
 Atommodelle 73
 Atomvolumen 92.
 Atomwärme 88.
 Auge 5.
 Avogadro'sches Gesetz 61.
 Avogadro'sche Zahl 62.</p> <p>Becquerelstrahlen 132.
 Beharrungsvermögen 12.
 Berührungselektrizität 97.
 Betastrahlen 133.
 Boyle'sches Gesetz 29.
 Brown'sche Bewegung 78.</p> <p>Chemische Umwandlung 47.</p> | <p>Dauerkonfiguration 9.
 Daniell'sches Element 104.
 Dichte 19.
 Dielektrizitätskonstante 98.
 Dissoziation 53, 110.
 Drehung 24.
 Dulong-Petit'sches Gesetz 91.
 Durchgang der Elektrizität durch Gase 114.</p> <p>Elastizität 25.
 Elektrischer Widerstand 99.
 Elektrische Schwingungen 99.
 Elektrisches Elementarquantum 112, 126.
 Elektrische Wellen 99.
 Elektrizität 96.
 Elektrizitätsleitung 98.
 Elektrizitätsstrahlung 98.
 Elektrolyse 105.
 Elektromagnetische Energie 44.
 Elektromotorische Kraft 99.</p> | <p>Elektronen 121.
 Elektronenstrahlen 123.
 Elektronentheorie der Spekt랄linien 130.
 Elementarladung 128.
 Elementarquantum der Elektrizität 112, 126.
 Emulsionen 75.
 Energie 43, 143.
 Energetik 143.
 Energiequantum 86.
 Erhaltung der Energie 45.
 Erhaltung des Stoffes 45.</p> <p>Feste Körper 26, 30.
 Fläche 6.
 Flüssige Kristalle 33.
 Flüssigkeiten 26, 30.</p> <p>Galvanische Elemente 104.
 Gammastrahlen 133.
 Gase 26, 28.
 Gaskonstante 89.
 Gasentladungen 114.
 Gefrierpunktserniedrigung 107.
 Gegenstand 9.</p> |
|---|---|--|

- Geschwindigkeit der Molekeln 57.
 Gesetz des Zufalls 59.
 Gesichtsraum 8.
 Gestalt 25.
 Gestaltsmodul 26.
 Gewicht 13.
 Größe 25.
 Halbwertszeit 137.
 Ideale Gase 28, 38.
 Ionen 106, 126.
 Ionenstrahlen 123.
 Ionisierung 115.
 Kalorie 88.
 Kanalstrahlen 122.
 Kapillarität 35.
 Kathode 106.
 Kathodenstrahlen 117.
 Kation 106.
 Kinetische Gastheorie 57, 88.
 Kinetische Masse 14, 125.
 Körper 9, 11.
 Kolloidale Lösungen 76.
 Kolloide 75.
 Kondensationskerne 127.
 Konkret 3.
 Kontaktelektrizität 97.
 Konvektionsstrahlen 71.
 Konvektionsströme 111.
 Kreis 14.
 Kristalle 31, 69.
 Kristalloide 75.
 Kritischer Druck 41.
 Kritischer Zustand 41.
 Kritische Temperatur 41.
 Ladung und Masse 113, 120.
 Lebensdauer der Elemente 137.
 Leitung 98.
 Linienserien im Spektrum 130.
 Lockere Massen 36.
 Lösungen 63, 103.
 Loschmidtsche Zahl 61.
 Magnetische Ablenkung der Strahlen 123.
 Magnetismus 141.
 Magnetonen 142.
 Masse 12, 16, 43, 125.
 Materie 2.
 Maxwell'sche Kurve 59.
 Molekel 50, 95.
 Molekulargeschwindigkeit 57.
 Molekularsphäre 88.
 Molekulartheorie 49.
 Molekulartheorie der Kristalle 70.
 Molekularwärme 88.
 Ohmsches Gesetz 100.
 Osmose 64.
 Osmotischer Druck 64, 108.
 Periodisches System der Elemente 92.
 Phasenlehre 140.
 Plancksches Gesetz 86.
 Ponderabel 15.
 Quantentheorie 86, 91, 95.
 Quasi-isotrop 32.
 Radioaktivität 49, 132.
 Radiumstrahlen 134.
 Raum 7.
 Raumgitter 69.
 Reibungselektrizität 96.
 Relativitätsprinzip 12, 143.
 Röntgenstrahlen 71.
 Rotation 24.
 Sättigungsstrom 114.
 Scheinbare Masse 43, 125.
 Schmelzung 40.
 Schwarzer Körper 84.
 Siedepunktserhöhung 107.
 Sinnesempfindungen 5.
 Spezifische Maße 19.
 Spezifisches Gewicht 20.
 Spezifische Wärme 42, 88, 94.
 — — bei konstantem Druck 89.
 — — bei konstantem Volumen 89.
 Spektrallinien 129.
 Spektrum 84, 128.
 Stefansches Gesetz 85.
 Strahlung 84, 98.
 Suspensionen 75.
 Symmetrie 33.
 Tastraum 7.
 Tastsinn 5.

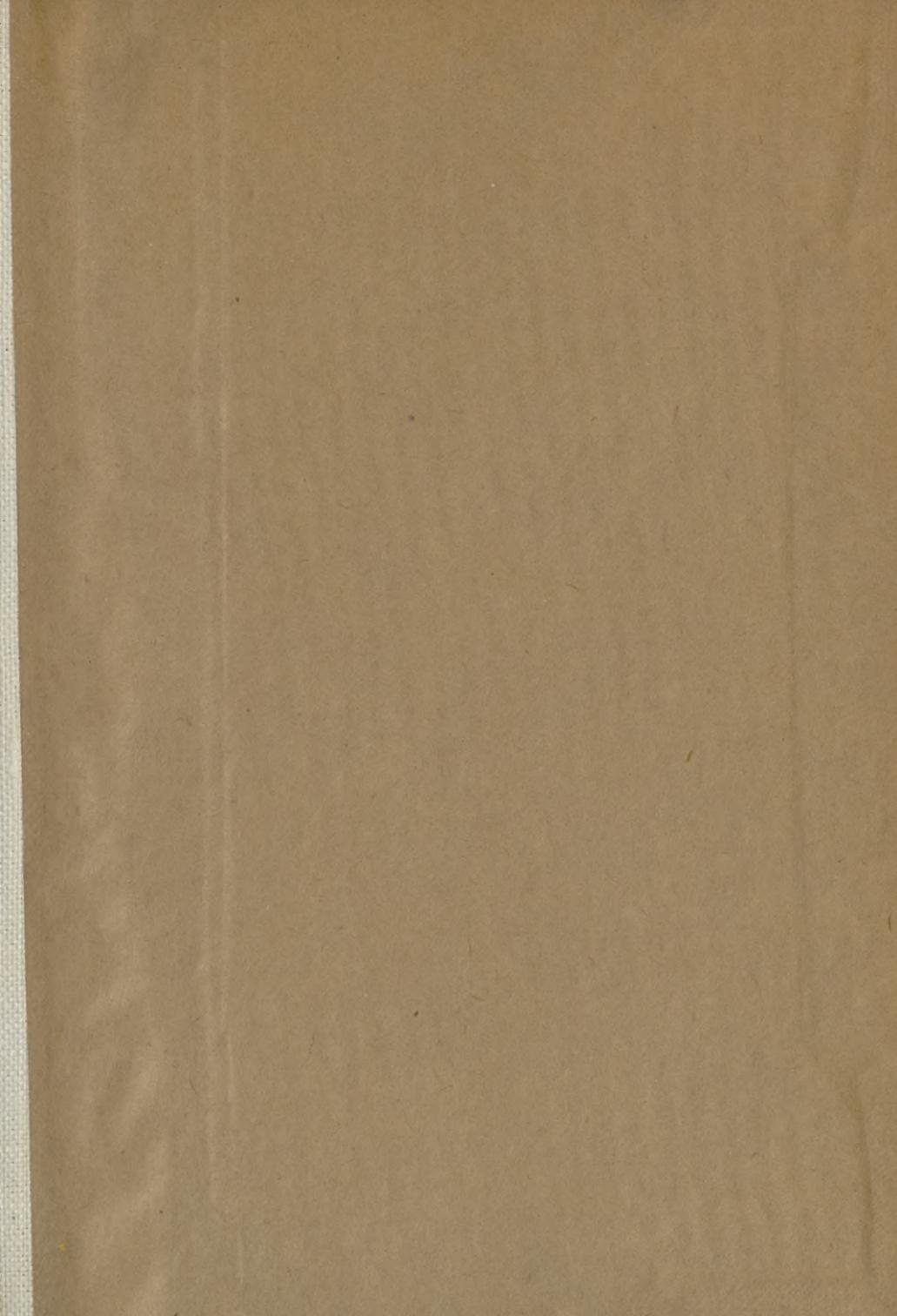
Temperatur 37.	Verdünnte Lösungen	Wanderung der Ionen
Temperaturkoeffizient	63.	106, 111.
des Widerstandes 102.	Verhältnis der Ladung	Weglänge der Molekeln
Thermometer 37.	zur Masse 113, 120.	60.
Träge Masse 12.	Verhältnis der spez.	Weltäther 143.
Trägheit 11.	Wärmen 89.	Widerstand 9, 99.
Trägheitsmoment 24.	Verschiebung 24.	Wiensches Gesetz 85.
Translation 24.	Volumenmodul 26.	Wirkungsquantum 95.
Variationskurve 59.	Wärme 42.	Zeit 8.
Verdampfung 40.	Wärmekapazität 43, 88.	Zerfall der Elemente 136.

BIBLIOTEKA FIZYKOTECZNICZNA
KRAKOW

Buchdruckerei Richard Gahn (S. Otto) in Leipzig.

8 - 98





BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Krakowskiej

I423

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000295995