



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000294806

x
292

Elektrische Maschinen
und
Verkehrs-Maschinen,
ihr Werden und Wesen.

Von

Oberingenieur A. ROTTH.

St. 27040

2. Auflage.



7/10



Berlin.

Verlagsbuchhandlung ALFRED SCHALL.

Kgl. Preuss. u. Herzogl. Bayer. Hofbuchh.

Verein der Bücherfreunde.

St. 7

33.

II 5342



Akc. Nr.

4982/50

Vorwort

Dieses Buch schließt sich in selbständiger Form seinem Inhalte nach an das 1904 erschienene Buch „Vom Werden und Wesen der Maschine“ an, das die Motoren behandelte. Wie in dessen Vorworte gesagt war, sollten in dem folgenden Buche die elektrischen Maschinen und die ortverändernden Maschinen behandelt werden. Wenn diese letztere Maschinengattung im Titel als „Verkehrsmaschinen“ bezeichnet ist, wiewohl sie hier auch die Maschinen zum Fördern von Flüssigkeiten und Gasen umfaßt, so mag diese Erweiterung des Begriffes über den üblichen Umfang hinaus zugunsten der kurzen deutschen Benennung entschuldigt werden.

Zweck und Behandlungsweise des vorliegenden Buches sind dieselben, wie bei dem vorhergehenden. Es will dem gebildeten Laien Anregung und Anleitung geben zur Erkenntnis der bestimmenden Grundgesetze wichtiger Maschinengattungen, im Anschlusse an ihre Entwicklung und in rein begrifflicher Darstellung, unter Verzicht auf jede Formelsprache.

Dem Plane gemäß ist auch hier der beschreibende Teil möglichst beschränkt, da der Text als Anknüpfung an die praktische Anschauung des Lesers gedacht ist. Nur im ersten Kapitel erschien bei der Jugend der elektrischen Maschinen die Vorführung einiger modernen Formen nicht überflüssig.

Das vorhergehende Buch hat vielfach, auch in eigentlichen Fachzeitschriften, sehr freundliche Beurteilung erfahren, zur aufrichtigen Freude des Verfassers, der dem vorliegenden Buche nur eine gleiche wohlwollende Aufnahme wünschen kann.

Berlin, August 1906.

Der Verfasser

Inhalt

Erstes Kapitel

Elektrische Maschinen

	Seite		Seite
Magnetische Wirkungen	2	Zusammenhang der Erscheinungen,	
Maß der magnetischen Kraft, Cou-		Maßsysteme	70
lombs Gesetz	9	Ausbildung der Dynamomaschine,	
Gauß' magnetische Messungen	13	magnetischer Kraftfluß	78
Elektrische Grunderscheinungen	14	Schaltungen der Gleichstrom-	
Coulombs Gesetz	18	maschine	86
Galvanis Entdeckung, Voltas Ar-		Hefner-Altenecks Trommelanker	88
beiten	19	Magnetgestelle, Erregerwicklung	93
Oerstedts Entdeckung des Elektro-		Ankerrückwirkung	97
magnetismus	23	Stromwendung in den Anker-	
Biot-Savartsches Gesetz	25	leitern	100
Ampères Arbeiten	28	Mehrpolige Maschinen	104
Elektromagnet	30	Gleichstrommotoren	109
Ohms Gesetz	30	Homopolarmaschine	113
Siemens' Widerstandeinheit	35	Akkumulatoren	114
Beginn der technischen Anwen-		Wechselstrommaschinen	115
dungen des Elektromagnetis-		Spannung- und Stromkurven,	
mus, elektromagn. Motoren	36	Oszillograph	124
Michael Faraday	40	Leistung des Wechselstromes,	
Kraftlinien-Bilder	42	Phasenverschiebung	126
Induktion, Lenz' Gesetz	50	Transformator	135
Magnetelektrische Maschine, Strom-		Kondensator	139
kurve	56	Wechselstrommotoren	141
Siemens' Doppel T-Anker	59	Drehstrommotor	145
Grammes Ringanker	61	Einphasenmotoren	156
Werner Siemens, Dynamoelek-			
trische Maschine	65		

Zweites Kapitel

Maschinen zum Fördern von Flüssigkeiten und Gasen

	Seite		Seite
Wasserschöpfmaschinen	158	Einzelheiten der Kolbenpumpen	169
Kolbenpumpen	163	Wasserheber mit Druckluft-Betrieb	180
Hydrostatisches Paradoxon	167	Luftpumpen, Kompressoren	183

IV

	Seite		Seite
Kältemaschinen	191	Stoßheber	206
Zentrifugalpumpen	194	Strahlpumpen	208
Zentrifugalkraft	195	Hydraulischer Druck	211
Einzelheiten der Zentrifugalpumpen	202		

Drittes Kapitel

Fuhrwerke

	Seite		Seite
Drais' Fahrrad	216	„Selbstfahrer“	241
Schubkarren	218	Zweirad, Stabilität	244
Erfindung der Räderfuhrwerke	219	Dampfwagen	250
Reibung	221	Automobilmotoren	255
Einachsiger und zweiachsiger Wagen	225	Zwischen-Mechanismen	259
Lenkbarkeit und Schmiegsamkeit, Gestelle	228	Automobil - Gestelle, Lenkbarkeit, Bremsen	268
Steifes Rad und schmiegsames Rad	233	Elektromobilen	269
Leistung der Zugtiere, Einfluß der Fahrbahn	237	Schleppzug	272

Viertes Kapitel

Schienenfuhrwerke

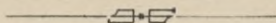
	Seite		Seite
Schienenbahnen	275	Bremsen	292
Trevithik	277	Fahrbahn	302
Stephenson	279	Straßenbahnen	304
Lokomotivformen	282	Elektrische Bahnen	306
Schema der Lokomotive	284	Elektr. Bahnmotoren, Wagen	308 309
Federsysteme	286	Regelung	313
Steuerungen	287	Bremsen, Sicherungen	316
Bewegungen, Zugkraft, Widerstand der Lokomotive und Wagen	291	Leitungen, Pufferbatterien, Netze	319
Virtuelle Länge der Eisenbahnen	292	Wechselstrombahnen	323
		Elektr. Lokomotive von Heilmann	325

Fünftes Kapitel

Vom Schiffswesen

	Seite		Seite
Wissenschaft und Kunst	326	Bewegungen des Schiffes	346
Schwimmen	328	Widerstand der Schiffe	349
Schwerpunkte	331	Schiffsformen	355
Stabilität	333	Froudes Versuche	357
Metazentrum	336	Widerstandleistung	362
Schiffszeichnung, Displacement	339	Ruderfahrzeuge	362

	Seite		Seite
Rudern, Schiffspropeller im all-		Joseph Ressel	396
gemeinen	366	Theorie der Schraube	396
Segel	370	Moderne Schrauben	401
Segelplan	376	Ericssons Schraube, Torpedo	404
Steuer	377	Eingekapselte Schrauben	406
Schiffsmotoren, Propellerarten	378	Motorboote	407
Schaufelrad	381	Reaktionpropeller	407
Fulton	382	Maschinenleistung, Geschwindig-	
Theorie der Propeller	384	keit	413
Rad mit beweglichen Schaufeln	389	Besondere Schiffsformen, Pictets	
Schraube	391	Boot	414
Frühere Versuche	394	Verhältnis von Länge und Breite	416



:: :: Alle Rechte vorbehalten, :: ::
insbesondere das der Uebersetzung

Elektrische Maschinen



Elektrische Maschinen.

Die Zeit ist im Schwinden begriffen, wo jeder Fortschritt der Technik von Vielen als unmittelbarer Maßstab der steigenden Kultur überhaupt genommen wurde. Solche Ueberschätzung war begreiflich und entschuldbar für das vorige Jahrhundert, das die beispielloos schnelle Entwicklung der Technik und damit eine Aenderung unserer gesamten äußeren Verhältnisse zeitigte. Jugendllicher Ueberschwang ist notwendig mit stürmischem Vordrängen verbunden. Wie aber die begeisterte Zuversicht der Encyclopädisten-Zeit schnell vergangen ist, die in einer besonders fruchtbaren Periode der exakten Naturwissenschaften alles Sein und Geschehen der unbelebten und belebten Welt in mathematischen Gleichungen darstellen zu können hoffte, zu denen nur die Konstanten zu bestimmen seien, so wird allmählich Platz für eine ruhigere Betrachtung der Technik und ihres Einflusses auf die Kultur im feineren Sinne des Wortes. Wie es müßig ist, nach dem Endzwecke einer Wissenschaft oder Kunst zu fragen — die Frage können wir garnicht beantworten, weil wir keinen Standpunkt außer uns haben — so ist die Schätzung der Technik nach ihrem praktischen Nutzen für die Menschheit ganz unbegründet, schon weil wir dann erst mal eine Erläuterung dafür geben müßten, was unter „praktischem Nutzen“ verstanden sein soll. Unser Forschen nach Grund und Ziel einer höheren Betätigung endet an den Grenzen unserer Erkenntnis überhaupt, für den uns eingepflanzten Drang nach Erkenntnis und Gestalten gibt es keine Erklärung. Die fortschreitende Teilung der Arbeit läßt unterscheidende Bezeichnungen für die sich sondernden Tätigkeiten eintreten, in Verkennung ihres gemeinsamen Ursprungs bringt man oft Wissenschaft und Kunst in Gegensatz zu einander und glaubt dieselben Gegensätze zwischen diesen beiden und der Technik zu finden, die doch vielleicht — im weiteren Sinne — gerade das Bindeglied zwischen ihnen ist, ein Ausdruck sowohl des Triebes zum Schaffen wie nach der Erkenntnis des

Zusammenhanges der Erscheinungen. — Wer in dieser Weise über die nächsten Anforderungen des Tages hinaus eine veredelnde Auffassung unseres Tuns sieht, wird besonders gern seinen Blick auf Gebiete lenken, die im Einzelnen allmählich ihre eigenen Wege gehen, dauernd aber in gegenseitigem Austausch befruchtend aufeinander wirken. Ein solches Gebiet ist die Elektrizität. Zuerst aus den unscheinbarsten Beobachtungen im Studierzimmer und Laboratorium unter zweckdienlichem Herbeiführen bestimmter Erscheinungsformen systematisch entwickelt, dann für besondere Zwecke benutzt und von zwerghaften Wirkungen allmählich zu mehrtausendpferdigen Leistungen gesteigert — so bietet sich Elektrizität in ihrer jetzigen Entwicklung zugleich ein Bild harmonischen Zusammengehens von Forschung und Verwertung ihrer Ergebnisse, wie sie eine dem wissenschaftlichen und künstlerischen Empfinden gleichwertige Bedriedigung gewährt, Naturkräfte geweckt und in größtem Maßstabe beherrschen gelernt zu haben.

Die elektrischen Maschinen, mit denen wir uns in den folgenden Blättern beschäftigen wollen, beruhen auf der Wechselwirkung von Erscheinungen, die, wiewohl ganz eng verwandt, bis jetzt noch in ihren Formen unterschieden werden, der magnetischen und elektrischen. Bei den elektrischen Maschinen, wie sie hier verstanden werden, spielen nur die großen Elektromagnete eine Rolle, es ist aber für die Entwicklung der Begriffe zweckmäßig, vor Eingehen auf die elektrischen Erscheinungen kurz an die vorhergehenden Erkenntnisse vom Magnetismus zu erinnern.

I.

Magnetische Wirkungen wurden zuerst von den Griechen an gewissen Eisenerzen von Magnesia beobachtet. Der Fundort hat die Bezeichnung für die Erscheinung geliefert. In Europa ist der Magnetstein vermutlich seit dem 11. Jahrhundert allgemeiner bekannt geworden, viel länger schon den Chinesen, nicht nur in seiner Eigenschaft, leichte Eisenstücke anzuziehen, sondern auch, an einem Faden aufgehängt, eine bestimmte unveränderliche Richtung anzunehmen. Bequemer zu beobachten und zu benutzen wurden die magnetischen Wirkungen, seitdem man gelernt hatte, Stäbchen von hartem Stahl durch Bestreichen in Magnete zu verwandeln, wodurch die ungefähr seit 1300 gebräuchliche einfache und handliche Form des Kompasses entstand mit der auf einer Spitze

schwebenden leichten Magnetnadel. Die nähere Erforschung des Magnetismus begann aber erst mit dem Engländer Gilbert (1540 bis 1603), der seine langjährigen Beobachtungen um 1600 in seinem berühmten Werke „De magnete“ niederlegte.

Die leichte Herstellung einfacher Magnetstäbchen vermittelt schon dem Kinde einige Anschauung von der magnetischen Wirkung, und mit den einfachsten Mitteln kann man diese Anschauung planmäßig erweitern. Die Anziehungskraft des Magneten geht von seinen Enden aus, den Polen, und äußert sich besonders auf weiches Eisen, auch noch auf einige andere Körper, wie Nickel, Kobalt, Mangan, wiewohl in viel geringerem Maße. Neuerdings hat man auch magnetische Eigenschaften an gewissen Legierungen festgestellt, deren Bestandteile einzeln keine Wirkung zeigen.*) Die magnetische Kraft wirkt unverändert durch alle Körper hindurch, sofern sie nicht, wie also vornehmlich Eisen, selbst magnetisch reagieren. Weiches Eisen wird von beiden Polen des Magneten angezogen, die Pole von zwei Magneten wirken aber entweder anziehend oder abstoßend auf einander, und wenn man die Pole beider Magnete nach den gleichen Wirkungen auf eine frei schwebende Magnetnadel unterscheidet, so erkennt man sofort, daß die gleichwirkenden Pole sich abstoßen, und umgekehrt. Da ferner die Kompaßnadel sich immer in dieselbe Richtung einstellt, und zwar annähernd in den geographischen Meridian, so muß man die Erde selbst als einen Magneten betrachten, der richtend auf jeden frei schwebenden Magneten wirkt. Die magnetischen Pole der Erde fallen nicht mit den geographischen zusammen, liegen aber in deren Nähe. Man bezeichnet nun den nach Nord weisenden Pol eines Magneten auch als Nordpol, wiewohl das nach dem Gesetze der Anziehung ungleichnamiger Magnetpole nicht folgerichtig ist. Indessen ist die Benennung der Magnetpole lediglich Sache des Uebereinkommens und deshalb beibehalten worden. Ein Stäbchen von weichem Eisen, das mit einem Ende an einem Pole eines Stabmagneten hängt, wird selbst zu einem Magneten und bildet mechanisch wie magnetisch eine Verlängerung des Magnetpoles, wie man sich sehr leicht überzeugen kann. Dieser Tatsache trägt in der modernen Theorie des Magnetismus der Begriff der magnetischen Leitfähigkeit Rechnung,

*) Auch magnetisch widerstrebende (diamagnetische) Körper sind bekannt, wie Antimon, Wismut, Kupfer, Gold u. a. m., ihre spezifische Wirkung ist aber so gering, dass sie in der Technik keine Rolle spielt.

der Fähigkeit also, die magnetische Wirkung durch einen vorgeschalteten Eisenweg in beliebige Richtung zu lenken. Da das Gesetz der Anziehungskraft zwischen ungleichnamigen Polen auch für die Pole eines einzigen Magneten gilt, so läßt sich aus weichen Eisenstücken eine Verbindung der Pole eines Stabmagneten herstellen, wobei die Verbindungstücke kettenartig aneinander haften, eine Reihe von mit den ungleichen Polen zusammenstoßenden Magneten bildend. Bei einem Magneten in Hufeisenform genügt zur Verbindung der Pole ein einziges Eisenstück, dem man den Namen „Anker“ beigelegt hat.

Das Verhalten frei beweglicher Stabmagnete unter der Wirkung des Erdmagnetismus und gegeneinander kann man sehr hübsch beobachten an magnetisierten Nähnadeln, die, etwas eingefettet, auf einer Schale Wasser schwimmen. Es wird dabei sehr anschaulich, wie von den Polen Kräfte entgegengesetzter Richtung ausgehen, die den Nadeln verwickelte Stellungen erteilen. An einer einzelnen Nadel, die sich zunächst in den magnetischen Meridian einstellt, kann man auch beobachten, wie durch einen horizontal in gewissem Abstände darüber gehaltenen Magnetstab mit entgegengesetzt liegenden Polen die Wirkung des Erdmagnetismus aufgehoben wird, wie auch zwei verbundene gleiche und gleichmagnetisierte Nadeln bei verschiedener Pollage sich gegenseitig magnetisch neutralisieren.

Wie andere physikalische Erscheinungen hat man sich auch die magnetischen zuerst durch unwägbarere Flüssigkeiten hervorgerufen gedacht, im Besonderen so, daß zwei Flüssigkeiten entgegengesetzter Wirkung in magnetisierbaren Körpern vorhanden seien, die, durch geeignete Behandlung des Trägers vorübergehend oder dauernd geschieden, sich mit einer gewissen Kraft wieder zu vereinigen streben, teils durch den Magnetkörper selbst, teils auf mehr oder weniger gekrümmten Bahnen durch das umgebende Medium. Diese Flüssigkeithypothese ist zwar, wie andere ähnliche in der Physik, längst aufgegeben, sie ist aber immer noch nützlich zur praktischen Uebersicht und Beschreibung der magnetischen Erscheinungen. Ebenso wenig ist nach jetzigen physikalischen Begriffen die Annahme einer unvermittelten Fernwirkung magnetischer Art haltbar. Wir müssen uns vielmehr die magnetischen Wirkungen überhaupt als eigentümliche Spannung- und Bewegungszustände der kleinsten Körperteile und eines hypothetischen Zwischenmittels,

des Aethers, vorstellen, und wie auf anderem Gebiete so ist auch hier die moderne Physik eifrig tätig, Konfigurationen aufzustellen, um das unseren Sinnen nicht unmittelbar Wahrnehmbare durch Wirkungen begreiflich zu machen, die uns durch Beobachtungen größerer Objekte geläufig sind. Als eine Vorstufe zu der feineren Erkenntnis, aber auch als unentbehrliches Mittel zum Versinnlichen hat man die mechanischen Bilder und Analogieen anzusehen, die sich unwillkürlich einstellen, wenn die eigentlichen Gründe der Erscheinungen uns nicht erkennbar sind. Ohne irgendwie den Anspruch zu erheben, eine wirkliche Erklärung dieser Gründe zu sein, führen die Analogieen, so grob sie auch sein mögen, nach Maßgabe ihrer mehr oder weniger glücklichen Wahl zur Kenntnis weiterer Erscheinungsformen und ihrer Beherrschung in bestimmter Richtung und sind so lange berechtigt, als sie diesen Dienst zu tun vermögen. — In diesem Sinne sind alle die mechanischen Bilder zu verstehen, von denen wir Gebrauch machen werden.

Die Vorstellung zweier Fluida entgegengesetzter Wirkung, die in magnetisierbaren Körpern festgehalten und durch den Magnetisierungsvorgang getrennt werden, trägt der Tatsache Rechnung, daß sich nicht ein isolierter Nordpol oder Südpol herstellen läßt, daß beide vielmehr in gleicher Stärke sich in dem magnetisierten Körper ausbilden. Die Wirkung einzelner Pole kann man nur für deren nähere Umgebung einigermaßen verwirklichen, etwa vermittelst stricknadelartiger Magnetstäbe. Eine andere Vorstellung vom Wesen des Magnetismus gründet sich auf die oben schon angedeutete Beobachtung mit einer Anzahl kettenartig zusammenliegender Eisenstäbe, die durch magnetische Beeinflussung von den Enden aus sämtlich zu Magneten werden. Man denkt sich darnach einen magnetisierbaren Körper als gebildet aus kleinsten Elementarmagneten, die zunächst regellos durcheinander liegen, ihre magnetische Kraft also gegenseitig aufheben, durch den Magnetisierungsvorgang aber alle im gleichen Sinne gerichtet werden, wobei sich alle magnetischen Kräfte in dieser Richtung addieren. Bei hartem Stahle behält die Mehrzahl der Elementarmagnete auch nach Aufhören des richtenden Zwanges die gleichsinnige Lage bei, einen Dauermagneten bildend, bei weichem Eisen kehrt die Mehrzahl wieder in den zwanglosen ungeordneten Zustand zurück. Beide Vorstellungen aber führen unmittelbar zu dem Begriffe einer beim Magnetisieren aufzuwendenden Arbeit und damit einer in

dem magnetisierten Körper angehäuften Energie. Am unmittelbarsten werden diese Begriffe anschaulich bei der ersten Vorstellung, da die Fluida entgegen ihrer gegenseitigen Anziehung getrennt werden müssen, wobei sie umsomehr Arbeit erfordern, also umsomehr Energie aufspeichern, je weiter die Trennung sich vollzieht. Ein mechanisches Analogon zu diesem Vorgange kann man in der Dehnung einer elastischen Schnur finden. Weiter wird bei dieser Vorstellung die Tatsache begreiflich, daß der Grad der Magnetisierung, immer langsamer zunehmend, bald seine Grenze findet, ferner, daß die magnetischen Pole, also die Ausgangspunkte der größten magnetischen Kraft, nicht genau mit den körperlichen Enden des Magneten zusammenfallen, sondern innerhalb etwas hinter den Enden liegen, um so weiter zurück, je geringer die Länge des Magnetstabes im Verhältnis zu seinem Querschnitte ist.

Die in der Nähe der Magnetenden angehäuften Mengen von Nord- und Südmagnetismus wirken auf einen einzelnen magnetischen Pol (annähernd verwirklicht durch den einen Pol eines sehr langen und dünnen Magnetstäbchens) abstoßend bzw. anziehend, also einen einzelnen Nordpol in der Richtung bewegend vom Nordpol des betrachteten Magneten zum Südpol. Man ist übereingekommen, diese Richtung, in der sich ein nordmagnetisches Teilchen zu bewegen strebt, als positiv zu bezeichnen. Die Größe und Richtung der bewegendenden Kraft in einem beliebigen Punkte der Umgebung ergeben sich als Resultierende der Abstoßung seitens des Nordpols und der Anziehung seitens des Südpols. Die Bahnen gleicher magnetischer Kraft in der Umgebung des wirkenden Magneten sind Kurven, die von Pol zu Pol laufen und durch Eisenfeilicht auf einem Kartonblatte, unter dem der Magnet sich befindet, zur Anschauung gebracht werden können, wie in jedem Lehrbuche der Physik mitgeteilt wird. In die Richtung der magnetischen Kraft an beliebigem Orte stellt sich auch eine kleine Magnetnadel ein, genau wie die Kompaßnadel in die Richtung der erdmagnetischen Kraft. In der Elektrotechnik kommen vornehmlich sehr starke magnetische Felder *einer* Richtung in Anwendung, und gewöhnlich erfordert nur genaueres Eingehen auf gewisse Einzelheiten die Behandlung von Feldern mit gleichzeitiger erheblicher Aenderung der Stärke und Richtung. Für unsere Zwecke sind deshalb solche, ohnehin schwierigeren, in Einzelheiten eingehende Betrachtungen entbehrlich. Den ganzen Bereich der magnetischen

Wirkung nennt man ein magnetisches Feld, dessen Stärke nach der Kraft bemessen wird, die ein erdmagnetischer Pol von der Stärke „1“ in ihm erfährt. Auf die Definition dieses Einheit-Poles kommen wir nachher zurück.

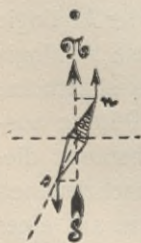
Wir sind damit schon von der bloß qualitativen Betrachtung der magnetischen Eigenschaften zu der Frage nach der quantitativen Bestimmung der Wirkung übergeleitet. Diese Bestimmung hat den Physikern besondere Schwierigkeiten bereitet, die einmal aus der geringen Größe der magnetischen Kräfte folgten, wie man sie früher nur herzustellen vermochte, namentlich aber aus der Unmöglichkeit, Magnetismus *einer* Art — nord- oder südmagnetisch — für sich herstellen und in genau bestimmter Anordnung an einen Körper zu binden. Der französische Physiker Coulomb hatte im letzten Viertel des 18ten Jahrhunderts seine berühmten Versuche über die elektrische Anziehung und Abstoßung gemacht, die er mit seiner Drehwaage in bis dahin unbekannter Genauigkeit durchführen konnte, da sich, im Gegensatze zum Magnetismus, Elektrizität einer Art getrennt auf ein Kügelchen bringen, und dessen Kraft gegen ein gleichgeladenes mit dem zu diesem Zwecke geschaffenen feinen Geräte messen läßt. Coulomb hatte bewiesen, daß die von einem Punkte ausgehende elektrische Kraft mit dem Quadrate der Entfernung abnimmt, also nur noch ein Viertel beträgt, wenn sich der Abstand verdoppelt. Eines derartigen Beweises bedürfen wir jetzt nicht mehr, da die weitere Forschung Tatsachen ergeben hat, die umgekehrt das Coulomb'sche Gesetz als Folge erscheinen lassen. Coulomb schloß nun aus der Analogie auf ein gleiches Gesetz für den Magnetismus, und diese Analogie wird auch durch das früher von Newton entdeckte allgemeine Gravitationsgesetz nahe gelegt. Wenn die von einem Punkte ausgehende Kraft nach allen Richtungen in demselben Abstände dieselbe Größe hat, also überall auf einer um den Punkt beschriebenen Kugel gleich ist, so darf geschlossen werden, daß sie auf einer Kugel von doppeltem Radius nur ein Viertel wie vorher beträgt, weil sich die Gesamtwirkung nunmehr auf eine viermal so große Oberfläche verteilt. Annähernd kann man auch in der Tat das auf den Magnetismus übertragene Gesetz von Coulomb nachprüfen mit Hülfe von sehr schlanken Magnetstäbchen, deren Pole also verhältnismäßig sehr großen Abstand von einander haben, womit für die nähere Umgebung eines Poles die Wirkung des entgegen-

gesetzten unerheblich wird. So weit vorgeschritten, konnte man wenigstens zu einer Definition der Polstärke in mechanischem Maße übergehen und nannte Einheitpol oder Einheit des Magnetismus einen Pol oder eine magnetische Menge, die im Abstände „1“ eine Kraft „1“ auf eine ihr gleiche ausübt. Der Wert der so definierten magnetischen Einheit ist selbstverständlich von den gewählten Einheiten der Kraft und der Länge abhängig.

Angenommen nun, man könnte Polstärken in der angenommenen Einheit unmittelbar richtig messen, so könnte man auch die Stärke ausgedehnterer magnetischer Felder damit bestimmen, beispielweise die erdmagnetische Kraft an einem beliebigen Orte. Die Richtung dieser Kraft ist durch frei schwebende Magnete mit jeder gewünschten Genauigkeit festzulegen. Die erdmagnetische Kraft ist im allgemeinen nicht parallel zur Erdoberfläche, sondern stark zu ihr neigt, wir beachten und benutzen in der Regel aber, wie in den gewöhnlichen Kompassen, nur ihre horizontale Komponente, auf die wir uns auch hier beschränken wollen.

Eine horizontal schwebende Magnetonadel wird im ganzen durch die erdmagnetische Kraft nicht von der Stelle gerückt, weil die beiden gleichen Pole im Erdfelde gleiche aber entgegengesetzte Kräfte erfahren. Die Nadel wird aber gedreht, wenn man sie aus ihrer Ruhelage im magnetischen Meridian abgelenkt hat. Denn nunmehr wirken die entgegengesetzten magnetischen Zugkräfte

in demselben Sinne drehend auf die Nadel (Fig. 1) und zwar wird ersichtlich die Drehkraft um so größer, je weiter die Nadel aus dem magnetischen Meridiane N-S abgelenkt war, am größten, wenn sie senkrecht dazu steht, denn dann sind die Hebelarme, an denen die beiden konstanten magnetischen Polkräfte in Bezug auf den Drehpunkt wirken, am größten. Ein solches Drehmoment können wir mit einem Geräte



Figur 1. nach Art einer feinen Wage messen. Da wir nun unserer Annahme nach die Polstärken kennen und ferner annehmen wollen, daß auch die Pole mit den Spitzen der Nadel zusammenfallen, womit also ihr Abstand vom Drehpunkte gegeben wäre, so würde ohne weiteres die horizontale Komponente der erdmagnetischen Kraft zu berechnen sein. Oder umgekehrt, wenn diese schon bekannt wäre, so wäre aus dem gemessenen Dreh-

momente der Nadel die Polstärke zu berechnen. Derartige Messungen, wie hier der Vollständigkeit wegen bemerkt sein mag, werden bequemer und genauer nach der sogenannten Schwingungsmethode ausgeführt. Die Nadel vollführt nämlich nach einer Ablenkung Schwingungen um die Gleichgewichtslage, wie ein Pendel unter Einfluß der Schwerkraft, und das Gesetz für diese Schwingungen ist leicht abzuleiten, die Schwingungsdauer ist in bestimmten Grade abhängig von der Größe und Verteilung der Nadelmasse, von der Polstärke, dem Polabstande und der Stärke des Erdfeldes.

Während aber mit Hülfe eines Pendels von gegebenen Abmessungen die Schwerkraft bezw. die Beschleunigung durch sie grundsätzlich leicht gemessen werden kann (die Schwierigkeiten liegen nur in der feinen Ausführung), weil alle Größen mit Ausnahme der zu messenden selbst von vornherein bestimmbar sind bezw. durch die Beobachtung erhalten werden, haben wir im vorliegenden Falle drei unbekannte Größen, Polstärke, Polabstand und die zu messende Stärke des Erdfeldes, denn wir hatten ja die Kenntnis der beiden ersteren nur vorläufig vorausgesetzt, um den Gang der Meßmethode zu erläutern.

Wie oben schon erwähnt, fallen die magnetischen Pole einer Nadel nicht genau mit den körperlichen Enden zusammen. In der Tat kann man den Polabstand eines Magneten nur annähernd bestimmen. Diese Größe ist für sich also überhaupt nicht für unsern Zweck brauchbar. Wir müssen deshalb suchen sie in Verbindung mit einer andern Größe zu erwerten, und dazu bietet die vorher geschilderte Messung des größten mechanischen Drehmomentes der Nadel im Erdfelde einen Fingerzeig. Dieses Drehmoment ist das Produkt aus den drei Größen Polstärke, Polabstand und Stärke des Erdfeldes. Betrachtet man das Produkt aus den ersten beiden, Polstärke und Polabstand für sich, so kann man ihm eine selbständige Bedeutung beilegen. Es ist dann gleichgültig, welche Werte die beiden einzelnen Größen haben, wenn nur ihr Produkt erwertbar ist, denn dann bliebe ja nur noch die zu messende Stärke des Erdfeldes als Unbekannte übrig. Wesentlich ist also, ob wir auf irgend eine Weise das fragliche Produkt finden können, dem man die besondere Bezeichnung „magnetisches Moment“ der Nadel gegeben hat.

Dieses magnetische Moment ist ohnehin maßgebend für die Wirkung eines Magneten, das wird schon wahrscheinlich durch

die Entstehungsweise des Magneten, wie wir sie oben betrachtet haben. Die Wirkung eines längeren Magneten nach außen muß bei derselben Polstärke offenbar größer sein wie die eines kürzeren, weil die Scheidung der Magnetismen auf eine längere Strecke erfolgt ist, oder nach der andern Vorstellung, weil mehr Magnete in demselben Sinne gerichtet werden. Der längere Magnet stellt deshalb einen größeren Energievorrat dar. Unmittelbar leuchtet aber die größere Wirkung eines längeren Magneten ein, wenn man sie auf einen einzelnen freien Pol bezieht, der in seine Nähe gebracht wird. Ein einzelner Nordpol wird von dem Nordpole des Magneten abgestoßen, von dem Südpole angezogen, und diese Kräfte heben sich um so mehr auf, je näher die Magnetpole einander sind, und umgekehrt. In Rechnungen, wie in der auf Figur 1 bezogenen und ähnlichen erscheint deshalb immer das Produkt aus Polstärke und Polabstand, das magnetische Moment. Tatsächlich sind auch beide Größen einzeln nur mathematische Fiktionen, bestimmbar bleibt immer nur ihr Produkt.

Es wird sich also darum handeln, eine Beziehung des magnetischen Momentes der Magnetnadel, deren mechanisches Drehmoment im Erdfelde wir schon gemessen hatten, in einer anderen Versuchsanordnung zu finden, um in Verbindung mit der ersten das fehlende Bestimmungstück zu erwerben. Dazu eignet sich die Ablenkung, die eine zweite frei schwingende Magnetnadel durch die erste in gewissen Lagen erfährt.

Eine Kompaßnadel, die sich in den magnetischen Meridian eingestellt hat, wird durch einen ebenfalls in ihrer Ebene liegenden Magneten aus dem magnetischen Meridiane abgelenkt, in einem Sinne und Grade, der von der Lage des Magneten abhängt. Der Grund dafür liegt in dem verschiedenen Anziehungsinne der Magnetpole, wovon man sich auf dem Papiere bei Annahme verschiedener Lagen der beiden Magnete leicht eine Vorstellung machen kann, was sich aber auch mit Hülfe eines einfachen Kompasses und Magnetstäbchens praktisch erweisen läßt. Auf die Kompaßnadel wirken dabei also erstens die erdmagnetische, zweitens die Richtkraft des Magneten. Für gewisse Lagen des letzteren zu der Nadel lassen sich nun besonders einfache Beziehungen beider zu einander aufstellen, die den Grad der Nadelablenkung aus dem Meridian berechnen lassen, wenn man das magnetische Moment des Magneten kennt. Das fehlt zunächst aber auch hier, und deshalb führt diese Beobachtung allein auch nicht zum Ziele.

Wenn man aber die beiden Versuche zusammen nimmt, wenn man also das Drehmoment einer Nadel im Erdfelde mißt und die Ablenkung, die dieselbe Nadel bei gewisser Lage auf eine in *demselben* Felde frei schwingende zweite Nadel ausübt, so erhält man aus zwei voneinander ganz unabhängigen Versuchen zwei verschiedene Beziehungen des magnetischen Momentes der ersten Nadel zu beobachtbaren Größen, oder mathematisch gesprochen, zwei Gleichungen mit denselben zwei Unbekannten — magnetisches Moment und Stärke des Erdfeldes —, die in bekannter Weise die Elimination des ersteren gestatten und die Stärke des Erdfeldes in dem untergelegten Meßsystem ergeben.

Die Verbindung der beiden Messungen, von denen wir oben eine grundsätzliche Vorstellung zu geben versucht haben, verdanken wir Gauß (1777—1855), der als Erster mit sehr verfeinerten Geräten die Methode zur Messung der horizontalen Componente des Erdmagnetismus ausbildete und ausübte. Die Wichtigkeit der genialen Leistung von Gauß geht weit über das unmittelbare Ergebnis hinaus. Sie liegt vor allem in dem Umstande, daß nunmehr die magnetischen Größen wirklich der genauen Messung in mechanischem Maße zugänglich wurden, nachdem sie bis dahin wegen ihrer Kleinheit und Unsicherheit sich der Bestimmung entzogen hatten, und im Besonderen in der Möglichkeit, schwache magnetische Felder mit solchem Grade der Genauigkeit zu messen, daß man von ihnen zur Bestimmung elektrischer Größen ausgehen kann. Darüber und über das von Gauß angewandte Maßsystem wird weiterhin berichtet werden, hier mag nur nochmal an die Bedeutung des Wortes „Horizontale Componente des Erdmagnetismus“ erinnert werden: Ein magnetischer Pol von der Stärke „1“ erfährt im Erdfelde eine bestimmte mechanische Kraft, deren Richtung horizontal und im magnetischen Meridiane ist. Es tut dabei nichts zur Sache, daß ein Einheitpol nur eine Fiction ist und in Wirklichkeit nicht herstellbar, denn für alle Beziehungen, die mit Hülfe dieser Fiction aufgestellt werden können, gilt trotzdem die ohne wirkliche Existenz des Einheitpoles gemessene Kraft. — Wir verlassen nun den Magnetismus, um uns nach der gleichzeitigen Entwicklung der Elektrizität umzusehen, bis zu der Verbindung der beiden Erscheinungsformen in dem Elektromagnetismus.

II.

Der erste Beobachter elektrischer Erscheinungen — Anziehen leichter Körper durch geriebenen Bernstein — soll Thales von Milet gewesen sein. Aber erst Gilbert erkannte den Unterschied zwischen der magnetischen und elektrischen Anziehung und von ihm stammt auch die Bezeichnung „Elektrizität“ (von ἤλεκτρον, Bernstein). Die weitere Entwicklung mußte naturgemäß zunächst zum Ziele haben, die minimalen Aeußerungen der elektrischen Kraft, die zu den ersten Beobachtungen Anlaß gaben, zu steigern, und bald nach Gilbert gelang es dem Magdeburger Bürgermeister Guericke (1602—1686) eine Elektrisiermaschine herzustellen, bestehend in einer großen, durch die aufgelegte Hand geriebenen Schwefelkugel, die durch einen Schnurtrieb gedreht wurde und die bei aller Unvollkommenheit doch schon soviel Elektrizität erzeugte, daß knisternde Fünkchen zu beobachten waren. Der Wert der Studien Guericke's, die er 1672 veröffentlichte, wie Anderer Arbeiten aus dieser Zeit darf nicht unterschätzt werden, denn die Steigerung der Wirkung bis zu einem Grade, daß Beobachtungen über die besonderen Eigenschaften der geheimnisvollen Kraft ermöglicht wurden, bildete die notwendige Grundlage der weiteren Fortschritte. Das 17. Jahrhundert hat aber sonst keine wesentliche Bereicherung des elektrischen Wissens gebracht, und auch der Vater der modernen Physik, Isaak Newton, dessen Blick in die kosmische Mechanik wie in die feinsten Aenderungen des Lichtstrahles eindrang, hat nur wenig für die Elektrizität zu tun vermocht, ihre wissenschaftliche Entwicklung beginnt erst nach Newton's Tode (1727). Immerhin hatten inzwischen die neuen, noch wenig auffallenden elektrischen Erscheinungen die Aufmerksamkeit vieler Naturforscher gefesselt, und im weiteren Verlaufe des 18. Jahrhunderts entwickelte sich im Wesentlichen das, was wir jetzt Elektrostatik nennen, die Kenntnis der Elektrizität im Ruhezustande. Um unter den vielen einige Namen zu nennen, die mit dem Ausbau der neuen Lehre verknüpft sind, möge nur des Engländers Gray, des Franzosen du Fay, des Domherrn von Kleist in Cammin und des allbekannten gelehrten Buchbinders Benjamin Franklin gedacht werden. Bei Behandlung der elektrischen Maschinen werden wir zunächst nicht mit den elektrostatischen Vorgängen zu tun haben, deshalb möge hier nur in großen Zügen der Stand der Erkenntnis bis zur Entdeckung des Galvanismus geschildert werden.

Durch Reiben kann man eine Glasstange in den elektrischen Zustand versetzen, der sich u. A. durch Anziehen leichter Körper kundgibt und den Eindruck macht, als wenn sich auf der geriebenen Oberfläche ein eigentümlicher Stoff ablagere, der sich durch Berührung auf andere Körper übertragen läßt. So mit Elektrizität „geladene“ Körper stoßen sich ab. Nach ihrem Vermögen, die Elektrizität zu übertragen und aufzunehmen, sind Leiter und Nichtleiter zu unterscheiden. Eine scharfe Trennung zwischen beiden besteht nicht, als Darsteller der beiden Klassen können aber einerseits die Metalle, andererseits Glas und Harze mit ganz reiner Oberfläche dienen. Einem leitenden Körper kann man durch Berührung eines seiner Punkte, etwa mit der Erde, seine ganze Elektrizität entziehen, die Entladung eines Nichtleiters, beispielsweise der geriebenen Glasstange, erfordert ein Bestreichen seiner ganzen Oberfläche. Die Elektrizität ist auf Leitern leicht beweglich enthalten, bei Nichtleitern haftet sie an den elektrisierten Stellen. Die Folge der gegenseitigen Abstoßung der Elektrizität-Teilchen ist Lagerung nur auf der Oberfläche leitender Körper, denn jedes einzelne Teilchen erfährt von seiten aller anderen eine Kraft, die es soweit als möglich von der Gesamtheit zu entfernen sucht, und diese im Gleichgewichte ordnet sich so an, daß der größtmögliche Abstand der Teilchen von einander erreicht wird. Bei einer leitenden Kugel entspricht dieser Forderung die gleichmäßige Belegung der Oberfläche mit Elektrizität, auf Körpern anderer Form verteilt sich diese aber ungleichmäßig. Die verschiedene Dichte, zu der die Elektrizität an verschiedenen Stellen der Oberfläche angehäuft ist, läßt sich vergleichen durch ein angelegtes metallenes Probescheibchen mit isolierendem Stiele, das je nach der elektrischen Dichte an der berührten Stelle mehr oder weniger stark geladen wird und den Grad seiner Elektrisierung durch die Wirkung auf ein geeignetes Meßinstrument zu erkennen gibt.

Denkt man sich bei dem Elektrisierungsvorgange die Glasstange ersetzt durch eine Harzstange (Hartgummi), so erhält man Elektrizität, die für sich durchaus dasselbe Verhalten zeigt, auf Elektrizität der ersten Art aber nicht abstoßend, sondern anziehend wirkt. Es zeigt sich weiter, daß zwei gleiche, in demselben Grade elektrische Körper ihre Ladungen neutralisieren, wenn diese verschiedenen Ursprunges sind, die eine durch Reiben von Glas, die andere von Harz entstanden ist. Dieser Tatsache trägt die Annahme von

zwei Arten Elektrizität Rechnung, die bei sonst gleichem Verhalten aufeinander gegensätzlich wirken. Insoweit besteht also Analogie mit den magnetischen Erscheinungen, ein wesentlicher Unterschied zu diesen aber in der Möglichkeit, die beiden Elektrizitäten zu trennen und einzeln auf Körpern anzuhäufen. Zur kurzen Bezeichnung der beiden Arten hat man die Glas-Elektrizität die positive genannt, die Harz-Elektrizität die negative. Die Bezeichnungen sind ganz willkürlich und sollen lediglich das entgegengesetzte Verhalten ausdrücken.

Die Folge der elektrischen Anziehung und Abstoßung sowie der leichten Beweglichkeit der Elektrizität auf Leitern sind die sogenannten Influenzerscheinungen. Zwei mit verschiedener Elektrizität geladene isoliert aufgehängte Kugeln, die bei großem Abstände von einander gleichmäßige Verteilung der Elektrizität zeigen, ziehen sich in der Nähe mit merklicher Kraft an, und wenn die Berührung verhindert wird, häufen sich ihre Ladungen infolge der gegenseitigen Anziehung nach den Stellen geringsten Abstandes der Oberflächen, die Verteilung der Elektrizität auf den Kugeln und auf den Leitern überhaupt wird durch die Influenzwirkung also wesentlich geändert. Auf dieser Wirkung beruht auch der elektrische Kondensator, der zuerst als Kleist'sche Flasche, oder, wiewohl unrichtig benannt, als Leydener Flasche bekannt geworden ist. Das Wesen des Kondensators besteht in zwei leitenden Flächen (Belegen), die durch eine nicht leitende Schicht getrennt sind. Dadurch ist wohl der Ausgleich von entgegengesetzten Elektrizitäten zwischen den Belegen verhindert, nicht aber ihre anziehende Wirkung aufeinander. Zwei entgegengesetzte Ladungen halten sich deshalb durch die isolierende Schicht hindurch fest, sie binden sich, und können infolgedessen in viel größerer Menge in dem Kondensator angesammelt werden, als wenn die leitenden Flächen für sich beständen. Diese Wirkung der Elektrizität durch die isolierende Schicht hindurch erinnert wieder an die Eigenschaft der magnetischen Kraft, die Körper, außer den magnetisierbaren, ohne Veränderung zu durchdringen. Die Rolle der magnetisierbaren spielen für die Elektrizität die leitenden Körper, doch ist hier auch der Einfluß des isolierenden Zwischenmittels erheblich.

Wir haben oben von Bezeichnungen und Begriffen Gebrauch gemacht, die von der ursprünglichen Stoff-Anschauung der Elektrizität herkommen. Die Ausdrücke: Elektrische Menge, Dichte,

Leiter, Kondensator u. s. w. lassen ihren Ursprung ohne weiteres erkennen. In der Tat hat man sich früher die Elektrizität, wie die Wärme, einfach als übertragbares Fluidum gedacht, oder Fluida, denn Zweifel bestanden nur, ob man ein einziges Fluidum annehmen und die gegensätzlichen Wirkungen dem Unterschiede der in den Körpern enthaltenen Mengen zuschreiben solle, oder ob zwei verschiedene Fluida beständen, die, für gewöhnlich sich neutralisierend, überall vorhanden seien und durch den Vorgang des Elektrisierens geschieden würden. Die spätere Physik hat in der Elektrizität wie anderwärts die einfache Stoffanschauung aufgeben müssen, und wenn neuerdings in der Elektronentheorie, infolge gewisser Erscheinungen der Strahlung und der Elektrolyse, eine gewisse Stoff-Hypothese wieder aufgestanden ist, so darf sie doch nicht einfach als eine wiederaufgelebte Stofftheorie alter Art angesehen werden. Die alte Vorstellung in passender Ausgestaltung ist trotzdem bis heute wirksam und unentbehrlich, aber nur als mechanisches Bild, mit dessen Hülfe sich die elektrischen Erscheinungen leichter übersehen und beschreiben lassen. In diesem Sinne, aber auch nur in diesem, sind die auch heute noch üblichen Ausdrücke und Erklärungen der Elektrizitätslehre zu verstehen, zu denen die Analogie mit mechanischen Erscheinungsformen geführt hat, gerade wie wir noch heute beispielweise von Wärmemengen sprechen, wiewohl die Vorstellung eines Wärmestoffes vollständig ausgemerzt ist. Als kurze begriffliche Bezeichnungen bestimmter Vorgänge werden solche dem Greifbaren entlehnte Vorstellungen und Bezeichnungen auch niemals verschwinden, selbst wenn die fortschreitende Erkenntnis sie nicht mehr als eigentliche Erklärung der Erscheinungen ansehen kann.

Der allgemeinen Kenntnisnahme der Erscheinungen folgt in jeder exakten Wissenschaft das Messen zur Bestimmung der genauen Gesetze, nach denen die Veränderungen der Zustände verlaufen. So wurde schon frühzeitig das Elektroskop, zunächst nur zum Erkennen des elektrischen Ladezustandes dienend, zu einem, wenn auch zunächst nur rohen Meßinstrumente, das später aber zu den wichtigsten und feinsten Messungen der Elektrostatik befähigt wurde. Die Elektroskope, Elektrometer genannt, wenn ihre Ausführung wirkliche Messungen ermöglicht, beruhen auf der Abstoßung bzw. Anziehung geladener Körper und bestehen in ihrer einfachsten Form in pendelartig aufgehängten, sehr leichten Leitern, beispiel-

weise Streifen aus Goldblatt, die mit dem zu untersuchenden Körper leitend verbunden werden und durch ihre Divergenz den Ladezustand anzeigen. Henley ging 1772 mit seinem Quadranten-Elektroskop, das die Weite des Ausschlages eines elektrischen Pendels maß, zum genaueren Vergleichen der Ladezustände über. Der erste aber, der wirkliche elektrische Messungen vornahm, war der Franzose Coulomb (1736—1806), und zwar bezogen sie sich auf das Gesetz der elektrischen Anziehung und Abstoßung. Mit der von ihm geschaffenen Torsionswaage, einem grundsätzlich sehr einfachen, aber sehr empfindlichen Geräte, maß er unmittelbar die Abstoßung zwischen kleinen geladenen Kugeln und bewies, daß die Kraft einfach im Verhältnisse der Ladungen steht und umgekehrt quadratisch mit ihrem Abstände sich ändert, ganz nach dem allgemeinen Gravitationsgesetze von Newton. Des analogen Verhaltens der magnetischen Kräfte haben wir schon früher gedacht. Die Messungen Coulombs haben nur noch historischen Wert, da sein Gesetz sich schärfer mittelbar erweist aus der Art der Verteilung der Elektrizität auf Leitern, die nur auf Grund des Gesetzes gewisse leicht beobachtbare Formen annehmen kann. Die Coulomb'schen Versuche geben aber einen unmittelbaren Anhalt zum Festsetzen der Elektrizität-Einheit. Als solche gilt eine Menge, die auf eine gleiche im Abstände der Längen-Einheit die Kraft-Einheit ausübt. Auf dieser Festsetzung beruht das elektrostatische Meßsystem, das aber in der Elektrotechnik nicht im Gebrauch ist. Wir kommen später darauf zurück.

Um diese Skizze von der Entwicklung der Elektrostatik abzurunden, sei noch erwähnt, daß die Probleme der elektrischen Verteilung, die sich nur in ganz einfachen Fällen leicht lösen lassen, zu tiefgehenden mathematischen Untersuchungen Anlaß gegeben haben und im Besonderen durch Laplace, Green und Gauß zu dem Sonderzweige der Potentialtheorie entwickelt sind.

III.

In den letzten Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts stand den Naturforschern schon eine Anzahl elektrischer Apparate zur Verfügung, die Versuche in größerem Maßstabe ermöglichten. Mit der Elektrisiermaschine und dem Elektrophor konnten leicht größere Mengen Elektrizität erzeugt und in der Kleist'schen Flasche zu kräftiger Entladungswirkung angesammelt werden. Unter den elektrostatischen Erschei-

nungen pflegen im Anfange immer besonders die Wirkungen auf den menschlichen Körper zu fesseln, und ganz natürlich mußten sich, nachdem man die neuen geheimnisvollen Kräfte einigermaßen zu beherrschen gelernt hatte, besonders Aerzte zum Studium der physiologischen Seite angeregt fühlen. Es wurde bald erkannt, daß die elektrische Entladung nicht nur subjektive Empfindungen am lebenden Körper hervorbringt, sondern auch den frischen toten Muskel in lebhaftes Zucken versetzen kann, und wie noch jetzt war der unglückliche Frosch ein bevorzugtes Objekt der elektro-physiologischen Studien. Bei solchen Arbeiten beobachtete nun 1790 der Arzt Luigi Galvani in Bologna (1737—1798) an Froschschenkeln bei gewisser metallischer Berührung dieselben Zuckungen, die durch die Elektrisiermaschine hervorgerufen werden konnten. Die wahrscheinlich unzutreffende Erzählung von den Umständen, unter denen sich die Entdeckung vollzog, mag hier übergangen werden, jedenfalls war die Entdeckung ein Werk des Zufalls, und der Entdecker selbst hat auch nicht vermocht, das Wesen seiner Beobachtung klar zu stellen. Galvani glaubte nämlich und hielt dauernd daran fest, daß tierische Elektrizität in den Froschschenkeln frei werde und die Zuckungen veranlasse, und er fand für diese Ansicht um so leichter Zustimmung, als für gewisse Nervenäußerungen schon lange elektrische Vorgänge als Erklärung herangezogen waren, und der Zitterrochen des Mittelmeeres sich allem Anschein nach als ein Lebewesen erwiesen hatte, das elektrische Ladungen als Waffe zu verwenden im Stande ist. Auch Alexander von Humboldt, der die sogenannten Krampffische in Amerika zu studieren Gelegenheit hatte, ist mit vielen Anderen noch ein Anhänger der Ansicht Galvanis geblieben, als schon Voltas Scharfsinn in jahrelangen Bemühungen der Nachweis gelungen war, daß wenigstens die von Galvani beobachteten Tatsachen auf eine andere Ursache zurückzuführen seien.

Allessandro Volta aus Como (1745—1827), der sich schon früher eingehend mit Elektrizität beschäftigt hatte, brachte, nachdem er selbst längere Zeit ein Anhänger der Theorie seines Landmannes gewesen war, die richtige Deutung der Erscheinung, indem er als ihre Ursache die Entstehung von Elektrizität bei leitender Berührung zwischen verschiedenen Metallen erkannte, wie sie tatsächlich zufällig bei Galvanis Versuchen stattgefunden hatte. Er sah also in der Erscheinung die Entdeckung einer neuen Quelle

der Elektrizität, und es gelang ihm, diese mit seiner Säule zu erzeugen, ohne daß tierische Teile dabei ins Spiel kamen.

Die Volta'sche Säule bestand aus einer Reihe von Elementen, die selbst wieder von je zwei, durch einen feuchten Leiter (Tuchscheiben mit verdünnter Säure oder Salzlösung) getrennten Platten verschiedener Metalle, z. B. Kupfer und Zink, gebildet waren. Jedes Element kann als Sitz einer elektrischen Scheidekraft angesehen werden, in deren Folge die ungleichnamigen Elektrizitäten nach entgegengesetzten Richtungen wandern und sich durch einen äußern Schließungsbogen wieder ausgleichen. Die Schichtung vieler Elemente übereinander, die sämtlich in demselben Sinne geordnet sind, gleicht einer Summierung der Scheidekräfte, durch die eine entsprechende Vergrößerung der Wirkung erzielt wird. Durch diese Summierung der an sich schwachen Einzelwirkungen war es Volta möglich, statische Kondensatoren zu laden und qualitativ ähnliche Erscheinungen hervorzubringen, u. A. Anziehen von Goldblättchen an den Enden der Säule, wie durch Reiben von Glas und Harz, damit den Nachweis der Identität zwischen der Reibungselektrizität und der Kontaktelektrizität zu führen.

Der Zufall, der die Entdeckung der Kontaktelektrizität brachte, muß eigentlich als ein doppelter angesehen werden, insofern nämlich, als die neue Erscheinung auch von vornherein als eine elektrische angesehen wurde. Die physiologischen Wirkungen bildeten die Brücke zwischen zwei Formen der Elektrizität, die zunächst kaum Verwandtes zu haben scheinen. Anstelle der glänzenden und sozusagen heftigen Aeußerungen größerer Mengen Reibungselektrizität, zeigt die Volta'sche Säule einen ruhigeren stetigeren Verlauf ihrer Wirkungen und leitete namentlich nach der Entdeckung der Wasserzersetzung durch Carlisle im Jahre 1800 zu der Vorstellung eines gleichmäßigen elektrischen Stromes, der durch den Schließungskreis von einem Pole zum andern geht, ebenso gleichmäßig die durch die Zersetzung entstehenden Gasbläschen in der Flüssigkeit aufsteigen lassend. Die elektrolytischen Eigenschaften des Stromes bildeten längere Zeit auch den bevorzugten Gegenstand des Studiums, am nachdrücklichsten gefördert durch den englischen Chemiker Davy, der als Erster auch mit genügend großen Säulen oder Batterien den elektrischen Lichtbogen herstellte.

Näher auf die Volta'sche Säule und ihre Abkömmlinge einzugehen, ist hier nicht angängig. Infolge von Nebenerscheinungen

(Gasentwicklung an den Metallplatten) läßt sie beim Gebrauche schnell in ihrer Wirkung nach, sie erhielt deshalb noch von Volta selbst die bequemere, wenn auch noch unvollkommene Form des Becherapparates, bei dem die Elemente durch Plattenpaare gebildet werden, die in Gefäßen mit angesäuertem Wasser hängen. Ihre weitere Ausbildung führte zu den sogenannten konstanten Elementen, bei denen die lästigen Nebenerscheinungen ganz oder teilweise unterdrückt werden, und die heute noch bekanntlich wegen ihrer Einfachheit und Zuverlässigkeit für kleine elektrische Leistungen in umfangreichem Gebrauche sind. Die Quelle der Elektrizität ist bei diesen Apparaten immer die chemische Reaktion zwischen den Flüssigkeiten und Metallen, und nach dem Gesetze der Erhaltung der Energie kann das auch nicht anders sein. Volta selbst nahm freilich noch eine elektrische Kraft zwischen den sich berührenden Metallen selbst an, und diese reine Kontakttheorie ist lange herrschend geblieben, da sich wirklich bei Berührung verschiedener Metalle mit scheinbar ganz reinen Oberflächen Elektrizitätserregung nachweisen läßt. Erst in neuerer Zeit ist unter Anwendung besonderer Vorsichtsmaßregeln der Nachweis gelungen, daß bei wirklich reinen Oberflächen keine Erregung eintritt.

An der Volta'schen Säule haben sich aber die Grundanschauungen der strömenden Elektrizität entwickelt, von denen wir nun sprechen wollen. Wie die Vorstellung eines Stromes im Galvanischen Schließungskreise entstand, wurde schon vorher erwähnt. Zu dieser Vorstellung bieten die meist heftigen Entladungsvorgänge der Elektrostatik weniger Anlaß. Wenn nun ein Strom, der sich augenfällig etwa in der Zersetzung von Wasser äußert, unter verschiedenen Umständen verschieden starke Wirkung zeigt, so wird man unwillkürlich zu der weiteren Vorstellung eines mehr oder weniger starken Druckes geführt, der die Ursache des Stromes ist, andererseits eines Widerstandes, der ihn bei einem gewissen Drucke nur in bestimmtem Maße zu Stande kommen läßt. In dieser natürlichen mechanischen Auffassung hat auch Volta schon von der „Spannung“ einer Säule gesprochen, die als Folge der Scheidekraft in den einzelnen Elementen die Elektrizität durch den Schließungskreis bewegt. Daß der Begriff der Stromstärke schon anfangs klar erfaßt wurde, lehren die frühzeitigen Versuche, sie nach der Menge des in einer gewissen Zeit zersetzten Wassers zu schätzen. Weniger deutlich war zunächst die Vorstellung von dem elektrischen Wider-

stande und den Zusammenhang zwischen den drei wichtigsten Größen, Spannung oder elektromotorische Kraft, Stromstärke und Widerstand, hat später erst Ohm scharf entwickelt. Mit dem Bilde eines Stromes ist aber endlich auch die Frage nach der Richtung verbunden. Da die Identität der Reibungselektrizität und der galvanischen Elektrizität nachgewiesen war, so mußten folgerichtig auch auf Grund der ähnlichen Wirkung die Pole der Säule bezeichnet werden. Einen ersten Anhalt dazu bot der schon an der Elektrisiermaschine beobachtete säuerliche Geschmack des positiven Poles, einen schärferen Vergleich gestattet das Elektroskop. Die Stromrichtung der positiven Elektrizität im äußeren Schließungskreise der Säule geht also vom positiven Pole zum negativen. Diese Richtung gilt kurz als die Stromrichtung überhaupt, wiewohl an sich kein Grund zu einer solchen Bevorzugung vorliegt. Wie die Bezeichnung der Elektrizitäten entgegengesetzter Wirkung und der Pole, so ist also auch die Annahme der Stromrichtung ganz willkürlich, einmal festgesetzt muß sie aber folgerichtig gehandhabt werden, wie beim Magnetismus, damit sich der Zusammenhang der Erscheinungen richtig übersehen läßt. Bei einem galvanischen Elemente aus Kupfer und Zink in angesäuertem Wasser zeigt das herausragende Kupferende, oder das angeschlossene Leiterstück, die positive Elektrizität, der Strom geht also nach Schluß des äußeren Kreises vom Kupfer zum Zink, im Elemente selbst aber vom Zink zum Kupfer, da man sich ein beständiges Umlaufen des Stromes vorzustellen hat. Bei der elektrolytischen Zersetzung von Metallverbindungen wandert das frei gewordene Metall, ebenso auch der Wasserstoff bei der Wasserzersetzung, mit dem Strome, also nach dem negativen Pole. Kleine, in bequeme Form gebrachte elektrolytische Prozesse werden vielfach zum Erkennen der Stromrichtung benutzt.

Die chemischen Wirkungen des galvanischen Stromes standen, wie wir sahen, zunächst im Vordergrund des Interesses, daneben gingen aber von Anfang an Versuche einher, seine Beziehungen zu andren Erscheinungen zu ergründen. Daß dünne Drähte sich durch den Strom erwärmten, konnte leicht beobachtet werden, vor Allem aber wurde wegen des gleichartigen Verhaltens in mancher Beziehung ein Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus vermutet. War doch schon Coulomb durch Analogieschlüsse zur Aufstellung desselben Gesetzes für die elektrische und magne-

tische Fernwirkung geführt. Viel erörtert wurde auch schon die Beobachtung Franklins, der Stahlnadeln durch elektrische Entladungen magnetisiert haben wollte. Bei dem in der bestimmten Richtung geweckten Interesse könnte es fast auffallen, daß doch eine Reihe von Jahren verging, ehe dem Kopenhagener Professor der Physik Oerstedt der bestimmte Nachweis der Wirkung des Stromes auf den Magneten gelang. Bedenkt man die Einfachheit des Apparates, der diesen Nachweis gestattet, eine Volta'sche Säule und eine gewöhnliche Busssole, so sieht man in der Verzögerung der wirklichen Entdeckung nur eine Bestätigung der immer wieder gemachten Beobachtung, unter welchen Schwierigkeiten gerade die einfachen grundlegenden Tatsachen ans Licht treten.

Oerstedt (1777—1851) hat seine Entdeckung nicht durch Zufall gemacht, wie gelegentlich erzählt wird. Er war zu der Zeit (1820) schon ein Mann von wissenschaftlichem Rufe, von früh an mit chemischen und physikalischen Studien beschäftigt, beherrschte die seitherigen Errungenschaften vollkommen, und unter diesen Umständen an das Walten des bloßen Zufalles zu glauben, hieße gegen alle Wahrscheinlichkeit schließen. Nachweislich hat aber auch Oerstedt den Grundgedanken seines Versuches entwickelt, ehe er zu diesem selbst schreiten konnte. Die Versuchsanordnung war so einfach wie möglich: Ueber eine Bussolennadel hinweg und parallel zu ihr (Figur 2) ist ein Draht geführt. Sendet man durch diesen einen Strom, so wird die Nadel aus ihrer vorherigen Lage in eine neue gedreht, in der sie verweilt, so lange der Strom andauert. Die Größe der Ablenkung hängt von den besonderen Umständen ab, aber ihr Sinn muß sich offenbar aus den Richtungen des Stromes und des Magnetismus ergeben, denn man beobachtet einen umgekehrten Ausschlag der Nadel, sobald man den Strom in entgegengesetzter Richtung fließen läßt. Für den Sinn der Ablenkung hat Ampère die etwas sonderbar klingende sogenannte Schwimmregel aufgestellt: „Denkt man sich in dem Stromleiter mit dem Kopfe voran in der Richtung des Stromes schwimmend und blickt man in dieser Lage auf die Nadel, so wird ihr Nordpol nach links, der Südpol nach rechts abgelenkt.“ Die Lage der Nadel in der Figur entspricht also dieser Regel,



Figur 2.

wenn, wie angenommen, der Draht über die Nadel fortgeht. Der Ausschlag wäre aber bei derselben Stromrichtung umgekehrt, wenn die Nadel sich über dem Drahte befände. Anstelle dieser Schwimmregel sind noch verschiedene andere aufgestellt, die manchmal bequemer sind. Es kann nicht auffallen, daß die grundlegende elektromagnetische Erscheinung durch eine äußerliche Gedächtnisregel beschrieben wird, wenn man sich erinnert, daß ja die Richtung des Stromes und ebenso die Polarität der magnetischen Nadel nur willkürlich angenommen sind.

Die nächste Frage nach dieser ersten Beobachtung, wo der Stromleiter der ursprünglichen Lage der Nadel parallel ist, muß sich jedenfalls auf die Wirkung des Stromes in anderer Lage zur Nadel beziehen. Man beobachtet nun ebenso leicht, daß die Nadel nicht beeinflusst wird, wenn der Leiter in seiner Ebene um 90° verdreht wird (in der Figur gestrichelt), während Zwischenstellungen eine umso geringere Wirkung zeigen, je mehr sie sich der Querstellung zuneigen. Damit sind immer noch Sonderfälle vorausgesetzt, insofern der Leiter in der zur Schwingungsebene der Nadel parallelen Ebene bleibt. Die Stromwirkung für alle möglichen Stellungen von Leiter und Nadel zu einander, lassen sich aber übersehen durch das folgende, aus zahllosen Beobachtungen abgeleitete Gesetz: Ein Stromfaden wirkt auf die Pole einer Nadel senkrecht zu seiner eigenen Richtung drehend, und zwar bei gleichen Abständen gleich stark, aber in verschiedenem Sinne.



Figur 3.

der Nähe eines stromführenden Leiters sucht sich deshalb die Nadel quer und senkrecht zum Leiter zu stellen (Figur 3), und wenn der geradlinige Leiter sehr lang, und die ganz frei bewegliche Nadel durch Mittel, die wir früher angedeutet haben, dem Einflusse des Erdmagnetismus entzogen ist, so bildet die Nadel eine Tangente an den Kreis, der in einer zum Leiter senkrechten Ebene um ihn beschrieben ist, an welcher Stelle des Kreisumfanges die Nadel sich auch befindet. Im Ganzen aber bleibt sie nach ihrer Stellungnahme stehen, denn der Strom wirkt auf sie wegen der gleichen Stärke der Pole mit derselben Kraft rechts und links drehend. Nach welcher Richtung die Pole weisen, läßt sich sofort nach der Ampère'schen Regel bestimmen, die nach

der Anordnung Figur 3 auch in die Form gebracht werden kann: Blickt man von außerhalb der Nadelebene in der Richtung des Stromes auf die Nadel (in der Figur also von unten her), so will sich der Nordpol im Uhrzeigersinne drehen. Ein einzelner magnetischer Pol, wenn ein solcher zu verwirklichen wäre, müßte demnach beständig um den Leiter kreisen. Diese Folgerung ist später von Ampère und Faraday praktisch als richtig erwiesen, indem sie durch einen Kunstgriff den Leiter so führten, daß nur einer der Pole eines Magneten unter seinem Einflusse stand.

Die Entdeckung Oerstedts verbreitete sich schnell über die ganze wissenschaftliche Welt. War doch nun der lange vermutete Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus sicher bewiesen. Zahlreiche Physiker studierten eifrig die Stromwirkung auf den Magneten unter den verschiedensten Bedingungen, die erste Beobachtung bestätigend und erweiternd. Am erfolgreichsten beteiligte sich an dem Ausbau der elektromagnetischen Kenntnisse der schon erwähnte französische Physiker André Marie Ampère (1775—1835) an Fruchtbarkeit und Einsicht den Entdecker selbst weit übertreffend. Ehe er aber noch mit eigenen Entdeckungen hervortrat, war seinem Landsmann Biot (1774—1862) die quantitative Vervollständigung der elektromagnetischen Grunderscheinung gelungen, er hatte den Grund gelegt zur Bestimmung der Größe der Stromwirkung.

Auffallend in der Stromwirkung auf die Magnetenadel, oder sagen wir nun allgemeiner auf einen magnetischen Pol, ist vor Allem ihre Richtung, die, entgegen allen sonstigen Beobachtungen an Naturkräften, nicht mit der Verbindungslinie zwischen Pol und Leiter zusammenfällt, sondern quer dazu ist. In dieser Abweichung von allem Bekannten wird auch der Grund der verzögerten Entdeckung zu suchen sein. Nicht minder auffallen mußte nun das von Biot aufgestellte Gesetz, nach dem die Kraft eines sehr langen, genauer gesagt unendlich oder unbeschränkt langen linearen Leiters auf einen Magnetpol einfach im umgekehrten Verhältnisse zu dem Abstände ist, also bei doppeltem Abstände halb so groß wie vorher, nicht aber nur ein Viertel so groß, wie nach dem Coulombschen Gesetze scheinbar zu erwarten wäre. An der



• Figur 4.

Richtigkeit des Biot'schen Gesetzes (gewöhnlich unter Berücksichtigung des Mitarbeiters das Biot-Savart'sche Gesetz genannt) war nicht zu zweifeln, denn es läßt sich leicht mit großer Schärfe durch den Versuch beweisen, der schematisch in Fig. 4 angedeutet ist. Eine Scheibe ist an Schnüren horizontal aufgehängt, durch ein mittleres Loch geht der sehr lange Stromleiter. Befestigt man nun zwei Stabmagnete einander gegenüber (oder beliebig viele) mit gleichen Polen nach außen radial auf der Scheibe, so dreht diese sich nicht, wiewohl sie vermöge ihrer Aufhängungsweise sehr leicht beweglich ist. Die Unbeweglichkeit kann offenbar ihren Grund nur haben in gleichen Drehkräften, die der Strom auf das Scheibensystem ausübt. Hätten also beispielweise die äußeren Pole den doppelten Abstand vom Leiter, als die inneren, so muß nach dem Hebelgesetze die auf jene ausgeübte Kraft halb so groß sein, wie auf diese, um die Unbeweglichkeit der Scheibe zu erklären. Der Apparat, der an die Torsionswage von Coulomb erinnert, läßt sich mit verhältnismäßig einfachen Mitteln sehr empfindlich machen und bildet deshalb einen zuverlässigen Beweis des Gesetzes. Dieses gilt aber nur, wie erwähnt, für den Fall eines sehr langen Leiters. Ist der durch die Scheibenmitte gehende Leiter kurz und seitlich abgebogen, so üben auch die Zuleitungen ihren Einfluß auf das drehbare System aus, ähnlich, wenn der Leiter in einem die Bogen die Scheibe durchsetzt. Dann

kann eine teilweise Drehung des Systems eintreten, niemals indessen eine ganze Umdrehung.

Das Biot'sche Gesetz bildet, wie schon gesagt, nur die Grundlage zum Bestimmen der Stromkraft auf einen Magnetpol. So auffallend seine Abweichung von den früher gefundenen Gesetzen der elektrischen und magnetischen Fernwirkung zunächst erscheint, so ist doch zu bedenken, daß diese letzteren nur für punktförmig konzentrierte Mengen ausgesprochen waren, also überhaupt nicht, von anderen Unterschieden ganz abgesehen, in unmittelbaren Vergleich mit dem Falle eines ausgedehnten Stromleiters gebracht werden kann. Mit anderen Worten, das Biot'sche Gesetz ist kein Elementargesetz für die Stromwirkung, ein solches lieferte erst Ampère auf Grund der Messungen Biot's.

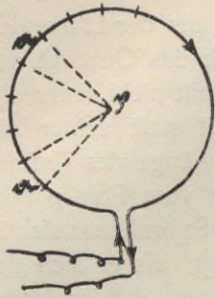


Figur 5.

Zur Erläuterung des Elementargesetzes für die Stromwirkung hat man sich den linearen Leiter in sehr kleine Abschnitte zerlegt zu denken. Steht ein solcher Abschnitt a (Fig. 5) senkrecht auf der Verbindungslinie mit dem Magnetpole p , so ist seine auf den Pol ausgeübte Querkraft proportional dem Produkte aus der Länge des Abschnittes und der Stromstärke, dividiert durch das Quadrat des Abstandes vom Pole. Steht der betrachtete Abschnitt nicht senkrecht zur Verbindungslinie, wie beispielweise a' , so ist statt seiner die Länge l einzusetzen, das ist also die scheinbare Länge des (immer sehr klein zu denkenden) Abschnittes, gesehen vom Pole p aus. Damit ist also ausgedrückt, daß der Abschnitt des Stromleiters sich in dem Maße an der Wirkung auf den Pol beteiligt, als er sich der genau senkrechten Lage der Verbindungslinie nähert, daß er ferner ganz ohne Einfluß ist, wenn seine Verlängerung durch den Pol selbst geht. Die ganze Wirkung des Leiters ist gleich der Summe der Einzelwirkungen, die bei dem geradlinigen Leiter (Fig. 5) mit der Entfernung vom Pole ersichtlich schnell abnehmen, sowohl wegen des wachsenden Abstandes, wie wegen der immer mehr abnehmenden in Rechnung zu stellenden Länge der Abschnitte. Durch höhere Rechnungen läßt sich nun zeigen, daß in der Tat das zugrundegelegte Elementargesetz, so wenig es an sich geprüft werden kann, doch in der Anwendung auf den unbeschränkt langen Leiter genau dem Versuchergebnisse Biot's entspricht, sobald die Abschnitte unbeschränkt klein angenommen werden, und die Summierung der Einzelwirkungen nach beiden Seiten des Leiters ins Unendliche ausgedehnt wird. An einer genaueren Zeichnung ähnlich der Fig. 5 kann man aber, wenn auch einigermaßen mühsam, die Richtigkeit des Gesetzes annähernd prüfen, indem man die Querkraft für den senkrecht zur Verbindungslinie stehenden Abschnitt a gleich einer beliebigen Zahl setzt, die Kräfte für die andern unter sich gleichen Abschnitte nach der mitgeteilten Regel berechnet und schließlich summiert, denselben Prozeß dann für einen anderen Polabstand, etwa den doppelten, wiederholt. Ist die Zahl der berechneten Abschnitte groß genug, so wird man mit hinreichender Annäherung bestätigt finden, daß die Gesamtwirkung beim doppelten Polabstande auf die Hälfte gefallen ist, wie das Biot'sche Integralgesetz verlangt.

Das besprochene Elementargesetz entspricht jedenfalls insofern der Erwartung, als es die Wirkung des Stromelementes umgekehrt

dem Quadrate des Abstandes vom Pole setzt, ähnlich der elektrostatischen Kraft. Mit seiner Hilfe läßt sich nun auch leicht die Kraft eines Kreisstromes auf einen Pol im Mittelpunkte berechnen.

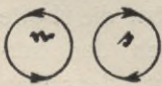


Figur 6.

Bei einem Kreise (Fig. 6) stehen sämtliche Leiterelemente senkrecht zu ihrem Abstände vom Pole, die Summierung der Einzelwirkungen ist also sehr vereinfacht, und man erkennt leicht, daß die ganze Kraft des Kreisstromes auf den Pol im Mittelpunkte proportional ist dem Produkte aus dem Umfange des Kreises und der Stromstärke, dividiert durch das Quadrat des Radius. Die Kraft an anderen Punkten ist verschieden von der Kraft im Mittelpunkte, der Richtungssinn

ist aber in allen Punkten innerhalb der Kreisfläche derselbe und ohne Weiteres nach der Ampère'schen Regel bestimmbar. Ein magnetischer Nordpol würde bei der durch die Pfeile angegebenen Stromrichtung von der Papierfläche nach hinten bewegt werden.

Ampère hatte klar erkannt, daß die Wirkung des Stromes in dem Oerstedt'schen Versuche nur eine magnetische sein könne. Wenn der Strom Kräfte auf die Magnetnadel oder allgemein auf einen Pol ausübt, die ebenso auch von einem anderen Magneten ausgehen könnten, so muß der stromführende Leiter selbst als eine Art Magnet angesehen werden. Im Besonderen muß der Kreisstrom (Fig. 6) einem Stabmagneten oder genauer einem Bündel von solchen äquivalent sein, der senkrecht zu der Kreisfläche dieselben magnetischen Kräfte in derselben Richtung ausübt, und zwar wird, der Ampère'schen Regel entsprechend, die Seite der Stromkreisfläche als nordmagnetisch anzusehen sein, von der aus



Figur 7.

gesehen der Strom umgekehrt dem Uhrzeiger umläuft (Fig. 7), denn ein nordmagnetischer Pol würde sich von der Stromfläche nach dem Beschauer zu bewegen. Der umgekehrten Stromrichtung entspricht

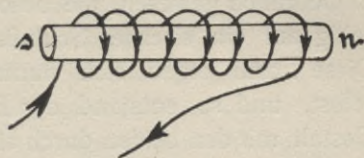
der entgegengesetzte Magnetpol. Klappt man also die beiden Kreisströme der Figur 7 so gegen einander, daß die Nordseite des einen der Südseite des andern gegenüberliegt (Fig. 8), so hat man gewissermaßen zwei ungleichnamige Magnetpole gegenüber gestellt, und wie diese werden sich die Kreis-



Figur 8.

ströme anziehen. In dieser Lage haben aber von außen

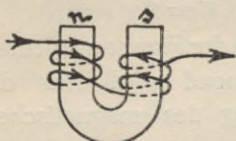
gesehen die Kreisströme gleiche Richtung, und deshalb ist die Erscheinung auch in dem Sinne aufzufassen, daß gleichgerichtete Ströme sich anziehen, ungleich gerichtete sich abstoßen. Dieses hier nur für Kreisströme entwickelte Gesetz hat Ampère als ganz allgemein gültig nachgewiesen, für Leiter jeder beliebigen Form, und auch das Elementargesetz für die Wirkung eines Stromes auf einen Magnet erweitert für die Wirkung zweier Ströme aufeinander. Mit sehr leicht beweglichen Drahtgestellen hat dann Ampère gezeigt, daß ein Kreisstrom, oder allgemeiner eine Stromschleife, wie ein Stabmagnet unter dem Einflusse des Erdmagnetismus eine bestimmte Stellung annimmt und zwar, entsprechend der gegenseitigen Lage von äquivalenten Stromkreisen und Magnetpolen, senkrecht zum magnetischen Meridiane. Das wird noch anschaulicher, wenn man sich eine Anzahl Kreisströme gleicher Größe hintereinander geschaltet denkt (Fig. 9). Die magnetischen Kräfte der Stromkreise äußern sich dabei alle in derselben Richtung, und die Stromspirale ist in ihrer Wirkung offenbar äquivalent einem längeren Stabmagneten, wie in der Figur angedeutet. Leicht beweglich aufgehängt oder schwimmend wird sich die Stromspirale mit ihrer Achse in die Richtung des magnetischen Meridians einstellen.



Figur 9.

Die Leistungen Ampères, von denen wir hier nur die für unsern besonderen Zweck wichtigsten kurz vorführen konnten, tragen offenbar viel weiter, als die ursprüngliche Entdeckung Oerstedts. Ampère verallgemeinerte diese nicht nur, er schuf überhaupt erst den Strommagneten als Äquivalent des Stahlmagneten, er fand vor Allem die magnetische Wirkung der Ströme auf einander, und wenn diese Entdeckung auch zeitlich nach der von Oerstedt kam und von dieser in gewissem Sinne angeregt wurde, so war sie doch keineswegs von ihr abhängig und hätte selbständig ohne sie auftreten können, die Entwicklung hätte gerade umgekehrt sein können. Indem Ampère endlich ein zutreffendes Grundgesetz für die magnetische Wirkung der Ströme aufstellte, das die vollständige Berechnung dieser Wirkung gestattet (gleichgültig wie umständlich die Rechnung im allgemeinen durchzuführen sein mag) erwies er sich als ebenso scharfsinnig in der Zergliederung der Erscheinungen, wie vorher schöpferisch in der Herstellung. Ampère muß als der eigentliche Vater des Elektromagnetismus angesehen werden.

Wer dagegen den ersten Elektromagneten im engeren Sinne ausführte, d. h. das mit Stromwindungen umgebene Stück weichen Eisens, läßt sich nicht genau angeben. Ampère's Landsmann Arago hatte Stahlnadeln in der Stromspirale dauernd magnetisiert, wie sonst durch Streichen mit einem Magneten. Daß weiches Eisen in der Stromspirale ebenfalls magnetisch wird, wie beim Anlegen an einen Magnetpol, aber im allgemeinen viel stärker, mußte sich bei der vielfachen Beschäftigung mit den Ampère'schen Apparaten oft der Beobachtung aufdrängen. Von da bis zum vollständigen Elektromagneten war ein stetiger Uebergang, das Grundelement der heutigen Elektrotechnik bedurfte nach den Arbeiten Ampère's keines neuen erfinderischen Gedankens mehr. Statt der einfachen Stahlmagnete in Stabform war schon vielfach die Hufeisenform in Gebrauch gewesen, die besonders geeignet ist, beide Pole gleichzeitig auf ein eisernes Schlußstück, den Anker wirken zu lassen. Diese Form ergab sich nunmehr für den Elektromagneten von selbst, und so entstand der Elektromagnet in seiner populärsten Gestalt mit den beiden durch ein Querstück verbundenen Schenkeln



Figur 10.

von weichem Eisen und den durch Umspinnung mit Baumwolle oder Seide isolierten Drahtwindungen. Figur 10 zeigt einen solchen Elektromagneten schematisch, hauptsächlich um noch mal an den richtigen Stromlauf zu erinnern, der Anfängern so viel

Zweifel zu bereiten pflegt. Die einfache Regel für die richtige Wicklung ist: Die Polarität der beiden Schenkel muß entgegengesetzt sein, deshalb muß sie der Strom in entgegengesetzter Richtung umkreisen. Der Südpol ist der vom Strome im Uhrzeigersinne umkreiste.

Mit dem Elektromagnetismus war auch der weiteren Forschung ein bequemes Mittel in die Hand gegeben, Stromstärken zu vergleichen und überhaupt das Vorhandensein eines Stromes nachzuweisen, ohne seine anderweitige Wirkung wesentlich zu beeinträchtigen. Es genügte im einfachsten Falle, den Stromleiter über eine Bussolennadel gehen zu lassen, während der Strom selbst etwa Wasser zu zersetzen hatte. Was aber die Arbeiten der Physiker ungemein erschwerte, und die scharfe Entwicklung der quantitativen Stromgesetze verzögerte, war die mangelhafte Gleichmäßigkeit in der Wirkung der Stromquelle. Die Spannung der Volta'schen

Säule und ihrer Abarten läßt nach Schluß des Stromes schnell nach und schwindet bald auf einen kleinen Teil des Anfangwertes. Um diesen wieder herzustellen ist das Entfernen der Gasbläschen von der Metallplatte erforderlich. Die spätern, sogenannten konstanten Elemente, von denen die besseren tatsächlich längere Zeit annähernd konstante Spannung zeigen, vermeiden die Gasentwicklung an den Platten und sind für alle Untersuchungen ungleich bequemere Stromquellen, als die in den ersten Jahrzehnten nach Volta vorhandenen. Es ist begreiflich, welche Schwierigkeiten die Inkonstanz des für die Wirkung der galvanischen Stromquelle in erster Linie maßgebenden Faktors bei der Bestimmung der von ihm abhängigen Größen bewirken mußte, und nur auf großen Umwegen konnte das Ergebnis reifen, das als Ohm'sches Gesetz die ganze Elektrizitätslehre durchdringt und in seiner Einfachheit nicht die Mühen seiner Entstehung ahnen läßt.

Georg Simon Ohm (1787—1854), in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts Lehrer an der allgemeinen Kriegsschule (jetzt Kriegsakademie) in Berlin, hatte seit Langem dem Widerstande der Leiter seine Aufmerksamkeit gewidmet. Die Vorstellung eines Widerstandes, den der Strom im Leiter findet, mußte sich notwendig bald entwickeln, nachdem schon frühzeitig, wie wir sahen, der Begriff der Spannung und der Stromstärke den beobachteten Erscheinungen untergelegt war. Diese natürlichen mechanischen Auffassungen schlossen eigentlich schon die Annahme eines der Ausbildung des Stromes Widerstehenden ein. Zahlreiche Beobachtungen, beabsichtigt und unbeabsichtigt, lehrten auch, daß die Länge eines Leiters, sein Querschnitt und sein Stoff für seinen Widerstand maßgebend seien. Irgend eine Wirkung des Stromes, beispielweise die auf die Magnetnadel, und ihre Aenderungen beim Einschalten verschiedener Drähte in den Stromkreis, gab davon Zeugnis. Ohm bestimmte nun zunächst genauer, unter Bestätigung oder Richtigstellung der Messungsversuche Anderer, daß der Widerstand einfach proportional der Länge ist und umgekehrt proportional dem Querschnitte eines Drahtes, oder daß dessen Leitfähigkeit mit der Länge abnimmt, mit dem Querschnitte aber wächst. Ohm gab auch genauere als bis dahin bekannte Verhältniszahlen für die verschiedene Leitfähigkeit der Metalle und nahm als besten Leiterstoff das Kupfer an, was allerdings nur zutrifft, wenn man lediglich die praktisch in Frage kommenden

Stoffe ins Auge faßt. Um nun aber in der gebotenen Kürze das Weitere zu entwickeln, wollen wir von dem mechanischen Bilde in einer Röhre fließenden Wassers Gebrauch machen, mit dem sich die Ergebnisse Ohm's zutreffend versinnlichen lassen.

Man denke sich eine Röhre vollständig mit Sandkörnchen gefüllt, die den freien Querschnitt der Röhre in eine Unzahl kapillarer Kanäle von immer wechselndem Querschnitte zerlegen. Eine solche Röhre wird dem durchfließenden Wasser einen großen Widerstand entgegensetzen, der durch einen bestimmten Druck, dargestellt etwa durch den Niveau-Unterschied zweier Gefäße an den Rohrenden, überwunden werden muß. Die Wassergeschwindigkeit in dem Rohre kann unter diesen Voraussetzungen nicht mehr gleich der Fallgeschwindigkeit gesetzt werden, welches Gesetz nur dann galt, wenn von einem Widerstande überhaupt abgesehen werden konnte, sodaß die infolge des Herabsinkens erlangte Bewegungsenergie dem Wasser vollständig erhalten blieb. Wir wollen hier umgekehrt die Durchflußgeschwindigkeit klein genug annehmen, um die zu ihrer Erzeugung erforderliche Druckhöhe vernachlässigen zu können gegen die Druckhöhe, die das Ueberwinden des Reibungswiderstandes in dem filterartigen, eine im Verhältnisse zum Querschnitte sehr große benetzte Oberfläche darbietenden Rohre verlangt. Die Geschwindigkeit ist dann einfach proportional dem wirksamen Drucke, und wenn man das Rohr, das der einfacheren Betrachtung wegen immer horizontal liegen möge, durch Querschnitte in eine größere Zahl gleicher Schichten zerlegt denkt, so kann man die Druckverteilung einigermaßen versinnlichen etwa durch die Vorstellung nebeneinander auf einer horizontalen Unterlage geschichteter Dominosteine. Jeder einzelne davon setzt seiner Bewegung einen gewissen Widerstand entgegen, der auf den letzten Stein wirkende Druck muß alle Einzelwiderstände überwinden, der Druck von Stein gegen Stein nimmt von hinten nach vorn in der Säule ab, denn an einer bestimmten Stelle ist er nur gleich der Summe der nach vorn hin folgenden Einzelwiderstände.

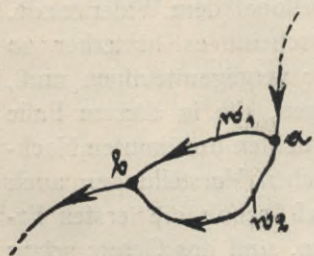
Anstelle des Normaldruckes der Steine gegen einander hat man für das Rohr nur den allseitig wirkenden hydrostatischen Druck zu denken, um dieselbe Ueberlegung hinsichtlich seiner Abnahme anwenden zu können. Auch den Begriff des Gefälles kann man darauf übertragen, d. h. als Maß für die Wirkung die Druckdifferenz an zwei um die Längeneinheit von einander entfernten

Querschnitten der Röhre setzen. Die Verhältnisse in einem elektrischen Leiter sind in vollständiger Analogie mit diesem mechanischen Bilde. Die Stromstärke im Leiter entspricht der in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt der Röhre fließenden Wassermenge. Bei gegebener Druckdifferenz oder elektrischen Spannungsdifferenz an den Enden ist sie umgekehrt proportional dem Widerstande. Dieser wächst im geraden Verhältnisse mit der Länge, sinkt im selben Verhältnisse mit zunehmendem Querschnitte, und es bedarf nur noch einer Vervollständigung des mechanischen Bildes, um den eigentümlichen Widerstand der Leiter zum Ausdrucke zu bringen, d. h. den Unterschied, den Leiter von verschiedenen Stoffen bei gleicher Länge und bei gleichem Querschnitte zu zeigen. Dieser Unterschied kann in dem Bilde durch verschiedene Korngröße des Füllsandes in der Röhre anschaulich gemacht und für wirkliche Leiter durch Verhältniszahlen berücksichtigt werden. Alle diese Ueberlegungen behalten auch ihre Gültigkeit, wenn man sich an dem einen Ende des Rohres durch Ansaugen eine Druckminderung hergestellt denkt. Es kommt immer nur an auf die Differenz der Drucke an den Rohrenden. Das berühmte Ohm'sche Gesetz sagt also aus, daß die Stromstärke eines elektrischen Schließungskreises proportional ist der Spannung der Elektrizitätsquelle und umgekehrt proportional dem Widerstande. Wie alle fundamentalen Erkenntnisse erscheint es hinterher so einfach, daß man sich den Zustand vorher vergegenwärtigen muß, um die Leistung des Urhebers zu würdigen, die in diesem Falle in dem unter großen Schwierigkeiten erbrachten bestimmten Nachweise von der Zulässigkeit der mechanischen Vorstellungen auch für den elektrischen Strom bestand. Daß schon die ersten Erklärungsversuche diese Richtung einschlugen, und das Gesetz schon vorher dunkel empfunden wurde, mindert nicht den Ruhm der genauen Erfassung, im Gegenteil.

Das Ohm'sche Gesetz wird jetzt so ausgesprochen: Die Stromstärke ist *gleich* der Spannung usw., da später alle Maßeinheiten so gewählt werden, daß sich die sonst erforderlichen Verhältniszahlen auf „1“ reduzieren. Weiterhin werden wir eingehender davon sprechen. Das Wesen des Gesetzes bleibt aber von der Wahl der Einheiten unberührt. Man kann es beziehen auf einen elektrischen Schließungskreis im Ganzen, wie auf einen einzelnen Teil davon, wenn man als Spannungsdifferenz an dessen Endpunkten

den in ihm zum Unterhalten des Stromes erforderlichen Bruchteil der ganzen Spannung des Schließungskreises einsetzt. Bei einer Röhre der vorher geschilderten Art kann diese Teilspannung an barometerartigen Standrohren gemessen werden, die an den Enden des betrachteten Rohrabschnittes angesetzt sind, bei einem elektrischen Strome kann sie angegeben werden durch einen Elektrometer, oder durch einen elektromagnetischen Spannungszeiger, etwa ein bussolenartiges Gerät mit vielen Windungen feinen Drahtes, dessen Widerstand so groß sein muß, daß der Strom durch den Spannungszeiger verschwindend klein ist gegenüber dem Strome durch den betrachteten Leiterabschnitt. Vorausgesetzt ist dabei natürlich, daß die Skala des Spannungsmessers nach einem gewählten Grundmaße geacht ist.

Bei den bisherigen Betrachtungen war immer stillschweigend vollständige Gleichmäßigkeit des Leiters vorausgesetzt, sodaß gleichen Längen bei gleichen Querschnitten auch gleiche Widerstände entsprachen. Besteht der Leiter aber aus mehreren hintereinander geschalteten Stücken verschiedener Art, so ist sein Gesamtwiderstand gleich der Summe der Einzelwiderstände. Das folgt ohne Weiteres aus den früheren Betrachtungen. Ebenso leicht lassen sich danach wenigstens die einfachsten Fälle der Stromverzweigung erledigen.



Figur 11.

Wenn ein Leiter an einem Punkte sich in die beiden Zweige mit den Widerständen w_1 u. w_2 teilt (Fig. 11), und die Spannungsdifferenz an den Verzweigungspunkten a und b bekannt ist, so führt jeder Zweig eine nach dem Ohm'schen Gesetze berechenbare Stromstärke, deren Summe gleich der Stromstärke in dem unverzweigten Leiter

gleich ist, die Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweige. Dasselbe gilt für eine mehrfache Stromverzweigung zwischen a und b . Handelt es sich aber um Kenntnis des Widerstandes der Stromverzweigung als eines Teiles des ganzen Schließungskreises, so wird zweckmäßig von dem Begriffe Leitfähigkeit, dem reziproken Werte des Widerstandes, Gebrauch gemacht. Dann ist offenbar die Leitfähigkeit der ganzen Verzweigung gleich der Summe der Leitfähigkeiten der einzelnen Zweige, und der reziproke Wert dieser Summe stellt den Gesamtwiderstand zwischen

den Verzweigungspunkten dar. — Für verwickeltere Fälle der Stromverzweigung bilden die Kirchhoff'schen, aus dem Ohm'schen abgeleiteten Gesetze bequeme Mittel zur Berechnung. Für unsere Zwecke können vorläufig die vorstehenden einfachsten Fälle genügen.

*

Mit der Feststellung des Ohm'schen Gesetzes gewann die Erklärung aller früheren Beobachtungen eine sichere Unterlage, und namentlich wurde immer wichtiger, für die fundamentalen Größen, elektromotorische Kraft, Stromstärke und Widerstand, bestimmte Grundmaße zu benutzen. Sie wurden zunächst rein willkürlich gewählt und deshalb auch nicht gleichmäßig angenommen. Ueber ihre Wahl entschied die Möglichkeit, sie leicht und genügend genau jederzeit darzustellen. Für die elektromotorische Kraft bot das inzwischen von Daniell erfundene konstante Element ein Mittel dazu, da die Spannung zwischen seinen Klemmen bei offenem Schließungskreise unverändert bleibt und bei einiger Sorgfalt in der Auswahl der Stoffe immer dieselbe Größe erhält. Die Stromstärke ließ sich am bequemsten ausdrücken durch die elektrolytische Wirkung. Nach dem Vorschlage Jacobi's, des Schöpfers der galvanoplastischen Technik, wurde der Strom gleich der Einheit gesetzt, der in einer Minute ein Kubikzentimeter Knallgas herstellt. Am meisten schwankte die Wahl der Widerstandseinheit. Es lag nahe, einen Metalldraht von bestimmtem Stoffe und bestimmten Abmessungen als Einheit des Widerstandes anzunehmen, es erwies sich aber als unmöglich, genaue Werte dafür einzuhalten, da der Widerstand der Drähte je nach der Reinheit des Stoffes und seiner mechanischen Behandlung, wenn auch für praktische Zwecke genügend gleichmäßig, für ein physikalisches Grundmaß zu sehr schwankt. Dieser Unsicherheit machte später Werner Siemens ein Ende durch die glückliche Wahl des Quecksilbers, das sich bei immer gleichem Gefüge am leichtesten von Beimischungen reinigen läßt, und setzte als Einheit des Widerstandes eine Quecksilbersäule von 1 qmm Querschnitt und 1 m Länge fest bei 0° C. Nach dieser, an sich unbequemen, aber im Laboratorium sicher herstellbaren Einheit wurden Neusilberdrähte geacht und an die Physiker versandt, die sich dem freundlichen Zwange nicht entziehen konnten und froh sein mußten, endlich ein brauchbares

Grundmaß zur leichten Verständigung zu besitzen. Das wissenschaftlich praktische Vorgehen von Werner Siemens, im Kleinen so bezeichnend für die fruchtbare Tätigkeit dieses großen Physikers und Technikers überhaupt, verschaffte der Siemens-Einheit allgemeinen Eingang, ist aber leider die Ursache gewesen, daß der Name des Urhebers bei der Benennung der heutigen Einheiten, die nach den Namen der hervorragendsten Förderer der Elektrizität erfolgen sollte, keinen Platz fand, damit keine Irrtümer eintreten könnten.

IV.

Mit der Herstellung des Elektromagneten begann die mechanisch-technische Anwendung der elektrischen Erscheinungen. Die Möglichkeit, ein Stück Eisen durch das einfache Schließen und Oeffnen eines Stromleiters zu einem Magneten zu machen und wieder zu entmagnetisieren, führte dazu, mechanische Arbeiten in beliebigen Absätzen ausüben zu lassen. Niemand kann sich dem anregenden Eindrücke entziehen, durch leisen Druck auf einen Knopf geheimnisvolle mechanische Kräfte ins Spiel zu bringen, nur durch Vermittlung loser Drähte, eine sinnlich-lebhaft Darstellung des Zusammenhanges der elektrischen und mechanischen Erscheinungen. Praktischen Nutzen von dem Grundelemente der Elektrotechnik, wie man den Elektromagneten mit Fug und Recht nennen darf, hat bekanntlich zuerst die elektrische Telegraphie gehabt, die auf der Uebertragung kleiner Energiemengen in elektrischer Form über große Entfernungen beruht. Unserem Programme gemäß betrachten wir aber hier nur die Versuche, große Elektromagnete zu motorischen Zwecken im engeren Sinne zu benutzen.

Bei gleicher Größe und hinreichender Stromstärke zeigten die Elektromagnete von weichem Eisen viel größere Wirkung wie die altbekannten Dauermagnete von hartem Stahle. Die verbesserten galvanischen Zellen bildeten eine bequeme Quelle elektrischen Stromes, die vorgeschrittene Erkenntnis der maßgebenden Größen erleichterte die Uebersicht der Erscheinungen, das Bestreben, die elektromagnetische Kraft mehr und mehr zu steigern, bedeutete eine natürliche Entwicklungsphase. Man erkannte bald, daß durch Vermehrung der das weiche Eisen magnetisierenden Stromwindungen zwar eine Vergrößerung der Tragkraft des Elektromagneten eintritt,

die wie bei den Dauermagneten sich als erstes rohes Maß der Wirkung darbot, daß aber keineswegs die magnetische Kraft im einfachen Verhältnisse mit den Stromwindungen wuchs, vielmehr sehr bald eine praktische Grenze erreichte und nur durch Vergrößerung des Eisenkörpers wesentlich weiter gesteigert werden konnte. Es entstanden nach damaligen Begriffen riesige Elektromagnete, deren Stärke Begeisterung erregte. Anders kann man den Eindruck nicht bezeichnen, wenn man sich erklären will, wie viele Mühe jahrzehntelang aufgewendet wurde, einen elektromagnetischen Motor herzustellen, trotzdem niemals ein aussichtvolleres Ergebnis gezeitigt wurde, und die Motoren meist nur sich selbst in Bewegung halten konnten. Ein zweckmäßig gebauter Elektromagnet in Hufeisenform, dessen Schenkel je 100 qcm Querschnitt haben, kann bei anliegendem Anker recht wohl eine Tragkraft von 3000 kg erhalten. Diese Kraft würde ungefähr dem maximalen Kolbendrucke einer modernen Dampfmaschine von etwa 20 cm Cylinderdurchmesser entsprechen. Daher lag wohl der Gedanke nahe, große Elektromagnete anstelle von Dampfzylindern zu verwenden und sie durch eine Selbststeuerung, die periodisch den Stromkreis schließt und öffnet, zum abwechselnden Anziehen und Nachlassen ihres Ankers zu befähigen, der dann durch ein Gestänge, oder in sonst geeigneter Weise auf eine Kurbelwelle wirken könnte. Die Tragkraft, d. h. die Anziehungskraft des Elektromagneten auf seinen Anker in nächster Nähe, ist nun zwar recht groß, sie wird aber mit dem Abstände des Ankers ungemein schnell schwächer, und wenn vorhin hinsichtlich der maximalen Kraft ein Vergleich zwischen Elektromagnet und Dampfzylinder angestellt werden konnte, so ist ein solcher gar nicht mehr möglich, wenn man die Wege betrachtet, die unter Wirkung der Kraft zurückgelegt werden. Legt man in dem vorigen Beispiele gleiche mittlere Druck- bzw. Zugkräfte für den Dampfkolben und den Elektromagneten zu Grunde, so ist der Weg des ersteren vielleicht 40 oder 50 mal so groß wie bei diesem. Besondere Elektromagnetformen gestatten nun zwar einen viel größeren Ankerweg. Dafür ist bei ihnen aber auch die Zugkraft entsprechend geringer, immer also das für die Arbeit maßgebende Produkt Kraft mal Weg klein. Diese Tatsache ändern zu wollen, würde heute Niemand mehr einfallen, es ist aber früher in den mannigfaltigsten Formen versucht, der Wunsch nach einem brauchbaren elektromagnetischen

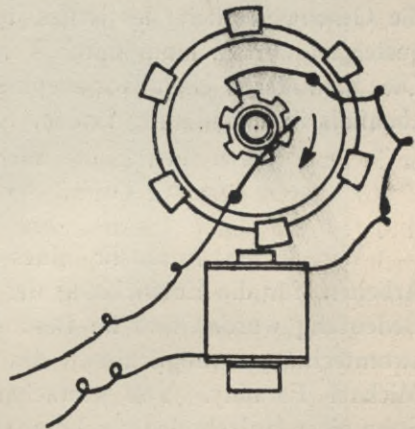
Motor war so groß, daß sogar der alte deutsche Bundestag ein Ausschreiben zur Aufmunterung in dieser Richtung erließ. Den innern Grund für die große Ausdauer in den immer von Mißerfolg begleiteten Versuchen kann man nur in der unausgesprochenen Hoffnung sehen, mit geringem elektrischem Aufwande große mechanische Leistungen zu erzielen, und auch als sich die Notwendigkeit herausstellte, bei überhaupt nennenswerter Stärke des elektromagnetischen Motors sehr umfangreiche und kostspielig zu unterhaltende galvanische Batterien zu verwenden, wurde immer noch nicht die Aussichtslosigkeit des Bemühens überhaupt erkannt. Unter den vielen Physikern und Technikern, die sich an der Herstellung elektromagnetischer Motoren beteiligten, war auch Jacobi in Petersburg, der Schöpfer der Galvanoplastik, der um 1840 angeblich in einem elektrisch betriebenen Boote auf der Newa gefahren sein soll. Stöhrer in Leipzig sollte ferner eine Drehbank mit Elektrizität und Erfolg in Bewegung gehalten haben, und als Jacobi davon hörte, erkundigte er sich, so wird berichtet, eigner schmerzlicher Mißerfolge heimlich gedenkend, bei Stöhrer nach den näheren Umständen. Die wurden ihm auch zugesagt, sofern er in seinem elektrischen Boote nach Leipzig kommen wolle!

Wir wissen jetzt auf Grund des Energiegesetzes, daß die Bemühungen um einen Elektromotor, der von einer galvanischen Batterie gespeist wird, im Keime verfehlt waren. Die mechanische Leistung des Motors kann nicht ohne Aufwand einer äquivalenten Menge anderer Leistung entstehen. Die mechanische Leistung der Dampfmaschine ist das Aequivalent des Teiles der entwickelten Wärmemenge, der nicht mehr im Abdampfe und in den Rauchgasen enthalten ist. Ebenso muß die Leistung des Elektromotors von der galvanischen Batterie aufgebracht werden. Die nähere Untersuchung lehrt, daß in diesem Falle ein oxydierendes Metall die wesentliche Energiequelle bildet, im Besonderen das meist verwendete Zink. Nun beträgt die beim Oxydieren des Zinkes entstehende Wärmemenge nur etwa ein Drittel von der des gleichen Gewichttheiles Kohlenstoff. Freilich setzt der Wärmemotor nur den kleineren Teil der Wärmemenge in mechanische Arbeit um, während die chemische Energie des Zinkes im galvanischen Elemente an sich viel vorteilhafter verwendet wird. Nähme man aber von diesem Gesichtpunkte aus gleiche Gewichte Zink und Kohle als gleichwertig an, so würde doch der Vergleich der Preise beider

Stoffe den Gedanken an wirtschaftliche Gleichwertigkeit gar nicht aufkommen lassen. Diese einfache Erwägung schnitt nach dem Durchdringen des Energiegesetzes ernsthafte Bestrebungen in der bis dahin verfolgten Richtung vollständig ab, und als in ganz anderem Entwicklungsgange ein in mechanischer Hinsicht vollkommenerer Elektromotor entstanden war, konnte nicht mehr an seinen Betrieb mit den bisher bekannten galvanischen Batterien gedacht werden. Die Frage würde aber sofort wieder auftreten, wenn es einst gelänge, brauchbare galvanische Elemente herzustellen, die durch die Oxydation von Kohle elektrische Energie liefern. Von diesem Ziele sind wir aber noch weit entfernt.

Trotz der Unbrauchbarkeit der alten Elektromotoren wird aber vielleicht nicht überflüssig sein, sie an einem Beispiele etwas näher zu betrachten, um eine irrthümliche Schlußweise zu beleuchten, die immer wieder einen endlichen Erfolg vorgaukelte. Wir wählen zu dem Ende den in der Form

einfachsten Motor von Froment (Fig. 12). Am Umfange eines Rades sind Eisenbarren angeordnet, die abwechselnd als Anker für den außerhalb aufgestellten Elektromagneten dienen. Durch die Steuerscheibe auf der Radachse wird beim Drehen des Rades der Strom periodisch geschlossen und unterbrochen und zwar so, daß er jedesmal den Elektromagneten zu umkreisen beginnt, wenn dessen



Figur 12.

Pole mitten in einer Lücke zwischen zwei Ankerbarren stehen, und wieder abgeschnitten wird, sobald ein Anker sich gerade vor den Polen befindet. Beim jedesmaligen Annähern eines Ankers an die Pole erfährt er also eine Zugkraft, ohne aber nach Ueberschreiten der Pole von ihnen zurückgehalten zu werden. Die Folge ist ersichtlich eine fortwährende Drehung des Rades, nachdem es einmal in Gang gesetzt ist, vorausgesetzt, daß seine Widerstände eine gewisse Grenze nicht überschreiten.

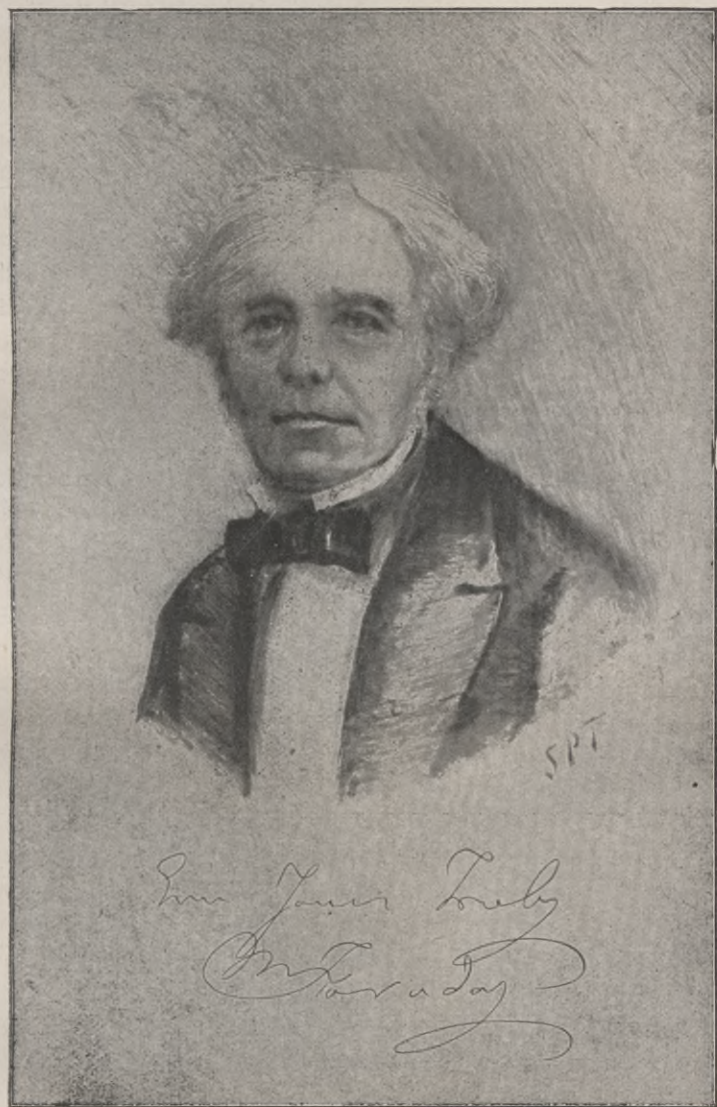
Nun könnte man schließen: Die Zugkraft des Elektromagneten, oder der Elektromagnete, denn es können zur Steigerung der

Wirkung natürlich so viele angewendet werden, als das Rad Anker trägt, mag verhältnismäßig gering sein, dafür kann das Rad sich aber sehr schnell drehen, ohne daß die Batterie mehr zu leisten hätte, denn sie ist ja bei jeder Geschwindigkeit immer während der halben Zeit eingeschaltet. Die große Geschwindigkeit müßte also trotz der geringen Kraft eine erhebliche motorische Leistung des Rades ergeben. Mit anderen Worten, bei derselben Leistung der Batterie, gleichgültig hier, nach welchem Maße diese geschätzt sein mag, würde je nach der Geschwindigkeit des Rades eine verschiedene mechanische Leistung erzeugt werden, oder diese könnte nach Belieben gesteigert werden. Das würde einen handgreiflichen Verstoß gegen das Energiegesetz bedeuten, und deshalb, so schließen wir jetzt, kann die Folgerung nicht richtig sein. Wir werden später auch erkennen, welche Gründe hier die erwartete Wirkung nicht zu Stande kommen lassen. Vorläufig mag nur bemerkt sein, daß die Geschwindigkeit des Rades tatsächlich begrenzt ist und nur gesteigert werden kann durch Vergrößerung der Batteriespannung. Die besonderen Unvollkommenheiten des Motors werden später ebenfalls ihre Erklärung finden.

*

Wir haben nunmehr eines Mannes zu gedenken, dessen Arbeiten für die Entwicklung der Elektrizität von einschneidender Bedeutung wurden und im Besonderen das Entstehen der Starkstromtechnik ermöglichten, des großen englischen Physikers Michael Faraday. Von einfacher Herkunft (er wurde 1791 als Sohn eines Hufschmiedes geboren) begann er seines Lebens Tätigkeit in den bescheidensten Verhältnissen: Er wurde Buchbinder, wie Franklin, und soll zuerst in dieser Eigenschaft mit Davy bekannt geworden sein. Jedenfalls war die zufällige Berührung mit dem damals schon berühmten Gelehrten entscheidend für seinen weiteren Lebensweg. Die Anregungen, die der Jüngling aus dem gelegentlichen Hören von Davy's Vorlesungen schöpfte, veranlaßten ihn zu eifrigem Selbststudium, mit solchem Erfolge, daß er 1813 Assistent seines Gönners an der Royal Institution in London wurde. Eine längere wissenschaftliche Reise, die er mit diesem 1815 nach Frankreich und der Schweiz unternahm, war für ihn äußerlich zwar wenig befriedigend (er ging eigentlich als Gehülfe Davy's

Tafel I.



Michael Faraday.

mit, mußte aber, um es milde auszudrücken, auch die Dienste eines Reisemarschalls versehen), brachte ihn aber in nahe Verbindung mit manchen Gelehrten des Auslandes und hat mittelbar nicht wenig zu seinem ersten Aufsteigen beigetragen. Ein freundliches Schicksal führte Faraday von da gleichmäßig aufwärts, seinem Verdienste entsprechend, wie man mit Befriedigung empfinden muß, denn selten hat sich Genie und Fleiß mit fester und zugleich reiner und gütiger Sinnesart so harmonisch vereinigt, wie bei Faraday. In vieler Hinsicht erinnert er an seinen Landsmann James Watt. Kennzeichnend für ihn ist die Art seiner Veröffentlichungen. Von seinen erstaunlich zahlreichen Arbeiten und Entdeckungen gab er nach dem ersten Abrunden sofort Kunde, die Leser an den Fortschritten teilnehmen lassend und ein schönes Beispiel dessen bietend, was Ernst Mach die Aufrichtigkeit in der Darstellung nennt, sich nicht scheuend, die Mühen der Entwicklung und gelegentliche Irrtümer sehen zu lassen. Bis in sein hohes Alter tätig (er starb 1867), hat er einen Schatz von Erkenntnis hinterlassen, der für die verschiedensten Gebiete bestimmend gewesen ist.

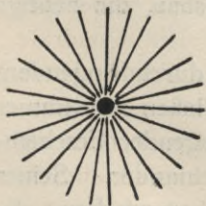
Bei der nahen Verbindung Faraday's mit Davy war natürlich, daß seine ersten Arbeiten der Chemie gewidmet waren, im Besonderen der Elektrochemie. Diese hat er durch sein elektrolytisches Grundgesetz bereichert, wonach dieselbe Stromstärke verschiedene Körper nach Maßgabe des chemischen Äquivalentes aus Verbindungen ausscheidet. Er erkannte zuerst den Einfluß des Zwischenmediums bei elektrostatischen Vorgängen, den Zusammenhang von Magnetismus und Licht, und er schuf endlich, von vielem Anderen zu schweigen, eine neue Art der Elektrizitätserzeugung, die durch Induktion, die in ihrem Ausbau die heutige Elektrotechnik darstellt.

Die Vielseitigkeit Faraday's und seine mit durchdringendem Scharfsinn gepaarte lebendige Vorstellungskraft ließen ihn immer an den Zusammenhang scheinbar auseinander liegender Erscheinungen denken und ihre Verwandbarkeit in einander. Seiner Eigenart mußte deshalb besonders eine Aufgabe entsprechen, die nach den Entdeckungen Oerstedt's und Ampère's oft angeregt war. Man hatte, in damaliger Ausdruckweise gesprochen, Elektrizität in Magnetismus verwandelt, war es nun möglich, und unter welchen Umständen, das Umgekehrte auszuführen? Ein

galvanischer Strom macht weiches Eisen zum Magneten, weshalb entstand nicht, wie sich zeigte, umgekehrt ein galvanischer Strom in den Drahtwindungen, wenn das eingeschlossene Eisen durch einen vorgelegten Magneten selbst zu einem solchen geworden war? An der Lösung dieser Frage hat Faraday unverdrossen fast zehn Jahre gearbeitet. Als ihm aber endlich 1831 die Erzeugung eines Stromes durch Magnetismus gelungen war, konnte er das ganze Gebiet der Induktion in wenigen Wochen erschliessen. Er hatte erkannt: Nicht der Magnetismus im Ruhezustande gegen den Leiter, sondern die relativen Aenderungen magnetischer Felder und Leiter gegen einander vermögen in diesen Elektrizität zu erzeugen.

Ehe wir eingehender davon sprechen, ist es zweckmäßig, oder vielmehr notwendig, eine geometrisch-mechanische Vorstellungswaise Faraday's zu skizzieren, die eine einfache Uebersicht aller elektrischen Erscheinungen ermöglicht und bis jetzt allein im Stande ist, verwickeltere Formen zu beherrschen. Faraday war nämlich ganz und gar kein Mathematiker im herkömmlichen Sinne. Er konnte, um mit Dubois-Reymond zu sprechen, „kein Binom quadrieren“. „Uebergibt es den Rechnern“ pflegte er scherzhaft-respektlos zu sagen, wenn es sich darum handelte, in den Grundzügen klar Erkanntes in seinen Verwicklungen quantitativ zu bearbeiten. Er war kein Mathematiker, aber er baute sich seine eigene Mathematik, wie seine Landsleute, die großen Mathematiker Maxwell und William Thomson (Lord Kelvin) von ihm gerühmt haben. Seine mathematische Sprache waren die Kraftlinien.

Faraday, wie manchem Anderen, widerstrebte die Annahme magnetischer und elektrischer Fernwirkung. Er dachte sich immer ein übertragendes Mittel, greifbar wie die isolierende Glasschicht zwischen den Belegungen des Kleist'schen Kondensators, oder hypothetisch, wie den Aether, das durch die magnetische oder elektrische Kraft in einen Spannungszustand versetzt wird.



Figur 13.

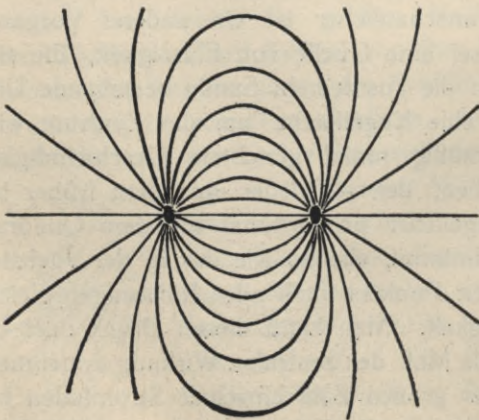
Die Faraday'schen Kraftlinien sollen nun zunächst die Richtung der Kraft in einem beliebigen Punkte des Wirkungsfeldes darstellen. Nehmen wir den einfachsten Fall, einen einzelnen Magneten, soweit ein solcher zu verwirklichen ist, oder eine punktförmige elektrische Menge (Figur 13), so ist deren Kraft allseitig wie die

Radien einer Kugel verteilt, und viele in gleichmäßigen Abständen gezogene Strahlen geben ein anschauliches Kräftebild, das aber nicht nur die Richtung der Kraft in jedem Punkte darstellt, sondern auch die Abnahme der Kraft mit dem Abstände vom Wirkungszentrum. Denn wenn im Abstände 1 von diesem durch einen gewissen Flächenteil eine bestimmte Anzahl Kraftlinien gehen, so ist der entsprechende Flächenteil im Abstände 2 nach bekanntem geometrischen Gesetze viermal so groß, oder durch einen gleich großen Flächenteil im Abstände 2 gehen nur ein Viertel der Kraftlinien, die den Flächenteil im Abstände 1 durchsetzten. Allgemein ist die Kraftlinienzahl durch gleiche Flächenteile umgekehrt proportional dem Quadrate ihres Abstandes vom Zentrum. Das ist aber dasselbe Gesetz, das für die magnetische und elektrische Kraftwirkung erwiesen wurde, und deshalb kann das geometrische Bild als Darstellung dieser Wirkung gelten. Mechanisch kann man sich ein solches Bild beispielweise auf folgende Art entstanden denken. Man nehme an, daß aus dem Zentrum eine große Zahl sehr elastischer Schnüre hervordrängen, etwa aus einem idealen Kautschuk bestehend, der unbegrenzter Ausdehnung fähig ist. Vermöge ihrer Elastizität werden die Schnüre, gewissermaßen um sich Platz zu schaffen, nach vorwärts drängen und, da keine Richtung bevorzugt ist, sich gleichmäßig strahlenförmig ordnen, in der Längsrichtung ebenso gespannt, wie in der Quere. In mancher Hinsicht noch anschaulicher ist ein anderer Vorgang: Das wirkende Zentrum sei eine Quelle von Flüssigkeit, die sich unter kräftigem Drucke in die aus feinem Sande bestehende Umgebung ergießt. Durch eine Kugelfläche um das Zentrum wird dann die überall gleichmäßig radial gerichtete Geschwindigkeit einen gewissen Wert haben, der — wieder aus dem früher betrachteten Grunde — umgekehrt proportional mit dem Quadrate des wachsenden Radius abnimmt, ebenso wie der in der nächsten Umgebung eines beliebigen Punktes nach allen Richtungen gleichmäßige Druck der Flüssigkeit. Man kann diesen Druck oder die radiale Geschwindigkeit als Maß der zentralen Wirkung annehmen, und das Ganze aus einer großen Zahl einzelner Stromfäden bestehend denken, wie vorher aus elastischen Schnüren, wobei jeder Stromfaden mit seiner Entfernung vom Zentrum gleichmäßig anschwillt, also die Form eines schlanken Trichters bietet, in dem die Geschwindigkeit nach dem erwähnten Gesetze abnehmen muß.

Stellt man sich eine recht große Zahl sehr schlanker Trichter vor, so kann jeder einzelne eine Kraftlinie und ihre Eigenschaften versinnlichen, oder noch besser eine sogenannte Kraftröhre, die ihrerseits wieder aus vielen Kraftlinien bestehen kann. Diese Bilder oder Analogien wie die Kraftlinien selbst sollen nichts weiter bedeuten, als Zustände oder Vorgänge von an sich freilich ganz anderer Art, wie die durch sie versinnlichten, bei denen aber die Aenderungen der Kräfte nach Größe und Richtung von Punkt zu Punkt sich nach demselben Gesetze vollziehen, die deshalb die Wahrscheinlichkeit bieten, auch in ihren Folgerungen und verwickelteren Formen den Erscheinungen analog zu bleiben, die wir nur in ihren Endwirkungen erkennen, deren Ursachen sich aber der unmittelbaren Beobachtung durch unsere Sinne entziehen. Die mechanischen Bilder oder Analogien können also, wenn sie gut gewählt sind, zu Schlüssen hinsichtlich der durch sie illustrierten wirklichen Erscheinungen führen, ihr Wert wird an dem Eintreffen der von ihnen vorausgesagten Folgerungen erkannt werden. Diese Probe hat die Faraday'sche Kraftlinientheorie bis jetzt noch immer bestanden.

Das oben gebrauchte Bild der Flüssigkeitsbewegung in einem hindernden Mittel ging von der Vorstellung der unter Druck nach außen strebenden Stromfäden aus. Er bleibt aber unverändert,

wenn man sich das Zentrum saugend denkt, wobei also die Geschwindigkeit und der *Unterdruck* nach dem Zentrum hin zunehmen. Kann das erste Bild der Darstellung im Sinne der früheren Festsetzungen der Wirkung eines nordmagnetischen Poles oder einer positiven elektrischen Menge gelten, so stellt das zweite



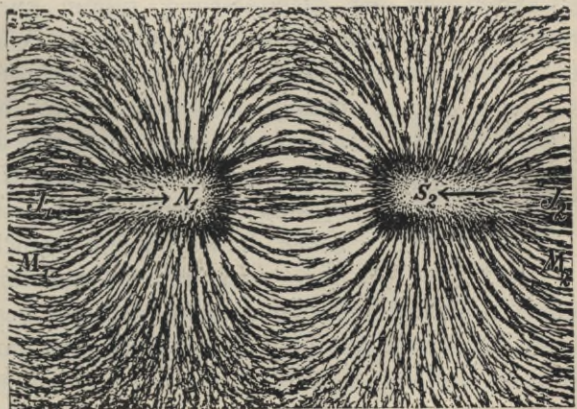
Figur 14.

die entgegengesetzte Wirkung dar. Jedes Bild für sich ist durch die Figur 13 gegeben, die Stromlinien oder Kraftlinien ändern

sich aber, wenn die entgegengesetzten Zentren bei größerer Nähe aufeinander einwirken. Dann ergibt sich ein Bild (Fig. 14), dessen Entstehung sich nunmehr leicht erklären läßt: Das Streben der Linien, sich gleichmäßig um ihr Zentrum zu ordnen, und gleichzeitig dem Drucke des einen und dem Unterdrucke des anderen Zentrums zu gehorchen, führt zu einer dichten Lagerung in der Nähe der kürzesten Verbindungslinie und zu immer größeren Bogen bei mehr und mehr abnehmender Dichte, je mehr sich die ursprünglichen Richtungen von der kürzesten Verbindungslinie abneigen. Oder anders gesagt, das eine Zentrum sucht möglichst viel der Kraftlinien des andern Zentrums abzufangen und in die eigenen Bahnen zu zwingen. Die Flüssigkeitsbewegung im widerstehenden Mittel zwischen einem Druckpunkte und einem Saugpunkte ergibt auch hier eine anschauliche Vorstellung der gesamten Erscheinung. Die Figur ist dabei selbstverständlich räumlich vervollständigt zu denken, sie zeigt uns den Verlauf der Kraftlinien in einer beliebigen durch die Zentren gelegten Ebene.

Die Linien in Fig. 14 geben nun also die Richtung an, in die sich eine kleine Magnetnadel in einem beliebigen Punkte des Raumes unter der gleichzeitigen Wirkung eines Nordpols und Südpoles einstellen würde, während die Dichte der Linien ein Maß für die Größe der richtenden Kraft bildet. Man kann solche Linienbilder auch annähernd praktisch verwirklichen durch Eisen-

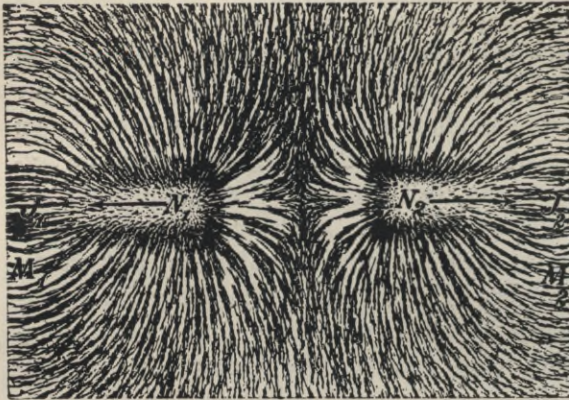
feilicht, das man auf ein Kartonblatt streut und sich durch den Einfluß darunter gehaltener Magnetpole bei leichteren Erschütterungen ordnen läßt. Solche praktisch erzeugten Bilder zeigen die Figuren 15 und 16. Das erste ent-



Figur 15.

spricht der geometrisch strengeren Form nach Fig. 14, das zweite der Ordnung der Kraftlinien zwischen zwei gleichnamigen Polen.

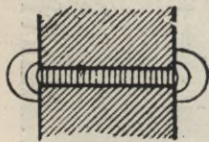
Nach den gewonnenen Anschauungen müssen offenbar die von Zentren gleicher Wirkung ausgehenden Linien sich zu verdrängen



Figur 16.

streben, wie in dem Bilde der Figur 16 klar zum Ausdrucke kommt. An Hand der Bilder kann man nun auch die Eigenschaften der Kraftlinien kurz folgendermaßen beschreiben: Sie suchen sich zwischen den Ausgangstellen zu verkürzen und zu verdichten, entgegen dem Zwange, der sich als abstoßender Querdruck der Kraftlinien gleicher Ausgangstelle oder gleichartiger Ausgangstellen aufeinander kundgibt.

Die vorstehenden Betrachtungen sollen nur eine Andeutung der mathematisch sorgfältig ausgebauten Kraftlinientheorie geben und eine Empfindung für ihre Grundanschauungen wecken, die, wenn klar erfaßt, schon in die wichtigsten Erscheinungen Einblick gewähren. In der Elektrotechnik führen nur die feineren Betrachtungen zu verwickelteren Kraftbildern. Wie schon früher bemerkt, kommen technisch vor allem ausgedehnte, annähernd gleich-



Figur 17.

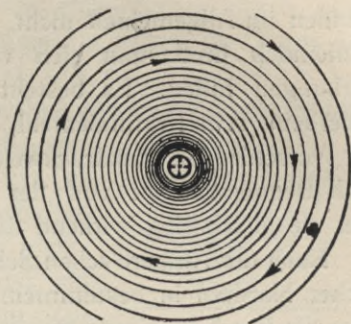
mäßige und sehr starke Kraftfelder zur Anwendung, deren Schema durch Figur 17 angedeutet sein mag: Zwischen den nahe gerückten Magnetpolen mit großen ebenen Flächen gehen die Kraftlinien als dichtes Bündel parallel über, und nur an den Rändern treten unter schnell abnehmender Dichte mehr oder weniger gekrümmte Kraftlinien auf, deren genauere Berücksichtigung umständlichere Untersuchung verlangt. Auch dieser Sonderfall kann leicht durch die früher gebrauchten Bilder — elastische Schnüre oder Flüssigkeitsbewegung — versinnlicht werden.

Die Grundform der magnetischen und elektrostatischen Kraftlinien war die gerade, vom Kraftpunkte ausgehende Linie, ent-

streben, wie in dem Bilde der Figur 16 klar zum Ausdrucke kommt. An Hand der Bilder kann man nun auch die Eigenschaften der Kraftlinien kurz folgendermaßen beschreiben: Sie suchen sich zwischen den Ausgangstellen

sprechend der Wirkung einer nur für sich betrachteten punktförmigen Menge. Ueberträgt man aber die Vorstellungweise auf die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes, so erscheint als Grundform der Kraftlinie hierfür die geschlossene, den Stromleiter umgebende Kurve. Denn wir haben früher gesehen, daß die magnetische Stromkraft quer zum Stromleiter und um ihn herum verläuft. In dem besonderen Falle eines langen linearen Leiters sind deshalb die Kraftlinien konzentrische Kreise zu ihm, und da

auch hier die Dichte der Kraftlinien die Größe der magnetischen Kraft anzeigen soll, für deren Abnahme mit dem Abstände vom Leiter wir schon das Gesetz kennen gelernt hatten, so ergibt sich das Bild Fig. 18, wo der mittelste Kreis den Querschnitt des Leiters vorstellt. Nach der früher mitgeteilten willkürlichen Festsetzung der Stromrichtung, die von dem positiven Pole der Elektrizitätsquelle



Figur 18.

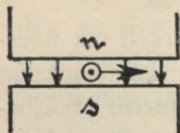
ausgehen soll, welche Bezeichnung ebenfalls willkürlich als übereinstimmend mit der Glaselektrizität angenommen ist, wird ein magnetischer Nordpol durch die Kraftlinien einen Antrieb im Uhrzeigersinne erfahren, wenn der Strom in dem Leiter vom Auge des Beschauers nach hinten fließt, hergeleitet aus der Ampère'schen Schwimmregel. (Ein Kreuz in dem Leiterquerschnitte bedeutet hier wie im Folgenden diese Stromrichtung, ein Punkt die umgekehrte. Diese Signaturen sollen das Gefieder bzw. die Spitze eines Pfeiles vorstellen, der die Stromrichtung kennzeichnet.)

*

Mit Hülfe der Kraftlinienvorstellung sollen nun weitere schon früher berührte wichtige Einzelheiten in erweiterter Form dargestellt werden. Vielleicht wird der Leser dabei gelegentlich einigen Mangel an Folgerichtigkeit in der Verwendung der neuen Anschauungsweise empfinden. Bedient man sich nämlich der Kraftlinien, so müßten genau genommen nur solche in die Betrachtung eintreten, ein Strom müßte immer ersetzt erscheinen durch sein zirkulares

Kraftfeld, das ja nur eine besondere Ausdruckform für ihn ist, ein magnetischer Punkt durch sein strahlenförmiges Feld u. s. w., allgemein dürfte man nur Gleichartiges auf Gleichartiges, Kraftlinien auf Kraftlinien wirken lassen. Der einfacheren Darstellung wegen verfährt man aber meist nicht so genau, betrachtet einen Strom in einem Kraftlinienfelde, einen magnetischen Pol in dem Felde eines Magneten, auch die Wirkung von Strömen aufeinander gelegentlich gemischt nach der einen Vorstellungsweise und der anderen. Solche durch die Kürze nahe gelegte Vereinfachungen schaden im Allgemeinen nicht, führen aber manchmal zu Zweifeln. Namentlich muß man sich vor der willkürlichen Häufung von Wirkungen hüten. Es besteht beispielweise nicht ein Strom und außerdem sein Kraftlinienfeld, sondern beide Vorstellungen sind nur verschiedene Ausdrucksweisen derselben Tatsache. Man darf nach Bequemlichkeit von der einen zur andern übergehen, nicht aber sie gleichzeitig wirkend denken.

Nach der Ampère'schen Schwimmregel bewegt sich ein magnetischer Nordpol in bestimmtem Sinne quer zum Strom. Wendet man die Regel in einem magnetischen Felde nach Art der Figur 18 an, so will sich der Nordpol nach links verschieben (Fig. 19), nach dem Prinzip der Gegenwirkung aber der Leiter selbst nach rechts, also, wenn wir jetzt mit Hülfe der Kraftlinien erläutern wollen, in bestimmter Richtung senkrecht zu ihnen, und diese Richtung kann oft



Figur 19.

bequemer durch eine andere Regel gefunden werden. Aus der Figur ist zu entnehmen: „Denkt man sich als Pfeil in den Kraftlinien schwimmend und in der Richtung des Stromes sehend, so ist der Bewegungsantrieb des Leiters durch den ausgestreckten rechten Arm angedeutet.“ Längs der Kraftlinien erfährt der Leiter keinen Antrieb und überhaupt nur dann, wenn er bei eintretender Bewegung Kraftlinien durchschneiden würde. Etwas Neues ist damit nicht gesagt, denn es ist nur eine unmittelbare Folge der Oerstedt-Ampère'schen Feststellungen.



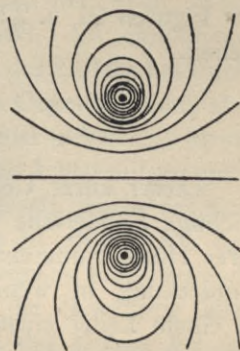
Figur 20.

Zwei parallele gleichgerichtete Ströme ziehen sich nach Ampère an, ungleich gerichtete stoßen sich ab. Wie diese Tatsache durch Kraftlinien zu versinnlichen ist, zeigt Figur 20, in der die Kraftfelder nur durch je eine Linie

dargestellt sind. Im ersteren Falle (a) heben sich die Kraftwirkungen zwischen den Linien teilweise gegenseitig auf, die Kraftlinien verschmelzen, und das punktiert angedeutete gemeinschaftliche Kraftliniensystem umschnürt gewissermaßen elastisch die Leiter. Das Umgekehrte findet im zweiten Falle statt (b), die gegeneinander pressenden Kraftlinien gleicher Richtung zwischen den Leitern bedeuten eine Verstärkung der magnetischen Kraft und suchen die Leiter, oder richtiger die beiden Kraftsysteme von einander zu entfernen. Zu demselben Ergebnis gelangt man, wenn man — wie wohl an sich nicht folgerichtig — den einen Strom durch sein Kraftsystem darstellt, in dem der andere im Sinne der Figur 19 einen Bewegungsantrieb erhält.

Die Kraftlinien eines langen geraden Leiters sind konzentrisch um ihn gruppiert (Fig. 18). Wenn der Leiter

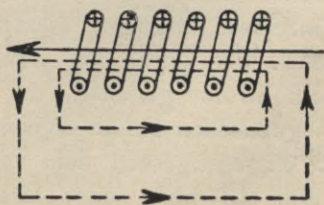
zu einem Kreise gebogen wird (Fig. 21), so muß nach den entwickelten Eigenschaften der Kraftlinien ein Zusammendrängen innerhalb des Kreises erwartet werden und ein Erweitern an den Außenseiten, beim Zusammenbiegen des geraden Leiters zum Kreise werden gewissermaßen die elastischen Kraftlinien von ihrem ursprünglichen Zentrum verdrängt und zusammengeschnürt. Die wirkliche Berechnung der Kraftwirkungen (die wir für den Mittelpunkt des Leiterringes kennen gelernt haben) berechtigt durchaus diese Anschauung.



*Figur 21.

Ebenso anschaulich ist hier die auch schon von Faraday verwendete Vorstellung des Leitvermögens des umgebenden Raumes für die Kraftlinien. Danach steht für diese innerhalb des Kreises nur ein geringer Querschnitt zur Verfügung, außen aber wählen sie weitere, weil bequemere Wege zum Schließen.

Das Bild nach Figur 21 ändert sich nicht wesentlich, wenn mehrere Kreisströme parallel nebeneinander liegen, wenn aber viele Stromwindungen zu einem langen Solenoid vereinigt sind (Fig. 22), so werden die Kraftlinien, in dem rohrartigen Innenraume zusammengedrängt, immer flacher, je länger das



Figur 22.

Solenoid ist. Stellen wir uns zwei einzelne Kraftlinien ganz roh als Rechtecke vor und denken an das Bestreben jeder Kraftlinie sich elastisch zu verkürzen, so werden die senkrechten Linienteile, die auf Zusammenziehen der horizontalen Teile wirken, mit zunehmender Rohrlänge relativ immer kürzer, mit der Folge, daß der Zwang zu ungleichmäßiger Verteilung der Kraftlinien, der in Fig. 21 deutlich hervortritt, immer schwächer wird, und der Querdruck der Linien aufeinander ihr Wandern nach der Achse begünstigt. So fortschreitend kann man schließen, daß ein unbeschränkt langes Solenoid die Kraftlinien in ganz gleichmäßiger Verteilung einschließt. Das bestätigt ebenso die Rechnung, wie die Vorstellung der Kraftlinien als elastische Schnüre. Würde man mit solchen einen einfachen Ring und ein langes Rohr im Sinne der Figuren 21 u. 22 bewickeln, so würden genau die Bilder entstehen.

*

Dieser kurze Ueberblick über die Kraftlinientheorie und einige wichtige Sonderfälle wird gerechtfertigt durch die Möglichkeit, mit ihrer Hülfe nunmehr den wesentlichen Inhalt der Faraday'schen Entdeckung in wenigen Zeilen vollständig angeben zu können: In einem Leiter entsteht bei seiner relativen Bewegung in einem magnetischen Felde immer eine elektromotorische Kraft, wenn er dabei Kraftlinien schneidet. Wenn also ein beweglicher Leiter nach Figur 19 unter Schneiden der Kraftlinien verschoben wird, so wird in ihm eine elektromotorische Kraft (EMK) induziert, und wenn er geschlossen ist, entsteht in ihm ein Induktionstrom.

Die Frage ist nun zunächst, in welcher Richtung die EMK wirkt. Einige Jahre nach den ersten Veröffentlichungen Faraday's über die Induktion hat Lenz eine Regel dafür angegeben, die ebenso kurz wie die Faraday'sche Entstehungsregel ist und alle Einzelbestimmungen überflüssig macht: Die EMK der Induktion bzw. der durch sie erzeugte Strom ist immer entgegengesetzt dem Strome gerichtet, der dieselbe Verschiebung des Leiters im magnetischen Felde ergeben würde. Oder: Der Induktionstrom ist entgegengesetzt dem verschiebenden Strome. Sollte also die Figur 19 nicht der Darstellung eines strombewegten Leiters, sondern eines induzierten Leiters dienen, so müßte bei derselben

Bewegungsrichtung der Strom im Leiter umgekehrt werden. Die weitere Folge daraus ist aber: In dem strombewegten Leiter, der ebenso wie der mechanisch bewegte der Induktion ausgesetzt ist, wird die Stromstärke verringert, da der EMK der Stromquelle die EMK der Induktion entgegenwirkt.

Das Lenz'sche Gesetz ist äußerst interessant, weit über seinen nächsten Zweck hinaus. Lenz hat es abgeleitet als Tatsache aus vielen Beobachtungen, es aber gewiß in Vorahnung des Energiegesetzes erfaßt, denn es ist eine notwendige Folge aus diesem. Würde nämlich in Figur 19 die EMK der Induktion dieselbe Richtung haben wie der bewegende Strom, so müßte dieser immer stärker werden; die bewegende Kraft würde immer mehr wachsen, ohne Aufwand einer äquivalenten Energie. Oder auch, wenn man sich die äußere Stromquelle entfernt denkt, der einmal eingeleitete Induktionstrom würde die Bewegung des Leiters befördern und sich dabei ohne Grenzen verstärken. Im Gegenteil muß aber für den Induktionstrom, der doch ganz wie jeder elektrische Strom Arbeit leistet, eine äquivalente, z. B. mechanische Arbeit aufgewendet werden. Daher kann man das Lenz'sche Gesetz auch so aussprechen: Die Richtung des Induktionstromes ist immer so, daß er die Bewegung des Leiters, oder die der Bewegung entsprechende Erscheinung hindert. Dieser Zusammenhang der Bewegung eines Leiters durch den Strom mit der Induktion des Leiters bei der Bewegung erklärt auch die gemeinschaftliche Regel für das Zustandekommen beider Erscheinungen, das Schneiden der Kraftlinien. Das Lenz'sche Gesetz bildet das unmittelbare Bindeglied zwischen der elektrischen Strömung und den mechanischen Vorgängen.

Nach Feststellung der Richtung der EMK tritt von selbst die Frage nach ihrer Größe auf. In der Volta'schen Säule und ihren Abkömmlingen ist die Größe der EMK abhängig von der Zahl der hintereinandergeschalteten Elemente, denn in jedem von diesen wirkt eine elektrische Kraft bestimmter Größe, und es bedarf nur des Aneinanderfügens der Einzelkräfte in demselben Sinne. Nun ist offenbar die Größe der EMK der Induktion proportional der magnetischen Feldstärke, oder der Dichte der Kraftlinien. Denn wenn in einem Leiter durch Schneiden der Kraftlinien eines magnetischen Feldes eine gewisse EMK induziert wird, so könnte er an einer anderen Stelle durch ein gleiches Feld in demselben Sinne

gleichzeitig beeinflußt werden, die EMKe würden sich wie bei der Volta'schen Säule addieren. Die beiden Felder können aber, ohne die Gesamtwirkung zu ändern, zu einem einzigen von doppelter Stärke oder doppelter Kraftliniendichte vereinigt werden. In ähnlicher Weise kann man aber auch schließen, daß die EMK des induzierten Leiters proportional seiner wirksamen, d. h. im Felde bewegten Länge ist. Denn die einzelnen Leiterelemente sind wieder wie in der Volta'schen Säule hintereinander geschaltet. Da endlich bei relativem Ruhezustande des Leiters im Felde keine Induktion erfolgt, so muß auch die relative Geschwindigkeit des Leiters für die EMK maßgebend sein. Wenn nun unter bestimmten Umständen eine gewisse Geschwindigkeit eine gewisse EMK erzeugt, so kann zu dieser wieder die gleiche EMK addiert werden, die unter gleichen Bedingungen an einer anderen Stelle des Leiters induziert wird. Dieselbe Wirkung würde aber erreicht, wenn dieselbe Leiterstelle in derselben Zeit zweimal um dieselbe Strecke in dem einen Felde verschoben würde. Daraus ergibt sich allgemein auch die einfache Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und EMK.

Zusammengefaßt also: Die EMK der Induktion ist einfach proportional der magnetischen Feldstärke, der Länge des Leiters und seiner Geschwindigkeit. Vorausgesetzt ist dabei aber stillschweigend, daß die Bewegung des Leiters nur im Sinne der stärksten Wirkung, d. h. senkrecht zu den Kraftlinien erfolgt. Da man nun nicht ausschließlich mit ganz gleichmäßigen Feldern zu tun hat, wie ein solches durch Figur 19 dargestellt sein sollte, so müßte man im Allgemeinen den Leiter stückweise unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitskomponenten betrachten, um das obige Gesetz bestätigt zu finden. Es läßt sich aber auch viel einfacher ausdrücken. Beachtet man nämlich, daß in dem vorausgesetzten einfachsten Falle durch die Leiterlänge, die Geschwindigkeit und die Kraftliniendichte auch die in der Zeiteinheit geschnittene Zahl der Kraftlinien ausgedrückt ist, und daß in abweichenden Fällen für jeden Leiterteil dasselbe gilt, so kann man allgemein sagen: Die EMK der Induktion ist proportional der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinienzahl.

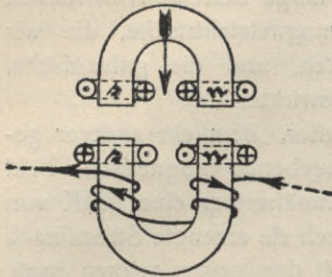
In diesen einfachen Gesetzen ist tatsächlich das ganze Gebiet der Induktionserscheinungen enthalten, so viel Schwierigkeiten in den besonderen Fällen auch ihre Handhabung bereiten kann.

Denn die Formen, in denen Leiter und magnetische Felder in Wechselwirkung treten können, sind sehr verschieden und wiewohl Faraday in ganz kurzer Zeit nach seiner ersten Entdeckung alle typischen Fälle von einem gemeinsamen Gesichtspunkte erledigt hatte, so unterschied man doch noch lange Zeit gewissermaßen als besondere Arten der Induktion die magnetelektrische, die wir an der Grundform oben kennen lernten, und die galvanische, nämlich die von Leitern auf einander bewirkte.

Ein gerader stromdurchflossener Leiter, dem ein anderer genähert wird, erregt durch das ihn umgebende magnetische Feld in dem zweiten Leiter während der Annäherung eine EMK von entgegengesetzter Richtung, weil der durch sie erzeugte Strom nach dem Lenz'schen Gesetze abstoßend auf den ersten wirken muß. Die umgekehrte Bewegung ergibt aber gleiche Richtung der Ströme, weil diese sich dann anziehen, und die zu ihrer Entfernung nötige Arbeit das mechanische Aequivalent der Erzeugung des Induktionsstromes ist. Die Richtung des induzierten Stromes ergibt sich natürlich auch, wenn man den zweiten Leiter die zirkularen Kraftlinien des ersten schneidend denkt. Anstatt die beiden Leiter wirklich in wechselnde Entfernung zu einander zu bringen, kann man auch mit derselben Wirkung bei feststehenden Leitern den Strom in dem ersten verstärken und schwächen, entsprechend dem Annähern und dem Entfernen der Leiter. Dann werden beim Entstehen und Verstärken des induzierenden Stromes die zirkularen Kraftlinien um den ersten Leiter nach außen wandern, sie schneiden den induzierten Leiter in demselben Sinne, als wenn dieser sich jenem nähert, und umgekehrt. Diese Bewegungen sind endlich nicht an die geradlinige Form der Leiter gebunden, wie der leichteren Uebersicht wegen zunächst angenommen war, sie gelten vielmehr für Leiter jeder Form, beispielweise auch für kreisförmige. Und da man der ähnlichen magnetischen Feldform wegen Kreisströme und ihnen ähnliche ersetzt denken kann durch Magnete, so läßt sich durch diese Ueberlegung ein Uebergang von der Induktion durch Ströme auf die Induktion durch Magnete herstellen.

Für die praktische Verwendung der Induktion zur Erzeugung von elektrischen Strömen mußten sich von jeher die Formen besonders großer Wirkung anbieten, das sind die starken Felder von Magneten, in denen sich Leiter relativ verschieben. Die einfachste und übersichtlichste Form dieser Art haben wir an Figur 19 er-

läutert, sie praktisch nutzbar zu machen ist aber erst später mit Hilfe des sogenannten Ringankers von Pacinotti und Gramme gelungen. Leichter zu verwirklichen war zunächst die schon lange bekannte gewöhnliche Form des Elektromagneten.



Figur 23.

Wenn man ein richtig gewickeltes (Figur 23 unten) hufeisenförmiges weiches Eisenstück (um gleich die zweckmäßigste Gestalt zu nehmen) durch einen Strom erregt, so wird es magnetisch. Wenn man es umgekehrt durch Nähern oder Entfernen eines Magneten (oben), etwa eines Stahlmagneten, abwechselnd magnetisiert und entmagnetisiert, so entsteht in seinen

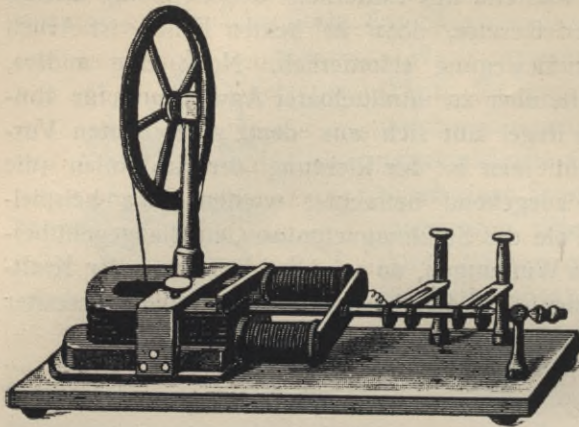
Leiterwindungen eine EMK bzw. ein Induktionstrom, denn in der Nähe des zu vielen Windungen zusammengelegten Leiters entstehen und verschwinden Kraftlinien, die nach Faraday die Induktionwirkung erzeugen. Diese muß besonders kräftig sein, weil eben auf verhältnismäßig kleinem Raume eine große Drahtlänge in Tätigkeit kommt. Will man hier die Vorstellung vom Schneiden der Kraftlinie durch den Leiter verwenden, so muß man annehmen, daß beim Magnetisieren die Kraftlinien von außen in den Eisenkern wandern und schließlich ihn bündelartig füllen, während umgekehrt beim Entmagnetisieren das Bündel sich wieder löst und in den Außenraum zerstreut, beide Male unter Schneiden des umgewickelten Leiters. Damit ist aber auch sofort die Richtung des Induktionstromes bestimmt. Anders und hier einfacher läßt sich diese angeben, wenn man sich den Stahlmagneten durch äquivalente Kreisströme ersetzt denkt, wie in der Figur durch Stromringe im Querschnitte angedeutet. Der weiteren Deutlichkeit wegen sind auch die Windungen des Elektromagneten an den Polen durch zwei einzelne Stromringe vertreten gedacht. Nähert man nun den Stahlmagneten dem Elektromagneten, so müssen in den Ringpaaren nach dem Lenz'schen Gesetze entgegengesetzte Ströme entstehen, wie durch die bekannten Signaturen angegeben. Das Umgekehrte tritt ein beim Entfernen des Stahlmagneten. Dem Induktionstrom im ersten Falle entsprechen gleiche gegenüberstehende Pole von Stahlmagnet und Elektromagnet, im zweiten Falle ungleiche Pole. Deshalb kann man auch so sagen: Während des Annäherns des

Stahlmagneten (es ist immer festzuhalten, daß die Wirkung nur während der jedesmaligen Bewegung eintritt) wird der Elektromagnet gleichpolig, während des Entfernens ungleichpolig, wieder nach dem Lenz'schen Gesetze, denn in beiden Fällen ist Arbeit zum Ausführen der Bewegung erforderlich. Noch eine andere, im Wesen nicht neue, aber zu unmittelbarer Anwendung für ähnliche Fälle bequeme Regel läßt sich aus dem geschilderten Vorgange ableiten: Sieht man in der Richtung der Kraftlinien (die also vom Nordpole ausgehend betrachtet werden) also beispielsweise vom rechten Pole des Stahlmagneten aus, in die gegenüberliegenden induzierten Windungen, so wird bei Zunahme der Kraftlinien in den Windungen ein dem Uhrzeigersinne entgegengesetzter Strom erzeugt, und umgekehrt. —

*

Die vorher behandelte Vorrichtung hatte Faraday als eine besondere Form der Induktionserzeuger angegeben und bald nach seiner ersten Veröffentlichung darüber wurden die ersten eigentlichen Induktionmaschinen hergestellt, die genau das Grundprinzip benutzten und nur das Nähern und Entfernen des induzierenden Magneten unmittelbar von Hand einem gleichmäßiger arbeitenden Mechanismus übertrugen. Ein solcher Mechanismus, der die hin- und hergehende Bewegung nachahmt, ist leicht herzustellen, viel einfacher aber wird die Maschine, wenn man durch Drehen des induzierenden Magneten um seine Achse einen fortwährenden Wechsel der Pole eintreten läßt. Denn der Bedingung, dem induzierten Magneten die induzierenden Pole des anderen so nahe als möglich gegenüber zu bringen und gleich wieder abzureißen, wird dadurch vollkommen genügt, und statt der ruckweisen Bewegung führt man dabei eine ununterbrochene Drehung ein. Diese Anordnung hatten die ersten sogenannten magnetelektrischen Maschinen. Da sich ferner für den induzierenden Stahlmagneten erhebliche Größe und Gewicht ergab, wenn er von genügender Wirkung sein sollte, so legte man ihn später fest und machte den leichteren „Anker“ drehbar. Eine solche Form zeigt die Figur 24, die mit geringen Aenderungen sehr lange in Gebrauch war, auch nachdem sie für größere Leistungen nicht mehr in Frage kam. Sie bildete namentlich ein bequemes Mittel zum Erzielen physiologischer

Wirkungen für ernsthaft gemeinte ärztliche Zwecke oder nur zur Spielerei. Sie kann aber auch heute noch als gutes Lehrmittel



Figur 24.

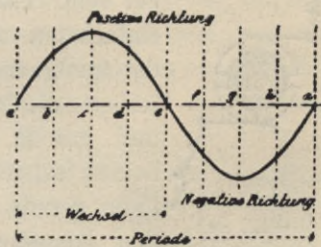
zum Veranschaulichen vieler Induktionserscheinungen dienen und ist als solches im Allgemeinen viel brauchbarer, als die „kleine Dynamomaschine“, deren Besitz oder womöglich Selbstherstellung jetzt oft das Ziel

jugendlichen Strebens bildet.

Der Aufbau der Maschine geht deutlich aus der Figur hervor. Der Stahlmagnet ist aus einer Anzahl dünnerer Lamellen zusammengesetzt, da sich diese leichter durchmagnetisieren lassen, der hufeisenförmige Anker mit den Spulen von isoliertem Drahte auf den Schenkeln ist gut ausbalanciert vor den Polen des Stahlmagneten drehbar gelagert, und durch einen Schnurtrieb kann der Welle von dem Handrade aus eine größere Geschwindigkeit erteilt werden. Um nun eine leitende Verbindung zwischen den beweglichen Spulen und den festen Anschlußklemmen herzustellen, sind Schleiffedern angeordnet, die auf der Welle isoliert befestigte Schleifringe sanft berühren, während diese selbst mit den Drahtenden der Spulen verbunden sind. Nehmen wir einfache vollständige Schleifringe an, die unter sich und gegen die Welle etwa durch Rohrstücke von Hartgummi isoliert sind, so zeigen die Klemmen der Maschine dieselbe Größe und Richtung der beim Drehen des Ankers entstehenden EMKe, wie an den Enden der Wicklung herrschen.

Die Richtung der EMK läßt sich nun leicht bestimmen. Gehen wir aus von der Ankerstellung, in der sich seine Pole denen des induzierenden Magneten gerade gegenüber befinden, und betrachten wir zunächst nur einen der Ankerschenkel, so wird in seiner Spule beim Entfernen der Pole eine EMK entwickelt, die

sich unter Berücksichtigung des in Frage kommenden Stahlpoles aus der zuletzt mitgeteilten Regel ergibt. Der Kraftfluß (die Summe der Kraftlinien) in dem Ankerpole nimmt ab und gleich darauf beim Annähern an den andern Stahlpol wieder zu, aber in entgegengesetzter Richtung. Das Abnehmen und Zunehmen des Kraftflusses in dem betrachteten Ankerpole beim Uebergange von einem induzierenden Pole zum andern erzeugt also eine EMK derselben Richtung, die erst wechselt, wenn nunmehr der Ankerpol anfängt sich wieder von dem eben erreichten induzierenden Pole zu entfernen. Dasselbe gilt auch natürlich für den zweiten Ankerpol, und da wir annehmen, daß die Spulen richtig geschaltet sind, d. h. so, daß sich die EMKe beider Spulen addieren, so ergibt sich: Von der Lage Pol gegen Pol ausgehend beginnt die EMK mit Aenderung der die Spulen durchsetzenden Kraftflüsse wirksam zu werden, sie nimmt mit der Drehung zu und wird wieder zu Null, nachdem sich der Anker um 180° gedreht hat, um dann wieder, aber im entgegengesetzten Sinne zu wirken und so fort, sodaß sie bei jeder vollständigen Drehung des Ankers zweimal zunimmt und abnimmt, ihr Sinn aber bei jeder Halbdrehung dem in der vorhergehenden oder nachfolgenden entgegengesetzt ist. Kann bei leitender Verbindung der Maschinenklemmen ein Strom zu Stande kommen, so muß er ebenso die Richtung wechseln wie die ihn erzeugende EMK, beide also werden, wenn man sie sich in der für periodische Aenderungen überhaupt gebräuchlichen Art graphisch dargestellt denkt, wellenartig verlaufen, wie in Figur 25 angegeben. Die horizontale Mittellinie bedeutet dabei den in Wirklichkeit kreisförmigen Weg der Ankerpole, oder besser den Drehwinkel des Ankers, ihre Länge entspricht im letzteren Falle einer ganzen



Figur 25.

Drehung von 360° , die gleichmäßigen Unterabteilungen ebensolchen Teilen davon. Nimmt man nun (willkürlich) die senkrechten Ordinaten oberhalb der Mittellinie als Darsteller der in den zugehörigen Ankerstellungen wirksamen positiven EMKe oder des erzeugten Stromes, so bedeuten die Ordinaten unterhalb der Mittellinie dieselben Werte bei entgegengesetztem Vorzeichen. Die in der Figur gezeichnete Welle giebt im Uebrigen nur ein Beispiel

der möglichen Wellenformen. Je nach den Umständen kann dies Gesetz, nach dem die Werte der EMK oder des Stromes zunehmen und abnehmen, sehr verschieden sein, sicher ist nur die Richtungsänderung innerhalb jeder vollständigen Drehung oder Periode, anders gesagt die Zusammensetzung der Periode aus zwei Wechseln, d. h. aus Wellenberg und Wellental.

Der in der beschriebenen Weise erzeugte Wechselstrom kann in geeigneten Fällen, z. B. für physiologische Zwecke unmittelbar brauchbar und erwünscht sein, in anderen Fällen aber, z. B. für elektrolytische Zwecke, ist in dem Schließungskreise immer dieselbe Stromrichtung erforderlich. Die Möglichkeit, mit der betrachteten Maschine trotz des fortwährenden Richtungswechsels im Anker den äußeren Schließungskreis doch nur mit Strom derselben Richtung zu versorgen, erkennt man sofort, wenn man sich vorstellt, daß man beim jedesmaligen Richtungswechsel auch die von den Klemmen ausgehenden Leitungen wechselte, sodaß die eine Leitung immer nur an der jeweilig positiven Klemme, der andre an der jeweilig negativen liegt. Bei der großen Geschwindigkeit der Vorgänge kann das natürlich nur mit einem besonderen mechanischen Mittel geschehen, am besten so, daß schon die Klemmen selbst immer Spannung desselben Sinnes erhalten. Zu dem Ende wird auf der Ankerwelle anstatt der früheren Schleifringe ein sogenannter



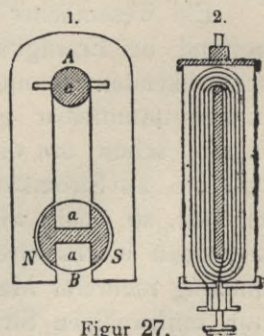
Kommutator, Kollektor oder Stromwender vorgesehen, der sehr verschiedenartig ausgebildet sein kann, am einfachsten aber sich nach Figur 26 darstellt. Auf der im Querschnitte gezeichneten Welle sind wieder isoliert die beiden metallenen Halbringe angeordnet und mit je einem Wicklungsende verbunden. Die beiden feststehenden Schleiffedern, die sich in diesem Falle gerade gegenüber befinden müssen, sind mit

den Klemmen verbunden. Stehen außerdem die Klemmen so, daß mit dem Wechsel der Stromrichtung im Anker auch der Wechsel in der Berührung der Halbringe durch die Schleiffedern eintritt, so erhält jede davon immer Spannung desselben Sinnes. Der von den Schleiffedern oder Bürsten abgenommene, den äußern Schließungskreis durchfließende Strom setzt sich also aus einzelnen Halbwellen derselben Richtung zusammen und kann graphisch dargestellt gedacht werden, indem man in Figur 25 die untere Welle nach oben klappt. Ganz zu-

treffen würde diese Darstellung indessen nicht, denn die Wellen des Gleichstromes sind aus später zu erörternden Gründen abgeflacht und namentlich ohne die scharfen Spitzen an der Grundlinie, die bei der gedachten Umwandlung der Wechselstromwelle entstehen würden. Jedenfalls ist der erzeugte Strom zunächst ein Wechselstrom und bleibt ein Wechselstrom im Anker, wird aber durch den Kollektor für den äußeren Schließungskreis in Gleichstrom verwandelt. Diesen Vorgang zeigen alle bisher gebräuchlichen Gleichstrommaschinen, die in dieser Hinsicht der betrachteten einfachen Maschine nur durch die Erzeugung praktisch vollkommenen Gleichstromes überlegen sind, der weder seine Richtung noch seine Stärke periodisch ändert.

Magnetelektrische Maschinen nach Figur 24 eignen sich ihrer Bauart nach nur für kleine Leistungen. Da ein starker Anreiz zum Bau größerer Maschinen sehr bald durch das Streben gegeben war, das elektrische Bogenlicht in praktischen Gebrauch zu bringen, dessen Herstellung durch galvanische Batterien zu lästig und zu teuer war, so entstanden magnetelektrische Maschinen der verschiedensten Formen, unter denen die Maschine der Alliance von Nollet für Leuchtturmlampen die größten waren und teilweise bis zum Ende der 70er Jahre in Gebrauch blieben. Grundsätzlich unterschieden sie sich nicht von der einfachen Maschine, bemerkenswert waren sie hauptsächlich durch ihren nach heutigen Begriffen riesigen Umfang im Verhältnisse zu ihrer Leistung, der sich ergab aus der geringen Kraft der Stahlmagnete und deren schwieriger Herstellung in Form von sogenannten Magazinen aus ziemlich kleinen und vor Allem dünnen Einzelmagneten. Im wesentlichen blieben deshalb die magnetelektrischen Maschinen auf kleine Leistungen beschränkt, erhielten dafür aber Ende der 50er Jahre eine besonders geeignete Form durch den Doppel T-Anker von Werner Siemens.

Die Siemens'sche Maschine ist durch Figur 27 schematisch erläutert, in einem Schnitte senkrecht zur Ankerachse und einem Längsschnitte durch den Anker allein. Zwischen den Polen der Stahlmagnete dreht sich der in Grundform zylindrische Anker, in dessen Längsnuten a a der induzierte Draht gewickelt ist. Der Anker hat also den Charakter



Figur 27.

eines geraden Elektromagneten mit stark verbreiterten Polen, seine Wirkung ist aber ganz dieselbe, wie in der Maschine nach Figur 24, denn er verbindet ebenso wie der dort angewendete Hufeisenanker wechselweise magnetisch die Stahlpole, bei diesem Wechsel seine Wicklung induzierend. Er kann aber, wenn durch Drahtbunde oder Ringe (in der Figur nicht angegeben) die langen Drahtlagen gegen Ausweiten durch die Fliehkraft geschützt sind, beliebig lang gemacht werden, sodaß eine entsprechend lange Reihe von Stahlmagneten auf ihn wirken kann. Deshalb und infolge der breiten Polschuhe, die einen guten magnetischen Schluß geben, wie man jetzt sagt, war die Siemens'sche Maschine bei gedrängter Bauart viel leistungsfähiger, als die bis dahin bekannten, und ist auch viel mehr in praktischen Gebrauch gekommen, so bei gewissen Siemens'schen Zeigertelegraphen, namentlich aber für Eisenbahnsignalapparate. Ihre glückliche Form hat ihr sogar heute noch ein beschränktes Gebiet gesichert.

*

In konstruktiver Hinsicht bahnbrechend für die mechanisch-elektrischen Maschinen war aber die Erfindung des Ringankers, der meist der Anker von Gramme genannt wird, wiewohl er schon etwas früher von Pacinotti angegeben war. Der ursprünglich als Modellschreiner bei der L'Alliance tätige Pariser Gramme hat ihn aber um 1860 wahrscheinlich selbständig erfunden und jedenfalls das Verdienst, ihn vollständig ausgebildet und in die Technik eingeführt zu haben.

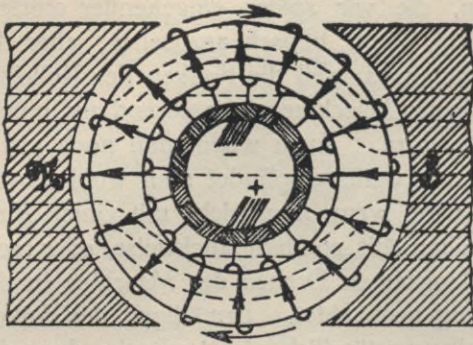
Ein wesentlicher Mangel der bisher betrachteten Maschinen bestand bei Erzeugung von Gleichstrom in der periodisch stark schwankenden Stromstärke. Dieser Nachteil braucht sich nicht immer unmittelbar geltend zu machen, denn die Polwechsel erfolgen, schon um die Maschine gehörig auszunutzen, so schnell, daß sie als Stromstöße sich überhaupt nicht mehr bemerkbar machen, so wenig wie die doch auch in umfangreicher Anwendung stehenden Wechselströme. Zudem kann man durch bauliche Verbindung mehrerer Maschinen ein weiteres Abflachen der gleichen, nur sanftwelligen Stromkurven erreichen. Der Hauptnachteil des sogenannten pulsierenden Gleichstromes zeigt sich vielmehr an der Maschine selbst. Bei dem jedesmaligen Umschalten des Stromes

durch den Kollektor (Fig. 26) entstehen nämlich immer Funken zwischen den Bürsten und den sich eben von ihnen lösenden Halbringen, aus Gründen, die wir später eingehender erörtern werden. Diese Erscheinung, recht hübsch anzusehen, aber der Kummer jedes Gleichstrommannes, weil die Funken den Kollektor zerschmelzen, ist schon bei kleinen Maschinen sehr störend und nimmt mit ihrer Größe beängstigend zu. Auch wenn man noch nichts über die Ursache der Störung weiß, empfindet man wohl unwillkürlich, daß sie gemildert wird, wenn man nicht mit einem Male die ganze Wicklung umschalten läßt, sondern stückweise, oder recht langsam, da man beim langsamen Drehen der Maschine in der Tat geringere Funkenbildung beobachtet. Ermäßigen der Anker- geschwindigkeit ist nun selbstverständlich nicht zulässig, denn damit würde ja die Leistungsfähigkeit der Maschine heruntergehen, es bleibt also nur der erstere Weg. Möglich, daß diese Erwägung Paccinooti und Gramme bei Erfindung des Ringankers geleitet hat, möglich auch, daß ihnen von vornherein die praktische Verwirklichung der einfachsten Induktorform (Fig. 19) mit Maschinen vorgeschwebt hat, bei der unmittelbar Leiter durch ein magnetisches Feld gezogen werden. Man führt auch wohl den Ringanker zurück auf eine Maschine von Stöhrer in Leipzig, der die Elemente der einfachen Maschine (Fig. 24) vervielfacht hatte, ähnlich wie Nollet an der Alliance-Maschine statt des zweiteiligen Ankers einen solchen mit 4, 6 oder mehr Schenkeln anwandte, die Wicklung also in der Tat unterteilte, ohne sonst an der Grundform zu ändern. Der Anker blieb deshalb aber immer ein Polanker, und kann kaum als Vorbild für den Ringanker gedient haben, wie sich aus dessen Wesen ergeben wird.

*

Der Ringanker, schematisch dargestellt in Figur 28, besteht aus einem Kernringe von weichem Eisen, über den der isolierte Draht in fortlaufender Schraubenlinie so gewickelt ist, daß Anfang und Ende sich vereinigen. Der von einer gewissen Tiefe in der Achsenrichtung zu denkende Kernring ist also von einem geschlossenen Solenoide umgeben. Rechts und links stehen dem Ringanker ausgebreitete Polflächen des induzierenden Magneten nahe gegenüber. Der eiserne Kernring bildet nun die Brücke für

die vom Nordpole des Magneten nach dem Südpole fließenden Kraftlinien, die Hälfte geht oberhalb der Achse durch den Ring, die andere Hälfte



Figur 28.

unterhalb. Man beachte, daß die Kraftlinien von links in den Ring und nach rechts aus dem Ringe durch die äußern Leitertheile der Wicklung hindurchgehen, während die Leitertheile an den Seiten und im Innern des Ringes nicht von

Kraftlinien durchsetzt werden. Denkt man sich nun die Wicklung um den feststehenden Kernring gedreht, so schneiden die äußeren Leitertheile, aber nur diese, fortwährend Kraftlinien und werden dadurch Sitz einer EMK, die für alle Leitertheile unter einem Magnetpole dieselbe Richtung hat, unter den beiden Polen aber verschiedene Richtung. Ist der Sinn der Pole und der Drehung gegeben, so sind die Richtungen der EMKe nach früherer Regel leicht bestimmbar. Denkt man sich ferner die induzierten Leitertheile auf ihrer Außenseite blank und zwischen den Polstücken von Schleiffedern berührt, diese selbst aber über einen Widerstand leitend verbunden, so fließt in der rechten und linken Wicklungshälfte je ein Strom der unteren Schleiffeder oder Bürste zu, der vereinigte Strom geht durch den Widerstand nach der unteren Bürste, um sich da nach rechts und links zu teilen und den Kreislauf zu vervollständigen. Nach den früheren Festsetzungen über die Stromrichtung ist also hier die untere Bürste als die positive zu bezeichnen. Das hängt aber ganz von dem Windungsinne der Wicklung ab, die hier in der Art eines Korkziehers fortschreitet. Verliefe sie umgekehrt, so würde unter sonst gleichen Umständen die obere Bürste zur positiven werden.

Der geschilderte Zustand bleibt bei der Drehung der Wicklung immer erhalten, die einzelnen Windungen wechseln aber beim Fortgehen unter den Bürsten ihre Rolle. Sie gehören bald zur rechten, bald zur linken Seite der Wicklung, führen also nach ihrer Lage unter dem einen oder andern Magnetpole Strom ver-

schiedener Richtung, der aber immer in demselben Sinne von der unteren Bürste durch die beiden Wicklungshälften der oberen Bürste zufließt und zwar in praktisch gleicher Stärke, denn es wird immer dieselbe Zahl äußerer Leiterteile induziert, und der Wechsel der Wicklungshälften vollzieht sich unter den Bürsten stückweise Windung für Windung. Die seitlichen und die inneren Teile der Windungen, die beim Drehen der Wicklung keine Kraftlinien schneiden, bilden offenbar nur Verbindungen der äußeren induzierten Teile, die durch diese Verbindungen in jeder Ringhälfte hintereinander geschaltet sind, sodaß sich die EMKe addieren. Die Wicklungshälften selbst erscheinen aber parallel geschaltet, denn der Strom verzweigt sich zwischen den Bürsten in zwei gleiche Teile. Diese Hintereinanderschaltung der Windungen durch die nicht induzierten Leiterteile bei allmählichem Wechsel der Wicklungshälften bildet das eigentliche Wesen des Ringankers. In der beschriebenen Weise läßt sich indessen der Ringanker nicht verwirklichen, denn der Kernring müßte doch gehalten werden, während angenommen war, daß die Wicklung sich über ihm verschiebt. Nun ändert sich aber die Verteilung der Kraftlinien nicht, wenn man den Kernring an der Drehung teilnehmend denkt, denn bei seiner vollständigen Gleichmäßigkeit bildet er in jeder Stellung dieselbe Brücke für die Kraftlinien. Die Wicklung ist deshalb fest auf den Kernring gelegt und dieser ist durch schmale radiale Stege, die zwischen den innern Leiterteilen Platz finden, mit der Welle verbunden zu denken. Das ist dann der Ringanker in seiner praktischen Ausführung. Der Ringanker ist nun noch mit einem vollkommeneren Schleifkontakt-Apparate ausgerüstet zu denken, wie in der Figur angegeben, einem Cylinder aus isoliert nebeneinander befestigten Metalllamellen, die mit den Windungen leitend verbunden sind.

*

Mit dem Ringanker war ein Element für die elektrischen Maschinen geschaffen, das mit dem Siemens'schen Doppel T-Anker den Vorzug der gedrungenen Form hatte, in seinem Aufbau zwar weniger einfach war (das Aufbringen der Wicklung war beim Ringanker viel schwieriger), ihn aber übertraf durch den gleichförmigen Strom, den er lieferte. Der Ringanker ist deshalb oft bei magnet-elektrischen Maschinen verwendet und später sehr viel bei den

dynamoelektrischen, seine eigentliche Bedeutung hat er aber doch nur als Glied der Entwicklung entfaltet, denn er ist jetzt durch den Trommelanker fast ganz verdrängt und kommt nur noch in besonderen Fällen zur Anwendung. Schematischen Darstellungen wird er aber auch heute noch gern zu Grunde gelegt, da man die Erscheinungen an ihm oft leichter übersehen kann.

Erhebliche Leistungen, wie schon früher angedeutet, konnten bei magnetelektrischen Maschinen nur mit großen Abmessungen und entsprechenden Kosten erkaufte werden. Die Stärke der Stahlmagnete ist zu gering. Andererseits war das Bedürfnis nach leistungsfähigeren Maschinen groß genug. Ausser der elektrischen Lichterzeugung bot die in raschem gewerblichen Aufblühen begriffene Galvanoplastik, von der man sich damals noch mehr versprach, als sich später verwirklichte, ein aussichtvolles Feld für die Anwendung. Es muß deshalb eigentlich auffallen, daß erst im Jahre 1866 der englische Physiker Wilde auf den Gedanken kam, die teuren und verhältnismäßig schwachen Stahlmagnete durch Elektromagnete zu ersetzen. Elektromagneten kann man leicht die zehnfache Stärke der Stahlmagnete geben, und wenn die Leistung der Maschine damit auch nicht ohne Weiteres im gleichen Verhältnisse wuchs, so war der Gewinn doch so bedeutend, daß der Versuch Nachahmung finden mußte. Die auffallende Verzögerung dieses Fortschrittes kann man sich nur erklären aus der immerhin noch geringen Bekanntschaft mit der hier wichtigsten Eigenschaft des Elektromagneten. Große Elektromagnete waren zwar vielfach hergestellt, ihre Stärke aber schien allein schon durch ihre Größe erklärt, der gegenüber die schwierig herzustellenden Stahlmagnete von vornherein im Nachteil waren. Bei der umfangreichsten Verwendung, die der Elektromagnet bis dahin gefunden hatte, in der Telegraphie, drängte sich weniger die Stärke, als die Eigenschaft der schnellen Magnetisierung und Entmagnetisierung der Beobachtung auf. Die verfehlten elektromagnetischen Motoren endlich boten auch wenig Anlass, glückliche Eigenschaften ihrer Einzelheiten ins rechte Licht zu setzen. Genug, der gelungene Versuch Wilde's war ein überraschender Fortschritt und leitete mit seinem neuen Gesichtspunkte eine nunmehr schnelle Entwicklung ein.

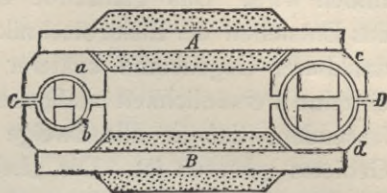
Wilde ersetzte zunächst in einer Maschine nach Art der in Figur 24 dargestellten das magnetische Magazin durch einen Elektro-



Werner Siemens.

magneten, der durch galvanische Elemente erregt wurde. Diese wieder zu ersetzen waren aber ohnehin die magnetelektrischen Maschinen bestimmt, und es lag deshalb nahe, als Erreger für die eigentliche Strommaschine eine kleinere zu benutzen, wie Wilde tat. Um den langen Siemens'schen Doppel-T-Anker anzuwenden, gab Wilde dem Elektromagneten breite plattenförmige Schenkel.

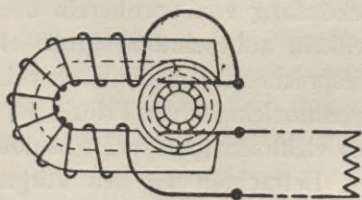
Nun ging Ladd noch einen Schritt weiter und stellte eine Art Doppelmaschine her (Fig. 29), bei der ein kleiner Anker C von demselben Elektromagneten induziert wurde, wie der Hauptanker D. Der Elektromagnet war dabei eigentlich von



Figur 29.

zwei einfach plattenförmigen Elektromagneten A und B gebildet, die an den Enden mit den halbzylindrischen Polschuhen a b und c d versehen waren. Die Erregung des Elektromagneten erfolgte also von dem kleinen Anker aus, und in dem Maße, wie dessen Stärke wuchs, wurde auch der kleine Anker zur Lieferung stärkeren Erregerstromes befähigt, sodaß eine wechselseitige Steigerung der Wirkung eintrat. Es ist also hier das Prinzip der Selbsterregung verwirklicht, wenn auch nicht in der einfachen und epochemachenden Form, wie sie Werner Siemens noch in demselben Jahre erdacht hatte, als Wilde den Elektromagneten als wesentliches Maschinenelement anwandte. In der Tat ist auch die Maschine von Ladd nach dem Bekanntwerden des Siemens'schen Prinzipes entstanden. Man erhält dieses,

wenn man sich den kleinen Anker C mit den Polschuhen a b durch ein massives Schlußstück ersetzt und den Strom des Hauptankers, ehe er in den äußeren Stromkreis gelangt, durch die Wicklung des Elektromagneten geführt denkt, wie in der Figur 30 schematisch dargestellt.



Figur 30.

V.

Der Schöpfer des Prinzipes der Selbsterregung, Werner Siemens (geb. 1816), war zur Zeit, als er mit seiner Erfindung die elektrische

Starkstromtechnik einleitete, schon lange ein Mann von Weltruf, den er durch seine Leistungen in der Schwachstromtechnik begründet hatte. Ursprünglich Artillerie-Offizier war er bald mehr und mehr seinen wissenschaftlichen und technischen Neigungen gefolgt und verwirklichte in seinem Leben eine Verbindung von Forscher, Techniker und Kaufmann, die ihres Gleichen kaum wieder finden wird. Das glänzende Bild des vielseitigen Mannes stellt das Entstehen der Elektrotechnik überhaupt dar, und es würde ein dankbarer Gegenstand späterer Untersuchung sein, wie weit die einzelne Persönlichkeit maßgebend für die Entwicklung eines umfassenden, tief in alle Zweige der Technik eingreifenden neuen Gebietes gewesen ist. Die „Lebenserinnerungen“ und die beiden Bände „Wissenschaftliche und technische Arbeiten“ geben eine lebendige Vorstellung von dem Schaffen Werner Siemens', das bis zu seinem 1892 erfolgten Tode ununterbrochen war.

Von seinem dynamoelektrischen Prinzip hat Werner Siemens zuerst in engerem Kreise Ende 1866 und dann anfangs 1867 der Berliner Akademie der Wissenschaften Kunde gegeben, die Begründung zeigte in ihrer schlichten, von der einfachsten Form des Strommagnetismus ausgehenden Art, daß die Erfindung nicht als ein weiterer, hinterher sehr naheliegend erscheinender Schritt nach vorwärts entstanden war. Diese lehrhafte und sich bei großen Erfindungen immer wiederholende Tatsache kann nicht genug beachtet werden. Wegen der Einzelheiten sei auf die leicht verständliche, weil in klarer Erkenntnis verfaßte Abhandlung selbst verwiesen, aus der auch hervorgeht, wie der Erfinder die Tragweite seiner Schöpfung von vornherein übersehen hat, bestehend in der Möglichkeit, unbeschränkt große elektrische Leistungen durch Aufwand entsprechender mechanischer Leistungen zu erzeugen. Zu seinem dynamoelektrischen Prinzip ist Werner Siemens durch Umkehrung des elektromagnetischen Motors geleitet.

Betrachten wir den Vorgang beim Ingangsetzen der Maschine etwas näher. Jedes, auch das weichste Eisen, behält nach einmaliger Magnetisierung einen kleinen Rest sogenannten remanenten Magnetismus. Wenn dieser vorhanden ist, so induziert er in dem in Bewegung gesetzten Anker eine kleine EMK, und wenn der Stromkreis, wie in der Figur 30 angedeutet, geschlossen ist, so zirkuliert zunächst ein entsprechend schwacher Strom durch den Anker um den Feldmagneten. Ist die Schaltung richtig, d. h. wird

durch den Strom der Feldmagnet im Sinne des von früher verbliebenen magnetischen Restes erregt, so entsteht stärkerer Magnetismus, der andererseits eine größere EMK induziert, also auch einen stärkeren Strom zur Folge hat, der wieder den Magnetismus steigert u. s. f., sodaß bald durch die wechselweise Verstärkung von Strom und Magnetismus das Eisen soviel Magnetismus aufnimmt, als es überhaupt im Stande ist. Von da an würde bei gleichmäßigem Weiterdrehen des Ankers Gleichgewicht der einander bedingenden Größen eintreten, wirkliche Dynamomaschinen würden diesen Zustand aber nicht lange aushalten, denn die gesamte elektrische Leistung würde dabei auf Erwärmung der Wicklungen des Ankers und des Feldmagneten verwendet, und nach kurzer Zeit würde die isolierende Umspinnung der Drähte verkohlen. Um das zu vermeiden, dürfen die Klemmen der Maschine nicht kurz geschlossen sein, sondern müssen einen den Strom schwächenden Widerstand enthalten, der sein Anwachsen über ein gewisses Maß verhindert. In Wirklichkeit ist dieser Widerstand ein Nutzwiderstand, Lampen, Motoren, elektrolytische Zellen und dergleichen. Aus der geschilderten Steigerung und Erhaltung der Maschinenwirkung durch den erzeugten Strom selbst erklärt sich auch die vom Erfinder gewählte Bezeichnung dynamoelektrische Maschine.

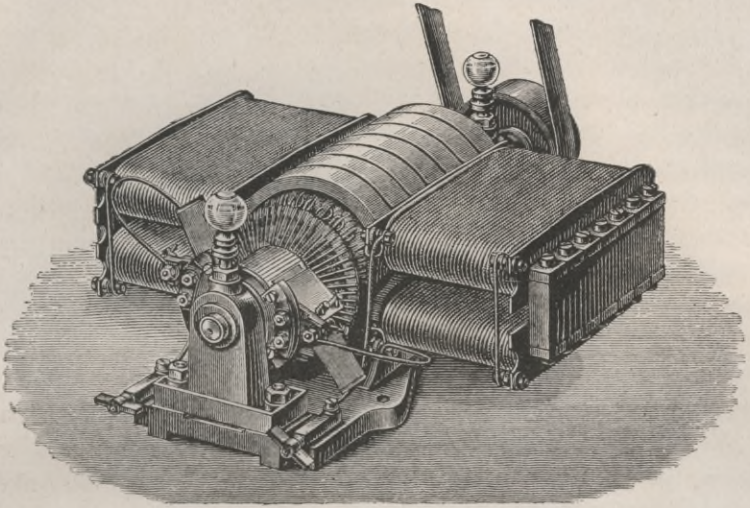
Wie bei jeder großen Erfindung hat es auch bei dieser nicht an Mitbewerbern um den Ruhm der Priorität gefehlt. Liegt die Erfindung vor, so erscheint sie in jedem Falle als ein Glied der Entwicklung, und gut geordnet bilden die vorhergehenden und der letzte Schritt eine Reihe, aus der sich alles folgerichtig ergibt. Man muß sich oft mit Liebe in die Entstehungsgeschichte versenken, um sich von dem Gedanken der fast mühelos sich ergebenden scheinbar natürlichen Folge frei zu machen. Die Dynamomaschine bietet dafür ein besonders lehrreiches Beispiel. Die späteren Prioritätsansprüche Anderer beruhen auch vielfach auf gutem Glauben. In einem gewissen Zustande der Entwicklung werden meist Vieler Gedanken auf dasselbe Ziel gerichtet sein, und die Selbsttäuschung kann dann nahe liegen, eigentlich die Erfindung selbst gemacht zu haben, nachdem durch ihre Kenntnisnahme blitzartig die ganze Schlußreihe erhellt ist. So ist vielleicht der englische Physiker Wheatstone nahe daran gewesen, als Erster die dynamoelektrische Maschine zu erfinden, nur ist ihm eben Werner Siemens zuvorgekommen. Um dessen Verdienst aber gegenüber

manchen, meist überhaupt ganz haltlosen Ansprüchen zu würdigen, muß man sich über den eigentlichen Kern der Erfindung klar werden. Betrachtet man sie nur in der äußeren Form und im Zusammenhange mit dem Vorhergehenden, so erscheint sie kaum erheblich. Das Wesentliche an ihr ist aber das Aufstellen der gegenseitigen Abhängigkeit von Anker und Feldmagnet. So muß die Erfindung aufgefaßt werden, um sie von allem Früheren zu scheiden und in ihr, trotz aller Warnungen und Fortschritte, die Grundlage sämtlicher heutigen mechanisch-elektrischen Maschinensysteme zu sehen.

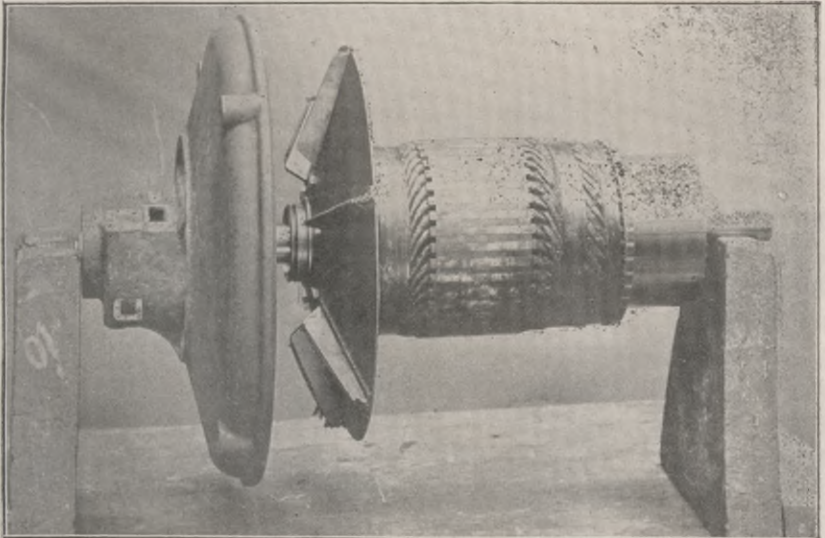
Eine Vorstellung von der Bauart der ersten in größerem Umfange gewerblich benutzten Dynamomaschine der Firma Siemens & Halske gibt die Figur 31 (siehe Tafel III). Die ganz symmetrische Form ist eine Folge des doppelten Feldmagneten, entstanden zu denken aus zwei flachen Hufeisenmagneten, die sich am Anker gegenüber liegen, und deren gleiche Pole mechanisch verschmolzen sind. Wesentlich zur schnellen praktischen Entwicklung der Dynamomaschine hat namentlich auch der schon vorhandene Ringanker beigetragen, den Gramme zuerst bei ihr anwandte, wie Werner Siemens selbst immer anerkannt hat.

*

Die mechanisch-elektrischen Stromerzeuger haben sich mit dem Gesetze von der Erhaltung der Energie entwickelt. Sie entstanden zu einer Zeit, als dieses Gesetz, wie sich jetzt deutlich erkennen läßt, schon unbewußt in Wirkung stand — u. A. ist ja die Regel von Lenz zur Bestimmung der Richtung der induzierten EMK nur ein besonderer Ausdruck des Energiegesetzes — und bei der Entfaltung und Bestätigung dieses Gesetzes haben die Vorgänge in den elektrischen Maschinen eine wichtige Rolle gespielt. Der Zufall hatte die erste Erkenntnis von der genauen Aequivalenz verschiedener Energieformen durch Robert Mayer an das Verhältnis zwischen mechanischen und kalorischen Erscheinungen geknüpft, bald danach hatte Helmholtz das Gesetz als gültig für alle Energieformen ausgesprochen. Seitdem war das Zurückführen der in ihren Äußerungen so verschiedenartigen physikalischen und chemischen Erscheinungen auf die mechanischen, oder anders gesagt, ihr Messen in mechanischem Maße, das vornehmste Ziel der Forschung



Figur 31.



Figur 36.

geworden. War die Aequivalenz in einem Falle genau bestimmt, so mußte sie sich bei der Verwandlungsfähigkeit der Erscheinungsformen in einander für jede einzelne bestimmen lassen. War das geschehen, so konnte man entweder die früheren willkürlichen Maße der einzelnen Formen bestehen lassen und zur Umwandlung auf das gemeinsame mechanische Maß die sich ergebenden Verhältniszahlen benutzen, oder man konnte von vornherein mechanische Maße zu Grunde legen und die Einheiten danach definieren. Das Erste ist für die Wärmeerscheinungen eingetreten, bei denen die willkürlichen Einheiten — Kalorie und Temperaturgrad — bis jetzt in praktischem Gebrauche geblieben sind, während die unmittelbaren mechanischen Wirkungen der Induktion zur Annahme mechanischer Einheiten für die Elektrizität geführt haben, nachdem, wie wir wissen, Gauß schon den Magnetismus nach mechanischer, oder, wie er es benannte, nach absolutem Maße bestimmt hatte. In gewissem Sinne sind auch freilich dabei willkürliche Festsetzungen nicht zu vermeiden. Man muß beachten, daß Begriffe wie elektrischer Strom, Spannung, magnetische Menge u. a. nur Denkbilder sind, die wir zur übersichtlichen Behandlung der Erscheinungen einführen, ohne damit ihre Realität aussprechen zu wollen. Wir können eine magnetische Menge selbst nicht fassen oder wägen, sondern beschreiben mit diesem Begriffe nur gewisse Erscheinungen, die analog denen greifbarer Massen sind, und willkürlich setzen wir als Einheit der magnetischen Menge eine solche, die auf eine gleiche im Abstände 1 der Kraft 1 ausübt. Wenn wir dann, wie im elektromagnetischen Maßsystem geschieht, den Strom messen nach seiner Wirkung auf die Einheit der magnetischen Menge, so ist damit nichts über die eigentliche Natur des Stromes in mechanischem Sinne ausgesagt. Man erhält auch für das, was wir als Strom bezeichnen, ganz andre Werte, wenn man bei seiner Messung von andren Grunderscheinungen ausgeht. So stützt sich das elektrostatische Meßsystem auf die Elektrizitätsmenge, deren Einheit wie die magnetische Einheit definiert wird, und in diesem Maßsysteme erscheint der Strom in einem Leiter gemessen durch die in der Zeiteinheit hindurchgehende Elektrizitätsmenge. Da magnetische Menge und elektrische Menge an sich keine vergleichbaren Größen sind, und da den beiden erwähnten Maßsystemen auch ganz andere Wirkungen der sogenannten Mengen zu Grunde liegen, so müssen sie zu ganz verschiedenen Werten für den Strom wie für die an-

deren einfachen elektrischen Größen führen. Wenn diese Größen aber so zusammentreten, daß ihre vereinigte Wirkung einem bestimmten mechanischen Begriffe entspricht, etwa der Arbeit oder der Energie, dann müssen sie unbedingt zu demselben Ergebnisse führen. In diesem Sinne erscheinen die elektrischen Größen als Hülfbegriffe, die bei der Umrechnung der Energieformen von selbst verschwinden. Deshalb ist jedes, an sich folgerichtig unter Benutzung zulässiger Analogieen aufgebaute Maßsystem brauchbar, über die Bevorzugung eines bestimmten entscheiden Zweckmäßigkeitsgründe. In der Elektrotechnik wird ausschließlich das elektromagnetische Maßsystem benutzt, das im Folgenden immer zu Grunde gelegt wird.

Die elektrischen Maschinen, so sagten wir, seien besonders geeignet, den Zusammenhang der verschiedenen Energieformen darzutun. In der Tat können wir in ihnen die mechanischen, elektrischen, kalorischen, optischen und chemischen Erscheinungen vereinigt haben. In den Erscheinungen der Strahlung, die wir subjektiv als Licht empfinden, wird zwar, um das der Vollständigkeit wegen hier zu erwähnen, der Energiebegriff noch nicht so umfangreich verwendet wie auf den anderen Gebieten, die Lichtmessung wird praktisch noch vollständig nach willkürlichen Maßen geübt, und was gewöhnlich als Optik bezeichnet wird, führt zum Teil noch ein ziemlich isoliertes Dasein. Andererseits wird sie aber als Teil der Strahlungserscheinungen überhaupt mehr und mehr in gemeinschaftliche Behandlung mit den anderen Formen gezogen.

Wenn man nun eine elektrische Maschine von Hand dreht (wir wollen dabei der Einfachheit und Uebersichtlichkeit wegen an eine magnetelektrische Handmaschine nach Figur 24 mit Ringanker nach Figur 28 denken), ohne eine leitende Verbindung der Klemmen hergestellt zu haben, bei offenem Anker, wie man sagt, so bieten — von gewissen Nebenerscheinungen abgesehen, die wir später besprechen — nur die Reibungswiderstände ein Hindernis und man kann mit geringer Mühe dem Anker eine große Geschwindigkeit geben. Das ändert sich aber sofort, wenn zwischen die Klemmen ein Leiter geschaltet wird. Denn nunmehr kann in der geschlossenen Leitung durch den Anker ein Strom zirkulieren, und soweit die Windungen des Ankers dabei Kraftlinien schneiden, suchen sie, wie wir schon wissen, die Drehung des Ankers zu hemmen. Um trotzdem dessen Geschwindigkeit auf der früheren Höhe zu halten,

muß die Kraft an der Kurbel angemessen gesteigert werden. Diese Kraft multipliziert mit der Geschwindigkeit der Kurbel, stellt eine gewisse Leistung dar, d. h. eine gewisse mechanische Arbeit in der Sekunde. Diese Leistung muß, wenn wir hier von den geringen Reibungswiderständen absehen, ein Aequivalent in der Stromleistung haben, und wir kommen damit zu einer genaueren Bestimmung dieses, schon mehrfach andeutungsweise verwendeten Begriffes. Bleibt die Geschwindigkeit des Ankers immer dieselbe, so ändert sich auch die EMK des Ankers nicht, dagegen kann der Strom verändert werden durch Einschalten verschiedener Widerstände zwischen die Klemmen. Denn nach dem Ohm'schen Gesetze ist der Strom bei gegebener EMK umgekehrt proportional dem Widerstande. Der Stromstärke proportional ist aber die hemmende Wirkung der Ankerleiter im induzierenden Felde. Denkt man sich nunmehr dieses auf doppelte Stärke gebracht, so wächst die EMK des Ankers in demselben Maße, die Stromstärke kann aber durch Einschalten von mehr Widerstand auf ihrem früheren Werte gehalten werden, die Ankerleiter erfahren also im Felde den doppelten Bewegungswiderstand, dem bei der vorausgesetzten gleichförmigen Geschwindigkeit die doppelte Leistung an der Kurbel entsprechen muß. Man erkennt daraus, daß diese Leistung, demnach auch die elektrische Leistung, gleichzeitig proportional ist der Stromstärke und der EMK, also dem Produkte aus beiden. Gleiche Schlüsse kann man ziehen, wenn man sich die Geschwindigkeit des Ankers veränderlich denkt. Sorgt man durch angemessenen Widerstand im Stromkreise für konstante Stromstärke, so wächst die erforderliche mechanische Leistung und damit die erzeugte Stromleistung immer im einfachen Verhältnisse zur EMK. Denn um dieser eine gewisse Größe zu geben, müssen die Ankerleiter mit umso größerer Geschwindigkeit durch das induzierende Feld gezogen werden, je schwächer dieses ist, und umgekehrt. Der Stärke des Feldes entspricht aber immer die hemmende Kraft auf die Leiter, die aufgewendete Leistung, das Produkt aus der hemmenden Kraft und der Geschwindigkeit, bleibt also für eine gewisse EMK dieselbe. Nun braucht man nur gleichzeitig auch die Stromstärke sich ändern zu lassen, um ganz allgemein als maßgebend für die elektrische Leistung das Produkt aus Stromstärke und EMK zu erkennen. Alle diese Verhältnisse sind für den Anfänger deshalb nicht ganz leicht zu übersehen, weil die be-

stimmenden Größen von einander abhängig sind. Zunahme der EMK, sei es durch Vergrößerung der Geschwindigkeit oder durch Verstärkung des Feldes, bedingt auch Vergrößerung der Stromstärke, also Steigerung der Leistung aus doppeltem Grunde; Verminderung des Widerstandes im Stromkreise läßt die Stromstärke wachsen, im selben Maße auch die Leistung; Verkleinerung der Triebkraft an der Kurbel läßt die Geschwindigkeit und damit die EMK des Ankers, gleichzeitig auch die Stromstärke sinken, deshalb nimmt die Geschwindigkeit nicht im einfachen Verhältnisse mit der auf die Kurbel ausgeübten Triebkraft ab, weil die Leistung wieder aus doppeltem Grunde kleiner wird usw. In Wirklichkeit aber, wie zum Troste gesagt sein mag, läßt sich der Zusammenhang der Größen meist leichter erkennen, als in solcher, etwas verwirrenden Zusammenstellung, sobald man sich nur das einfache Ohm'sche Gesetz klar vor Augen hält.

Wenn nun die elektrische Leistung als Aequivalent der mechanischen Leistung auftritt, so muß wieder nach dem Aequivalente für jene gefragt werden. Wir haben uns oben einen einfachen Stromkreis gedacht mit mehr oder weniger Widerstand, in dem der Strom zirkuliert. Ein Anhäufen von elektrischer Energie kann hier nicht stattfinden, die ganze Leistung muß im Stromkreise verbraucht werden und zwar äußert sie sich zunächst als Erwärmung der Leiter, bis deren Temperatur so hoch gestiegen ist, daß sie durch Leitung und Strahlung gerade soviel Wärme an die Umgebung abführen, als ihnen in elektrischer Form zufließt. Die in der Zeiteinheit entstandene Wärmemenge muß aber nach dem Energiegesetze wieder der von der Maschine verbrauchten mechanischen Leistung äquivalent sein, sodaß, wenn es nur auf die Größe der Wärmemenge überhaupt ankäme und nicht auf ihre besondere Form, der Umweg der Leistung durch die elektrische Maschine ganz vermieden werden könnte. Diese dient, soweit Wärmewirkungen in Betracht kommen, beispielweise bei der elektrischen Beleuchtung, nur dazu, die Wärme in geeigneter Form an bestimmten Stellen zu konzentrieren.

Wie sich die erzeugte Wärme im Schließungskreise verteilt, hängt ganz von seiner Zusammensetzung ab. Die Stromstärke ist nach dem Ohm'schen Gesetze proportional der EMK und umgekehrt proportional dem Widerstande, oder die EMK wird verbraucht, um den Widerstand des Stromkreises für eine gewisse

Stromstärke zu überwinden. Bei der überall gleichen Stromstärke ist also die gesamte elektrische Leistung auf die einzelnen Teile des Kreises nach Maßgabe ihrer Widerstände verteilt. Oder allgemeiner: Jedes Leiterstück zeigt an einem Spannungsmesser oder Elektrometer eine dem durchgehenden Strom proportionale Spannungsdifferenz, und als Äquivalent für die dadurch gegebene Stromleistung wird in der Zeiteinheit eine bestimmte Wärmemenge in dem Leiter entwickelt. Das Alles steht wieder in vollständiger Analogie mit einem Flüssigkeitsstrom durch eine Widerstand bietende Röhre, in der ebenfalls die verzehrte Leistung in Wärme umgesetzt wird. Die Leistung des Stromes in einem Leiter, die vorher an dem Produkte aus Spannungsabfall und Strom gemessen wurde, kann nun meist bequemer auch durch Strom und Widerstand ausgedrückt werden, da die drei in Frage kommenden Größen durch das Ohm'sche Gesetz verbunden sind. Der Spannungsabfall ist proportional der Stromstärke und dem Widerstande, er kann also durch das Produkt aus beiden ersetzt werden, und damit ergibt sich die in der Zeiteinheit entstehende Wärmemenge als proportional dem Produkte aus dem Quadrate des Stromes und dem Widerstande. Um die experimentelle Prüfung dieses Gesetzes hat sich besonders der englische Physiker Joule verdient gemacht.

*

Durch die Entwicklung der Elektrotechnik erhielten die schon weiter zurückliegenden Bestrebungen um einheitliche und rationelle Maße für die elektrischen Größen eine kräftige Stütze. Da die Größen gesetzmäßig von einander abhängen, so führt ihr Gebrauch immer zu lästigen Umrechnungen, wenn jede einzelne in willkürlichen Einheiten ausgedrückt wird. So konnten wir beispielweise für das Ohm'sche Gesetz bis jetzt nur sagen, der Strom ist *proportional* dem Quotienten EMK dividiert durch Widerstand. Soll dabei der Stromwert nach seiner willkürlichen Einheit angegeben werden, so muß der Quotient noch mit einem Zahlenfaktor multipliziert werden. Die große Vereinfachung, wenn man statt *proportional* einfach *gleich* sagen kann, leuchtet ohne weiteres ein. Ueber die große Bequemlichkeit hinaus geht aber der Gewinn durch ein rationelles Meßsystem in wissenschaftlicher Hinsicht.

Die in allen Verbindungen der Größen vor Augen tretende, von allem Beiwerk befreite Abhängigkeit jeder von den andern erinnert immer an die Ableitung aus gemeinsamer Grundanschauung und führt zu neuen Beziehungen, die sonst leicht durch die mitgeschleppten Reduktionzahlen verdeckt werden.

Nachdem durch Gauß die magnetischen Bestimmungen nach mechanischem Maße durchgeführt waren, und nachdem, wie wir oben sahen, im Besonderen durch die Induktionerscheinungen die gemeinschaftliche Behandlung auch der elektrischen Größen nach diesem System sich als möglich ergeben hatte, war von dem Göttinger Professor Wilhelm Weber (1804—1891) das elektromagnetische Meßsystem ausgearbeitet, das später durch Annahme anderer mechanischer Einheiten umgeformt und auf dem Pariser Kongresse 1881 zur allgemeinen Annahme gebracht wurde. Das im Grunde sehr einfache System erscheint zunächst nur dadurch etwas verwickelt, als die untergelegten mechanischen Einheiten selbst teilweise abweichend von dem üblichen technischen System definiert werden.

Das sonst in der Technik benutzte Maßsystem geht aus von der Krafteinheit, als welche das Gewicht eines Liters reinen Wassers im Zustande größter Dichte (bei 4° C.) angenommen wird. Als Längeneinheit dient das Meter. Nach Festsetzung dieser beiden Größen ist die Einheit der Masse nicht mehr frei wählbar, wenn eine einfache Beziehung zwischen den dreien bestehen soll. Denn die Kraft 1 soll der Masse 1 die sekundliche Geschwindigkeitszunahme (Beschleunigung) 1 erteilen. Da die Kilogramm-Kraft der Masse eines Kilogrammes eine Beschleunigung von 9,81 m erteilt, so muß in dem technischen oder terrestrischen Meßsysteme die Masse 1 den Wert von 9,81 Kilogrammstücken haben. Als wesentlichen grundsätzlichen Mangel wirft man diesem Maßsysteme die Unbestimmtheit vor, die in der etwas verschiedenen Schwere eines Kilogrammstückes an verschiedenen Orten der Erde liegt. Doch wollen Andre diese Unbestimmtheit nicht gelten lassen, da zu ihrer Behebung nur die Angabe eines bestimmten Ortes nötig wäre.

Gauß und nach ihm Wilhelm Weber haben aber die Masse als Ausgangspunkt genommen, außerdem aber auch viel kleinere Einheiten, weil man damals nur mit sehr kleinen magnetischen und elektrischen Kräften zu tun hatte. Namentlich durch den Einfluß der englischen Gelehrten wurden die Einheiten zwar ver-

größert, sie blieben aber immer noch klein gegenüber den bisherigen technischen. Als Einheit der Masse wurde 1 cbcm Wasser festgesetzt, als Längeneinheit 1 cm, die Krafteinheit folgt daraus als die Kraft, die der Masseneinheit die Beschleunigung von 1 cm erteilt. Die Krafteinheit im absoluten oder Centimeter-Gramm-Sekunden-System wird Dyne benannt (von *δύναμις*).

Das Grundsätzliche in der Verbindung der Einheiten mit einander ist also natürlich in beiden Systemen dasselbe, in der Handhabung hat jedes seine Vorzüge, ganz abgesehen von der Größe der Einheiten. Das Gauss-Weber'sche sogenannte absolute System ist im Grunde einfacher und leichter zu übersehen, das ältere terrestrische in mancher Hinsicht anschaulicher, denn seine Krafteinheit ist sinnlich wirksamer. Man kann sich im terrestrischen System nach alltäglicher Erfahrung leicht eine Kraft als Gewicht einer Masse vorstellen. Dagegen bereitet die Unterscheidung zwischen dem Gewichte und der Masse eines Kilogrammes gelegentlich Zweifel.

Die Masse eines Grammstückes erhält im absoluten Systeme von der Kraft 1 eine Beschleunigung von 1 cm, das Gewicht erteilt derselben Masse eine Beschleunigung von 981 cm. Eine auf Gramm und cm gegründete terrestrische Krafteinheit würde also fast 1000 mal so groß sein, wie die absolute. Als Gewicht ausgedrückt entspricht demnach die Dyne ungefähr 1 Milligramm, und die wirklich gebrauchte terrestrische Einheit, das Kilogramm-gewicht, enthält fast 1 Million absoluter Einheiten.

Ein magnetischer Einheitpol im absoluten System bedeutet nun nach dem früher Gesagten einen solchen, der im Abstände von 1 cm auf einen gleichen die Kraft einer Dyne ausübt. Drückt man ferner bei der Gauß'schen Messung alle Werte in absoluten Einheiten aus, so erhält man für die horizontale Intensität des Erdmagnetismus ungefähr die Zahl 0,2, d. h. ein Einheitpol erfährt im Erdfelde eine Kraft, die in Gewichtmaß ausgedrückt etwa $\frac{1}{5}$ Milligramm entspricht.

Ein solcher Einheitpol dient zum Bestimmen der absoluten Stromeinheit. Diese soll in einem Leiter von der Länge 1 cm bei überall gleichem Abstände auf den Pol die Kraft einer Dyne ausüben. Die Forderung überall gleichen Abstandes vom Pole führt zur Auffassung der Leitereinheit als Teil eines Kreisstromes von 1 cm Radius, im Mittelpunkte dieses Kreises würde also der Ein-

heitpol die Kraft von 2π Dynen erfahren. Bei so kleinen Abmessungen würde die genaue Bestimmung der Stromeinheit sehr ungenau sein. In Wirklichkeit werden deshalb viel größere Kreisströme benutzt und die Kräfte für die ideellen Einheitabmessungen umgerechnet.

Die Einheit der EMK wird aus der Induktion gewonnen und definiert als eine solche, die entsteht, wenn ein Leiter von 1 cm Länge in einem magnetischen Felde von der Stärke 1 mit der Geschwindigkeit von 1 cm senkrecht zu den Kraftlinien bewegt wird. Da nach Gauss magnetische Felder von genügender Ausdehnung, z. B. das Erdfeld, genau zu messen sind, und da man die Induktion in beliebig langen Leitern leicht auf die Einheitslänge zurückführen kann, so ist die Einheit der EMK ebenfalls mit großer Genauigkeit zu bestimmen.

Mit der Annahme dieser beiden Größen ist nun aber die dritte, die Widerstandseinheit nicht mehr frei wählbar, wenn die verlangte einfache Beziehung nach dem Ohm'schen Gesetze hergestellt werden soll, die dritte Einheit muß vielmehr durch die beiden andern ausgedrückt werden, dahin nämlich, daß ein Leiter die Einheit des Widerstandes hat, wenn eine Spannungsdifferenz 1 die Stromstärke 1 in ihm herstellt. Auch diese Einheit ist natürlich nur durch Vielfachen der Wirkung und Umrechnung genau zu erhalten.

Die peinliche Bestimmung der drei Einheiten, die viele Einzelbestimmungen umfaßt, hat die jahrelange Arbeit einer großen Zahl von Physikern in Anspruch genommen, die mit ebenso großem Scharfsinn wie Geduld die aus der minimalen Größe der zu messenden Kräfte folgenden Schwierigkeiten überwinden mußten.

Für technische Zwecke sind die so festgelegten Einheiten nicht unmittelbar brauchbar, im Besonderen, weil die Einheit der EMK so ungemein klein ist. Bei Dynamomaschinen werden Leiter von vielen Metern Länge durch magnetische Felder geführt, die 20 000 bis 50 000 mal so stark sind wie das horizontale Erdfeld, und das mit Geschwindigkeiten von selten unter 1000 cm. Man hat deshalb, um nicht der Anschaulichkeit zu großen Zwang anzutun, als praktisches Maß der EMK eine hundert Millionen mal so große praktische Einheit eingeführt und (nach Volta) mit Volt benannt. Diese praktische Einheit entspricht nahezu der EMK eines Daniell'schen Kupfer-Zink-Elementes und ein solches oder ähnliches in genau bestimmter Zusammensetzung dient als praktisches Vergleichmaß.

Für die Stromstärke dagegen schien s. Zt. die absolute Einheit zu groß und man setzte die praktische Einheit zu $\frac{1}{10}$ davon an. Da inzwischen die in der Technik gebräuchlichen Stromstärken ins Riesenhafte gewachsen sind, so ist die durch die verkleinerte praktische Einheit herbeigeführte unnötige Verwicklung zu bedauern. Diese praktische Einheit heißt Ampère.

Auf den Namen Ohm ist die praktische Widerstandseinheit getauft, deren Größe nunmehr wieder durch die Beziehung aus dem Ohm'schen Gesetze festgelegt ist. Da 1 Volt dividiert durch 1 Ohm 1 Ampère geben soll, so muß das Ohm 1000 Millionen absolute Einheiten enthalten. Das Ohm kommt der alten Siemens'schen Quecksilbereinheit nahe, es übertrifft diese um etwa 6 %.

Der leichteren Uebersicht wegen werden die Vielfachen der absoluten Einheiten, die für die praktischen Einheiten angenommen sind, als Potenzen von 10 geschrieben. Das Volt hat also 10^8 , das Ampère 10^{-1} , das Ohm 10^9 absolute Einheiten.

Die aus den drei Grundeinheiten abgeleiteten Einheiten müssen nun ebenfalls sich in das gewählte Maßsystem fügen. Es wird uns zunächst die Einheit der Stromleistung interessieren. Da die Stromleistung durch das Produkt aus der EMK und der Stromstärke sich bildet, so enthält das praktische Volt-Ampère 10^7 absolute Einheiten. Benannt ist es nach Watt, der zuerst in der Pferdestärke ein bestimmtes Maß für die mechanische Leistung aufstellte. In der Technik wurde und wird das Pferd im terrestrischen Meßsystem gemessen, bei einem elektrischen Generator, der von einem Wassermotor oder von einem Wärmemotor angetrieben wird, herrschen also die beiden Meßsysteme nebeneinander und erfordern fortwährende Umwandlung, die aber leicht zu übersehen ist, wenn man zunächst das Kilogramm in Grammcentimeter umrechnet, also das erstere mit 1000×100 multipliziert. Da nun die absolute Krafteinheit, die Dyne, nur etwa $\frac{1}{1000}$, genauer $\frac{1}{981}$, einer terrestrischen Einheit in Grammcentimetern betrug, so ist ein Kilogramm ungefähr 10^8 Dynen äquivalent, und da 10^7 absolute Einheiten der Leistung ein Watt ausmachten, so ist dieses gleich $\frac{1}{10}$ Sekundenkilogramm. Da endlich 75 von diesen ein Pferd benannt wurden, so entsprechen 750 Watt, oder genauer gerechnet 736 Watt, der Leistung von 1 Pferd.

Die Rechnungen mit elektrischen Größen erfordern noch viele andere Einheiten, von denen wir später noch einige betrachten müssen. Das Mitgeteilte kann uns zunächst genügen. Der Eindruck ganz besonderer Trockenheit, die Maßsystemfragen für den Anfänger notwendig haben müssen, läßt sich leider durch kein Mittel mildern. Als Trost für die ausgestandene Mühe kann nur die Erleichterung in Aussicht gestellt werden, die das ruhige Durchdenken der Grundbeziehungen bei der Betrachtung der Maschinen im Gefolge hat. Ist dabei die Einsicht in den Zusammenhang einiger Größen gefestigt, so bereiten die andern gar keine Schwierigkeiten mehr.

*

Die Dynamomaschine, deren schnelle Entwicklung den praktischen Anstoß zur Regelung der Maßsysteme gegeben hatte, befand sich die ersten zwanzig Jahre nach ihrer Erfindung in einer eigentümlichen Lage. Ihr physikalisches Wesen war durch die Induktionsgesetze vollkommen bekannt, und diese selbst waren in allen Folgerungen eingehend bearbeitet, und trotzdem beruhte der Bau einer Dynamomaschine von verlangten Eigenschaften auf rein empirischer Grundlage. Als erste maßgebende Größe der zu irgend einem Zwecke zu verwendenden Maschine tritt die an ihren Klemmen entstehende Spannungsdifferenz auf, wie bei einer Dampfmaschine der Dampfdruck oder bei einem Wassermotor das verfügbare Gefälle. Die Spannung ist gegeben durch die gesamte wirksame Länge der Ankerleiter und die Geschwindigkeit, mit der sie das induzierende magnetische Feld passieren. Aus der gemessenen Spannung ist ohne weiteres die Stärke dieses Feldes zu berechnen. Bei dem Entwurfe einer Maschine muß die Feldstärke aber bekannt sein, um die Leiterlänge und ihre Geschwindigkeit richtig wählen zu können. Nun ist zwar die Stärke eines Elektromagneten, wie wir wissen, abhängig von der Zahl der Drahtwindungen und der Stromstärke in ihnen, oder, wie wir nun kurz sagen können, von der Zahl der ihn umkreisenden Ampèrewindungen, und man könnte deshalb meinen, daß ja nur nötig sei, diese Zahl durch hinreichend viele Windungen, die vom Maschinenstrom durchflossen werden, so zu vergrößern, daß Magnetismus der erforderlichen Stärke erzeugt wird. Der Draht der Feldwicklung

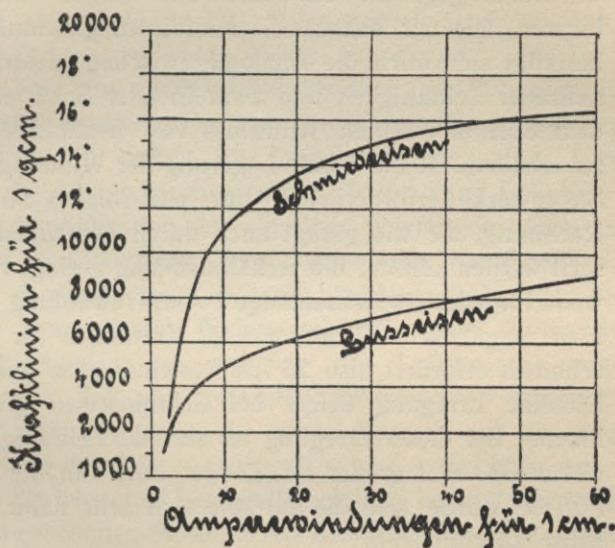
muß aber hinreichenden Querschnitt haben, um nicht durch seinen Widerstand den Maschinenstrom zu sehr zu schwächen und um nicht durch die in der Feldwicklung erzeugte Wärme eine zu hohe Temperatur entstehen zu lassen. Zum Unterbringen der Wicklung auf den Magnetschenkeln muß also ein gewisser Raum vorhanden sein. Dasselbe gilt auch für andere Schaltungen der Feldmagnete, die wir später besprechen werden. Außerdem aber wußte man von den Elektromagneten überhaupt, daß ihre Stärke keineswegs einfach mit der Ampèrewindungszahl zunimmt, daß vielmehr nach anfänglich sehr schneller Zunahme der Stärke ihre Steigerung über ein gewisses Maß hinaus nur mit unverhältnismäßig großer Ampèrewindungszahl erkaufte werden kann. Was man früher an empirischen Formeln für die Tragkraft von Elektromagneten in Abhängigkeit von der Erregung aufgestellt hatte, war an sich ohne rechten Wert und für den Bau von Dynamomaschinen erst recht ohne Nutzen. Die Vorherbestimmung aller Einzelheiten einer Maschine von verlangter Spannung und Leistung, wie sie der rationelle Maschinenbau anstreben muß, stand deshalb auf ganz schwachen Füßen und beruhte hauptsächlich auf dem Vergleiche ausgeführter Maschinen und daraus gewonnenen Erfahrungszahlen. Um aus diesem schwerfälligen Zustande herauszukommen, bemühte sich besonders Fröhlich, damals Chefelektriker von Siemens & Halske, und Gisbert Kapp, einer der Ersten, die als Maschinenbauer der Dynamomaschine näher traten, durch grundlegende Versuche allgemeine Beziehungen zwischen den Hauptgrößen abzuleiten. Ihre Ergebnisse wurden aber bald weit überholt durch eine Auffassung vom Wesen des Elektromagneten, die auf Grund einmaliger, an den in Frage kommenden Eisensorten anzustellender Messungen eine Berechnung der Dynamomaschine gestattet, die an Genauigkeit nicht hinter der Berechnung einer Dampfmaschine oder Turbine zurücksteht.

Bei Besprechung des Ringankers (Figur 28) hatten wir schon von der Vorstellung Gebrauch gemacht, daß der magnetische Kraftfluß vom Nord-Feldpole aus in den Anker tritt, sich dort teilend zu beiden Seiten der Ankerwelle hindurchfließt und nach der Vereinigung zum Südpole übergeht. Betrachtet man die Maschine im Ganzen (Figur 30), so führt diese Vorstellung von selbst zu einem in sich geschlossenen magnetischen Kreise, indem man sich den Kraftfluß vom Südpole aus durch den Eisenkörper des Feld-

magneten wieder nach dem Nordpole geleitet denkt. Der Begriff der magnetischen Leitfähigkeit, der schon durch die übertragende Wirkung eines vor einen magnetischen Pol gehaltenen weichen Eisenstabes nahe gelegt wird, wurde ja auch von Faraday benutzt. Bei Erweiterung dieses Begriffes auf den geschlossenen Kraftfluß einer Dynamomaschine mußte sich auch der reziproke Wert der Leitfähigkeit, der Widerstand, als ein neuer magnetischer Begriff nach Analogie des entsprechenden elektrischen aufdrängen. Und wie der elektrische Strom in einem geschlossenen Leiterkreise durch eine elektromotorische Kraft erzeugt wird, so mußte, war man sich der Analogie mal bewußt geworden, die Ursache des magnetischen Kraftflusses in einer magnetomotorischen Kraft gesucht werden, die ihren Sitz nur in den erregenden Ampèrewindungen haben kann. Diese formale Analogie des magnetischen und elektrischen Flusses wurde besonders von John Hopkinson ausgebildet. Danach ist auch in einem magnetischen Kreise der Widerstand in bekannter Weise von dem Querschnitte und der Länge des Leiters, sowie von der spezifischen Leitfähigkeit des Stoffes abhängig. Oder anders gesagt, um in einem magnetischen Kreise eine gewisse Dichte der in sich geschlossenen Kraftlinien zu erzeugen, wird für jede Längeneinheit eine gewisse Ampèrewindungszahl aufzuwenden sein. Die Analogie mit dem elektrischen Stromkreise versagt nur hinsichtlich der spezifischen Leitfähigkeit gerade der magnetisch wirksamsten Stoffe, im Besonderen also des Eisens. Die elektrische Leitfähigkeit ist bei allen Stoffen ganz unabhängig von der Stromstärke, die magnetische Leitfähigkeit des Eisens nimmt mit der Dichte der Kraftlinien ab, aber nicht nach einem aus irgendwelchen Beziehungen herleitbaren Gesetze und nicht in demselben Maße für die verschiedenen Eisensorten. Außerdem herrscht für das magnetische Leitvermögen nicht die Mannigfaltigkeit bei verschiedenen Stoffen, wie für das elektrische. Das Eisen und wenige andere Stoffe, diese aber schon in erheblich geringerem Grade, leiten magnetisch sehr gut, die übrigen verhältnismäßig sehr schlecht und zwar praktisch gleichmäßig schlecht, sodaß z. B. zwischen Kupfer und Luft in dieser Hinsicht kein Unterschied ist. Andererseits kennt man aber keinen als magnetischen Isolator zu bezeichnenden schlechten Leiter.

Die Unbekanntschaft des Gesetzes, nach dem sich die magnetische Leitfähigkeit des Eisens ändert, hat dazu genötigt, die

Kraftliniendichte im Verhältnis zu den erregenden Ampèrewindungen stufenweise zu bestimmen und die Werte in Tabellen, oder besser in graphischer Form festzuhalten. Die Bestimmungen, um das hier kurz zu erwähnen, geschehen mit besonderen Apparaten, die fast ausschließlich auf den Induktionsgesetzen beruhen. Einfachere, aber viel weniger genauere Apparate benutzen die Tragkraft eines aus dem zu untersuchenden Eisen hergestellten Elektromagneten. Denn die Tragkraft der Elektromagnete, die sich früher jeder wirklichen Berechnung entzog, ist ebenfalls auf Grund der Vorstellung vom magnetischen Widerstande bestimmbar geworden. Eine graphische Darstellung der Kraftliniendichte bei verschiedener Erregung für zwei Eisensorten, und zwar für Schmiedeeisen und für Gußeisen, ist nun in Figur 32 gegeben. Darin bedeuten die Ordinaten die verlangten Kraftliniendichten, also die Kraftlinienzahlen für 1 qcm Querschnitt, die Abszissen die dafür erforderlichen Ampèrewindungen für jeden cm



Figur 32.

Kraftlinienweg. Die eine Kurve gilt für Schmiedeeisen, die andere Kurve für Gußeisen. Man sieht, wie mit zunehmender Erregung die magnetischen Dichten anfangs sehr schnell wachsen, dann langsamer und bald, in Uebereinstimmung mit den schon erwähnten älteren Erfahrungen, so langsam, daß die Steigerung der Dichten nicht mehr vorteilhaft ist. Man bemerkt ferner den erheblichen Unterschied im Verhalten des Gußeisens und Schmiedeeisens und den trotzdem übereinstimmenden Charakter der beiden Kurven, ausgeprägt besonders durch den ziemlich schnellen, knieartigen Uebergang von den mehr senkrechten Teilen zu den mehr wagerechten.

Für Luft und die meisten anderen Stoffe ist eine Aenderung der spezifischen magnetischen Leitfähigkeit mit der Kraftliniendichte nicht beobachtet. Stellt man deshalb für sie die Abhängigkeit der magnetischen Dichte von der Erregung ebenfalls graphisch dar, so erhält man eine zur Abszissenachse geneigte gerade Linie. Im Übrigen aber könnte die experimentelle Bestimmung dieser Linie grundsätzlich in ähnlicher Weise erfolgen, wie die Kurven für Eisen. Erforderlich ist das indessen nicht, da sich die Kraftliniendichten in Luft für einzelne Stromwindungen oder für ein vollständiges Solenoid berechnen lassen. Andeutungen darüber haben wir früher gegeben. An einem sehr langen Solenoide, in dessen Inneren, wie wir sahen, die Kraftlinien gleichmässig verteilt sind, bestätigt sich auch die Analogie zwischen elektrischer und magnetischer Leitfähigkeit und zwar in aller Schärfe. Denn um in dem Solenoide einen Kraftfluss von bestimmter Stärke aufrecht zu erhalten, ist die dichte Lagerung der Windungen bei bestimmter Stromstärke erforderlich. Für ein solches Solenoid ergibt die Rechnung, die wie gesagt auch durch experimentelle Messung ersetzt werden könnte, die verhältnismässig geringe Feldstärke von 0,8, wenn für jedes cm Achsenlänge 1 Ampèrewindung aufgewendet wird. Eine magnetische Dichte von 20 Kraftlinien für 1 qcm des Querschnittes erfordert also 25 Ampèrewindungen auf jedes cm Länge. Dieselbe Erregung liefert bei Schmiedeseisen etwa 15000 Kraftlinien. Bei dieser Erregung ist also die Leitfähigkeit des Schmiedeseisens 600 mal größer als die der Luft. In der Darstellung nach Fig. 32 würde also die Luftlinie sich sehr nahe an die Abszissenachse anschmiegen.

Mit Hülfe der geschilderten Methode ist man also im Stande, die Dynamomaschine nunmehr vollständig zu berechnen, die einer geforderten Spannung entspricht, und kann so durch angemessene Aenderung des Entwurfes alle Verhältnisse den besonderen Bedingungen anpassen. Die Befreiung von der früher herrschenden Unsicherheit ist von grösster Wichtigkeit für die feinere Ausbildung der Dynamomaschine seit dem Ende der 80 er Jahre geworden. Die Hopkinson'sche Methode bildet ein ebenso einfaches wie glänzendes Beispiel für den Einfluß rein theoretischer Betrachtungen auf den praktischen Maschinenbau. Wir werden nachher noch den Aufbau einer Dynamomaschine verfolgen und dabei über die Benutzung der Hopkinson'schen Methode Einzelnes

nachtragen, zunächst sei über die Berechnungsweise an Hand der Figur 30 nur Folgendes bemerkt. Der magnetische Kreis der Maschine setzt sich aus mehreren Teilen zusammen, für die einzeln die erforderlichen Ampèrewindungen berechnet werden. Die Kraftliniendichte ist bei angenommenen Abmessungen der Teile überall im Kreise durch die Bedingung gegeben, daß an der Stelle, wo die Induktion der Leiter stattfindet, nämlich im Luftspalte, eine bestimmte Kraftliniendichte herrschen muß, um die geforderte Maschinenspannung zu erhalten. Man kann an der Maschine hinsichtlich der nötigen Erregung drei Hauptteile unterscheiden, das Magnetgestell, den Anker und den doppelten Luftspalt zwischen den Polen und dem Anker. Das Magnetgestell setzt sich dabei meist selbst noch aus mehreren Teilen zusammen. Die Feldwicklung wollen wir uns zunächst als ziemlich gleichmässig auf dem Gestelle verteilt denken. Die Tabellen und die Magnetisierungskurven nach Figur 32 geben die Ampèrewindungen für 1 cm Kraftlinienweg, die Ampèrewindungen für die einzelnen Teile finden sich also durch Multiplikation der einzelnen Weglängen in cm mit jenen Zahlen. Den längsten Weg haben die Kraftlinien im Magnetgestelle, den kürzesten in den Luftspalten. Da aber hier der spezifische magnetische Widerstand sehr viel größer ist, als in den Eisenteilen, so nehmen die Luftspalten immer einen bedeutenden Teil der gesamten Erregung in Anspruch. Am geringsten und oft ganz zu vernachlässigen ist der magnetische Widerstand des Ankers, wenigstens des eigentlichen Ankerkernes. Einige Schwierigkeit bei der Berechnung bereitet immer die Schätzung der sogenannten Streuung der Kraftlinien in der Maschine. Der im magnetischen Kreise sozusagen eingeschnürte magnetische Kraftfluß zeigt immer Neigung zu einiger „Leckage“, wie die Engländer bezeichnend sagen, d. h. es werden Kraftlinien aus dem Kreise herausgedrängt, die sich auf anderem als dem vorgeschriebenen Wege zu schließen suchen, namentlich natürlich da, wo der gut leitende Eisenweg unterbrochen ist, also an den Luftspalten. Ein Teil des Kraftflusses schließt sich deshalb durch die Luft von Pol zu Pol, ohne den Anker zu passieren und ist für die Induktion der Ankerleiter verloren. Der Kraftfluß im Feldmagneten muß daher immer etwas größer angenommen werden, als tatsächlich in den Luftspalten zur Wirkung kommt. Der Verlust oder die Streuung ist auch bei heutigen Maschinen immer noch erheblich und kann im groben

Mittel etwa zu 25 % angenommen werden. Eine eigentliche Berechnung der Streuung ist umständlich und doch unsicher, die Berücksichtigung auf Grund von Erfahrungen an Maschinen ähnlicher Bauart genügt aber auch meist.

Wiederholen wir nun noch einmal den Gang der ersten Berechnungen an der Dynamomaschine im Zusammenhange: Durch die Erregung des Feldmagneten ist eine bestimmte Kraftliniendichte in den Luftspalten sicher gestellt. Von den Ankerleitern befindet sich eine gewisse Anzahl unter den Polflächen, die gewöhnlich in der Abwicklung rechteckige Form haben. Die achsiale Tiefe der Polflächen bestimmt die wirksame Länge der Leiter, die mit einer bestimmten Geschwindigkeit die Kraftlinien schneiden. Man braucht nur die Induktion in dem einen Luftraume zu beachten, da die beiden Ankerseiten parallel geschaltet sind. Dann ergibt sich die EMK der Maschine als Summe der in den einzelnen Leitern induzierten, die nach früherem durch das Produkt aus Leiterlänge, Geschwindigkeit und Kraftliniendichte gegeben sind. Alle Maße sind dabei in cm ausgedrückt. Man erhält damit eine riesengroße Zahl, die durch 100 Millionen zu dividieren ist, um die EMK in Volt darzustellen. Im wirklichen technischen Gebrauche wird zur Berechnung der EMK eine handliche Formel benutzt, die in vereinfachter Gestalt den geschilderten Rechnungsvorgang enthält.

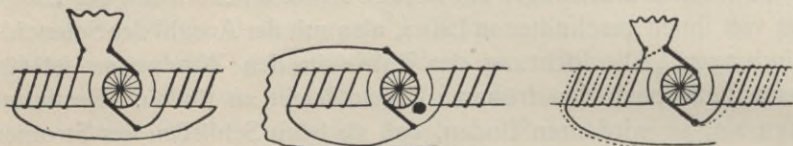
Wie aus den bisherigen Betrachtungen hervorgeht, besteht die Rolle des Feldmagneten der Dynamomaschine in der Vervollständigung des magnetischen Kreises und im Aufnehmen der erregenden Wicklung, die tatsächlich nur in den Luftspalten zur nützlichen Wirkung kommt. Die große Leitfähigkeit des Eisens ermöglicht die Leitung des Kraftflusses auf dem verhältnismäßig langen Wege durch den Magnetkörper unter Aufwand eines nur mäßigen Teiles der ganzen Erregung. Diese Möglichkeit, vermittelt des Eisens die magnetische Kraft vieler Windungen auf die beschränkte Luftstelle zu lenken, erklärt nun auch die große Stärke der Elektromagnete überhaupt, die wir früher nur als Tatsache hingenommen haben. Auch ein eisenloses Solenoid (Fig. 22) führt einen magnetischen Kraftfluß, verlangt aber für die gleiche Kraftliniendichte eine viel größere Erregung. Würde man den Kraftlinien in Figur 22 einen geschlossenen Eisenring bieten, so würde ihre Dichte sich in dem starken Maße vergrößern, der durch die Magnetisierungskurven Figur 32 gegeben ist.

Nach der Vorstellung von den Kraftlinien sind diese im Innern des Solenoides durch die umschließenden Stromwindungen zusammengezwängt, nach Aufhören des Stromes erweitern sie sich infolge ihres Querdruckes auf einander zu unbeschränkt großen Kreisen, müssen dabei die Windungen des Solenoides schneiden, induzieren also in diese eine EMK. Umgekehrt, so muß man sich folgerichtig vorstellen, treten beim Schließen des Stromes die Kraftlinien von außen quer in das Solenoid ein, induzieren dabei also wieder eine EMK, aber von entgegengesetzter Richtung. Diese EMKe werden dabei um so größer sein, je mehr Kraftlinien sich zerstreuen bzw. zusammendrängen, besonders groß also bei einem geschlossenen Eisenwege, sie werden ferner wachsen mit der Länge der von ihnen geschnittenen Leiter, also mit der Anzahl der Solenoidwindungen. Die Richtung der EMKe in den Windungen ist für beide Fälle nach den früheren Regeln leicht zu finden. Bestimmt man sie, so wird man finden, daß sie beim Schließen des Stromes dessen Ausbildung in den Windungen zu verzögern suchen, umgekehrt aber beim Oeffnen ihn aufrecht zu erhalten. Das folgt auch mittelbar aus einer anderen Betrachtung. Ein stromdurchflossenes Solenoid, oder sagen wir jetzt kurz ein Elektromagnet, stellt nach Ausbildung des Stromes einen bestimmten Energievorrat dar, der beim Oeffnen des Stromes wieder frei wird. Das folgt unmittelbar aus der Kraftlinienvorstellung. Deshalb muß nach allgemeinen Grundsätzen der Strom beim Schließen zunächst einen besonderen Widerstand finden, denn er muß ja eine gewisse Arbeit leisten, während umgekehrt beim Oeffnen die frei werdende Energie den Strom noch eine gewisse, meist nur ganz kurze Zeit unterhält. Ein Elektromagnet mit vielen Windungen zeigt deshalb beim Einschalten eine gewisse Trägheit, während beim Ausschalten die als Magnetismus aufgespeicherte Energie sich in Form eines lebhaften Funkens oder selbst einer vollständigen Flamme zeigt. Die EMK bildet nämlich beim Trennen der Kontaktstücke zunächst einen kleinen Funken, der etwas Metall verdampft und sich in den heißen Metaldämpfen und Gasen eine glühende Brücke schafft, die bei größerem Abstände der Kontaktstücke und mit dem Verschwinden der EMK abreißt. Das Alles gilt nun aber nicht nur für Solenoide, sondern für Leiter überhaupt, denn jeder stromdurchflossene Leiter erzeugt ein magnetisches Feld und zwar ein um so stärkeres, je mehr man durch Eisen in seiner Nähe die Verdichtung der Kraft-

linien begünstigt. Ein einfacher gerader Leiter in Luft zeigt die geschilderten Erscheinungen kaum merklich, ganz oder teilweise von Eisen umgeben wird er aber zum Träger einer Energiegröße, die sich unter Umständen sehr störend bemerkbar macht.

*

Zu der ursprünglichen Schaltung der Dynamomaschine (Fig. 30), bei der die Felderregung durch den gesamten Ankerstrom bewirkt wird, gesellte sich bald eine neue, die sogenannte Nebenschlußschaltung, die durch zwei gesonderte von den Bürsten abzweigende Stromkreise gekennzeichnet ist. In Figur 33 stellt die Skizze links



Figur 33.

die ältere Serienschaltung dar, die mittlere Skizze die Nebenschlußschaltung. Während bei der ersteren die Erregung vom Ankerstrom abhängig ist, gibt bei der zweiten die als Nebenschluß betrachtete Wicklung dem Feldmagneten eine konstante Erregung, wenn die Maschine mit gleichbleibender Drehzahl läuft. Denn in diesem Falle wirkt an den Enden der Nebenschlußwicklung immer dieselbe Spannungsdifferenz, die infolge des gleichbleibenden Widerstandes der Wicklung den Erregerstrom konstant hält. In ihren Eigenschaften kann die Nebenschlußmaschine deshalb mit der magnetelektrischen Maschine verglichen werden (Fig. 24), von ihrer viel stärkeren Wirkung abgesehen, freilich nur annähernd, denn es wird sich später ergeben, daß bis zu einem gewissen Grade auch die Spannung der Nebenschlußmaschine vom Ankerstrom abhängt. Endlich ist noch eine dritte Schaltung möglich, die aus den beiden ersten zusammengesetzt ist und kurz als Kompoundschaltung bezeichnet wird. Die Skizze rechts gibt davon eine Vorstellung. Die besonderen Eigenschaften dieser drei Schaltungsarten werden weiterhin näher betrachtet werden, sie wurden hier zunächst nur zum besseren Verständnisse des Folgenden erwähnt.

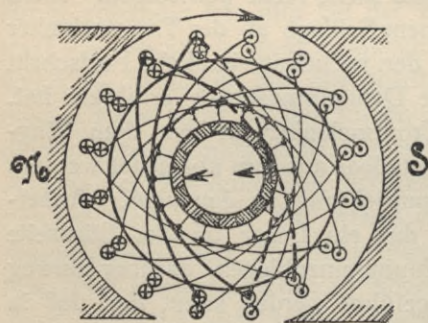
Auf die bauliche Durchbildung der Maschine haben die verschiedenen Erregungsweisen des Feldmagneten wenig Einfluß, desto

mehr aber die Form des Ankers. Der Ringanker von Pacinotti-Gramme, der in so hohem Grade fördernd gewirkt hatte, zeigte bei der weiteren technischen Behandlung manche Untugenden, denen durch verschiedene Aenderungen abzuhelpfen versucht wurde. In erster Linie wurde das Mißverhältnis empfunden zwischen der wirksamen und der wirklichen Leiterlänge. Jedem wirksamen Leiterstücke auf dem Rücken des Ringes (Fig. 28) entspricht ein ebenso langes, nur zur Verbindung dienendes Stück im Ringinnern, und dazu kommen noch je zwei, ebenfalls wirkungslose Seitenstücke. Diesem Mißverhältnis suchte man durch andere Ringformen zu begegnen, von denen der Schuckert'sche Flachring am bekanntesten geworden ist. Besonders störend war aber immer die schwierige Ausführung der Ringankerwicklung. Der äußere Ringumfang ist namentlich bei den kleineren Maschinen viel länger, als der innere, die Drähte finden hier also nicht genügend Raum, und müssen mehrfach übereinander gelegt werden. Der ohnehin knappe Innenraum wird noch verkleinert durch eine Anzahl Rippen, die den Ring mit der Welle verbinden. Endlich ist der Umstand sehr lästig, daß der lange Wickeldraht immer durch die engen Fächer zwischen zwei Rippen hindurchgezogen werden muß. Auch die Festigkeit des ganzen Ankeraufbau's konnte nicht recht befriedigen. Allen diesen Uebelständen half mit einem Schlage ab der Trommelanker von v. Hefner-Alteneck, der als der wichtigste bauliche Fortschritt bezeichnet werden muß, den die Dynamomaschine erfahren hat.

Der Hefner-Alteneck'sche Trommelanker ist aus dem Ringanker entstanden, und kann unmittelbar aus ihm abgeleitet werden. Beachtet man nämlich die Stromrichtung in den beiden Ankerhälften (Fig. 28), so sieht man, daß ein Leiter an der Stirnseite von links her, statt in die Ringöffnung einzubiegen, darüber hinweg nach einem Leiter gegenüber geführt werden kann, und daß in dieser Weise alle Leiter an beiden Stirnseiten zu je zweien verbunden werden können, ohne die Stromrichtungen, die durch die Induktion der wirksamen Leiterteile bestimmt werden, irgend wie zu stören. Notwendig ist dabei nur eine gerade Zahl der ursprünglichen Ankerwindungen, da immer je zwei Windungen zu einer einzigen über den ganzen Ankerweg vereinigt werden. Führt man diese Entstehungsweise des Trommelankers zeichnerisch durch, so kreuzen sich die Stirnverbindungen strahlenförmig im Mittelpunkte, und man erkennt daraus sofort die Notwendigkeit, sie in

Wirklichkeit in flachem Bogen zu führen, um Platz für die durchgehende Welle zu schaffen. Dafür kann aber nun der Hohlraum des Ankerkörpers vollständig fortfallen, was zu einer Verkleinerung des Ankerdurchmessers führt, der Anker ist solide mit der Welle zu verbinden, die Wicklung erfolgt knäuelartig nur außen um den Anker herum, der ganze Aufbau ist einfacher, fester und billiger. Mäßiger allerdings ist der Gewinn an wirksamer Drahtlänge, der zunächst als das wichtigste vorgeschwebt haben mag, da die Stirnverbindungen nicht viel kürzer sind, als die fortgefallenen inneren Drahtstücke. — Die Trommelwicklungen wie die Ankerwicklungen überhaupt sind in vielerlei Formen ausgebildet und haben zu eingehenden mathematischen Untersuchungen Anlaß gegeben. Wir werden nur die einfachsten Grundformen benutzen. Für weitergehendes Interesse mag hier aber noch der Rat angefügt werden, das Studium der Ankerwicklungen durch wirkliches Ausführen anschaulich zu machen. Mit flachen Rundstücken von Kork, Stecknadeln und buntem Garn kann man das sonst etwas trockene Studium wesentlich beleben und fördern.

Das vollständige Schema einer Trommelwicklung zeigt Fig. 34. Am übersichtlichsten werden diese Wicklungen immer, wenn man



Figur 34.

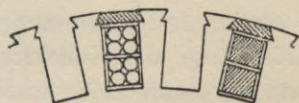
sich, der wirklichen Ausführung entsprechend, je zwei Windungen übereinanderliegend denkt, oder zwei Wicklungsteilen, von denen jede aus mehreren Windungen besteht. Die vorderen Stirnverbindungen sind in der Figur ausgezogen, von den hinteren sind nur zwei punktiert angedeutet. Die Kollektorsegmente sind in regel-

mäßiger Folge an die vorderen Stirnverbindungen angeschlossen, die Bürsten des Kollektors durch Pfeile bezeichnet, der Stromrichtung entsprechend. Verfolgt man von den Bürsten aus die zwei Stromzweige, die von den Bürsten ausgehen, so erhält man dieselbe Stromverteilung wie beim Ringanker, wie bei der Entstehungsweise des Trommelankers auch nicht anders zu erwarten ist. Man bemerkt ferner, wenn man die einzelnen vollständigen Windungen, d. h. je zwei aktive Leiter mit ihrer Verbindung auf

der Ankerrückseite, für sich betrachtet, daß man sich die ganze Wicklung aus einzelnen Windungen (Spulen) zusammengesetzt denken kann, wobei die eine aktive Seite immer zu der oberen Leiterlage am Ankerumfang gehört, die andere zu der unteren. Tatsächlich werden auch die Trommelwicklungen jetzt nicht mehr durch wirkliches Wickeln, sondern durch Zusammenfügen vorbereiteter, mit besonderen Geräten zu genau gleichen Formen gebogener Spulen. Die Verbindung der Spulenden auf der vorderen Stirnseite des Ankers mit dem Kollektorsegmenten erfolgt durch Verschrauben oder Verlöten. Die Verbindungsstücke selbst werden jetzt meist nicht quer über die Stirnflächen gezogen, sondern als Winkelstücke ausgebildet, die annähernd auf einem Cylindermantel liegen.

Der Widerstand der beiden Ankerzweige muß immer tunlichst klein gehalten werden, denn die in den Ankerleitern entwickelte Stromwärme stellt einen Leistungsverlust dar. Die Leiter müssen also reichlichen Querschnitt erhalten und bilden dicht zusammengedrängt eine Schicht auf der Ankeroberfläche von erheblicher Dicke. Da diese Schicht auch noch aus mechnischen Gründen genügenden Abstand von den Magnetpolen haben muß, so wird der Abstand zwischen Poleisen und Ankereisen bei dem bisher betrachteten sogenannten glatten Anker verhältnismäßig sehr groß, und dem entspricht ein starker Aufwand von Erregerwindungen auf dem Feldmagneten. Diesen Uebelstand zu mildern, ist der erste Zweck des Zahnankers oder Nutenankers, der

am Umfange mit tiefen, meist rechteckigen Ausnehmungen versehen ist (Fig. 35), in denen die Ankerleiter eingebettet liegen. Die Zähne des Ankers gehen



Figur 35.

nun ziemlich nahe an das Poleisen heran, vermindern den magnetischen Widerstand zwischen Pol und Anker, wenn sie auch selbst eine besonders hohe Kraftliniendichte führen müssen, und bilden gleichzeitig einen viel besseren Halt für die Leiter, als der glatte Anker bieten kann. Bemerkenswert ist übrigens bei diesem Anker die eigentümliche Art der Induktion der Leiter. Wie Rechnung und Messungen zeigen, wird der Kraftfluß zwischen Pol und Anker fast ganz von den Zähnen geführt, die Leiter schneiden also bei ihrer Berechnung eigentlich keine Kraftlinien, trotzdem aber werden sie gerade so induziert, wie auf einem glatten Anker. Um das

zu erklären, muß man sich vor Augen halten, daß der Begriff des elektrischen Stromes in dem Leiter nur ein besonderes Denkbild ist für eine Wirkung, die in anderer Form durch das magnetische Feld *um* den Leiter dargestellt wird. Derartige Felder um die Leiter zu erzeugen, kann man als die Wirkung der Drehung des Ankers im induzierenden Felde auffassen. Diese Andeutung muß hier genügen, um für die auffallende Tatsache der Leiterinduktion ohne Schneiden von Kraftlinien wenigstens den Versuch einer Erläuterung zu geben. Ohnehin ist die Mechanik der Kraftlinien in dieser Beziehung noch wenig ausgebildet.

Die Ankerleiter, die in den Nuten natürlich sorgfältig isoliert sind, im Einzelnen durch mehrfache Umspinnung mit Baumwolle, zusammen durch nochmalige Umwicklung mit Baumwollband und Preßspahn-pappe, sind bei kleineren Maschinen einfache Runddrähte, bei größeren Stäbe von rechteckigem Querschnitte. Wesentlich ist nämlich immer gute Ausnutzung des von den Leitern eingenommenen Raumes, von dem ohnehin von der Isolation viel in Anspruch genommen wird, verhältnismäßig um so mehr, je dünner die Leiter sind. Rechteckige Leiter füllen nun offenbar den rechteckigen Nutenraum besser aus als runde, und sie werden deshalb gewählt, sobald die Leiterquerschnitte groß genug sind, um die Lagerung mit geradlinig verlaufenden Kanten ohne Schwierigkeit zu ermöglichen.

Der empfindlichste Teil des Ankers ist immer der Kollektor, dessen Segmente aus schmalen, unter sorgfältiger gegenseitiger Isolation fest zusammengehaltenen schmalen Kupferbarren bestehen. Die Länge des Kollektors ist von der Stromstärke abhängig, da die nur sanft aufliegenden Bürsten eine ziemlich große Berührungsfäche haben müssen, um den Strom ohne erheblichen Spannungsverlust überleiten zu können.

Würde man zwischen den erregten Feldpolen der Maschine einen massiven Eisenzylinder rotieren lassen, so könnte sofort ein großer Widerstand gegen die Bewegung und bald eine starke Erwärmung des Zylinders festgestellt werden. Diese Tatsache erklärt sich leicht, wenn man sich den massiven Zylinder aus einzelnen Stäben bestehend denkt, die beim Drehen gerade wie die isolierten Ankerleiter induziert werden und, da sie mit den entgegengesetzt induzierten und den nicht induzierten leitend zusammenhängen, die Ausbildung starker Ströme ermöglichen, also gewissermaßen eine

kurz geschlossene Ankerwicklung darstellen. Derartige unregelmäßige, oder richtiger in ihren Bahnen nicht genau verfolgbare Ströme, kurz Wirbelströme genannt, entstehen immer, wenn massive Metallmassen sich in magnetischen Feldern von wechselnder Richtung oder Stärke bewegen, sie können nur vermieden werden durch Unterteilung der Massen senkrecht zu den sonst entstehenden Strömen. Aus diesem Grunde hatte schon Gramme den Körper seines Ringankers aus lackiertem oder oxydiertem Eisendrahte gebildet. Die Trommelanker dagegen werden aus Eisenblechscheiben aufgeschichtet, die von einander durch ganz dünnes Papier einigermaßen isoliert sind. Um auch Wirbelströme von begrenzter Ausdehnung tunlichst auszuschließen, darf im Allgemeinen die Dicke der Blechscheiben etwa $\frac{1}{2}$ mm nicht übersteigen, sodaß die Anker immer Hunderte davon enthalten. Hergestellt werden die Blechscheiben jetzt meist auf Stanzmaschinen, die aus den vorher beklebten Blechen zunächst runde Scheiben mit Mittelloch austanzen, die darauf nach demselben Verfahren mit Nuten versehen werden. Scheiben über eine gewisse Größe müssen aus Blechstücken zusammengebaut werden.

Auch diese weitgehende Unterteilung des Ankerkörpers schützt noch nicht ganz vor Verlusten. Beim schnellen Drehen des Ankers bei offenem Stromkreise in dem induzierenden Felde steigert sich doch seine Temperatur, wozu in geringem Grade die nicht ganz zu vermeidenden Wirbelströme in den Eisenblechen und auch die Wirbelströme in den Leitern beitragen, wenn auch bei Zahnankern nur sehr wenig, hauptsächlich aber eine gewisse magnetische Zähigkeit des Eisens, die zuerst von Warburg näher betrachtet wurde und den Namen Hysterisis erhalten hat (von *ὄσῆσις*, zurückbleiben). Bei jeder einmaligen Umdrehung des Ankers wechseln nämlich die Kraftlinien im Eisen zweimal ihre Richtung (Fig. 28), und dieses Ummagnetisieren des Eisens vollzieht sich unter einem gewissen Reibungswiderstande, der mit dem einer zähen Flüssigkeit zu vergleichen ist und bei seiner fortwährenden Wiederholung eine nicht unbeträchtliche Erwärmung verursacht. Dieser Verlust kann nur durch Verwendung magnetisch guten Eisens in zulässigen Grenzen gehalten werden, läßt sich aber an Hand sorgfältiger Versuche nach der Masse des Eisenkörpers genau genug abschätzen. Wirbelstrom- und Hysterisis-Verluste wachsen ihrer Natur nach mit der Drehzahl des Ankers.

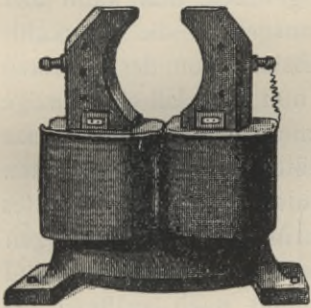
Die Wärme im Anker infolge der Verluste, die wir im Vorstehenden betrachtet haben, die Stromwärme in den Leitern bei der größten zulässigen Stromstärke, die Wärme infolge von Wirbelströmen und Hysteresis, ebenso die im Kollektor durch Ströme und Bürstenreibung entstehende, muß nun an die Umgebung zerstreut werden, wenn nicht die Temperatur des Ankers auf die Dauer zu hoch werden soll. Früher achtete man nicht so sorgfältig auf diesen Umstand, jetzt sind aber allgemein Temperaturgrenzen vorgeschrieben, die von guten Maschinen nicht überschritten werden dürfen. Für Anker gilt gewöhnlich eine Temperaturerhöhung von 50° C noch als zulässig. Daraus ergibt sich ein gewisses Mindestmaß an Ankeroberfläche bei einer bestimmten Leistung, das nicht durch eine einfache Zahl angegeben werden kann, da es sehr von der Art der Luftbspülung des Ankers abhängt. Als ein erster Anhalt kann, um wenigstens eine erstmalige Schätzung zu ermöglichen, die Forderung dienen, für jeden qcm Ankeroberfläche nicht mehr als 5—8 Watt Leistungsverlust eintreten zu lassen. Die Leistung eines Ankers von gewisser Größe ist deshalb zunächst durch seine Erwärmung bestimmt. Um diese niedrig zu halten werden jetzt immer besondere Maßnahmen zur reichlichen Luftkühlung des Ankers vorgesehen, meist bestehend in Lüftungsschlitzen senkrecht zur Achse, die mit Längskanalen nahe derselben in Verbindung stehen und ventilatorartig wirken.

Den Nutenanker einer kleinen Maschine von etwa 8 Kilowatt (23 cm Durchmesser) zeigt die Figur 36 (siehe Tafel III). Die Wicklung, die Zähne, die Kollektorsegmente sind deutlich daran zu sehen. Auf der linken Seite ist eine Rippenscheibe angebracht, die mit dem (etwas abgerückten) Lagerschilde einen besonderen Ventilator bildet, um Kühlluft in wesentlich achsialer Richtung durch die Maschine zu blasen. Derartige besondere Bläser sind bis jetzt noch weniger gebräuchlich, scheinen sich aber allmählich mehr einzuführen.

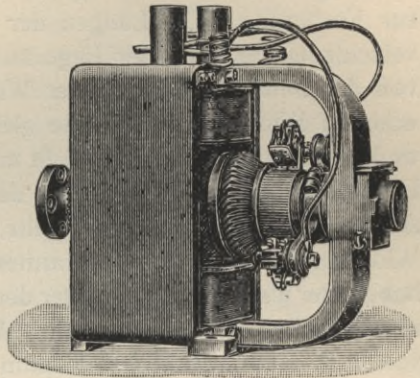
Den elektrischen Maschinen sachgemäße Kühleinrichtungen zu geben, hat man sich nur langsam und zögernd entschlossen. Die Erzeuger schienen sich beinahe zu schämen, daß ihre Maschinen nicht sozusagen von selbst kühl genug blieben, wenn den erwärmten Teilen nach gewissen Faustregeln eine gewisse Oberfläche gegeben war, während doch weder dem Hersteller noch dem Abnehmer der unvermeidliche Leistungsverlust durch Wärmebildung ein Geheimnis war. Seitdem vollzieht sich aber eine verständige Wandlung, und

die sorgfältige Behandlung der Kühlung hat schon wesentliche Fortschritte gemacht.

Für das viel leichter als der Anker zu behandelnde Magnetgestell war längere Zeit die Hufeisenform vorherrschend (Fig. 37). Nachdem mit allgemeiner Annahme des Nutenankers infolge des damit erzielten geringeren Widerstandes im Luftspalte die Erreger-
spulen kleiner werden konnten, ging man mehr und mehr zu dem vollständig symmetrischen Bau über (Fig. 38), der sich durch kurze



Figur 37.



Figur 38.

Magnetschenkel in dem rahmen- oder ringförmigen Joche kennzeichnet und neben anderen Vorteilen für den Anker einen sicheren Schutz bietet. Auch in ästhetischer Hinsicht hat die Maschine dadurch gewonnen. Als Baustoff für das Magnetgestell dient Gußeisen oder weicher Stahlguß, der in magnetischer Hinsicht dem besten Schmiedeeisen gleich ist. Die Querschnitte des gußeisernen Gestelles müssen wegen der geringeren spezifischen Leitfähigkeit bedeutend größer sein als die stählernen, die Maschine wird also viel schwerer. Der niedrige Preis des Gußeisens gleicht aber das Mißverhältnis wieder aus, bei der Wahl zwischen beiden Stoffen entscheiden die besonderen Verhältnisse. Allgemein aber verwendet man jetzt für die Schenkel mit den Erregerwicklungen magnetisch besten Stoff, da er eine große Ersparnis an Kupfer im Gefolge hat und das ganze Magnetgestell nicht unwesentlich verkleinert. Um das einleuchtend zu machen, müssen wir die Ausführung der Erregerwicklung näher kennen lernen.

Die Erregerwindungen werden immer für sich hergestellt und nachträglich auf die Magnetschenkel geschoben. Zu dem Ende wird der mit Baumwolle mehrfach besponnene Draht auf sogenannte

Spulenkasten gewickelt, meist mit Preßspahn beklebte Hülsen aus Blech mit breiten Flanschen. Der Wickelraum hat gewöhnlich rechteckigen Querschnitt (Fig. 37 und 38) und enthält eine Anzahl Drahtlagen übereinander. Wir wollen nun den Drahtdurchmesser für die Ampèrewindungszahl bestimmen, die nach der Berechnung der magnetischen Widerstände erforderlich ist, und setzen dabei eine Nebenschlußmaschine voraus. Zur Erzeugung der Ampèrewindungen steht hier die ganze Klemmenspannung der Maschine zur Verfügung. Die Längen der einzelnen Drahtwindungen sind verschieden, je nach der Lage zu der sie gehören, man kann aber von der mittleren Länge einer Windung ausgehen, die bei rechteckigem Wicklungsquerschnitte gleichen Abstand von der innersten und äußersten Lage hat. Stellt man sich nun vor, daß eine einzige Drahtwindung unter Wirkung der Klemmenspannung die ganze Ampèrewindungszahl führen sollte, so müßte sie einen bestimmten Widerstand, also einen bestimmten Durchmesser des Kupferdrahtes haben, der als bester Leiter unter den unedlen Metallen für Wicklungen ausschließlich verwendet wird. Man rechnet dabei den Widerstand von 1 m Kupferdraht bei 1 qmm Querschnitt nach mäßiger Erwärmung durch den Strom zu $\frac{1}{50}$ Ohm. Daraus ist der Widerstand für andere Querschnitte leicht zu berechnen, am bequemsten aber aus einer Tabelle zu entnehmen. Man erhält auf diese Weise zwar einen lächerlich starken Strom für die eine Windung, nichtsdestoweniger ist aber der Drahtquerschnitt richtig gefunden. Denn wenn man sich nun statt der einen Windung deren zwei von gleicher Länge und hintereinandergeschaltet denkt, so bekommt man den doppelten Widerstand, damit die halbe Stromstärke, die Ampèrewindungszahl ist aber dieselbe geblieben. So weiter schließend sieht man mit der Vermehrung der hintereinander geschalteten Windungen die Stromstärke proportional abnehmen, die Ampèrewindungszahl aber unverändert bleiben. Und da von einer Windung mittlerer Länge ausgegangen war, so kann man den ganzen Spulenkasten ausfüllen, mit dem Erfolge, bei konstanter Ampèrewindungszahl die Stromstärke in den Windungen auf ein zulässiges Maß zurückgeführt zu haben. Zulässig bedeutet dabei, daß die auf 1 qcm der Spulenoberfläche entfallende Stromleistung der ganzen Spule ein gewisses Maß nicht überschreitet, beispielweise 8 oder 10 Watt. Da die Leistung, Strom mal Spannung, hier wegen der konstanten Spannung dem Strome einfach proportional ist, so kann

man sie bei genügend großem Wickelraume beliebig herabsetzen und gleichzeitig die abkühlende Oberfläche vergrößern, oder, um eine vorgeschriebene Ampèrewindungszahl um einen Schaft bei zulässigem Verluste und zulässiger Temperatursteigerung zu leiten, ist eine gewisse Größe des Wickelraumes erforderlich. Denkt man sich nun weiter den Schaftdurchmesser so vergrößert, daß die mittlere Länge der Windungen verdoppelt wird, so muß, um dieselbe Ampèrewindungszahl aufrecht zu erhalten, auch der Drahtquerschnitt verdoppelt werden, denn die einzelne Windung, von der wir ausgingen, muß denselben Widerstand behalten. Dann finden aber nur halb so viel Windungen in dem Wickelraume Platz, und es stellt sich die doppelte Stromstärke ein, die einen doppelten Leistungsverlust ergibt. Zwar ist die Außenfläche der Spule nun auch auf das Doppelte gewachsen, hinsichtlich genügender Kühlung braucht man also keine Sorge zu haben, aber um den Leistungsverlust wieder zu verringern, wird man den Wickelraum vergrößern müssen und zwar vornehmlich in der Achsenrichtung, um nicht die Länge der Windungen noch mehr zu steigern. Das Kupfergewicht war nun schon durch die Verdopplung der Windungslänge auf das Doppelte gewachsen, die Vergrößerung des Wickelraumes gibt einen weiteren Zuwachs, gleichzeitig aber auch eine Vergrößerung des ganzen Magnetgestelles, und das hat wieder eine Zunahme des magnetischen Widerstandes zur Folge, die eine Steigerung der erregenden Ampèrewindungen erfordert, oder eine Zunahme des Gestellgewichtes. Alle diese Erwägungen gelten, wie sich mittelbar aus ihnen ergibt, wie sich aber auch leicht durch vergleichende Rechnungen zeigt, für jede beliebige Spannung an den Enden der Erregerspulen, und sowohl für Nebenschluß, wie für Serienmaschinen. Als maßgebende Spannung für die Erregerwicklung der letzteren hat man den Spannungsverlust der Maschinen anzusehen, den man für sie aufwenden will. Eine niedrige Spannung ist allerdings insofern von Vorteil, als der stärkere Draht eine relativ geringere Isolierdicke erhält, also etwas weniger Platz einnimmt.

Jedenfalls aber zeigen die Erwägungen, von welchem Einflusse für Größe, Gewicht und Herstellungspreis der Maschine schlanke Magnetschenkel sind, und das ist der Grund, weshalb man sie aus möglichst gut leitendem Eisen herstellt, um den magnetischen Kraftfluß ohne zu viel Aufwand von Erregerwindungen durch sie hindurchzuleiten. Zur Erzielung genügend großer Polflächen muß

dann eine Verbreiterung gegen den Anker hin vorgenommen werden, um nicht einen zu großen Widerstand im Luftspalte zu erhalten, und zum Aufbringen der Spulen ist man gezwungen, entweder besondere abnehmbare Polschuhe anzuwenden, oder den ganzen Magnetschenkel abnehmbar zu machen. Diese werden jetzt übrigens auch, wie der Anker, vielfach aus Blechen hergestellt, um Wirbelströme infolge der nahen Ankerzähne tunlichst auszuschließen.

Bei einer modernen Maschine (Figur 38) sind die Erregerwicklungen auf einen kleinen Teil des magnetischen Kreises zusammengezogen, und es kann auffallend erscheinen, daß wir trotzdem stillschweigend eine gleichmäßige Verteilung der Kraftlinien angenommen haben, die in dem Solenoide (Fig. 22) nur bei sehr großer Länge eintreten sollte. Dabei war aber keine Füllung des Innenraumes mit Eisen vorausgesetzt. Hat man dagegen, um den einfachsten Fall zu betrachten, um einen Eisenring an einer Stelle eine kurze Spule gelegt, die für sich in freier Luft eine sehr ungleiche Verteilung der Kraftlinien zeigen würde, so stellt sie doch in dem Eisenringe eine praktisch gleichmäßige Verteilung her. Das läßt sich durch den Versuch beweisen, wenn der Ring an einer beliebigen Stelle einen schmalen Schlitz erhält, und wenn eine isolierte Drahtschlinge, deren Fläche einen kleinen Teil der Schlitzfläche beträgt, aus ihrer Ruhelage an den verschiedensten Punkten des Schlitzes herausgeschneilt wird. Sind die Enden der Schlinge mit einem Galvanometer verbunden, so zeigt sich unter dem jedesmaligen Induktionstromstoß immer derselbe Nadelausschlag, ein Zeichen, daß an jedem Punkte des Schlitzes die Kraftliniendichte gleich groß war. Erklären läßt sich die Tatsache einfach aus dem Begriffe des magnetischen Leitvermögens. Wir mußten den Kraftlinien, wenn sie die magnetischen Erscheinungen darstellen sollten, die Eigenschaft der Längsspannung und des Querdruckes zuschreiben. Der Ausgang aller magnetischen Bestimmungen war die Kraftwirkung in Luft. Bei besserem Leitvermögen des umgebenden Mediums muß die magnetische Kraft für gleiche Strecken abnehmen, wie die elektrische Spannungsdifferenz an den Enden eines Leiters bei demselben Strome mit abnehmendem Widerstande. Vergegenwärtigen wir uns die schematische Auffassung der Solenoidwirkung nach Figur 22, so folgt sofort, daß die geringere Kraftlinienspannung in einem besser leitenden Medium kleinere

Unterschiede in der Verteilung zur Folge haben wird, als in Luft. Da nun das Eisen ein so ungemein hohes Leitvermögen hat, so kann schon eine kurze Spule in einem Eisenkreise eine fast gleichförmige Verteilung der Kraftlinien zur Folge haben. — An dieser Stelle sei übrigens bemerkt, daß der Ausdruck „Kraftlinien“, die doch nicht nur die Verteilungsweise darstellen, sondern auch einen Ausdruck für die Größe der magnetischen Kraft bilden sollen, streng genommen nur für das Medium angewendet werden dürfen, für das die magnetische Kraft definiert war, also für Luft bezw. die ihr magnetisch gleichen Stoffe. Der einfacheren Ausdruckweise wegen kann aber hier wie in der Elektrotechnik meist von einer Unterscheidung zwischen den eigentlichen Kraftlinien in Luft und den analogen Vorstellungen für magnetisch andere Stoffe abgesehen werden.

Wenn wir somit, durch Ueberlegung und experimentelle Messung berechtigt, im Ganzen gleichmäßige Verteilung der Kraftlinien im Luftspalte annehmen, wobei auch die Randwirkungen (Figur 17) und die lokalen Abweichungen infolge der Ankerzähne unbeachtet bleiben, die selbst Gegenstand genauer Untersuchungen geworden sind, so gilt das doch zunächst nur für die stillstehende erregte Maschine. Die Form des induzierenden Feldes ändert sich auch nicht, wenn sich der Anker bei offenen Klemmen dreht, denn der magnetische Widerstand bleibt immer derselbe. Der sehr geringe Erregerstrom der Nebenschlußmaschine hat keinen praktischen Einfluß. Wenn aber die Ankerleiter Strom führen, so zeigen sich Erscheinungen, die auf eine Störung des induzierenden Feldes schließen lassen und die kurz als Ankerrückwirkung bezeichnet werden. Wenn man den Begriff Rückwirkung allgemeiner faßt, so kann man ihn an allen Maschinen unter wechselnder Inanspruchnahme feststellen. Ein leer laufender Riemtrieb oder Seiltrieb zeigt gleiche Spannung oder Durchhang beider Seiten des Riemens oder Seiles, sofort aber Unterschiede, sobald er Leistung zu übertragen hat, denn dabei strafft sich die ziehende Seite, und die andere wird schlaffer; der Druck in einem Dampfkessel fällt etwas, wenn die bis dahin leerlaufende Dampfmaschine Leistung abgibt usw. Solcher Beispiele einer gewissen elastischen Nachgiebigkeit bei Spannungsänderungen lassen sich leicht viele finden, auch die geringen Formänderungen der meist als starr betrachteten Maschinenorgane unter Wirkung wechselnder Kräfte gehören dazu.

Ein Analogon dazu bietet die Rückwirkung des Ankerstromes auf das induzierende Feld, die, wie in ähnlichen Fällen bei der Nachgiebigkeit magnetischer Felder überhaupt, verhältnismäßig stark ist. Diese Rückwirkung wird in verschiedener Weise dargestellt. Die vielleicht am meisten zutreffende Vorstellung gewinnt man unmittelbar im Gedenken an die elastischen Eigenschaften der Kraftlinien. Wenn diese einem senkrecht zu ihnen geführten Strom-



Figur 39.

leiter Widerstand entgegenstellen, so werden sie entgegen ihrem Querdrucke mehr oder weniger nachgeben und vor dem Leiter sich verdichten. Das zeigt deutlich das Bild (Figur 39), das in früher geschilderter Weise mit Eisenfeilicht erhalten ist unter Verhältnissen, die einigermaßen denen einer Dynamomaschine entsprechen. Dabei ist nur ein einzelner Stromleiter angewendet, wenn aber eine

gleichmäßige Reihe solcher in dem Luftspalte wirkt, so muß der Erfolg offenbar ein Zusammenschieben der gesamten Kraftlinien sein, und da der ganze Kraftfluß durch die Pole in dem Luftspalte festgehalten wird, so ist das Bild des durch den Ankerstrom verzerrten induzierenden Feldes ungefähr entsprechend einer senkrechten hohen Schicht elastischer Platten, die im Ganzen zwischen starren Endplatten zusammengedrückt werden, durch ihr eigenes Gewicht aber von oben nach unten die einzelnen Schichten immer mehr belasten, sodaß ihre Dichte von unten nach oben abnimmt. Ein ähnliches Gesetz herrscht bekanntlich auch für die Abnahme des atmosphärischen Druckes und der Luftdichte mit der Höhe. Man könnte das Bild von den elastischen Platten der Feldverzerrung noch ähnlicher gestalten, auch ohne das wird aber leicht zu erkennen sein, von welchen Umständen der Grad der Feldverzerrung abhängt, erstens selbstverständlich von der Stärke des Ankerstromes, zweitens von dem Widerstande des Feldes gegen die Verzerrung. Dieser Widerstand — man denke immer an den

Querdruck der Kraftlinien — wird zunehmen mit der ursprünglichen Felddichte und mit der Länge der Kraftlinien im Luftspalte. Denn da sie im Ganzen von der einen Seite des Poles nach der andern hin verschoben werden, das gutleitende Eisen des Poles und des Ankers aber nur geringen Widerstand gegen diese Verschiebung bietet, so ist der Querwiderstand des Luftspaltes (bei hoher magnetischer Sättigung auch der Ankerzähne) das wesentlichste Hindernis gegen die neue Form des induzierenden Feldes.

Unter der Wirkung des Ankerstromes wird also, um es noch einmal kurz zusammenzufassen, das vorher gleichmäßige Feld des Luftspaltes an der einen Polkante schwächer, an der anderen stärker, und zwar erfolgt die Verstärkung bei einem Generator im Sinne der Ankerdrehung, das Maß der Feldänderung ist abhängig vom Ankerstrom, von der ursprünglichen Kraftliniendichte und von der Weite des Luftspaltes. Man kann das auch so ausdrücken: Das Feld wird um so mehr verzerrt, je weniger Erreger-Ampèrewindungen für den Luftspalt vorhanden sind im Verhältnisse zu den Ampèrewindungen auf dem Anker. Die Rechnung hat die Erscheinungen der Feldverzerrung noch nicht genügend bemeistern können, es bestehen sogar noch manche grundsätzliche Zweifel darüber, doch gewähren aus Erfahrungen entnommene Verhältniszahlen Anhalt im vorherigen Abschätzen der zulässigen Feldänderung.

Die Nachteile der Feldverzerrung machen sich zunächst durch erhöhten Widerstand im magnetischen Kreise geltend. Das spezifische Leitvermögen des Eisens sinkt im Gegensatze zur Luft mit der geführten Kraftliniendichte. Während deshalb im eigentlichen Luftspalte die größere Kraftliniendichte auf der einen Polseite durch die geringere auf der anderen hinsichtlich des Aufwandes an Erregung ausgeglichen wird, wächst der Eisenwiderstand dort mehr, als er hier abnimmt. Wie weit sich die Feldverzerrung in das Pol- und Ankerisen hinein erstreckt, ist noch ganz unsicher, jedenfalls werden in den einzelnen Ankerzähnen größere Unterschiede in der magnetischen Sättigung auftreten und mindestens in einem Teile der benachbarten Pol- und Ankermassen. Die Vermehrung des magnetischen Widerstandes ist also leicht erklärlich, ebenso die vergrößerte Streuung um den Luftspalt herum, da der Uebergang der Kraftlinien von Pol zu Anker ja noch mehr erschwert ist. Der größte Nachteil der Feldverzerrung äußert sich aber durch ihren Einfluß auf den am schwierigsten zu behandelnden Punkt der Dynamo-

maschine, die Kommutierung oder die Stromwendung unter den Bürsten.

*

Die Gleichstrom-Kollektormaschine ist im Grunde eine Wechselstrommaschine, denn in ihren Ankerwindungen wird abwechselnd Strom verschiedener Richtung erzeugt, dem aber durch den Kollektor oder Kommutator in der Außenleitung dieselbe Richtung gegeben wird. Der Vorgang ist früher ausführlich geschildert. Der Wechsel der Windungen zwischen den beiden Ankerhälften vollzieht sich beim Vorbeigehen an den Bürsten, und da diese aus Gründen genügender Leitfähigkeit und wegen der Stromwendung selbst eine gewisse Breite haben müssen, so wird vorübergehend eine Ankerwindung durch die dazu gehörige Bürste kurz geschlossen oder von den andern Windungen abgeschaltet. Das gilt sowohl für den Ringanker (Figur 28), als für den Trommelanker, wie man sich durch Verfolgen der betreffenden Windungen leicht überzeugt. Nun bildet aber jeder Leiter auf dem Anker infolge des von ihm geführten Stromes ein magnetisches Feld um sich herum aus, das beim Abschalten des Leiters vom Stromkreise verschwinden muß, weil es nicht mehr vom Strome aufrecht erhalten wird. Beim Wiedereinschalten der eben noch kurz geschlossenen Windung zu der andern Ankerhälfte muß sich infolge des umgekehrten Stromes ein Feld entgegengesetzter Richtung bilden. Könnte man die Ankerwindung an der Wendestelle kurze Zeit anhalten, zunächst kurz schließen und danach langsam in die neue Stromrichtung überführen, so würde man die früher betrachteten Vorgänge beim Aus- und Einschalten von Spulen im Einzelnen beobachten können. Zuerst würde die Energie des schnell verschwindenden Feldes in der kurz geschlossenen Windung einen Strom erzeugen, der sich in Wärme umsetzt, dann würde sich ein in seiner Stärke allmählich zunehmender Strom in die stromfrei gemachte Windung ergießen und nach Maßgabe seines Anwachsens das neue Feld ausbilden. In Wirklichkeit muß das Alles aber in einem sehr kleinen Sekundenbruchteile vor sich gehen. Kann der Energiewechsel dabei ohne Sprünge in dem beschriebenen Sinne verlaufen, so hat man eine gute Maschine, im andern Falle sieht man an den Bürsten Funken, die auch flammenartig werden und

unter lebhaftem Geräusche und Spritzen in kurzer Zeit den Kollektor mit Bürsten verderben, zum Entsetzen jedes gerechten Gleichstrommannes. „Die Maschine feuert“ — welche Summe von Enttäuschung, Verdruß und Entmutigung schließen die Worte ein! Denn es ist jetzt anders geworden, seit man die ersten Dynamomaschinen in die Welt schickte. Damals hatte der Laie wie beinahe auch der Fachmann noch seine Freude an den rötlichen Funken und grünlichen Flammen, jetzt in nüchternerer Zeit will Niemand mehr auch das harmloseste Bürstenfeuer sehen, mit gutem Grunde freilich, denn das Erhalten des teuren Kollektors ist doch wichtiger als die Augenweide an dem bunten Feuerwerke.

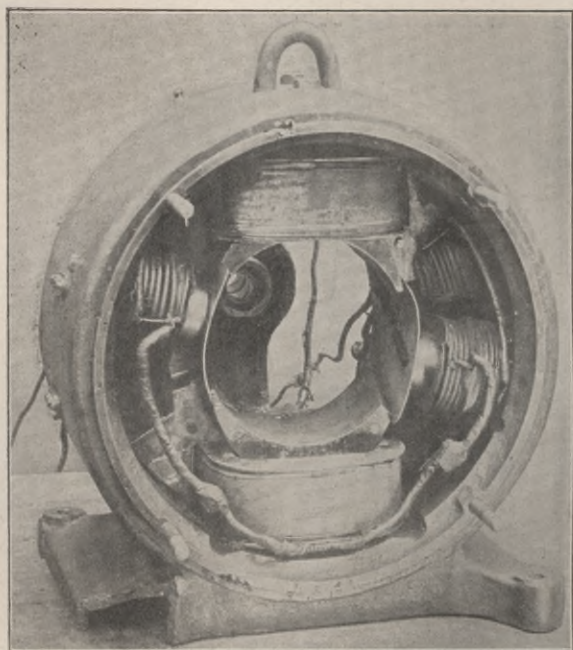
Ein Mittel zum Verringern des Bürstenfeuers fand man bald in dem Verschieben der Bürsten im Sinne der Ankerdrehung, die Bürsten wurden seitdem verstellbar eingerichtet. Man erklärte sich die Tatsache so, die Windungen würden, indem sie schon vor der Wendung in den Bereich des folgenden Poles treten, durch dessen Induktion zur Aufnahme des neuen Stromes „vorbereitet“. In gewissem Sinne ist das auch richtig, wenn auch ganz unzulänglich, wenigstens aber folgte daraus, daß die betreffende Polkante eine genügende Stärke haben muß.

Besonders gefährlich bei der Stromwendung ist offenbar der Augenblick, wo das vorgehende Kollektorsegment eben die Bürste verlassen will. Ist der Kurzschlußstrom dann noch nicht verlaufen, so wird, wie wir von früher wissen, in seiner Folge Feuer auftreten, und der neu einsetzende Ankerstrom, der wegen des noch nicht ausgebildeten Feldes um die ausgetauschte Windung einen scheinbaren Widerstand vor dieser Windung findet, wird geneigt sein, die schmale Segmentisolation als Lichtbogen zu überbrücken. Die Verhältnisse, wie wir hier ausdrücklich bemerken wollen, sind in Wirklichkeit noch viel komplizierter, namentlich wegen des veränderlichen Widerstandes zwischen der Bürste und den beiden in Frage stehenden Segmenten, die beim Vorbeigehen von der Bürste in wechselnder Breite berührt werden.

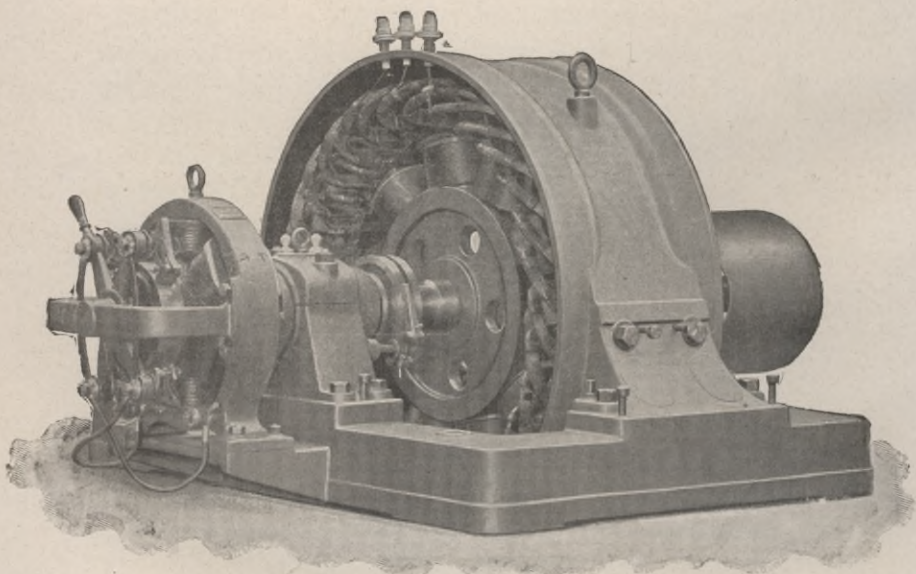
Weiter in die Einzelheiten, um nicht zu sagen in die Geheimnisse der Stromrichtung einzudringen, müssen wir uns hier versagen, wohl aber können wir schon jetzt übersehen, von welchen Umständen in quantitativer Hinsicht sie abhängt. Die Neigung zum Feuern der Maschine wird um so geringer sein, je freier die Akerwindungen von Eisen sind, da ihr Feld dann um so schwächer

ist. In dieser Hinsicht war der alte glatte Anker dem Zahnanker überlegen, bei dem die Leiter tief in Eisen gebettet sind. Um den Nachteil nicht zu groß werden zu lassen, wendet man aber bei Gleichstrommaschinen nur offene Nuten an, im Gegensatz zur Wechselstromtechnik, wo vielfach fast geschlossene Nuten vorkommen. Die jeweilig störend wirksamen magnetischen Felder werden ferner um so schwächer, je mehr die Ankerwicklung unterteilt ist, am günstigsten ist deshalb, wenn jede Windung, wie in der schematischen Figur 34 angenommen, ein besonderes Kollektorsegment haben kann. Dann ist auch die Spannung zwischen zwei Segmenten am kleinsten, die das Ueberspringen der in der Wendung begriffenen Windung begünstigt. Endlich spielt die Geschwindigkeit des Ankers eine Rolle, doch äußert sich ihr Einfluß in verschiedener Weise.

Das wichtigste Mittel zum Bekämpfen des Wendefeuers ist ein äußeres magnetisches Feld, das dem Eigenfelde der Windungen entgegenarbeitet. Das äußere Feld soll die Umkehr des Eigenfeldes beschleunigen, die Umkehrgeschwindigkeit soll sich der zeitlichen Aenderung der Erscheinungen tunlichst anpassen. Die Beherrschung des Vorganges kann unterstützt werden durch besondere Widerstände in den Verbindungsleitungen zwischen Segmenten und Windungen, sodaß der Kurzschlußstrom nicht zu stark werden kann. Einen ähnlichen, aber noch weiter gehenden Zweck haben die jetzt allgemein verwendeten Kohlebürsten anstelle der früheren Metallbürsten, die den Widerstand gegen die Segmente vergrößern und den Wechsel der Erscheinungen überhaupt mildern. Der wichtigsten Forderung eines genügend starken und geeignet geformten Wendefeldes, das die bisher betrachteten Maschinen immer an der im Sinne der Ankerdrehung vorn befindlichen Polkante finden, steht die Feldverzerrung unter den Polen entgegen, die gerade diese Kante mit steigendem Strome schwächen, während die Stromwendung das Gegenteil verlangen würde. Auch in dieser Hinsicht waren die Maschinen mit glattem Anker besser daran, da bei ihnen infolge des — in magnetischem Sinne — breiteren Luftspaltes die Feldverzerrung unter sonst gleichen Umständen geringer war. Früher durfte man die Bürsten bei veränderlichem Ankerstrome verschieben und so immer die hinsichtlich des Feuers günstigste Stellung aufsuchen, heute verlangt man unveränderliche Bürstenstellung bei jeder Belastung. Erfahrene Konstrukteure



Figur 40.



Figur 55.

können dieser Bedingung genügen, aber nur mit Hülfe der Kohlebürsten, deren Nachteile, merklichen Widerstand für den ganzen Ankerstrom und längeren Kollektor wegen der erforderlichen größeren Auflagefläche, man in Kauf nehmen muß. — Auffallend übrigens ist, daß für den so komplizierten Vorgang der Stromwendung noch kein mechanisches Bild oder Analogon geschaffen wurde, das für ein eindringendes Studium der Erscheinungenfolge von großem Nutzen sein müßte.

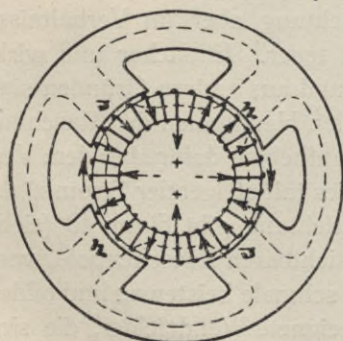
Das für die Stromwendung notwendige Verschieben der Bürsten hat wieder einen Uebelstand im Gefolge, der sich im Sinken der Maschinenspannung kundgibt und vermehrte Erregung erfordert. Den Anker selbst nämlich kann man als einen Elektromagneten auffassen, dessen Achse in der Verbindungslinie der Bürsten liegt. Aus dem Stromlaufe in Figur 34 überzeugt man sich leicht davon. Dreht man nun die Bürstenachse ganz in die Richtung des Kraftflusses, also um ungefähr 90° , so würden die Ankerampèrewindungen den Feldampèrewindungen gerade entgegenarbeiten, teilweise tritt diese Wirkung natürlich schon bei geringeren Verdrehungen ein. Es muß deshalb, wenn man nicht gerade von der Eigenschaft starken Spannungsabfalles Gebrauch machen will, erwünscht sein, die Bürsten möglichst in der Mittelstellung belassen zu können. Diesem Wunsche genügt, unter manchen andern vorgeschlagenen Mitteln, einigermaßen die Gegenwicklung oder Kompensationswicklung nach Ryan. Sie besteht in Leitern an den Feldpolen in nächster Nähe des Luftspaltes, die vom Ankerstrom entgegengesetzt zu dessen Leitern durchflossen werden und richtig angeordnet offenbar die Feldverzerrung mit ihren Nachteilen aufheben. Bei Gleichstrommaschinen ist diese Einrichtung aber im Verhältnisse zu ihrem Nutzen zu umständlich und teuer. Einfacher und wirksamer hinsichtlich der Stromwendung und aus andern Gründen sind die sogenannten Wendepole zwischen den Hauptpolen der Maschine, die allerdings nicht die Feldverzerrung aufheben, dafür aber dem Verlangen nach Verstärken des Wendefeldes mit steigender Stromstärke vollständig genügen. Von dieser Einrichtung gibt Figur 40 (siehe Tafel IV) ein Beispiel. Die deutlich sichtbaren Zwischenpole, vom Hauptstrome erregt, kehren dem Anker schmale Leisten zu und bilden gerade in der Mitte der Hauptpole geeignete Wendefelder, die sich mit dem Strome verstärken. In der Figur sind je zwei Zwischenpole zu sehen, die aber in gleichem Sinne erregt anzunehmen sind.

Diese Doppelpole und der einigermaßen rüde Zustand der Maschine deuten ihre Bestimmung zu Versuchszwecken an. Der Anker nach Figur 36 gehörte zu dem hier wiedergegebenen Magnetgestelle.

Solche Wendepole waren schon frühzeitig vorgeschlagen, beim glatten Anker aber weder notwendig noch zweckmäßig, da sie zu weit vom Ankereisen abstanden und deshalb zu starker Erregung bedurften. Sie blieben deshalb lange ganz außer Acht, erwiesen sich aber unter den durch den Zahnanker veränderten Bedingungen als sehr geeignet. Unter den besonderen Mitteln zur Stromwendung sind sie das wirksamste und einfachste, sie geben auch, was noch wenig beachtet wird, einen mit der Stromstärke steigenden Zuschuß zu dem induzierenden Kraftflusse, arbeiten also dem Spannungsabfalle entgegen, in einem nicht unerheblichen Maße, das bei sonst richtiger Formgebung durch geringe Bürstenverstellung geändert werden kann. — Es ist zur Zeit noch eine offene Frage, ob derartig eingerichtete Maschinen ganz allgemein Anwendung finden werden, denn ihre Herstellungskosten sind natürlich etwas höher und müssen durch vergrößerte Leistung ausgeglichen werden. Vielleicht entscheiden weitere, naheliegende Verbesserungen zu ihren Gunsten. Jetzt schon sind sie unentbehrlich geworden in den sich mehrenden Fällen, wo durch Regeln des Erregerstromes die Maschinenspannung in sehr weiten Grenzen geändert werden soll, sodaß die bei geringer Erregung zu schwachen Hauptpole überhaupt kein genügendes Wendefeld mehr herstellen können.

*

Nachdem sich die Dynamomaschine in kleinerem Maßstabe



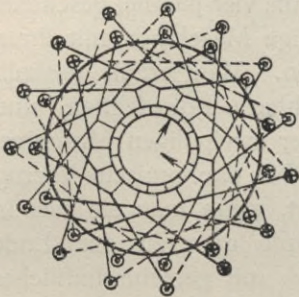
Figur 41.

bewährt hatte, und man dazu überging, ganze Stadtgebiete mit elektrischen Netzen zu versehen, machte sich das große Gewicht der Generatoren für höhere Leistungen un-
bequem geltend, und es entstanden die Magnetgestelle mit mehr als zwei Polen. Eine solche Maschine mit vier Polen ist in Figur 41 schematisch angegeben in Verbindung mit einem Ringanker. Die Pole wechseln im magnetischen Sinne ab, und man kann sich vorstellen, daß

durch Aufschneiden, Aufbiegen und Zusammensetzen von zwei je zweipoligen Gestellen das vierpolige entstanden sei. Der Ringanker hat die gewöhnliche Wicklung, wie aber aus dem eingezeichneten Stromlaufe sich ergibt, müssen nunmehr zwei Bürstenpaare zur Anwendung kommen, damit der Strom im richtigen Sinne abgeführt wird. Je zwei gleichnamige Bürsten (durch Pfeile angedeutet) stehen sich gegenüber und sind leitend verbunden zu denken. Es bilden sich also vier gesonderte Stromkreise aus, die alle vier parallel geschaltet sind, wie wenn zwei selbständige zweipolige Maschinen mit ihren gleichnamigen Klemmen verbunden wären. Man erhält deshalb keine höhere EMK, als wenn zwei benachbarte Pole fehlten, und ihre Berechnung gestaltet sich wie bei der zweipoligen Maschine, dagegen ist die Stromstärke verdoppelt. Der ökonomische Vorzug der vierpoligen Maschine ergibt sich sofort, wenn man sie sich in eine zweipolige umgewandelt denkt. Würde man zu dem Ende je zwei gleichnamige Pole vereinigen und mit gemeinschaftlicher Wicklung versehen, so müßte man, um Spannung und Gesamtstromstärke unverändert zu lassen, auch von den Windungen je zwei verschmelzen, da der Kraftfluß durch die Pole verdoppelt ist. Man erhielte also die halbe Windungszahl von doppeltem Querschnitte. Dagegen müßte nun auch das Magnetjoch doppelten Querschnitt erhalten, da es den doppelten Kraftfluß zu führen hat. Die Maschine würde also sehr viel schwerer werden, wiewohl etwas weniger Erregerkupfer enthalten, da zwei größere Pole weniger beanspruchen als vier von zusammen demselben Querschnitte. Die Gewichtersparnis an Eisen ist so augenfällig, daß sich von einer gewissen Größe an die vierpolige Maschine trotz etwas komplizierteren Baues empfehlen wird, um dann ihrerseits bei weiterer Steigerung von der sechspoligen abgelöst zu werden usw. Auf die vielfachen kleineren Vorzüge und Nachteile der mehrpoligen Maschine wollen wir nicht eingehen, ihre Berechtigung in ökonomischer Hinsicht unter zutreffenden Umständen ist nach dem Vorstehenden einleuchtend.

Ganz dieselben Gesichtspunkte gelten für die Maschine mit Trommelanker, und es mag dem Leser überlassen sein, die zweipolige Trommelwirkung nach Figur 34 in eine vierpolige zu verwandeln. Er wird dabei von selbst finden, daß die Trommelwicklung weniger frei zu behandeln ist, als die Ringwicklung. Während diese, soweit nur die Schaltungweise in Betracht kommt,

sich ohne Weiteres für jede Polzahl eignet, muß jene auf die Polteilung Rücksicht nehmen, da die beiden Seiten einer Windung immer in gleicher Lage unter verschiedenen Polen sein müssen. Dagegen läßt die Trommelwicklung wieder sehr leicht eine Hintereinanderschaltung der Wicklungsabteilungen zu, sodaß die mehrpolige Trommelmaschine mit geringen Aenderungen der Wicklung wie mehrere parallel oder wie hintereinander geschaltete Maschinen

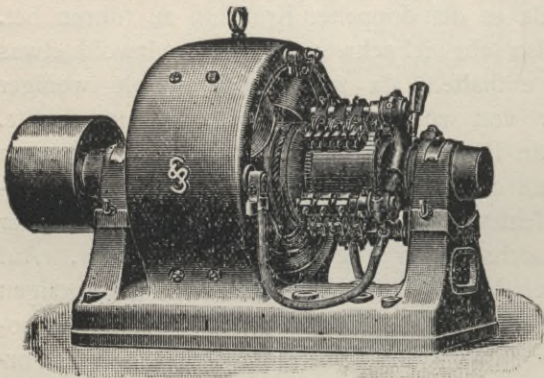


Figur 42.

wirken kann. Ein Beispiel einer solchen Serienwicklung zeigt der vierpolige Trommelanker Figur 42, der in einem der Figur 41 ähnlichen Magnetgestelle arbeiten würde. Verfolgt man den eingezeichneten Stromlauf, so sieht man, wie die Windungen nicht zwischen je zwei benachbarten Polen hin- und hergehen, wie es bei der Parallelschaltung sein würde, sondern um die ganze

Trommel herumlaufen, wobei auch nur zwei Bürsten erforderlich sind. Außer dem geringeren Gewichte hat die mehrpolige Trommelwicklung noch den besonderen Vorzug vor der gleich großen zweipoligen, daß die Verbindungen der aktiven Leiterstücke viel kürzer werden, da sie einen kleineren Teil der Stirnseiten überspannen. Der ganze Anker erhält deshalb geringere Länge. Die mehrpoligen Maschinen überhaupt legen von selbst die kreisförmige Jochbildung fest, die als gefälligste und dem Wesen der Dynamomaschine entsprechendste Form jetzt herrschend geworden ist.

Der ganze Anker erhält deshalb geringere Länge. Die mehrpoligen Maschinen überhaupt legen von selbst die kreisförmige Jochbildung fest, die als gefälligste

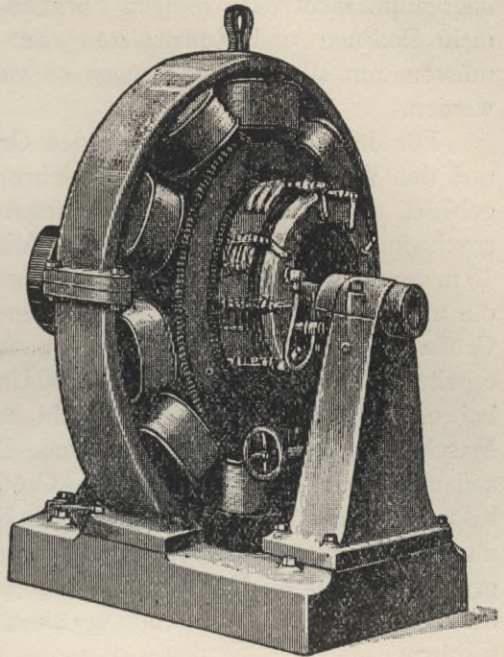


Figur 43.

Eine vierpolige Trommelmaschine zeigt Fig. 43, eine vielpolige Maschine, wie sie in großen Zentralen zur Anwendung kommt, die Fig. 44.

Keine Maschine ist so geeignet, die technische Tätigkeit als ein Ausgleichen sich widerstrebender Anforderungen erscheinen zu lassen, wie die Dynamo-

maschine. Man denke allein an den Einfluß der Weite des Luftspaltes auf die Größe des Magnetgestelles einerseits, auf die Stromwendung und die Feldverzerrung andererseits. Ein kleines leichtes und billiges Gestell verlangt knappen Luftspalt, die beiden anderen Faktoren das Umgekehrte. Die Leistung der Maschine ist begrenzt durch die Erwärmung und durch das Bürstenfeuer, gleichzeitig soll aber der Wirkungsgrad möglichst hoch sein, der wieder von teilweise wider-



Figur 44.

sprechenden Umständen abhängt. Dazu kommt die Berücksichtigung der Geschwindigkeit der Antriebmotoren, die meist nicht in dem Grade gesteigert werden kann, wie zur guten Ausnutzung des Ankers erwünscht wäre. Andererseits laufen die Dampfturbinen wieder so schnell, daß die genügende Festigkeit des Ankers nur durch die sorgfältigste Formgebung erreicht werden kann. Der Anker wird um so leistungsfähiger, je schneller er seine Leiter durch das induzierende Feld führt, dafür erwärmt er sich aber um so mehr wegen des häufigeren Ummagnetisierens des Eisens, und auch lebhaftere Luftzuführung kann dann vielleicht nicht mehr die nötige Kühlung herbeiführen. Das sind einige von den in stetem Streit liegenden Gesichtspunkten, und je mehr man auf die Einzelheiten eingeht, um so mehr findet man ihrer. Der Bau der in Wesen und Aufbau so einfachen Dynamomaschine ist mit der Zeit zu einer wissenschaftlichen Kunst geworden, deren Ausübung neben vieler Erfahrung ebenso physikalische Kenntnisse wie konstruktives Geschick und Formensinn

verlangt. Hoffentlich ist aus den vorhergehenden Blättern das Eine klar geworden, daß man eine Dynamomaschine, wie Maschinen überhaupt, nicht nach fertigen Formeln errechnen kann, daß vielmehr Rechnen und Konstruieren stets Hand in Hand arbeiten müssen, um allen Anforderungen so viel als möglich gerecht zu werden.

Für die zunächst bestimmenden Größen, die Geschwindigkeit und den Wirkungsgrad, hat die Erfahrung gewisse Werte herausgebildet, die beim Entwerfen den ersten Anhalt bieten. Die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers wird im Allgemeinen nicht unter etwa 15 m genommen, die Drehzahl der kleineren und mittleren Maschinen, die mit Riemenübersetzung angetrieben werden, nimmt mit der Größe ab. Maschinen von 10 Kilowatt (1 Kilowatt = 1000 Watt) erhalten im großen Mittel etwa 1200 Umdrehungen in der Minute, bei einem Wirkungsgrade von nicht unter 85 %, 100 Kilowatt-Maschinen haben etwa halb so große Drehzahl, ihr Wirkungsgrad soll aber nicht unter 90 % sein. Größeren Maschinen von 1000 Kilowatt und darüber in unmittelbarer Kupplung mit dem Antriebsmotor kann man bis etwa 200 Umdrehungen geben, ihr Wirkungsgrad steigt bis 95 %. Ganz andere Anforderungen hinsichtlich der Drehzahl stellen, wie schon erwähnt, im Besonderen die Dampfturbinen.

In den meisten Fällen soll die Dynamomaschine bei konstanter Drehzahl konstante Spannung aufrecht erhalten. Dazu eignet sich am meisten die Nebenschlußmaschine, die aber, um der Forderung bei allen Belastungen zu genügen, einen Ueberschuß von Erregung erhalten muß, etwa 25—30 %, sodaß dem mit der Stromstärke schwankenden Spannungsabfalle durch erhöhte Erregung vorgebeugt werden kann. Derartige Maschinen werden deshalb immer mit einem Nebenschlußregler versehen in Form eines Kastens mit Widerstandsdrahten und Stufenschalter, der den Erregerstrom richtig einzustellen gestattet, sei es von Hand oder mit Hilfe selbsttätiger Spannungsrelais. Eine selbsttätige Regelung der Spannung bewirkt die Compounderschaltung (Figur 33 rechts), die bei wachsendem Strome die Erregung steigert. Da diese Schaltung aber gewisse Nachteile beim Betriebe mit Akkumulatoren hat, so ist sie nicht in allgemeiner Verwendung. — Ganz andere Aufgaben hinsichtlich der Spannung stellt häufig die elektrische Kraftübertragung, wie schon früher erwähnt wurde.

Um den Zusammenhang der beim Betriebe wichtigen Größen leicht übersehen zu können, sind graphische Darstellungen gebräuchlich, sogenannte Charakteristiken der Maschinen, die beispielweise bei konstanter Geschwindigkeit und Spannung die Abhängigkeit der Erregung von der Stromstärke enthalten usw.

*

Jeder Gleichstromgenerator ist ohne Weiteres auch ein Gleichstrommotor. Der Generator-Anker setzt seinem Drehen einen bestimmten Widerstand entgegen, weil die Leiter in dem induzierenden Felde nach Maßgabe der Stromstärke und der Feldstärke einen ihrem Bewegungsinne entgegengesetzten Druck erfahren. Wenn man deshalb von einer äußeren Stromquelle dem Anker Strom derselben Richtung zuführt, so dreht er sich, Leistung abgebend, umgekehrt wie beim Generator, vorausgesetzt, daß die Feldpole in beiden Fällen im selben Sinne erregt werden. Diese Umkehrung der Gleichstromdynamo war von vornherein bekannt, doch führte, wie man sagt, erst ein Zufall auf der Wiener Ausstellung 1873 Hyppolyte Fontaine zur Nutzbarmachung dieser Eigenschaft für den Fernbetrieb von Elektromotoren. In größerem Maßstabe führte Werner Siemens die elektrische Fernübertragung auf der Berliner Ausstellung 1879 vor, damit zuerst einen Ausblick eröffnend in ein Anwendungsgebiet der Dynamomaschine, das seitdem die breiteste Unterlage für die Elektrotechnik geworden ist.

Wie beim Generator so sind auch beim Motor Geschwindigkeit, induzierendes Feld und Spannung für das Verhalten im Betriebe maßgebend. Die Spannung des Generators ist bei konstanter Geschwindigkeit abhängig vom induzierenden Felde, dieses bestimmt umgekehrt bei konstanter Spannung die Geschwindigkeit des Motors. Da bei der Nebenschlußmaschine konstante Spannung auch das Feld, von Nebenwirkungen zunächst abgesehen, unverändert erhält, so muß die Geschwindigkeit bei allen Belastungen annähernd gleich bleiben. Das ist leicht unmittelbar aus der Induktionwirkung zu erweisen. Die Ankerleiter, gleichgültig natürlich wodurch sie bewegt werden, erfahren bei erregtem Felde immer eine der Geschwindigkeit proportionale Induktion. Die an die Klemmen des Motors angelegte Spannung muß also etwas größer sein, als die entgegenstehende Induktionsspannung des Ankers,

damit er Strom durchlassen kann, nur *etwas* größer, weil der Ohm'sche Spannungsverlust im Anker immer klein ist. Anders gesagt, der Nebenschlußmotor strebt bei einer gewissen angelegten Spannung immer die Geschwindigkeit anzunehmen, bei der er als Generator eine gleiche Klemmenspannung erzeugen würde. Er bleibt gegen diese Geschwindigkeit je nach seiner Belastung etwas zurück, um durch Verminderung seiner Gegenspannung soviel Strom durch den Anker zu lassen, wie der Belastung entspricht. Seine Geschwindigkeit schwankt deshalb nur um einige Prozente, sie kann auch bei vollständiger Entlastung des Motors ein bestimmtes Maß nicht übersteigen. Soll die Geschwindigkeit in weiten Grenzen geregelt werden, so muß eine Verstärkung oder Schwächung des Feldes eintreten, gerade wie beim Nebenschlußgenerator zur Veränderung der Spannung bei konstanter Geschwindigkeit oder es muß bei Erregung des Feldes mit konstanter Spannung die an den Anker gelegte Spannung verändert werden. Da man meist die Motoren bei konstanter Netzspannung gebraucht, so wird gewöhnlich von der ersten Methode Gebrauch gemacht, die zweite wird aber dabei zum Anlassen des Motors benutzt. Der stillstehende Anker nämlich, der noch gar keine Gegenspannung entwickelt, würde wegen des geringen Ankerwiderstandes einen übermäßig starken Strom aufnehmen, der ein stoßweises Anlaufen des Motors zur Folge hätte, ihn mechanisch und thermisch beschädigen könnte und einen plötzlichen Spannungsabfall im Netze erzeugen würde. Die Spannung am Anker wird deshalb zunächst durch einen großen Anlaßwiderstand soweit erforderlich erniedrigt, und erst mit zunehmender Geschwindigkeit des Ankers wird durch stufenweises Ausschalten des Widerstandes die Ankerspannung allmählich auf die Netzspannung erhöht. Nur ganz kleine Motoren dürfen ohne dieses Hilfsmittel unmittelbar eingeschaltet werden. Das Mittel ist aber zum dauernden Regeln der Geschwindigkeit nicht geeignet, da in dem Anlaßwiderstande elektrische Leistung als Wärme verschwendet wird.

Hält man nun immer fest, daß die Feldstärke bei konstanter Netzspannung für die Geschwindigkeit jedes Gleichstrommotors maßgebend ist, so lassen sich auch die wichtigsten Eigenschaften des Serienmotors übersehen. Bei diesem ist das Feld abhängig vom Ankerstrom, die am Ankerumfange wirksame Kraft ist deshalb in doppelter Beziehung durch den Ankerstrom bestimmt. Hat

nun der Motor einen mechanischen Widerstand zu überwinden, beispielweise durch Vermittlung von Zwischengliedern eine gewisse Last zu heben, so entspricht dieser eine gewisse Umfangkraft des Ankers, Stromstärke und Feld stellen sich auf das dieser Umfangkraft entsprechende Maß ein, das so gegebene Feld bedingt eine der angelegten Spannung entsprechende Geschwindigkeit. Wird die Last kleiner, so stellen sich Strom und Feld für die geringere Umfangkraft ein, das Feld wird schwächer, die Geschwindigkeit steigt. Bei weiterer Verminderung der Last wird die Geschwindigkeit immer größer, sie wächst, da der mechanische Eigenwiderstand des Motors sehr klein ist, praktisch ohne Grenzen, der Motor „geht durch“. Der Serienmotor hat also keine bestimmte Geschwindigkeit, wie der Nebenschlußmotor. Von seinen anderen Eigenschaften wird bei Besprechung der elektrischen Bahnen die Rede sein.

Die Umfangkraft des Gleichstrommotors kann unmittelbar aus der Feldstärke, der Gesamtlänge der aktiven Leiter und der Stromstärke gefunden werden. Gebräuchlicher ist die Angabe des Drehmomentes, die aus seiner mechanischen Leistung und der Drehzahl erhalten wird. Die mechanische Leistung in Pferdestärken ist gleich der aufgenommenen elektrischen Leistung in Watt (Stromstärke mal Klemmenspannung), dividiert durch 736, wovon 10 bis 20 % abzuziehen sind, um die mechanische Nutzleistung zu erhalten. Die in mechanische Leistung überhaupt umgesetzte elektrische Leistung ist gleich der Stromstärke mal Gegenspannung des Ankers, weil diese der Feldstärke proportional ist.

Wenn wir nunmehr wieder an die ersten Bestrebungen zur Herstellung von Elektromotoren denken, z. B. an den Fromentschen Motor, Fig. 12, so können wir leicht die Gründe ihres Mißerfolges erkennen. Diese Motoren beruhten auf der irrümlichen Vorstellung, daß allein durch Erregen von Elektromagneten gleichmäßige Leistung zu erzielen sei, während eine angemessene verbrauchte Stromleistung das Äquivalent für die gewonnene mechanische Leistung sein muß. Bei den elektromagnetischen Motoren bildet sich deshalb, wie im einzelnen leicht zu verfolgen, ebenso wie bei dem zum Motor umgekehrten Generator, durch die Bewegung eine Gegenspannung aus, die von der angelegten Spannung überwunden werden muß. Diese Erscheinungen als Zeichen, daß der Strom gegen einen nützlichen Widerstand arbeitet, wurden

auch immer beim Betriebe der kleinen elektromagnetischen Motoren beobachtet, ihre richtige Würdigung durch Werner Siemens spielte bei der Erfindung der selbsterregenden Dynamomaschine eine wichtige Rolle.

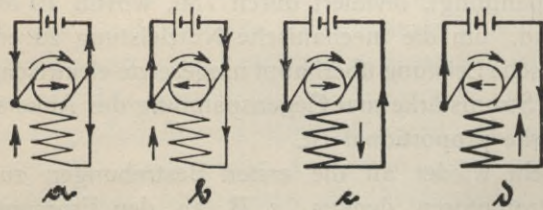
Die beiden Hauptschaltungen der Gleichstrommaschinen sind nicht nur auf ihre Geschwindigkeit als Motor von Einfluß, sondern auch auf die Stromrichtungen im Anker und den Erregerwicklungen unter verschiedenen Bedingungen. Bei unveränderten Magnetpolen muß natürlich die Drehrichtung des Motorankers entgegengesetzt sein der des Generatorankers, der Strom derselben Richtung erzeugen würde. Daher läuft aber ein Nebenschlußmotor bei einem Ankerstrome gleicher Richtung im selben Sinne wie der Generator, weil die Erregung sich umkehrt (Figur 45). Das folgt ersichtlich aus der verschiedenen Lage der EMK im Verhältnis zum Nebenschlußkreise. Beim Generator (ausgezogene Pfeile) liegt sie in dem Schließungskreise Anker - Magnetentwicklung, beim Motor (punktirte Pfeile) außerhalb.



Figur 45.

Wenn aber ein Generator gegen eine Spannung arbeitet, wie beim Laden von Akkumulatoren, oder wenn er parallel zu einem anderen Generator geschaltet ist, so kann bei geringem Nachlassen

seiner Geschwindigkeit sich der Strom wohl im Anker umkehren, nicht aber in seinem Feldmagneten, wie aus Figur 46 a und b folgt.



Figur 46.

nicht umpolarisiert, der Generator fährt fort, mit seiner eigenen Spannung gegen die überwiegende Außenspannung zu arbeiten. Anders dagegen der Seriengenerator c und d, bei dem sich die Stromrichtung im Anker *und* in den Polen bei überwiegender Außenspannung umkehrt, und der dann als Motor wirkt, seinen eigenen Antriebmotor fördernd. Der Seriengenerator darf deshalb nicht zum Laden von Akkumulatoren und für solche Zwecke benutzt werden, wo ein unbeabsichtigtes Umpolarisieren des Magneten stattfinden könnte.

Aus Figur 47 ist ferner zu ersehen, wie der Nebenschlußmotor ohne jede Umschaltung selbsttätig zu einem Generator wird.

sobald er mit etwas höherer Geschwindigkeit angetrieben wird, sodaß seine Gegenspannung die angelegte Spannung übertrifft. Er liefert dann seinerseits Strom in das Netz zurück, er wirkt bremsend. Diese Eigenschaft kann auch in anderer Weise benutzt werden, indem man den Motor vom Netze abschaltet und ihn über einen Widerstand oder kurz schließt, wie in der Figur punktiert angegeben. Immer bleibt dabei die Stromrichtung in den Feldmagneten unverändert, während zum gleichen Zwecke der Serienmotor umgeschaltet werden müßte.



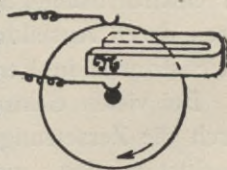
Figur 47.

Handelt es sich darum, die Drehrichtung eines Motors gleichgültig welcher Schaltung umzukehren, so muß der Strom im Anker *oder* in den Feldmagneten gewendet werden, da gleichzeitige Wendung in beiden die Drehrichtung unverändert läßt.

*

Eines Schmerzenskindes vieler angehender Elektrotechniker wollen wir nun noch gedenken, der sogenannten Unipolarmaschine oder Homopolarmaschine. Die immer schwierig zu behandelnde Stromwendung der bisher betrachteten Gleichstrommaschine hat frühzeitig Bestrebungen zum Bau einer kollektorlosen Maschine angeregt, die auch schon von Faraday angegeben war, leider nur zu geringe Spannung liefert.

Das Schema einer solchen Maschine bildet der Versuch von Faraday, der durch Figur 48 versinnlicht ist. Zwischen den Magnetpolen dreht sich eine metallene Scheibe. Es werden in ihr also EMKe in radialer Richtung induziert, denn man kann sich ja die Scheibe aus dicht stehenden Speichen gebildet denken. Wenn



Figur 48.

nun an der Achse und am Umfange der Scheibe Schleifbürsten gleiten, so kann zwischen ihnen ein Strom zustande kommen. Die Klemmenspannung der Maschine ist aber nur gering, denn es geht ja immer nur gewissermaßen ein Leiter durchs Feld, oder eine beliebige Anzahl parallel geschalteter, jedoch fehlt die Hintereinanderschaltung vieler Leiter, durch die in der Kollektormaschine höhere Spannungen erzeugt werden. Man kann nun zwar eine Anzahl

solcher Elementarmaschinen hintereinander schalten, oder auch in einem Maschinengestelle mehrere, von einander isolierte Scheiben, das ist aber immer nur durch Schleifbürsten möglich, und dadurch wird die Anordnung schon bei Spannungen unförmlich und unzweckmäßig, die in der Elektrotechnik gar nicht mehr in Frage kommen. Am meisten gebräuchlich sind hier Spannungen von 110 und 220 Volt, Unipolarmaschinen für solche Spannungen zu bauen ist aber erst wieder durch die Dampfturbine angeregt, deren große Geschwindigkeit, wenn gleichzeitig starke und große induzierende Felder in Anwendung kommen, wenigstens die Zahl der hintereinander zu schaltenden Elemente beschränkt. Die immer auf dem Faraday'schen Schema beruhenden kollektorlosen Maschinen sind schon in vielen Formen ausgeführt und haben in Verbindung mit der Dampfturbine als Schnellläufer vielleicht eine Zukunft, wenn es gelingt, der besonderen Schwierigkeiten, die sie bieten, Herr zu werden. Versuche aber, ohne Schleifbürsten eine Hintereinanderschaltung der induzierten Elemente durchzuführen, die immer darauf hinauslaufen, Rückleiter durch geheimnisvolle Löcher und Spalten beim Durchziehen durch das Feld induktionfrei zu halten, sind aussichtslos und können im besten Falle den glücklichen Erfinder nur zu vertiefter Einsicht in das Wesen der Induktion führen.

*

Beim Verlassen des Gleichstromes möge nun noch ganz kurz der elektrolytischen Sammler oder Akkumulatoren gedacht werden, durch deren Ausbildung die Elektrochemie die Vorherrschaft des Gleichstromes in Verteilungnetzen gesichert hat.

Bei vielen elektrolytischen Prozessen kann nach Aufhören des durch die Zersetzungszelle gehenden Stromes eine Rückbildung beobachtet werden, wenn die Elektroden an einen Schließungskreis gelegt werden, wobei nunmehr die Zelle als galvanisches Element Strom in umgekehrter Richtung liefert, als sie vorher empfangen hatte. Für solche Prozesse, bei vielfach wiederholtem Wechsel im Umsetzen elektrischer Energie in chemische und umgekehrt, eignet sich besonders das Blei. Bleiplatten in angesäuertem Wasser sind elektrisch indifferent gegen einander, erhalten aber einen Spannungsunterschied, nachdem ein zwischen ihnen übergehender Strom die eine Platte chemisch verändert (oxydiert) hat, wobei gleichzeitig

beide Platten auch wesentliche physikalische Aenderungen erfahren. In dieser Weise „geladene“ Elemente haben beim Entladen längere Zeit ziemlich konstante EMK von annähernd 2 Volt, bei Hintereinanderschaltung genügend vieler nach Maßgabe der Netzspannung kann die so gebildete Batterie zeitweise die Stromlieferung übernehmen. Sie spielt also ganz die Rolle eines Sammelbehälters, bei starkem Strombedarfe aushelfend, bei geringerem den zeitigen Ueberschuß von elektrischer Energie aufnehmend, macht den Betrieb des Generators gleichmäßiger und ermöglicht eine vorübergehende starke Stromentnahme aus der Zentrale, ohne daß der Generator selbst für eine solche höhere Leistung ausreichend zu sein braucht. Mobile Akkumulatoren für Fuhrwerke haben sich besonders ihres großen Gewichtes wegen wenig bewährt. Um so größer ist der Nutzen der ortfesten Batterien in Zentralen trotz ihrer erheblichen Größe und Empfindlichkeit, die sorgfältige Wartung verlangt, auch trotz des nicht besonders günstigen Wirkungsgrades, der einen erheblichen Leistungsverlust herbeiführt. Die Vorteile der ausgleichenden Wirkung der Sammler sind doch größer, als die nicht geringen Uebelstände, die ihnen noch anhaften.

Technisch verwendbare Blei-Akkumulatoren wurden zuerst von Faure um 1880 hergestellt, nachdem das elektrolytische Grundprinzip schon viel früher bekannt geworden war.

VI.

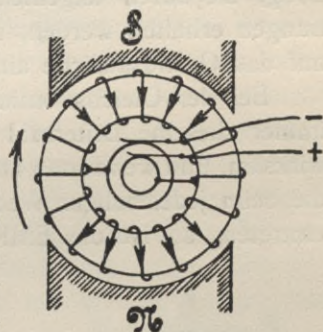
Es ist die Mission der Gleichstrom-Dynāomaschine gewesen, nicht nur für sich selbst, sondern auch für ihre Mitbewerberin, die Wechselstrommaschine, die Bahn zu bereiten. Indem sie überhaupt lehrte, größere elektrische Leistungen herzustellen und zu behandeln, den Grund legte zu allgemein gültigen Anschauungen in der technischen Benutzung von Magnetismus und Elektrizität und namentlich starke induzierende Magnetfelder durch Elektromagnete als wesentlichstes Mittel kräftiger Wirkung der Generatoren in großem Maßstabe einführte, förderte sie mittelbar auch die Wechselstrommaschine, die mit Stahlmagneten ausgerüstet u. a. als Alliance-Maschine schon vorher in beträchtlicher, nach jetzigen Begriffen, an der Leistung gemessen, ungefügiger Größe vorhanden gewesen war. Die Wiederaufnahme der veränderten Wechselstrommaschine zur selben Zeit, als die Gleichstrommaschine aus dem

Laboratorium heraus in die Maschinenwerkstatt hineinwuchs, ist wohl erklärlich, wenn man bedenkt, daß die Schwierigkeiten der Stromwendung bei der Gleichstrommaschine nur sehr langsam überwunden wurden, daß auch der Akkumulator, der beste Freund der Gleichstrommaschine, erst in den 80er Jahren seine technische Ausbildung erhielt. Für die Weiterentwicklung der Wechselstrommaschine ist dann namentlich der Transformator entscheidend gewesen, der ihr denselben Dienst geleistet hat, wie der Akkumulator der Schwestermaschine. Festgehalten muß aber werden, daß die gegenseitige Abhängigkeit von Anker und Feldmagnet, der eigentliche Kern von Werner Siemens' Schöpfung, auch für die Wechselstrommaschine zutrifft, die als Zeichen des gemeinsamen Grundprinzipes auch oft Wechselstromdynamomaschine genannt wird.

Das Schema der Wechselstrommaschine jetziger Art ist durch die alte magnetelektrische Maschine (Figur 24) gegeben, wenn man sich darin die Stahlmagnete durch Elektromagnete ersetzt denkt. Wir haben bei Besprechung dieser Maschine schon gesehen, wie sie Strom gleicher oder wechselnder Richtung erzeugen kann, je nachdem volle Schleifringe auf der Achse oder geteilte Ringstücke (Figur 26) zur Anwendung kommen. Und da zur Erregung der induzierenden Elektromagnete nur Strom gleicher Richtung tauglich ist, so könnte man sich auch vorstellen, daß beide Arten Stromableiter auf der Achse angeordnet sind, wo dann die zweite Art nur zum Erregen der Feldmagnete dient, während die erste den äußeren Stromkreis mit Wechselstrom versorgt. Damit hätte man eine selbsterregende Wechselstrommaschine, bei der die Verwandtschaft der beiden Maschinengattungen noch deutlicher hervortritt, und die auch für manche große Ausführungen vorbildlich gewesen ist, wenn schon im Allgemeinen gesonderte Gleichstrom-Erregermaschinen vorgezogen werden.

In dem Wellenstrom mit wechselnder Richtung (Figur 25) hatten wir den allgemeinen Charakter der uns jetzt beschäftigenden Stromart kennen gelernt, damit aber noch nichts über die besondere Form der Wellen ausgesagt, die zunächst nicht den Strom selbst, sondern die EMK der Maschine in jedem Augenblicke vorstellen mögen. Diese ist immer abhängig, wie wir wissen, von der Geschwindigkeit, mit der sich der magnetische Kraftfluß zu den von ihm durchsetzten induzierten Windungen ändert. Daher wird in dem Augenblick keine EMK induziert, wo der Hufeisen-

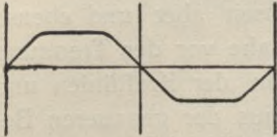
anker gerade vor den Polen des induzierenden Magneten steht, wo also der Kraftfluß nach allmählicher Zunahme sein Maximum erreicht hat und sich anschickt, wieder abzunehmen, oder wobei die Richtung der EMK durch Null hindurch wechselt. Wie sich diese Richtung bestimmt, haben wir früher gesehen. Wenn man nun den Anker einer solchen kleinen Maschine von Hand dreht, so beobachtet man zunächst einen nur langsam zunehmenden mechanischen Widerstand beim Herausdrehen des Ankers aus der Lage Pol gegen Pol, ein schnelles Anwachsen aber und ebenso schnelles Abnehmen, wenn die Polkanten nahe vor der Trennung stehen. Das bedeutet eine Art Mitschleppen der Kraftlinien und ein plötzliches Zurückschnellen, wie sich aus der genaueren Betrachtung des wechselnden magnetischen Widerstandes auch erklärt, also eine besonders große EMK in gewissen Stellungen. In der Tat zeigen derartige, jetzt nicht mehr übliche Maschinen, die in großem Maßstabe mit vielen Polen ausgeführt wurden, besonders spitze Wellenlinien. Ein Gegenstück dazu bilden Maschinen, deren allgemeine Anordnung der Gleichstrommaschine mit Ringanker gleichkommt, nur daß statt eines Stromwenders zwei volle Schleifringe angeordnet, mit zwei gegenüberliegenden Punkten der Wicklung verbunden sind (Figur 49) und durch Schleifbürsten an dem äußeren Stromkreis liegen. Steht der durch die Verbindungspunkte gegebene Durchmesser senkrecht zum induzierenden Kraftflusse, wie in der Figur, so ergeben sich für die EMKe die eingezeichneten Richtungen. Wie



Figur 49.

bei der Gleichstrommaschine ist der Anker in zwei parallel geschaltete Hälften geteilt, die augenblicklichen elektrischen Vorzeichen der Bürsten sind in der Figur angedeutet. Steht dagegen der Verbindungsdurchmesser in Richtung des Kraftflusses und gerade in der Mitte, so ergibt sich keine EMK an den Klemmen der Maschine, denn es befinden sich dann unter jedem Pole zu beiden Seiten des Verbindungspunktes gleichviel Leiter, die, wie man leicht verfolgen kann, ihre Wirkungen gegenseitig aufheben. Die Richtung der Klemmenspannung wechselt bei jedem vollen Umlaufe des Ankers zweimal, man erhält also

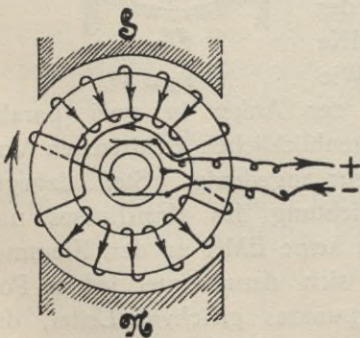
wieder eine Wellenlinie, aber ihre Form ist ganz flach. So lange nämlich der betrachtete Durchmesser sich in dem freien Raume zwischen den Polen befindet, bleibt die Klemmenspannung unverändert auf ihrer größten Höhe, um dann auf Null abzunehmen, während der Durchmesser von zwei entsprechenden Polkanten nach der Mitte der Pole geht. Die Klemmenspannung nimmt in entgegengesetzter Richtung wieder zu, wenn der bestimmende Durchmesser von den Polmitten nach den anderen Polkanten geht u. s. f. Die Wellenform der EMK



Figur 50.

hat also den Charakter der Figur 50 und ist durch Berechnen einer genügenden Zahl von Einzelwerten für die verschiedenen Stellungen des Ankers ganz nach Art des bei der Gleichstrommaschine befolgten Verfahrens leicht zu konstruieren. Einigermaßen umständlich ist ein solches schrittweises Verfahren wohl, besonders bei den nachher zu erwähnenden anderen Anordnungen, und es machen sich deshalb für den wirklichen Gebrauch vereinfachende Formeln nötig, die durch allgemeinere Behandlung der typischen Anordnungen erhalten werden, uns kommt es hier indessen immer nur auf das Grundsätzliche an.

Bei der Gleichstrommaschine war infolge des Stromwendens immer dieselbe Leiterzahl in demselben Sinne unter einem Pole wirksam, und wenn man absieht von den ganz kleinen Aenderungen, die beim jedesmaligen Wechseln einer Windung unter den Bürsten eintreten, so ist die EMK der Gleichstrommaschine durch eine



Figur 51.

gerade Linie darzustellen. Die Wellenform bei der Wechselstrommaschine legt von selbst die Frage nahe nach dem mittleren Werte ihrer veränderlichen EMK, und bei dem eben betrachteten Beispiele ist sofort erkennbar, daß dieser Mittelwert kleiner sein muß, als bei der ähnlichen Gleichstrommaschine, denn die größte EMK herrscht ja nur auf einer gewissen Strecke der Welle. Wie durch

Aufschneiden der geschlossenen Ringwicklung und angemessenes

Verbinden die Hintereinanderschaltung der Hälften unter Verdoppelung der EMK zu erzielen ist, zeigt Figur 51.

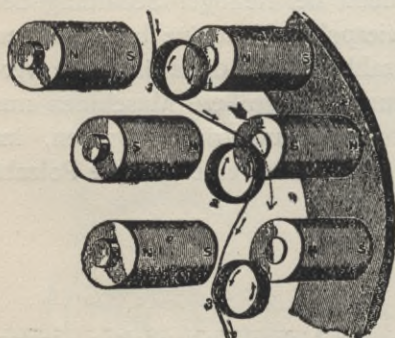
Die doppelte Wellenform (Fig. 50) entsteht bei jeder vollständigen Drehung des Ankers und heißt Periode, die also zwei Wechsel umfaßt. Während nun für die Verwendung des Gleichstromes gleichgiltig ist, ob er von einer schnell oder langsam laufenden Maschine stammt, übt die Zahl der sekundlichen Perioden des Wechselstromes einen bedeutenden Einfluß. Läßt man die Maschine (Fig. 49) schneller laufen, so steigt, wie bei der Gleichstrommaschine, ihre EMK, gleichzeitig aber auch die Periodenzahl, was je nach Umständen erwünscht sein kann oder nicht, wie sich später ergeben wird. Da nun in einem Wechselstromnetze alle Apparate für eine bestimmte Periodenzahl berechnet sind, so muß die einmal angenommene Zahl immer beibehalten werden, und der Gleichmäßigkeit wegen kenutzt man, wie für die Netzspannungen, auch für die Periodenzahl tunlichst übereinstimmende Werte. Bei uns gilt für den letzteren im Allgemeinen die Zahl 50. Um diesen Wert herzustellen müßte also die zweipolige Maschine 50 Umdrehungen in der Sekunde machen, oder 3000 Umdrehungen in der Minute. Eine solche Drehgeschwindigkeit ist für einen aus Eisen und Kupferwicklungen zusammengesetzten Körper niemals erwünscht, und deshalb liegt für Wechselstrommaschinen vermehrter Anlaß zu mehrpoligem Bau vor, denn bei richtiger Schaltung der Wicklungen erfordert schon eine vierpolige Maschine bei derselben Periodenzahl nur die halbe Drehzahl. Auch diese ist noch verhältnismäßig sehr groß und kommt für größere Maschinen nur in Frage, wenn sie durch Dampfturbinen angetrieben werden, im Allgemeinen ist sie viel niedriger, was immer eine größere Polzahl zur Folge hat.

*

In den beiden Beispielen, die wir bisher behandelten, treten ganz verschiedene Spannungskurven auf, und die Frage liegt nahe, welche Form als günstig angestrebt werden soll. Ein geforderter Mittelwert der Spannung kann mit spitzen und flachen, wie überhaupt mit beliebigen Kurvenformen erreicht werden. Im Allgemeinen ungünstig sind nun immer verhältnismäßig schroffe Uebergänge in den Kurven, wie sie schon in der Kurve Figur 50

aufzutreten, und große maximale Werte der Spannung, die neben zu schnellen Aenderungen bei spitzen Kurven unvermeidlich sind. Anzutreiben ist deshalb immer ein tunlichst sanfter Verlauf, wie ihn die Kurve Figur 25 zeigt. Eine solche Sinuskurve, so genannt, weil ihre Ordinaten den zunehmenden und abnehmenden Sinuswerten eines Winkels entsprechen, den ein um den Mittelpunkt eines Kreises sich drehender Radius mit seiner Anfangslage bildet, zeigt die EMK eines Leiters, der sich in einem genügend ausgedehnten homogenen magnetischen Felde senkrecht zu den Kraftlinien gleichförmig so bewegt, daß er einen Zylindermantel beschreibt. Da die Sinuskurve sich besonders für eine einfache mathematische Behandlung der Wechselstromprobleme eignet und gleichzeitig der oben ausgesprochenen Bedingung genügt — diese beiden Umstände sind in Wirklichkeit identisch — so wird sie bezw. die ihr entsprechende elementare Bewegung des Leiters meist zum Ausgangspunkte der genaueren Betrachtungen genommen. Für unsere Zwecke kann genügen, die Sinuskurve sozusagen als die Normalkurve des Wechselstromes zu bezeichnen.

Wie man nun Spannungskurven gewünschter Form erhalten kann, läßt sich allgemeiner erläutern zunächst an den schematischen Figuren 52 und 53, die gleichzeitig die Hintereinanderschaltung der induzierten Spulen bei mehrpoligen Maschinen zeigen. Man



Figur 52.

sieht (Fig. 52), wie das Magnetgestell aus zwei Hälften mit vorspringenden Polen besteht, in solcher Anordnung, daß zwischen den gegenüberstehenden Polen induzierende Felder abwechselnder Richtung sich bilden. Durch diese Felder werden die in gleichen Abständen von einem geeigneten (in den Figuren nicht gezeichneten) Gerüste getragenen Spulen bewegt und dabei in einem Sinne und

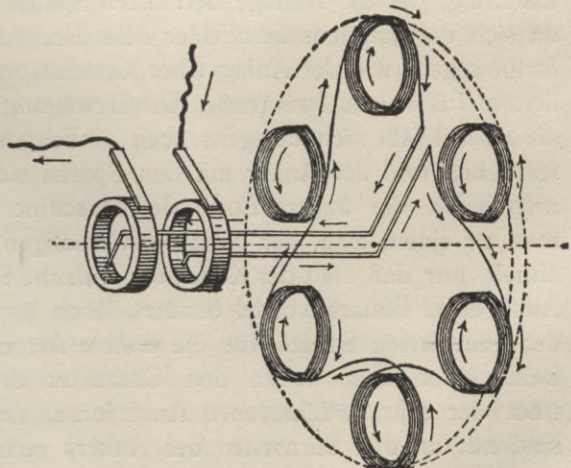
Grade induziert, die nach dem früher Mitgeteilten immer angegeben werden können. Denn macht man von der einfachsten Auffassung der Induktion Gebrauch, wonach die EMK in einem Leiterelemente abhängt von der Zahl der sekundlich geschnittenen Kraftlinien, so kann man, ausgehend von der durch die Polformen, den magne-

tischen Widerstand und die Erregung bestimmten Feldform, in jedem Augenblicke die EMK einer Windung berechnen, wobei nur zu beachten ist, daß die in den einzelnen Abschnitten einer Windung induzierten EMKe sich teilweise entgegenarbeiten, woraus die früher auf anderem Wege erkannte Tatsache folgt, daß die resultierende EMK einer Windung Null ist, wenn sie, bei den vorausgesetzten regelmäßigen Formen, gerade vor den Polen steht, oder auch, wenn sie sich in einem ganz homogenen Felde bewegt. Die Berechnung der durch Hintereinanderschaltung der einzelnen Windungen und der Spulen entstehenden Klemmenspannung der zunächst noch stromlos gedachten Maschine auf dem angegebenen Wege ist noch verhältnismäßig einfach, wenn alle Windungen von gleichem Durchmesser angenommen werden. Sie wird aber sehr verwickelt infolge der in Wirklichkeit immer verschiedenen weiten Windungen einer Spule, und man begreift dabei die ökonomische Notwendigkeit, solche Rechnungen durch einmalige allgemeine Behandlung tunlichst soweit zu erledigen, daß im praktischen Gebrauche die besonderen Fälle mit Hilfe einiger Koëffizienten berechnet werden können. Man erkennt aber auch, wie durch geeignete Formen der induzierenden Felder, der Spulen und der Verteilung der Windungen in den Spulen in weiten Grenzen die Form der Spannungskurven beliebig gestaltet werden kann.

In Figur 53 ist ein vollständiger Satz von induzierten Spulen in Hintereinanderschaltung und in Verbindung mit den stromabgebenden Schleifringen gezeichnet.

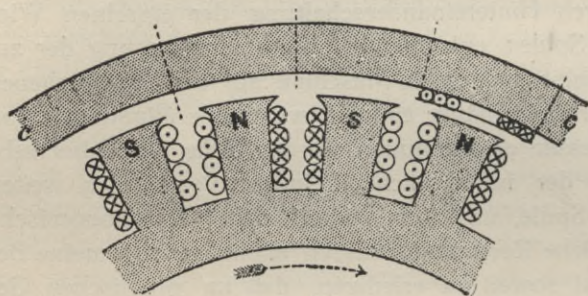
Solche sogen. Scheibenmaschinen wurden vielfach früher ausgeführt, mit kreisförmigen oder anders gestal-

teten Spulen, sie haben in elektrischer Hinsicht viele Vorteile, entsprechen aber nicht mehr den jetzigen Anforderungen in baulichem



Figur 53.

und ökonomischem Sinne. Die Spulen sind nicht leicht solide genug zu befestigen und verlangen einen großen Luftspalt, deshalb starke Erregung mit den bei der Gleichstrommaschine besprochenen Nachteilen. Zu den jetzt üblichen Maschinen, die beide schwerwiegende Uebelstände vermeiden, leitet die schematische Figur 54 über. Diese zeigt zunächst nicht die induzierten Spulen, sondern das Feldmagnetsystem beweglich. Bei dieser Anordnung braucht nur der die Feldpole erregende Gleichstrom von mäßiger Spannung durch Schleifringe zu-



Figur 54.

Rücksicht auf die gute Isolierung sehr erwünscht ist. Der ganze Bau ist ferner vereinfacht durch die Anwendung nur einer induzierenden Polreihe, die magnetischen Kreise zwischen den einzelnen Polen schließen sich durch den gegenüberstehenden Eisenring, der die Auflage der festen Spulen bildet, der nun aber, da sich die magnetischen Felder beim Drehen der Feldpole in ihm fortbewegen, wie der Anker einer Gleichstrommaschine aus lamelliertem Eisen bestehen muß. Die Bewegung der Feldpole gegen die Spulen läßt sich übrigens auch umkehren, die Feldpole können feststehen und der Anker mit den Spulen sich drehen, und wenn man auch die äußere Form der Maschine umkehrt, so gelangt man zu einem Bau, der ganz der vielpoligen Gleichstrommaschine ähnelt, nur daß statt des Kollektors einfache Schleifringe nötig sind. Auch diese Bauart ist viel benutzt, doch ist die sichere Lagerung der induzierten Spulen für die erstere Art entscheidend gewesen. Beide Arten aber haben den Charakter der Trommelmaschine, trotz der sehr verschiedenen Ankerform, denn die aktiven Leiter sind nur an den Stirnseiten des Ankers verbunden.

Von der Spulenform nach Figur 54 gilt ganz das bei der Scheibenmaschine Gesagte, durch angemessene Verteilung der Spulenwindungen und geeignete Form der Polköpfe kann jede

Schleifringe zugeführt zu werden, während die induzierten Wechselstromleiter feststehen, was bei der oft sehr großen Wechselstromspannung mit

Spannungskurve erzielt werden. Um nun auch den Luftspalt zu Gunsten einer leistungsfähigen Maschine zu verengen, bettet man, wie beim Gleichstromanker, die Spulen in das Eisen ein, man gibt diesem Nuten, gröbere zur Aufnahme einer ganzen Spulenseite, oder besser feinere zur Verteilung der Leiter, damit wieder eine zweckmäßige Spannungskurve erzielt wird. So genau und glatt wie bei der freiliegenden Spule kann die Kurve zwar nicht werden, denn der magnetische Widerstand zwischen den Polen einerseits, den Nuten und Zähnen andererseits ist nicht gleichmäßig, die Kurve wird in sich etwas wellig oder gezackt. Das kann gemildert werden durch teilweises oder gänzlichliches Schließen der Nuten den Polen gegenüber, was hier zulässiger ist als bei Gleichstromankern, da keine Stromwendung durch Umschalten der Spulen in Frage kommt. Bei mehr oder weniger geschlossenen Nuten ist aber das Einlegen fertiger Spulen schwierig oder unmöglich, die Herstellung wird verteuert, auch findet ein Teil des Kraftflusses leichter Gelegenheit, vor den Spulen nach den Nachbarpolen zu gehen, also wirkungslos zu werden. Die Spulenform schließt sich natürlich den immer geraden Nuten an, sie wird im Wesentlichen ein Rechteck mit gebogenen Stirnseiten. Eine solche Maschine, und zwar für eine besondere Art des Wechselstromes, den Drehstrom, zeigt Figur 55 (siehe Tafel IV), mit angebautem Gleichstromerreger.

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Verhältnisse gelten für die Wechselstrommaschine dieselben Grundsätze, wie für die Gleichstrommaschine: Möglichste Leistungsfähigkeit bei geringer Größe, niedrigem Preise und gutem Wirkungsgrade, daher große Kraftlinien- und Stromdichte bei tunlichst großer Geschwindigkeit ohne zu große Verluste.

*

Wenn oben mit solcher Sicherheit von Kurvenformen gesprochen wurde, die viele Male in einer Sekunde sich bilden und verschwinden, so kann mit einigem Recht gefragt werden, auf welche Weise man denn nachweisen kann, ob sich tatsächlich die Ueberlegung mit der Wirklichkeit deckt. Daß im Großen und Ganzen diese Uebereinstimmung herrschen muß, beweisen mittelbar die aus den Annahmen gezogenen Schlüsse. Allerdings aber ist mit der feineren Ausbildung der Wechselstromtechnik bald das

Bedürfnis aufgetreten, die wichtigen Kurvenformen wirklich darstellen zu können, um das Studium zu erleichtern und überhaupt solche Einzelheiten zu erkennen, die bei der Verwicklung der Vorgänge sich rechnerisch zu schwer verfolgen lassen. Die ersten Apparate zu diesem Zweck waren sehr unvollkommen, dagegen besitzen wir jetzt u. a. in dem Oszillographen ein wunderbar feinfühliges und ebenso bequemes Mittel, Strom und Spannungskurven objektiv darzustellen.

Verliefen die Kurven so langsam, daß man ihre Ordinatenwerte an den Ausschlägen eines Meßinstrumentes leicht verfolgen könnte, so läge die Herstellungsmöglichkeit der vollständigen Kurven auf der Hand. Man könnte den in seinen Einzelheiten zu verfolgenden Strom auf eine Magnethadel wirken lassen, wie bei einem gewöhnlichen Galvanometer. Die Nadel würde je nach der augenblicklichen Stromrichtung nach rechts oder links ausschlagen und mit einer Amplitude, die bei sonst geeigneter Form des Meßgerätes der jeweiligen Stromstärke proportional wäre. Auf diesem Prinzipie beruhen wirklich die Oszillographen, nur daß die Photographie herangezogen ist, um die ungemein schnell wechselnden Stellungen des beweglichen Systems festzuhalten. Die besonderen Schwierigkeiten lagen dabei u. a. in diesem selbst, da es so wenig Trägheit haben muß, daß es den Stromänderungen schnell genug folgen kann. Die Nadel eines größeren Taschenkompasses mag etwa 20 Doppelschwingungen in einer Minute machen, beim Oszillographen soll aber das schwingende System nicht nur mehrere tausend mal in derselben Zeit hin- und hergehen, sondern auch innerhalb einer Periode die kleineren Aenderungen der Kurve angeben. Die Nadel ist deshalb hier ersetzt durch eine von dem Strome durchflossene feine Drahtschleife, deren beide Zweige etwa 1 mm Abstand von einander haben und durch ein starkes konstantes magnetisches Feld gehen. Der durchgehende Strom erteilt dem einen Zweige eine kleine Durchbiegung nach der einen Seite, dem anderen nach der entgegengesetzten Richtung, und der Sinn der Verzerrung der Schleife wird von der Richtung des Stromes abhängen, das Maß der Verzerrung von der Stromstärke. Ein Spiegelchen, das an der Stelle der größten Ausbiegungen der Zweige befestigt ist, nimmt an ihren mikroskopischen Bewegungen Teil und wirft einen von einer starken Lichtquelle ausgehenden Strahl auf eine entferntere mit photographischem Papiere belegte

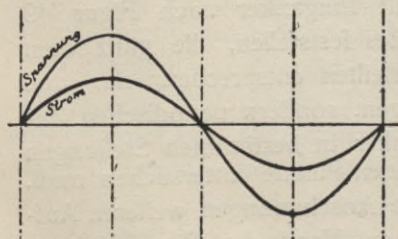
Trommel. Auf dieser schwingt der Strahl längs ihrer Achse hin und her und gibt die kleinen Schwingungen des Spiegels sehr stark vergrößert wieder. Dreht sich nun gleichzeitig die Trommel um ihre Achse, so beschreibt der Lichtstrahl einen Kurvenzug auf der Trommel, der bei geeigneter Anordnung des Oszillographen die Formen in der früher benutzten Darstellungsweise wiedergibt. Besondere Einrichtungen lassen auch die Kurve unmittelbar sichtbar werden, darauf beruhend, daß infolge der Trägheit unseres Schapparates beim Bewegen des Strahles nicht ein einzelner Punkt auf einer getroffenen Fläche sich zeigt, sondern die ganze schnell wechselnde Folge der Punkte. — Diese rohe Andeutung muß hier genügen. Der Oszillograph in seiner jetzigen sorgfältig durchgebildeten Form ist im Stande, den Verlauf der Kurven mit solcher Treue wiederzugeben, daß er mehr und mehr zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel der Elektrotechnik wird.

Hätte man nun mit dem Oszillographen die Spannungskurve bei offenem äußeren Stromkreise kontrolliert und in Uebereinstimmung mit den früheren Ueberlegungen gefunden, so würde man sofort eine Veränderung der Kurvenform bemerken, wenn der Generator Leistung abgibt, etwa eine Anzahl Glühlampen speist. Denn die Rückwirkung des Stromes macht sich bei der Wechselstrommaschine nicht nur im Ganzen durch eine Verminderung der Klemmenspannung bemerkbar, wie bei der Gleichstrommaschine, sondern auch in einem Einflusse auf die Größe und Folge der Kurven-Ordinaten. Die Rückwirkung im Ganzen erklärt sich zum Teil ähnlich wie bei der Gleichstrommaschine. Zunächst verursacht der Widerstand der Wicklung nach Maßgabe der Stromstärke einen gewissen Spannungsabfall, sodann kann man beispielweise bei der Maschine mit Ringanker nach Figur 49 Aenderungen des induzierenden Feldes feststellen, die ganz dem bei der Gleichstrommaschine Mitgeteilten entsprechen, nur daß man es nicht mit einem gleichmäßigen, sondern periodischen Zustande zu tun hat, deshalb den Anker in bestimmten Stellungen der an die Schleifringe angeschlossenen Punkte untersuchen muß. Bei Maschinen nach Figur 52 geben Anschauungen weiteren Aufschluß über die Rückwirkung, die an Hand der Figur 23 entwickelt wurden. Von besonderem Einflusse bei Wechselstrommaschinen ist ferner eine eigentümliche Erscheinung, die wir nachher unter dem Namen „Phasenverschiebung“ kennen lernen

werden. Die Ankerrückwirkung bei Wechselstrommaschinen ist deshalb viel schwieriger zu übersehen, wie bei der Gleichstrommaschine. Nicht daß bei dieser die genauere Bestimmung im Einzelnen leichter wäre, der Wechselstrom verlangt aber die gleichzeitige Berücksichtigung einer Anzahl periodisch wechselnder Einflüsse in ihrem Zusammenwirken. Daß sich nun der Charakter der Spannungskurve ebenfalls durch die Rückwirkung des Ankerstromes ändert, also nicht nur etwa durch gleichmäßige Verkleinerung der Ordinaten, folgt allein schon aus dem, was wir früher kurz Verzerrung des induzierenden Feldes genannt haben. Da die augenblickliche Induktion der Spulen von der Feldform abhängt, und da im Besonderen die jetzigen Maschinen mit Zähnen und geringem Luftspalte schon in stromlosem Zustande erhebliche Abweichungen von der glatten Kurvenform geben, so leuchtet ein, daß Feldänderungen infolge der Rückwirkung noch viel größeren Einfluß haben werden. Welche sonderbar verschobenen Formen aber auch der Oszillograph nachweisen mag, so gelten bei ihnen doch die allgemeinen Gesetze, die wir im Folgenden betrachten werden, bei deren Besprechung wir also immer an die einfachste Kurvenform (Figur 25) denken können.

*

Die Leistung eines Gleichstromes hatten wir als das Produkt aus Strom und Spannung kennen gelernt, es fragt sich nun, wie wir diesen Begriff auf den Wechselstrom übertragen können. Die Spannung ändert fortwährend ihre Stärke und in jeder Periode



Figur 56.

zweimal ihre Richtung, ebenso also auch der Strom im äußeren Schließungskreise, den wir uns zunächst immer als Speisestrom von Glühlampen, oder in einem Zickzackdrahte von genügendem Widerstande denken wollen. In jedem Augenblicke muß der Strom durch das Ohm'sche Gesetz gegeben sein als Quotient aus Spannung und

Widerstand. Kennt man also die Spannungskurve (Figur 56), so läßt sich auch die Stromkurve festlegen, indem man genügend

viele Ordinaten der ersteren durch den Widerstand dividiert und so eine dichte Reihe von Stromkurven-Punkten bestimmt. Die Maßstäbe der einzelnen Spannung- und Stromwerte können dabei beliebig angenommen werden, wenn man sie nur bei der weiteren Durchführung der zeichnerischen Darstellung folgerichtig festhält. Das Produkt aus zwei zusammengehörenden Ordinaten der Spannung und des Stromes würde der Leistung eines Gleichstromes entsprechen, der diese Werte dauernd beibehielte, und wenn man viele Einzelwerte der Leistung bei gleichen Abständen der Ordinaten auf der Grundlinie berechnete und aus ihnen das Mittel nähme, so hätte man die wirkliche Leistung des Wechselstromes erhalten. Unrichtig aber wäre, aus den Kurven für Spannung und Strom je den Mittelwert zu berechnen und beide mit einander zu multiplizieren. Denn die notwendige Voraussetzung für ein richtiges Ergebnis ist immer, daß jede Spannungordinate mit der *ihr zugehörenden* Stromordinate multipliziert wird, und den Unterschied dieser Berechnungsweise des Mittelwertes der Leistung, von der die Mittelwerte aus Strom und Spannung benutzenden lehrt schon das bloße Empfinden. Der Unterschied ergibt sich streng aus der mathematischen Behandlung, in jedem Einzelfalle zeigt er sich aber, sobald man diesen nach beiden Berechnungsweisen behandelt.

Diese Erwägungen stützten sich auf die Kenntnis der wirklichen Spannungskurve, wie man sie mit Hilfe des Oszillographen allerdings erhalten kann. Für gewöhnliche praktische Messungen ist aber weder ein so feines und teures Gerät, noch seine umständliche Benutzung zum Messen der Leistung geeignet, man will vielmehr wie beim Gleichstrom an einfachen Meßgeräten mit Skala die verlangten Werte ablesen, die dann gleich mittlere Werte sein sollen und auch nur sein können, da gröbere bewegliche Systeme, als beim Oszillographen verwendet werden, den schnellen Schwankungen ohnehin nicht folgen würden.

Erinnern wir uns nun der Spannung und Strommessung mit Hilfe von Zeigergeräten überhaupt. Die erstere wird erhalten durch die magnetische Wirkung einer Spule mit vielen Windungen eines ganz dünnen Drahtes, die also sehr großen Widerstand hat, sehr kleine Stromstärke führt, und deren Enden an die Klemmen des Generators oder überhaupt an zwei Punkte gelegt werden, deren Spannungsdifferenz zu messen ist. Die in solcher Spule entstehende Stromstärke ist ein geringfügiger und deshalb zu ver-

nachlässiger Teil des Generatorstromes, die genügende magnetische Wirkung der Spule folgt aus der großen Zahl der Windungen. Der Strom dagegen wird gemessen durch ein sonst ähnliches Gerät, aber mit einer Spule aus einer oder wenigen Windungen dicken Drahtes, deren Widerstand sehr klein ist, und die in den Verbrauchstromkreis geschaltet wird.

Wenn man nun diese beiden Spulen nicht jede für sich etwa auf eine Magnetnadel wirken läßt, wie zum Messen von Gleichstrom zugänglich war, sondern aufeinander, und dabei eine, am besten die Spannungspule, beweglich aufhängt, in solcher Stellung, daß, richtige Schaltung vorausgesetzt, wie bei den Ampère'schen Versuchen die beweglichen Stromwindungen sich gegen die festen verdrehen wollen (gekreuzte Spulenachsen), so übt jede Verbrauchstromwindung — um es kurz so zu bezeichnen — auf jede Spannungstromwindung eine gewisse Drehkraft aus, und wie bei zwei sich anziehenden Massen, elektrischen oder magnetischen Mengen, ist die gesamte Drehkraft dem Produkte aus beiden Strömen proportional, mit andern Worten dem Produkte aus Spannung und Verbrauchstrom. Wirkt dann etwa eine nachgiebige Feder der Stromkraft, die den Spulenachsen parallele Stellung zu geben sucht, entgegen, so läßt sich das Meßgerät so einrichten, daß statt eines der Leistung proportionalen Wertes diese selbst an der Skala abgelesen werden kann. Der Zeiger steht in bestimmtem Ausschlage still, nicht nur bei Gleichstrom, sondern auch bei Wechselstrom. Denn der Sinn des Ausschlages hängt nur von der Schaltung der Spulen gegeneinander ab, da sich der Strom in beiden Spulen übereinstimmend wendet, also immer dieselbe Richtung der Drehkraft ergibt, während die verhältnismäßig große Masse der beweglichen Spule nicht der schwankenden Stromstärke folgen kann, sondern eine mittlere Lage einnimmt und höchstens ganz kleine Erzitterungen zeigt. Ein solches Wattmeter mißt nun in der Tat das Mittel aus den jeweiligen Einzelwerten der Leistung, weil für alle Augenblickswerte die selbsttätige Multiplikation der jeweiligen Stromstärke mit der zugehörigen Spannung eintritt. Die Angabe ist also die wirkliche Leistung des Wechselstromes.

Nach diesem für das Wattmeter verwendeten Prinzipie des sogenannten Stromdynamometers (so genannt, weil herkömmlich die Ampère'schen Stromwirkungen oft kurz als dynamische bezeichnet werden) werden auch die Geräte zum Messen von Wechselstrom

und Spannung für sich eingerichtet. Zu dem Ende braucht man nur zwei Strom- oder zwei Spannungspulen statt je einer solchen, wie beim Wattmeter, und zwar in Hintereinanderschaltung anzuwenden. Dann erscheint die bewegliche Spule als Ersatz des nur bei Gleichstrom möglichen, weil auf die Stromrichtung reagierenden Magneten, woraus sich auch die gekreuzte Stellung der Spulen ergibt, nach der Regel der Aequivalenz von Kreisströmen mit Magnetstäben. Bei solchen dynamometrischen Ampèremetern und Voltmetern ist nun immer die Drehkraft dem Quadrate des durch beide Spulen gehenden gemeinschaftlichen Stromes proportional, wie unmittelbar aus der Erläuterung des Wattmeters folgt. Die Zeigerangaben bedeuten also mittlere Stromstärken — gleichgültig, ob die Verbrauchstromstärke, oder die zum Messen der Spannung dienende — die der wirklichen Leistung des Stromes entsprechen, weil ja die Stromleistung nicht nur als Produkt aus Stromstärke und Spannung, sondern auch aus dem Quadrate des Stromes und dem Widerstande angegeben werden kann. *Diese Mittelwerte* von Stromstärke und Spannung dürfen demnach multipliziert werden, um die Leistung des Generators zu erhalten.

Damit hätten wir zum Messen der Leistung zwei verschiedene Methoden, die unmittelbare unter Benutzung des Wattmeters und die mittelbare, auf Berechnung aus der gemessenen (nach Ueber-einkunft „effektiven“) Stromstärke und Spannung. Beide Methoden sollten nach den vorherigen Ueberlegungen dasselbe Ergebnis liefern, wenn Wattmeter, Ampèremeter und Voltmeter richtig ge-richt sind, und doch trifft das nur bedingungsweise, eigentlich aber überhaupt nie zu.

Diese Beobachtung ergab sich aus der Wechselstrompraxis in den 80er Jahren, als man dazu überging, nicht nur Lampennetze mit Wechselstrom zu speisen, sondern auch Wechselstrommotoren herzustellen. Denn damals trat als schlimmster und bis jetzt noch nicht überwundener Feind der elektrischen Beleuchtung das Auer'sche Gas-Glühlicht auf, und es hätte schlecht um die Elektro-technik gestanden, wenn nicht der Elektromotor mit seinen Vor-zügen gewesen wäre. Es ergaben sich immer die aus Spannung und Strom berechneten Wechselstromleistungen als viel größer, wie die vom Wattmeter angegebenen, und die aus der Messung der mechanischen Motorleistung gefolgerten. Als Grund dafür wurde erkannt die sogenannte Phasenverschiebung, welcher damals

in die Wechselstromtechnik eingeführte Begriff schon einige Zeit vorher durch rein theoretische, an gewisse optische Erscheinungen anknüpfende Erwägungen vorbereitet war.

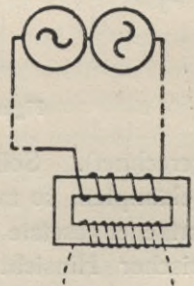
Wir hatten oben als Verbrauchkörper der Wechselstromleistung ausdrücklich Glühlampen oder im Zickzack geführte Widerstandsdrähte vorausgesetzt. Auch ganz gerade Stromleiter in freier Luft bilden, wie wir wissen, beim Stromdurchgange magnetische Felder um sich, die meist keinen wesentlichen Einfluß haben, durch spulenartige Anordnung der Leiter aber verstärkt werden, noch mehr durch nahe Eisenmassen. Hin und her, bifilar, geführte Leiter heben aber ihre magnetischen Felder, wegen der entgegengesetzten Ströme, teilweise auf, um so mehr, je näher die Zweige bei einander liegen. Auch Glühlampen mit ihrer einfachen Stromschleife geben nur ganz schwache Felder. Wenn aber beispielsweise eine Spule auf einem Ringe oder Rahmen aus lamelliertem Eisen mit gutem magnetischem Schlusse liegt, so sind die besten Bedingungen zur Ausbildung starker magnetischer Felder gegeben. Wir wissen nun weiter schon, daß beim Strombeginn in solcher Spule eine elektromotorische Gegenkraft auftritt, weil Leistung zum Aufspeichern einer gewissen Energiemenge verbraucht wird, daß dagegen diese Leistung wieder als Strom der ursprünglichen Richtung frei wird, wenn die angelegte Spannung nachläßt.

Diese Doppelperscheinung wiederholt sich bei Wechselstrom in jeder Periode zweimal, in wechselnder Folge der Strom- bzw. Feldrichtungen. Von der Energie, die diesem steten Wechsel im Verzögern und Unterhalten des Stromes gegen und mit der angelegten Spannung entspricht, tritt nichts nach außen, es wird im Ganzen keine Leistung der Stromquelle verbraucht, der Strom muß auch wie sonst wellenförmig verlaufen, aber seine Werte können nicht mehr der angelegten Spannung entsprechen, denn anders hätten die Begriffe Verzögern und Unterhalten keinen Sinn, der Strom wird nicht Null und erreicht nicht sein Maximum zur selben Zeit wie die angelegte Spannung, „der Strom eilt seiner Spannung nach“, wie man gewöhnlich kurz aber unrichtig sagt, sofern man auf „seiner“ Nachdruck legen wollte. Das ergibt sich genauer aus Folgendem.

Der feldfreie bifilare Draht, den wir uns früher als Leistungsverbraucher vorstellten, der einen gewissen Ohm'schen Widerstand und Kurvenbilder nach Figur 56 ergab, werde nun, nicht mehr

bifilar, zu einer Spule um einen eisernen Rahmen gewickelt, der immer lamelliert zu denken ist, um Verluste durch Wirbelströme auszuschließen. Dann zeigen sich folgende abweichende Erscheinungen, wobei unveränderte Spannung an den Generatorklemmen vorausgesetzt ist: Der Strom wird schwächer, und außerdem wird das Produkt aus effektiver Stromstärke und Spannung, die sogenannte scheinbare Leistung, größer als die Angabe des Wattmeters. Beides kann nun nicht mehr überraschen. Denn das Verzögern des Stromes bei zunehmender Spannung der Welle schließt schon seine unvollkommenere Ausbildung in der gegebenen Zeit ein, d. h. seine geringere mittlere Stärke, und gleichzeitig ist ein Teil der Leistung nicht effektiv, weil ein gewisser Energiebetrag bei jeder Stromwelle nur in dem Systeme wandert, ohne nach außen zu treten. Wäre beispielweise der Strom auf die halbe Stärke zurückgegangen, so würde seine wirkliche Leistung, die hier in Erwärmung des Schließungskreises auftritt, nur noch $\frac{1}{4}$ der früheren sein (Strom-Quadrat mal Widerstand), während infolge der unveränderten Klemmenspannung auf die halbe frühere Leistung (Spannung mal Strom) geschlossen werden könnte.

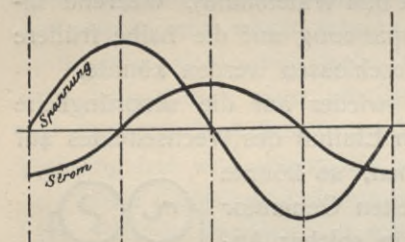
Wollte man aber den Strom wieder auf die ursprüngliche Stärke bringen und gleichzeitig den Einfluß des Wechselfeldes auf die Erscheinungen für sich erkennen, so könnte man in den Stromkreis einen zweiten Generator derselben Wechselzahl einschalten, in solcher Anordnung, daß er der EMK des Wechselfeldes immer entgegenarbeitet, sie also aufhebt. Nach Figur 53 müßte also zu dem ursprünglichen Generator links noch der Generator rechts in den Stromkreis um den Eisenrahmen geschaltet werden, und die erforderliche Lage seiner Spannungswellen erkennt man durch Betrachten der Stromwelle, die wieder hergestellt werden soll.



Figur 57.

Angenommen, der Strom verlaufe schon wieder so, wie nach Figur 56 bei einem feldfreien Verbrauchstromkreise, so wird er je nach seinem Augenblickswerte in dem Rahmen einen wechselnden Kraftfluß erzeugen, der sich für jeden dieser Werte aus dem magnetischen Widerstande des Rahmens und der Windungzahl an Hand der Magnetisierungskurven (Figur 32) berechnen läßt. Der Sinn der dadurch geweckten elektromotorischen Gegenkraft ist

davon abhängig, ob das Feld wächst oder fällt, ihre Größe ist proportional der augenblicklichen Aenderungsgeschwindigkeit des Feldes. Der Einfachheit wegen nehmen wir an, daß die Magnetisierung des Rahmens dem Strom proportional ist, wie annähernd zutrifft, wenn man im unteren Teile der Magnetisierungskurve arbeitet. Dann kann man die elektromotorische Gegenkraft unmittelbar auf die Aenderungen des Stromes selbst beziehen. Diese Aenderungen kann man schätzen, wenn man viele Ordinaten in gleichen Abständen auf der Grundlinie errichtet, und ihre Zunahme oder Abnahme vergleicht. Höhere Rechnungen geben bei bestimmter Kurvenform einfache Ausdrücke für die Aenderungsgeschwindigkeit in einem beliebigen Punkte der Kurve. Ohne das erkennt man aber sofort, daß die Aenderungsgeschwindigkeit des Stromes im Scheitel seiner Wellen gleich Null ist — denn zwei der dichten Ordinaten an dieser Stelle in symmetrischer Lage zur Scheitelordinate sind gleich —, und daß die Aenderungsgeschwindigkeit des Stromes am größten ist,



Figur 58.

wenn er durch Null geht. Also ist die elektromotorische Gegenkraft immer Null, wenn der Strom am größten ist, und umgekehrt. Sie ist also dargestellt durch Figur 54 und dem Strome, wie man sieht, um eine viertel Periode voraus (die durch die Grundlinie dargestellte Zeit von links nach rechts gerechnet). Soll also der zweite Generator diese Gegenkraft bekämpfen, so muß er immer im richtigen Augenblicke die gleiche entgegengesetzte EMK liefern, demnach muß sein Anker in elektrischer Hinsicht (bei zweipoligen Maschinen) senkrecht stehen zum Anker des ersten Generators. Dann aber wäre in der Tat der Stromzustand wie bei feldfreiem Verbrauchskreise wieder hergestellt: Die Leistung des ursprünglichen Generators in Form der Stromwärme im Schließungskreise erreicht wieder ihre frühere Höhe, die aus gemessener Spannung und Stromstärke berechnete Leistung ist gleich der Wattmeterangabe, der Einfluß des Wechselfeldes im Rahmen ist geschwunden, der Hilfgenerator hat aber gar keine Leistung, er läuft nur mit. Würde man genauer verfolgen, wobei sich auch noch andere Erkenntnisse ergäben, so fände man

bei jedem Wechsel für diesen Generator eine aufgewendete und wieder abgegebene Energiemenge, gerade wie bei dem Wechselfelde im Rahmen. — Bei diesen Darlegungen ist zu Gunsten der Einfachheit von Nebenverlusten in den Generatoren durch Stromwärme, Hysteresis u. s. w., wie auch von dem Hysteresisverluste in dem Rahmen abgesehen.

Die beiden Generatoren teilen somit ihre Aufgaben, der erste gibt die wirkliche Leistung, im vorliegenden Falle die Stromwärme in den Windungen, der zweite unterdrückt die elektromotorische Gegenwirkung des Wechselfeldes. Wäre nun der Widerstand aller Windungen so klein, daß er vernachlässigt werden könnte, so hätte der erste Generator nichts zu leisten, er könnte ganz fehlen, und nur der zweite würde das Hin- und Herwogen von Energie in dem Systeme aufrecht erhalten. Die beiden Generatoren stellen also die Grenzfälle dar, die sich beim Wechselstrombetriebe wenigstens annähernd verwirklichen können: Vollständig feldfreier Verbrauchkörper und Zusammenfallen der Phasen von Spannung und Strom mit entsprechender Leistung einerseits, widerstandloser Stromkreis mit Wechselfeldern ohne Leistung andererseits, wobei der Strom gegen die angelegte Spannung um $\frac{1}{4}$ Periode zurückbleibt. In Wirklichkeit tritt immer ein Zustand zwischen diesen Grenzfällen ein, mehr oder weniger großes Nachbleiben des Stromes, je nach der Stärke der Wechselfelder, und größere, aus gemessener Stromstärke und Spannung berechnete, als vom Wattmeter angezeigte Leistung. Unter Umständen, wie beim Speisen eines Glühlampennetzes, kann man die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung als unbedeutend vernachlässigen, in anderen Fällen erreicht sie fast $\frac{1}{4}$ Periode.

*

Der Kunstgriff, den wir oben auf rein physikalischem Wege durchführten, die Uebertragung der Aufgabe an zwei getrennte Generatoren, wird bei der mathematischen Behandlung des Problems durch Zerlegen des gemessenen Stromes ganz nach Art der Kräftezerlegung in der Mechanik vorgenommen, wobei also sowohl die Stärke wie die Richtung der Componenten zu berücksichtigen sind. Man spricht dann von einer Wattcomponente, die der wirklichen Leistung proportional ist, und einer wattlosen Componente oder dem Magnetisierungstrom. Diese formale Behandlung legt zunächst

immer die einfache Sinuskurve unter, man beachte aber, daß die vorigen Darstellungen für jede Kurvenart gelten. Der sogenannte Leitungsfaktor, d. h. der Bruch, mit dem die durch Ampère- und Voltmeter gemessene scheinbare Leistung zu multiplizieren ist, um die wirkliche Leistung zu erhalten, bedarf nun keiner besonderen Erklärung mehr.

Wenn in Wirklichkeit ein einziger Generator die Aufgabe der beiden gesonderten zugleich übernehmen muß, so ist die elektrische Stellung seines Ankers zu den Wellen des beabsichtigten Stromes ähnlich zu finden, wie die resultierende Kraft in der Mechanik aus zwei Seitenkräften. Man kann aber immer, wenn in einem Kreise mit Wechselfeldern ein Strom bestimmter Stärke erhalten werden soll, den Fall mit Hilfe der zwei Generatoren behandelt denken. Geht man aus von dem verlangten Strom, so sind dessen Wechselfelder mitgegeben. Aus diesen ist mit beliebigem Grade der Genauigkeit die Aenderungsgeschwindigkeit in jedem Augenblicke, deshalb die Gegenspannung auf die Wicklung zu finden, als Summe der in den einzelnen Windungen erzeugten, danach die ganze Kurve der Gegenspannungen und die Größe des Hilfgenerators, wie die elektrische Stellung seines Ankers, während der Generator für die wirkliche Leistung sich bestimmt, als wenn er nur in einem feldfreien Stromkreise arbeitete. Für die wirkliche Behandlung sind natürlich auch hier vereinfachende Formeln von größtem wirtschaftlichem Werte, vorausgesetzt, daß klare physikalische Vorstellungen vorher gewonnen wurden.

Es wird nach dem Gesagten nützlich sein, noch einmal auf den Ausdruck „der Strom eilt seiner Spannung nach“ zurückzukommen. Ein Strom ist immer das Ergebnis einer bestimmten Spannungsdifferenz an den Enden seines Leiters und nicht davon zu trennen. Wenn infolge der Feldwirkung ein Wechselstrom geringere Stärke zeigt, als sich aus der angelegten Spannung und dem Ohm'schen Widerstande berechnen würde, so bedeutet das nur, daß tatsächlich nicht die ganze angelegte Spannung zur Geltung kommen kann, sondern nur ein Rest, der nach Abzug der wechselnden Gegenspannung jeweilig verbleibt. Mit diesem Reste, mit „seiner“ Spannung, ist der Strom immer in Phase, und um Mißverständnissen vorzubeugen haben wir auch immer von „angelegter“ Spannung gesprochen. Ein Analogon aus der Mechanik wird das vielleicht noch deutlicher machen. Man beobachte in mehreren hundert

Metern Abstand jemand, der taktmäßig etwa auf ein Faß schlägt. Der Gesicht- und der Gehöreindruck fallen dann nicht zusammen, man wird von einer Phasenverschiebung beider sprechen können, von einem Nacheilen des Tones gegen den wirklichen Schlag. Dem Urheber der Erscheinung entsteht aber ein solcher Eindruck nicht, so wenig ein magnetisches Wesen in dem Wechselfelde das Bewußtsein haben würde, daß eigentlich ein stärkerer Strom in seinen erregenden Windungen entstehen sollte. Es kommt ganz auf den Standpunkt an, von dem aus man beobachtet.

*

Der oben besprochene Sonderfall, wo der Strom fast um $\frac{1}{4}$ Periode gegen die angelegte Spannung verschoben ist, tritt in der Praxis bei den einfachsten Geräten ein, von denen die Wechselstromtechnik umfassenden Gebrauch macht, bei den Transformatoren. Diese dienen dazu, die elektrische Leistung, die von dem Generator bei mäßiger Spannung geliefert wird, in dieselbe Leistung bei höherer Spannung umzuformen, oder umgekehrt, der hineingeschickten Leistung höherer Spannung eine niedrigere zu geben, wie sie für die Verbrauchkörper erwünscht ist. Für das Fortleiten der elektrischen Leistung auf längere Strecken ist, soweit nicht Isolationschwierigkeiten eine Grenze ziehen, immer eine möglichst hohe Spannung vorteilhaft, da der Verlust an Leistung durch die Erwärmung der Leiter mit dem Quadrate der Stromstärke wächst. Diese möglichst niedrig zu halten, der zu übertragenden Leistung also hohe Spannung zu geben, um mit geringen Querschnitten der Leiter auszukommen, ist eine notwendige ökonomische Forderung. Die analogen Verhältnisse bei Röhrenleitungen für Flüssigkeiten liegen so nahe, daß nur daran erinnert zu werden braucht. In den Verteilungnetzen sind dagegen zum Anschluß von Lampen und Motoren niedrigere Spannungen teils erforderlich, teils erwünscht, wie beim Gleichstrom. Diesen Anforderungen entspricht in sehr vollkommener Weise der Transformator.

Die Umwandlung der gegebenen Spannung in eine andere ist schon von Faraday als besonderer Fall der Induktionerscheinungen behandelt und war seit langem mit Hilfe der kleineren oder größeren Induktorien für physikalische und physiologische Zwecke in Gebrauch. In die Technik wurden solche Umwandler, in freilich

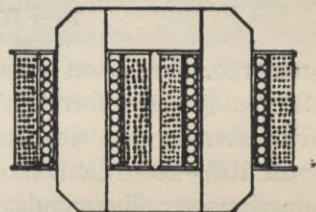
wesentlich anderer Gestalt und von ungeahnt großen Abmessungen, zuerst von Gaulard und Gibbs in den 80er Jahren eingeführt. Die Figur 57 gibt gleichzeitig das Grundschema eines Transformators.

Denkt man sich nämlich eine zweite (in der Figur punktierte) Wicklung auf den Eisenrahmen gelegt, so werden in ihr periodische EMKe geweckt, wie in der ersten Wicklung, nur sind ihre Richtungen entgegengesetzt. Denn der angelegten Spannung, die den Strom in der ersten Wicklung herstellt, wirken die Wechselfelder entgegen, in der sekundären Wicklung erzeugen sie einen Strom. Die Größe der induzierten Spannung an den Klemmen der sekundären Wicklung hängt von ihrer Windungszahl ab, wie nicht näher ausgeführt zu werden braucht, und da auf beide Wicklungen dieselben Wechselfelder wirken, so ist das Verhältnis der primären zur sekundären Spannung, das Uebersetzungsverhältnis des Transformators, gleich dem Verhältnisse der entsprechenden Windungen. Solange nun der sekundäre Stromkreis offen ist, übt seine Wicklung keinen Einfluß, das Verhalten des Transformators ist ganz nach dem schon Mitgeteilten zu beurteilen. Da aber die Wicklungen des Transformators, wie die eines Generators, möglichst wenig Leistung verbrauchen sollen, also verhältnismäßig sehr geringen Widerstand erhalten, so muß auf die Erzeugung eines wirkamen magnetischen Kraftflusses bei geringem Erregerstrom Bedacht genommen werden. Es kommen daher immer verhältnismäßig große Eisenquerschnitte und zahlreiche Windungen zur Anwendung. Unter diesen Umständen tritt eine Phasenverschiebung zwischen angelegter Spannung und primärem Strome von nahezu $\frac{1}{4}$ Periode ein. Wenn aber auch die sekundäre Wicklung über einen Verbrauchkörper oder eine Gruppe solcher geschlossen wird, so wirken ihre Stromwindungen *schwächend* auf den magnetischen Kraftfluß, wie sich aus den Richtungen der sekundären Spannung sofort ergibt. Die Gegenspannung auf die primäre Wicklung wird dadurch kleiner, die angelegte Spannung kann einen stärkeren Strom erzeugen, der den Magnetismus auf der früheren Höhe hält, es tritt eine Selbstregelung des Transformators ein, in dem Sinne, daß bei stärkerer Entnahme von Leistung aus der sekundären Wicklung auch die Stromstärke in der primären Wicklung steigt, und gleichzeitig seine Phasenverschiebung gegen die angelegte Spannung sich vermindert. Das ist nach Früherem klar, da die

Phasenverschiebung von der Gegenspannung abhängt, die nunmehr im Verhältnisse zum Strom geschwächt ist, und das muß auch so sein, weil die sekundäre Leistung nur aus der primären stammen kann, diese also in der erforderlichen Größe vorhanden sein muß.

Durch den verhältnismäßig geringen, aber bei steigender Stromstärke immer größeren Spannungsabfall verursachenden Ohm'schen Widerstand, durch Hysteresis und Wirbelströme werden die Phasenverhältnisse des Transformators ziemlich verwickelt, hier kann der Hinweis auf die Selbstregelung und die allgemeinen Baubedingungen genügen, die für den Transformator, wie für den Generator gelten. Die nötigen Querschnitte der Windungen erfordern einen bestimmten Raum, des Querschnitt des Eisenkörpers ist maßgebend für die Windungszahlen, die Verluste im Eisen und im Kupfer müssen zu einem Optimum ausgeglichen sein, die Abkühlungsflächen müssen genügende Größe haben, ein Transformator gewisser Größe kann zweckmäßig nur bis zu einer gewissen Leistung benutzt werden.

In Figur 59 ist ein Transformator üblicher Bauart skizziert. Der Eisenkörper ist aus Blechstücken zusammengesetzt, die Wicklungen sind auf die zwei Schenkel gleichmäßig verteilt, also nicht, wie in Figur 53 angenommen war, als primäre auf dem einen, als sekundäre auf dem anderen Schenkel



Figur 59.

angeordnet. Wichtig für das Verhalten des Transformators ist nämlich, daß beide Wicklungen immer denselben Kraftfluß umfassen, der im anderen Falle infolge der mit der Belastung zunehmenden Streuung zu verschieden sein würde. In dieser Hinsicht würde ein ringförmiger Eisenkörper, der gleichmäßig mit den beiden Wicklungen belegt ist, am günstigsten sein, und die ersten technischen Transformatoren waren auch in der Weise ausgeführt. Doch hat diese Bauart die Nachteile des Grammeringes und ist deshalb verlassen.

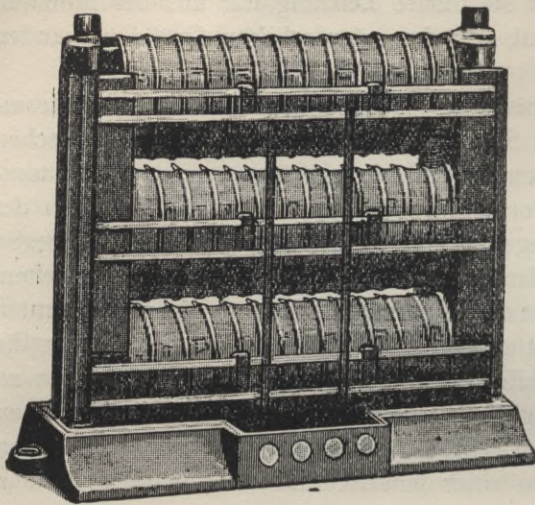
Bei der einfachen Grundform des Transformators, und da sämtliche Teile ruhen, kann man die Isolierung der Windungen so vollkommen durchführen, wie bei keiner anderen elektrischen Maschine, und man kann deshalb mit dem Transformator elektrische Leistung unter Spannungen herstellen, die auch bei den Wechselstrom-Generatoren mit feststehenden Ankern nicht möglich wären.

Wesentlich bei der Isolierung ist immer, zwischen den einzelnen Windungen geringe Spannungen auftreten zu lassen. Ein Mittel

dazu ist die weitgehende Unterteilung der Hochspannungswicklung in niedrige Spulen, in deren einzelnen die Spannungsdifferenzen gering genug bleiben, und die, gegenseitig reichlich isoliert, hinter einander geschaltet werden. Einen solchen größeren Transformator und zwar für Drehstrom, zeigt Figur 60.

Mit Hilfe der jetzt zu hoher Vollendung gebrachten Transformatoren,

die einen sehr guten Wirkungsgrad haben (kleinere bis 95 %, größere über 98 %) ist das Problem der wirtschaftlichen Fernübertragung elektrischer Leistung so gefördert, daß Strecken von 100—200 Kilometer mit Freileitungen von etwa 8 mm Drahtdurchmesser überwunden werden können, bei Verlusten, die 10 % im Allgemeinen nicht übersteigen. Das erste Beispiel boten die berühmten Versuche zwischen Frankfurt a. M. und Laufen im Jahre 1892. Diesem Versuche folgten größere Ausführungen mit 10000 Volt Betriebsspannung, die immer weiter gesteigert werden konnte, nachdem auch die Einzelheiten der Leitungsführung sorgfältig durchgebildet waren, sodaß jetzt Anlagen mit 40000 Volt nichts Ungewöhnliches mehr sind, und Betriebsspannungen von 100000 Volt über Strecken von mehreren hundert Kilometern schon ernsthaft behandelt werden. Die Möglichkeit gefahrloser und sicherer Erzeugung so hochgespannter Leistung und ebensolcher Verwendung bietet nur der Transformator.



Figur 60.

*

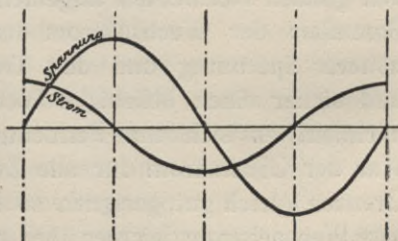
Eines interessanten Apparates der Wechselstromtechnik möge nun noch Erwähnung geschehen, des Kondensators, interessant

zunächst deshalb, weil er ein gegensätzliches Verhalten zum Transformator zeigt und wie dieser ein Energiespeicher ist. In der Starkstromtechnik spielt er freilich keine erhebliche Rolle, weil es noch nicht gelungen ist, ihn in größerem Maßstabe billig genug bei sicherer Wirkung herzustellen.

Der einfachsten Formen des Kondensators haben wir schon früher gedacht in der Franklin'schen Tafel und der Kleist'schen Flasche. Er besteht in zwei großen leitenden Flächen, die durch eine dünne Isolierschicht getrennt sind und mit entgegengesetzten Elektrizitäten geladen werden. Die Elektrizitäten wirken aufeinander anziehend, ohne sich durch die Isolierschicht ausgleichen zu können, es wird eine gewisse Energiemenge in elektrischer Form angesammelt, die bei Verbindung durch einen Leiter als elektrischer Strom wieder frei wird.

Schaltet man einen solchen Kondensator an die Pole eines Wechselstromgenerators bzw. in dessen Schließungskreis, so laden sich die Belegungen des Kondensators, so lange die Spannung der Wellen steigt, die angesammelte Elektrizität wird aber zurückgegeben, wenn die Spannung wieder abzunehmen beginnt. In jeder Periode findet deshalb ein zweimaliges Laden und Entladen des Kondensators statt in entgegengesetzter Richtung, ohne daß Energie nach außen tritt. In dieser Hinsicht ähnelt der Kondensator also ganz dem magnetischen Wechselfelde, und wie dieses die größte Gegenspannung ergibt, wenn es mit seinem erzeugenden Strome durch Null geht, weil in diesem Augenblicke seine

Aenderung-Geschwindigkeit am größten ist, so hat der Kondensator seine größte Spannung erreicht, wenn der Ladestrom Null geworden ist. Während aber der Magnetisierungstrom der angelegten Spannung um $\frac{1}{4}$ Periode nacheilt (Fig. 58), geht der Ladestrom des Kondensators um ebensoviel



Figur 61.

vor (Fig. 61), weil die Entladung nach Erreichen des höchsten Wertes der angelegten Spannung beginnt.

Die Energiemenge, die bei bestimmter Spannung der Kondensator aufnehmen kann, ist von seinem Fassungsvermögen (Kapazität) abhängig, und diese wird durch die Vergrößerung der Belegungen

und durch Verminderung der trennenden Schicht gesteigert. Ist die Kapazität groß genug, so kann der Kondensator wegen seiner gegensätzlichen Wirkung die Phasenverschiebung infolge eines Wechselfeldes entsprechender Größe aufheben. Von dieser Eigenschaft des Kondensators würde in vielen Fällen Gebrauch gemacht werden, wenn sich eben seiner Herstellung nicht zu große Schwierigkeiten entgegen stellten. Diese folgen aus den sehr großen Abmessungen der Belegungen bei möglichst geringer Dicke der Isolierschicht, um die Kapazität genügend zu steigern. Durch Zerlegen des schon bei geringeren Kapazitäten viele Quadratmeter großen Kondensators in kleinere, schichtweise angeordnete, oder durch Zusammenrollen eines breiten Kondensatorbandes ergeben sich immer so erhebliche Abmessungen des Paketes, daß seine Herstellungskosten bei Vermeiden aller ungünstigen Einflüsse (Feuchtigkeit, ungleichmäßiger Abstand der Schichten von einander u. s. w.) bis jetzt noch in keinem wirtschaftlichen Verhältnisse zu dem technischen Werte stehen.

Bemerkenswert ist übrigens, daß die Wirkung des Hilfsgenerators in Figur 57 als eine kondensatorartige aufgefaßt werden kann.

*

Viele Jahre lang haben sich Gleichstrom und Wechselstrom heftig befehdet. Der Gleichstrom konnte für sich anführen den allmählich in allen Einzelheiten erprobten, zwar schwerfälligen, aber doch den ganzen Netzbetrieb ungemein erleichternden, elektrolytischen Sammler; der Wechselstrom hatte die leichtere Erzeugung bei höherer Spannung und den Transformator voraus, der einfach und sicher einen beliebigen Wechsel der Spannungen erlaubt, je nachdem es sich um Fernleitung oder um Verteilung handelt. War der Gleichstrom für alle Zwecke innerhalb engerer örtlicher Grenzen gleich gut geeignet, so konnte der beschränkter verwendbare Wechselstrom leichter über größere Strecken an die Verbrauchsstellen geführt werden. Hinsichtlich dieser selbst konnte man kurz sagen, was auch heute noch gilt: Der Gleichstrom ist schwieriger herzustellen, aber leichter zu verwenden, als der Wechselstrom. Ein allgemeiner Streit um den Vorrang der einen oder anderen Stromart wird heute nicht mehr geführt. Man weiß die eigentümlichen Vorzüge beider zu würdigen und macht von ihnen

Gebrauch je nach dem besonderen Falle. Weitaus die meisten Zentralen, um das hier zu erwähnen, verwenden Gleichstrom, während Uebertragung auf größere Strecken selbstverständlich eine Domäne des Wechselstromes ist. Hochspannungsanlagen für Gleichstrom, die von Thury in Genf praktisch durchgeführt sind, haben bis jetzt als Ausnahmen zu gelten. Ueber die Zukunft dieses Systemes läßt sich noch nichts sagen.

Schwierig wurde die Lage für den Wechselstrom, als es nicht gelang, einen befriedigenden Wechselstrommotor herzustellen. Der Wechselstromgenerator ist nur in beschränktem Sinne umkehrbar, aus Gründen, die man vielleicht am einfachsten an dem Motor von Froment (Figur 12) erkennt, besonders wenn man annimmt, daß seine Stromimpulse nicht durch die Selbststeuerung eingeleitet werden, sondern durch eine irgendwie hergestellte selbständige, gleichmäßige Bewegung der Steuerscheibe. Befinden sich beim Stillstande vor den Polen des oder der wirksamen Elektromagnete Ankerstücke gerade in der Mittelstellung, so ist die wechselnde Erregung der Elektromagnete nicht im Stande, den Drehteil in Gang zu setzen, denn die magnetischen Zugkräfte gehen immer durch die Drehachse, geben also keine Drehkraft. Auch wenn die Ankerstücke etwas seitlich von den Polen stehen, wird ein einmaliger Impuls durch die erregten Elektromagnete im Allgemeinen nicht im Stande sein, dem Drehteile genügenden Schwung zu geben, um die folgende stromlose Halbperiode zu überwinden. Man wird also den Motor erst von Hand in Gang setzen müssen. Dann wird er so schnell laufen, wie die unabhängig getriebene Steuerscheibe vorschreibt, vorausgesetzt, daß sein mechanischer Widerstand nicht zu groß wird, denn sonst wird er stehen bleiben und erst wieder durch einen äußeren Eingriff in Gang gesetzt werden müssen. Die Ankerstücke bleiben je nach der Belastung des Motors etwas hinter den Stromimpulsen zurück, bis das Zurückbleiben so groß wird, daß der Elektromagnet sie nicht mehr im Sinne der Drehung anzuziehen vermag. Daran wird nichts Wesentliches geändert, wenn man sich die Ankerstücke polarisiert denkt, den Drehteil also selbst zu einem System dauernd erregter Elektromagnete macht, und die feststehenden Elektromagnete mit Wechselstrom speist, so daß statt der absetzenden Stromimpulse einer Richtung ein periodisches Umpolarisieren eintritt. Dann folgt vor jedem Wechselstrompole dem Anziehen eines der polarisierten

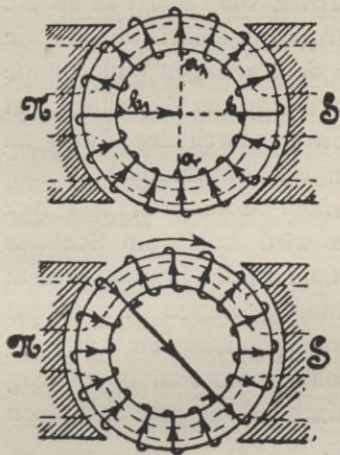
Ankerstücke ein Abstoßen, damit gegen früher ein doppelter Antrieb im Drehsinne, im Uebrigen aber bleiben die störenden Eigenschaften des so veränderten Motors dieselben, er kommt nicht von selbst in Gang und bleibt bei Ueberlastung stehen. Die Umkehrung *dieser* Motorform bildet ersichtlich das Schema des Wechselstrom-Generators, das wir früher betrachtet haben, und es ist lehrreich, die Erscheinungen in diesem Zusammenhange durchzudenken. Die Geschwindigkeit des Motors ist immer durch die Periodenzahl in der Sekunde, die Frequenz, gegeben, jedes Ankerstück passiert in einer Periode des Wechselstromes zwei wirksame Wechselepoles, der Motor läuft synchron. Diese Eigenschaft kann in besonderen Fällen erwünscht sein, im Allgemeinen aber ist ein solcher Motor, außer infolge der schon erwähnten Untugenden, dem Gleichstrommotor unterlegen, dessen besonderer Vorzug gerade die große Regelbarkeit seiner Drehzahl ist.

Eine schwere Unzuträglichkeit bildet endlich beim synchronen Wechselstrommotor die Notwendigkeit, das rotierende Magnetsystem durch Gleichstrom zu erregen.

Die unbefriedigenden Ergebnisse auf dem eingeschlagenen Wege führten dazu, den Gleichstrommotor mit Wechselstrom zu betreiben, um so die Vorzüge beider Stromarten tunlichst zu vereinigen. In Frage kam dabei zunächst allerdings nur der Serienmotor, denn das äußere Feld muß in Phase mit dem Ankerstrom sein, damit beide immer zur selben Zeit ihre größten Werte erreichen und so das größte Drehmoment erzeugen. Bei Nebenschlußerregung wird dagegen das vom Ankerstrom unabhängige äußere Feld infolge der Phasenverschiebung nicht mit jenem günstig zusammenfallen. Daß im Uebrigen der Gleichstrommotor auch mit Wechselstrom betriebsfähig ist, leuchtet ein, wenn man bedenkt, daß der periodische Richtungswechsel für das Feld *und* den Ankerstrom eintritt, das Drehmoment also immer dieselbe Richtung hat. Nur muß, aus früher erörterten Gründen, auch das Magnetgestell aus lamelliertem Eisen bestehen, um Wirbelströme auszuschließen, die bei einem massiven Gestelle sich in ganz unzulässiger Stärke entwickeln würden. In den allgemeinen Eigenschaften unterscheidet sich dieser Wechselstrommotor sonst nicht von dem Gleichstrommotor gleicher Schaltung, wenn auch der Wirkungsgrad etwas geringer ist, weil die Verluste durch das periodische Ummagnetisieren aller aktiven Eisenmassen hinzukommen.

Eine andere Form des Wechselstrom-Kollektormotors kam damals noch in Vorschlag in dem sogenannten Repulsionmotor.

Wenn man einen Ringanker (Figur 62 oben), der hier wieder der leichteren Uebersicht wegen angenommen wird, wiewohl sich das Folgende ebenso auf den Trommelanker bezieht, vermittelt der beiden Feldpole, die von Wechselstrom erregt werden, periodisch magnetisiert, so werden die Windungen nach Maßgabe des von ihnen jeweilig umfaßten Kraftflusses induziert. Nimmt man die augenblickliche Polarität der Peldpole wie in der Figur angegeben und in der Stärke zunehmend an, so sind die Richtungen der EMKe in den Windungen nach bekannter Regel zu bestimmen



Figur 62.

(in Richtung der Kraftlinien gesehen wird bei zunehmendem Kraftflusse die umschließende Windung entgegen dem Uhrzeigersinne induziert). Man sieht, wie die Richtungen der EMKe von den Polmitten aus wechseln, die EMKe in den beiden Ringhälften sind gleich und entgegengesetzt, heben sich also auf, es kann sich kein Strom ausbilden. Daran wird nichts geändert, wenn man zwei gleich weit von den Polmitten befindliche Punkte a a_1 der beiden Wicklungshälften verbindet, denn diese Punkte haben denselben Spannungszustand. Anders, wenn die Punkte b b_1 verbunden werden, dann fließt, wie aus den Pfeilen an den Windungen zu erkennen, ein Ausgleichstrom hin und her, in dem angenommenen Augenblicke von links nach rechts, und zwar, wenn die Verbindungsleitung nicht erheblichen Widerstand hat, ein recht starker Strom, da die Wicklung selbst immer nur geringen Widerstand haben darf. Ein Drehmoment des Ankers kann aber trotzdem nicht entstehen, weil unter jedem Pole gleich viel Leiter in verschiedenem Sinne Antrieb erhalten. Verbindet man aber (Figur 62 unten) zwei gegenüberliegende Windungen in einer Stellung zwischen den beiden betrachteten, so heben sich die EMKe nur teilweise auf, wie aus Vergleich der Figuren erkenntlich, es bildet sich ein Ausgleichstrom durch die Verbindung, und da nunmehr unter jedem Pole ganz oder überwiegend Ströme derselben Richtung fließen,

so entsteht ein Drehmoment. Dieser Zustand wird dauernd aufrecht erhalten, da die Verbindung nicht fest ist, sondern durch Schleifbürsten hergestellt. Der Motor verhält sich also nahezu so, als ob auch dem Anker von außen Strom zugeführt würde, wie beim Serienmotor, um so mehr, als bei dem geringen Widerstande nur ein mäßiges Verschieben der Bürsten aus der Mittellage $a a_1$ erforderlich ist, um genügend starken Strom durch den Anker zu ergeben, dieser erhält also seinen Strom transformatorisch.

Auf weitere Einzelheiten dieser beiden Motorarten soll hier nicht eingegangen werden, die erstere wird noch am Schlusse näher betrachtet. Der störendste Uebelstand beider bestand in dem starken Bürstenfeuer, zu weiterer Ausbildung gelangten sie zunächst nicht, da inzwischen [der Mehrphasenmotor entstanden war, der mit einem Schlage die Wechselstrom-Kollektormotoren überflüssig zu machen schien und in seiner Einfachheit längere Zeit auch dem Gleichstrommotor gefährlich wurde.

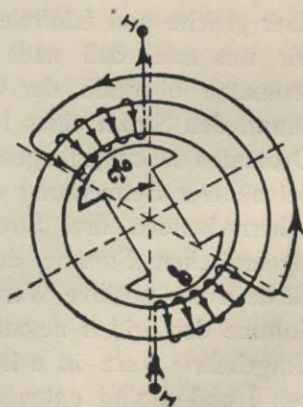
*

Wenn man sich in dem Froment'schen Motor (Fig. 12) mehrere Sätze von Elektromagneten, deren Polabstände nicht mit den regelmäßigen Abständen der Ankerbarren übereinstimmen, und die Erregung der verschiedenen Elektromagnete zeitlich auf einander folgend denkt, so würde das wirksame magnetische Feld gewissermaßen wandern und den Drehteil annähernd so beeinflussen, als wenn ein einzelner Elektromagnet mit einer gewissen Geschwindigkeit tangential unter Mitnahme der Ankerbarren verschoben würde. Man könnte in dieser Weise zu einem vollständigen Systeme gelangen, in dem keine Totlage des Drehteiles eintreten würde. Von dem synchronen Wechselstrommotor ausgehend führte 1880 Marcel Deprez ein Motormodell aus, das aus zwei mit den Achsen gekuppelten magnetelektrischen Maschinen ähnlich der nach Fig. 24 bestand, denen aus einer gemeinsamen Stromquelle durch Umschalter abwechselnd Strom zugeführt wurde. Die beiden Anker waren aber um 90° gegeneinander versetzt, sodaß sich der eine in der Mittelstellung befand, während der andere vor den Polen der Feldmagnete stand. Der erstere erhielt also beim Erregen ein Drehmoment in bestimmtem Sinne und half dem zweiten über den Totpunkt hinweg, in den Zwischenlagen wirkten beide Anker

drehend. Vollkommener und in grösserem Maßstabe baute danach Tesla in Amerika auf demselben Grundprinzip beruhende Motoren, vollkommener deshalb, weil er die Umschalter fortfallen und zwei unabhängige Wechselströme wirken ließ, die um eine Viertelperiode versetzt waren, und weil er diese Wechselströme in einer einzigen Maschine erzeugte und ebenso die beiden gekuppelten Motoren zu einem vereinigte. Grundsätzlich konnte man das Generatorsystem also darstellen durch zwei magnetelektrische Maschinen mit je zwei mechanisch verbundenen, um 90° versetzten, aber elektrisch selbständigen Ankern.

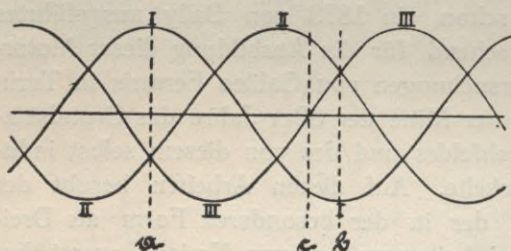
Bei diesen und anderen Ausführungen schwebte immer die Verbesserung des synchronen Wechselstrommotors vor, bei seinen weiteren Arbeiten gelangte aber Tesla zu Motorformen, die sich mehr dem jetzt als asynchronen oder Induktionmotor bezeichneten näherten, dessen Keim schon ein 1879 von Baily ausgeführtes Modell enthielt. Bahnbrechend für die Ausbildung dieser Motor-gattung waren die Untersuchungen von Galileo Ferraris in Turin (gestorben 1897), der in der Mitte der 80er Jahre das Grundsätzliche des sogenannten Drehfeldes und des von diesem selbst induzierten Drehteiles entwickelte. Auf diesen Arbeiten beruht der heutige Drehstrommotor, der in der besonderen Form als Drei-phasenmotor mit nur drei Leitungen weiteren Kreisen zuerst bekannt wurde, als der berühmte Versuch zwischen Lauffen und Frankfurt a. M. (175 km) im Jahre 1891 die Uebertragung auf große Entfernungen mittels Hochspannung einleitete.

Bei den oben erwähnten Mehrphasensystemen kamen zwei unabhängige Wechselströme zur Anwendung, die also vier Leitungen zwischen Generator und Motor erforderten. Es liegt nahe, eine noch größere Gleichmäßigkeit des Drehmomentes des Motors zu erreichen durch drei gleiche Wechselströme, deren Phasen um je eine Drittel Periode gegen einander verschoben sind, die auch nach dem Vorgange des Zweiphasenstromes in einem einzigen Generator erzeugt werden können. Legt man, den jetzigen Ausführungen entsprechend, die induzierten Wicklungen als Ring- oder



Figur 63.

Trommelwicklung auf einen feststehenden Ringteil (Figur 63), in dem sich der Feldmagnet dreht, und benutzt man, der symmetrischen Stromverteilung wegen, die Anordnung in je zwei Hälften zerlegter, um einen Polabstand verschobener Spulen, wie in Figur 51, so hat man bei einer zweipoligen Maschine den Ring in sechs gleiche Sektoren zu teilen, und auf die in Figur 63 gezeichnete einzige Phasenwicklung I—I würde Alles zutreffen, was für die gewöhnliche Wechselstrommaschine galt. Der Einfachheit wegen nehmen wir auch an, daß durch angemessene Form des induzierenden Kraftflusses und der Spulenwindungen die Spannungskurven reine Sinuslinien werden (Figur 25). Ergänzt man dann die Wicklung des Ringes für die beiden andren Wechselströme, so erhält man ein System von drei selbständigen Wechselstromkreisen mit gleichen Spannungskurven, die aber zeitlich um eine Drittelperiode gegen



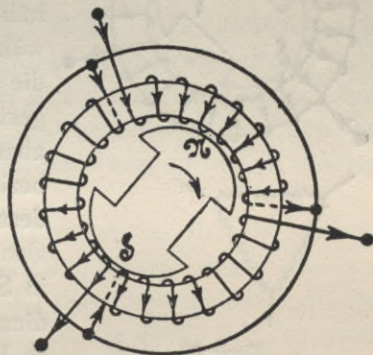
Figur 64.

einander verschoben sind. Auf derselben Grundlinie in richtigen gegenseitigen Lagen gezeichnet (Figur 64) geben die Kurven die Augenblickswerte für die drei einzelnen Wicklungen, wie das Ver-

hältnis der drei Spannungen zu einander in jedem Augenblicke, oder auch das Verhältnis der Ströme, wenn die drei Stromkreise über gleiche und feldfreie Widerstände geschlossen sind. Erinnern wir uns nun, daß nach der gewählten Darstellung die Kurvenordinaten oberhalb der Grundlinie, gewöhnlich die positiven genannt, den Strom eines Kreises in der einen Richtung, die unteren Ordinaten die entgegengesetzte Richtung bedeuteten, so erkennt man bei näherer Betrachtung der in einem beliebigen Augenblicke z. B. a herrschenden drei Stromwerte, daß der eine immer gleich der algebraischen Summe der beiden andern ist. So ist im Augenblicke a der positive Wert von Kurve I entgegengesetzt gleich der Summe der beiden negativen Werte von II und III, in b findet das Umgekehrte statt, in c ist der Wert von III gleich Null, die Werte von I und II sind entgegengesetzt gleich u. s. w. Dasselbe folgt auch aus anderen graphischen Darstellungen, aus der algebraischen Berechnung an Hand allgemeiner Formeln und aus der unmittel-

baren Berechnung nach der wirklichen Maschine, so umständlich diese Berechnung auch sein mag. Damit ergibt sich aber: Anstelle der zweiten Leitung jedes Stromkreises können immer zwei Leitungen der beiden andern Stromkreise eintreten, und da das gleichmäßig für alle drei Kreise gilt, so genügen bei richtiger Verbindung der Spulen im Ganzen drei Leitungen für das Dreiphasensystem, das dadurch zu einem sogenannten Systeme mit verketteten Spannungen wird. Sind nun auch in Wirklichkeit die Kurven im Allgemeinen nicht reine Sinuslinien, die bei der Zeichnung in Figur 64 angenommen waren, so kann man sich doch Kurven anderer Form immer durch äquivalente Sinuslinien ersetzt denken, und man versteht, wie wohl im Einzelnen bei andern Kurvenformen Abweichungen eintreten können, im Ganzen aber das Gesetz der gegenseitigen Vertretung der Leitungen in Geltung bleibt.

In der einfachsten Form ist ein Dreiphasengenerator immer darzustellen durch eine Ringwicklung mit nur drei Spulen, wenn auch diese übersichtlichste Anordnung schon wegen der unsymmetrischen Verteilung der Stromstärken praktisch nicht zweckmäßig wäre. Von den sechs Spulenden kann man nun drei gleichliegende verbinden, wie in Figur 65 angegeben. Man hat damit, wie aus Figur 64 als zulässig erkannt, je eine Leitung des einen Stromkreises ersetzt durch zwei Leitungen der beiden anderen Kreise, sofern nur die richtige Reihenfolge beachtet wird. Bei



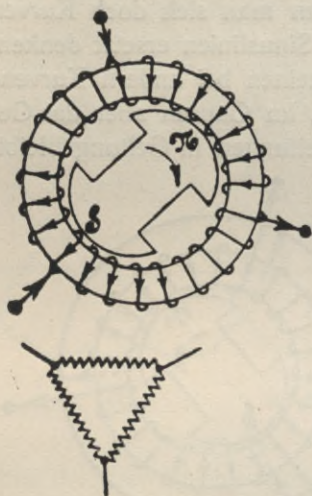
Figur 65.

gleicher Belastung aller drei Stromkreise bildet diese Verbindung den neutralen Punkt des Systemes, denn die drei Spannungen heben sich in ihm in jedem Augenblicke auf, wie es in Bezug auf die Grundlinie in Figur 64 der Fall war. Die übrig bleibenden drei freien Spulenden sind an die drei Netzleitungen angeschlossen zu denken. Bei der in Figur 65 gezeichneten augenblicklichen Stellung des rotierenden Feldmagneten erfährt die Spule I die

stärkste Induktion, da alle ihre Leiter Kraftlinien schneiden, während die beiden anderen Spulen nur teilweise unter der Wirkung des anderen Feldpoles stehen. Das entspricht also etwa dem Augenblicke a der Figur 64, der Strom in I ist gleich dem in der zugehörigen Netzleitung. Diese Spulenverbindung wird als Sternschaltung bezeichnet und symbolisch durch die Nebenfigur gekennzeichnet, die ebenso die Verteilungsweise der Spulen im Ringe andeutet, wie der geometrischen Behandlung des Problems entspricht.

Die zweite wichtigste Verbindungsweise der drei Spulen ist in

Figur 66 angegeben. Die Spulen sind fortlaufend verbunden, oder von einer geschlossenen Ringwicklung sind in Abständen von je 120° die Netzleitungen abgeführt. Im Uebrigen sind die Verhältnisse wie bei der vorigen Figur gewählt, Spule I erhält auch gerade wieder die stärkste Induktion, der dadurch hergestellte Spannungunterschied ist jetzt aber nicht auf einen neutralen Punkt zu beziehen, der nicht vorhanden ist, sondern auf die angrenzenden Spulen. War also vorher der größte Spannungwert in Spule I bei a in Figur 64 als Ordinate von der Grundlinie aus abzutragen, so bedeutet er jetzt den Abstand des



Figur 66.

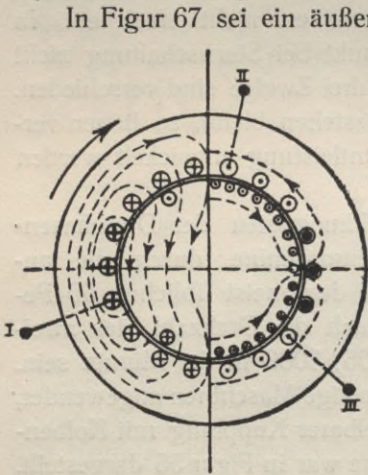
Schnittpunktes der Kurven II und III vom oberen Scheitel der I. Trotz derselben Leiterzahl, die sich in Spule I eben im Maximum der Induktion befindet, ist wegen der unmittelbaren Verbindung der Spule mit den benachbarten, schwächer aber entgegengesetzt induzierten die Spannung geringer wie vorher. Dagegen verteilen sich die Ströme jeder Netzleitung auf je zwei Spulen, wenn auch nicht gleichmäßig, sondern nach Maßgabe der jeweiligen Spannungen. Diese Schaltung, die Dreieckschaltung (siehe Nebenfigur), gibt also unter sonst gleichen Umständen geringere Netzspannung (Spannung zwischen zwei Leitungen), erlaubt aber bei derselben Beanspruchung der Wicklung eine entsprechend größere Stromstärke. — Ersichtlich kann man die beiden beschriebenen Hauptschaltungen des Dreiphasensystems durch geeignete Schaltapparate in einander überführen, wenn auch bei den wirklichen Trommelwicklungen nicht so einfach, wie bei den

hier angenommenen schematischen Ringwicklungen. Von dieser Möglichkeit kann gelegentlich Gebrauch gemacht werden, wenn ein Wechsel der Spannungen zwischen zwei Grenzen ohne Verluste erreicht werden soll.

Wie man den Dreiphasengenerator entstanden denken konnte als eine Vereinigung von drei Einphasen-Generatoren, so ist auch natürlich seine Gesamtleistung gleich der Summe der drei Einzelleistungen. Je zwei Leitungen bilden immer einen einfachen Wechselstromkreis, und wenn alle drei Kreise ganz gleich belastet sind, so genügt die Leistungsmessung eines von ihnen, um die Gesamtleistung als das Dreifache davon zu erhalten. Solche gleichmäßige Belastung der Zweige ist indessen nur bei reinem Motorbetriebe genügend gesichert, beim Speisen von Beleuchtungskörpern, die zwischen die einzelnen Leitungen geschaltet werden, muß man für tunlichst gleiche Belastung der Zweige sorgen, kann aber natürlich vollständige Gleichmäßigkeit im Allgemeinen nicht erreichen. In diesem Falle bleibt der Verbindungspunkt bei Sternschaltung nicht spannungslos, und die Leistungen der drei Zweige sind verschieden. Da aber immer ihr Zusammenhang bestehen bleibt, so haben vereinfachte Messmethoden für die Gesamtleistung entwickelt werden können.

Die Drehgeschwindigkeit des Feldmagneten der Dreiphasenmaschine ist wie bei der Einphasenmaschine durch die angenommene Frequenz festgesetzt. Bei den meist üblichen 50 Perioden in der Sekunde müßte demnach die Drehzahl des zweipoligen Feldmagneten (Figur 65 und 66) 3000 in der Minute sein. Auch hier werden deshalb immer mehrpolige Maschinen angewendet, große Polzahlen besonders bei unmittelbarer Kupplung mit Kolbendampfmaschinen. Eine solche Maschine war in Figur 55 dargestellt, die auch statt der schematischen Ringwicklungen der Figuren 65 und 66 die jetzt allein übliche Trommelwicklung zeigt mit Hintereinanderschaltung der Spulen, wie bei den Einphasenmaschinen besprochen. Die größere Mannigfaltigkeit der Trommelwicklungen und die drei in einander geschachtelten Spulensätze geben meist ein weniger übersichtliches Bild, festzuhalten ist aber immer, daß die Stromverteilung nach den für die Ringwicklung aufgestellten Grundsetzen erfolgen soll.

Der eigentliche Zweck des Mehrphasenstromsystemes ist der Motorbetrieb. Denkt man sich beispielweise die Maschine nach Figur 65 nicht stromerzeugend, sondern ihrerseits mit Dreiphasenstrom gespeist, der dieselbe wechselnde Stromverteilung in den Leitern herstellt, wie der rotierende Feldmagnet ergab, so wird dieser selbst von den Strömen mitgenommen. Das ist leicht zu erkennen, wenn man die Wirkung der im Ringe festen aktiven Leiter auf die von den Feldmagneten ausgehenden Kraftlinien betrachtet. Man hätte dann durch Umkehrung einen synchronen Dreiphasenmotor erhalten, der dem gleichen Einphasenmotor gegenüber allerdings den Vorzug hat, in jeder Stellung anzugehen, wie schon an dem Zweiphasenmotor erkannt wurde, dagegen immer noch einer besonderen Gleichstromerregung des Feldmagneten bedürfte. Diese unnötig zu machen, ist das Wesen des asynchronen Mehrphasenmotors.



Figur 67.

In Figur 67 sei ein äußerer Eisenring in Nuten auf der Innenseite mit Leitern versehen, die Teile einer Ringwicklung sein könnten, oder besser und den jetzigen Ausführungen entsprechend, schematisch eine Trommelwicklung darstellen sollen. Eine solche gibt immer weniger Streuung, als eine Ringwicklung und ist mit aus diesem, für Drehstrommotoren besonders wichtigen Grunde allein noch gebräuchlich. Für die folgenden Betrachtungen ist der Umstand aber zunächst unerheblich, wesentlich ist nur, daß lediglich die wirksamen Innenseiten der Wicklung beachtet zu werden brauchen. Die Wicklung sei im Uebrigen nach dem Schema der Figur 63 mit geteilten Spulen ausgeführt. Führt man dann der Wicklung an den drei freien Enden Dreiphasenstrom zu und geht man aus von dem Augenblicke a in Figur 64, so bilden sich in dem Ringe (Stator) Ströme aus, wie in der Figur 67 angegeben, wobei die zur Zeit stärkeren Ströme gekennzeichnet sind. Im Innern des Ringes befindet sich der eiserne drehbare Zylinder (Rotor), beide sind wie immer lamelliert zu denken. Der

seite mit Leitern versehen, die Teile einer Ringwicklung sein könnten, oder besser und den jetzigen Ausführungen entsprechend, schematisch eine Trommelwicklung darstellen sollen. Eine solche gibt immer weniger Streuung, als eine Ringwicklung und ist mit aus diesem, für Drehstrommotoren besonders wichtigen Grunde allein noch gebräuchlich. Für die folgenden Betrachtungen ist der Umstand aber zunächst unerheblich, wesentlich ist nur, daß

Luftspalt zwischen beiden sei so klein wie möglich. Jeder Leiter ist nun der Sitz einer magnetomotorischen Kraft und sucht um sich ein zirkulares magnetisches Feld zu bilden, die Felder verschmelzen teilweise und bilden ein System von Kraftlinien, von dem die linke Seite, in roher Annäherung, durch die punktierten Linien angedeutet ist, und das zur Hälfte in dem Stator, zur andern Hälfte unter Ueberspringen des schmalen Luftspaltes möglichst in dem Motor verlaufen soll. Nach einer Drittelperiode ist dieselbe Stromverteilung um 120° fortgeschritten, bei entsprechender Schaltung der freien Wicklungenden etwa im Uhrzeigersinne, nach dem gleichen Zeitraume wieder um 120° und so fort, und zwar findet ein allmählicher Uebergang von dem einen zum andern Zustande statt, wovon man sich durch Zeichnen der Stromrichtungen an Hand des Diagrammes Figur 64 überzeugen kann. Es macht also den Eindruck, als wenn die magnetische Axe des Rotors sich in einer ganzen Periode einmal vollständig herumdrehte, oder als ob die durch die Ströme ausgebildeten Pole im Ringe einen ganzen Umlauf machten. Diese Auffassung ist aber nur insofern berechtigt, als man beispielweise bei Wasserwellen von einer fortschreitenden Geschwindigkeit spricht, während in Wirklichkeit die Wasserteile selbst sich nur periodisch auf und ab bewegen, wie man an kleinen Schwimmkörpern leicht beobachten kann. Wir wollen zunächst aber annehmen, daß ein wirkliches magnetisches Drehfeld hergestellt sei, nicht nur ein Schwingen der magnetischen Einzelzustände auf der Stelle, da die meisten Erscheinungen sich in dieser Form, die oft unrichtig als die tatsächliche dargestellt wird, am einfachsten erklären lassen.

Bei ihrer Zu- und Abnahme erfahren die Ströme eine Phasenverschiebung gegen die angelegte Spannung, da sie eben Felder um sich bilden. Da die magnetischen Widerstände, im Eisen und im Luftspalte, bei gegebener Form aller Teile sich genau genug berechnen lassen, bei ebenfalls gegebenen Strömen also die wechselnden Feldstärken bekannt sind, so ist auch die Gegenspannung und damit die Phasenverschiebung zu finden. Die Verhältnisse ähneln durchaus denen des leerlaufenden Transformators, und wie bei diesem ist, da der Ohm'sche Widerstand der Wicklungen immer klein sein muß, die Phasenverschiebung sehr groß, der Strom schwach, der weitaus größte Teil des Widerstandes, den die angelegte Spannung findet, besteht in der Gegenspannung, an

Leistung hat das Netz nur die Verluste im Kupfer und Eisen aufzubringen.

Sind nun auch in dem (immer noch feststehenden) Rotor Nuten mit Leitern, wie rechts gezeichnet, so werden diese beim Drehen des Feldes von Kraftlinien geschnitten. Die Richtungen der Spannungen in diesen Leitern sind in bekannter Weise zu bestimmen, wie auf der linken Seite an zwei einzelnen Leitern ausgeführt. Wären die Rotorleiter so verbunden, daß sich Ströme in ihnen infolge der induzierten Spannungen ausbilden könnten, so würde sich ein ähnliches Kraftliniensystem wie im Stator ergeben, die magnetische Achse des Rotors aber senkrecht zur Achse des Stators stehen, wie beim Gleichstrommotor. Die Leiter sind nun immer leicht so zu zweien zu verbinden, daß ihre Spannungen in gleichem Sinne wirken, also Ströme entstehen. Man kann aber auch sämtliche Leiter auf beiden Stirnseiten des Rotors unter einander verbinden, denn jeder findet dabei den entsprechenden Gegenleiter, wie sich ergibt, wenn man zunächst passende Leiter zu Gruppen vereinigt denkt. Die Folge ist dann ein starkes Drehmoment auf den Rotor, weil auf jeden Leiter das induzierende Feld eine mitnehmende Kraft ausübt, wie aus Früherem erhellt und wie sich auch unmittelbar ergibt, wenn man den Bewegungsantrieb eines stromdurchflossenen Rotorleiters in dem ruhend angenommenen jeweiligen Felde bestimmt. Der Rotor kommt deshalb in Drehung und zwar im Sinne des Drehfeldes im Stator, er wird mitgenommen, wie etwa ein Schaufelrad unter Wasser von einem dicht daneben angeordneten ähnlichen, durch einen äußeren Antrieb gedrehten. Erforderlich ist aber immer ein Geschwindigkeitunterschied zwischen Rotor und Drehfeld, damit Kraftlinien überhaupt geschnitten werden, und Ströme in den Rotorleitern entstehen, deshalb kann der Rotor, so leicht beweglich er auch sei, nie die Geschwindigkeit des Drehfeldes selbst erreichen. Die Kraftlinien müssen die Rotorleiter immer so schnell schneiden, daß Spannungen induziert werden, die zur Ueberwindung des geringen mechanischen Rotorwiderstandes hinreichende Stromstärken entwickeln. Die Spannungen würden ganz verschwinden, wenn der Rotor durch äußeren Antrieb in einer Periode ebenfalls einen vollständigen Umlauf machte. Bei dem geringen Ohm'schen Widerstande der Rotorleiter genügt aber ein ganz geringes Zurückbleiben, um die zum Leerlaufen erforderlichen

schwachen Ströme zur Ausbildung kommen zu lassen, der Rotor nimmt deshalb *nahezu* die Geschwindigkeit des Drehfeldes an, und an den Kraftliniensystemen der Fig. 67 wird wenig geändert.

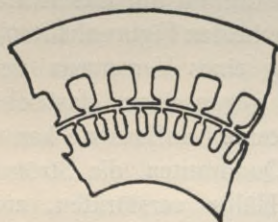
Anders aber, wenn der Rotor größeren mechanischen Widerstand erfährt. Er bleibt dann mehr gegen das Drehfeld zurück, die Spannungen werden durch schnelleres Schneiden der Kraftlinien größer, die Ströme stärker, damit auch das magnetische Drehmoment, es stellt sich selbsttätig eine neue Geschwindigkeit ein. Der Drehstrommotor verhält sich darin ähnlich, wie der Gleichstrom-Nebenschlußmotor, auch insofern, als die Geschwindigkeitsunterschiede bei verschiedenen Belastungen infolge der kleinen Leiterwiderstände gering bleiben. Sie betragen auch bei der größten zulässigen Belastung nur wenige Prozente von der Geschwindigkeit des Drehfeldes.

Mit den Strömen im Rotor wächst auch die Dichte seines Kraftliniensystems, und wenn man dessen Einfluß auf das Kraftliniensystem des Stators betrachtet (vergl. die beiden Figurenhälften), so gelangt man wieder zu der Vorstellung eines Verzerrens des Drehfeldes, das man auch etwa als eine gegenseitige elastische Nachgiebigkeit der beiden Kraftliniensysteme auffassen kann. Während nun beim Leerlauf in den vier Quadranten die Ströme des Stators und Rotors sich nahezu zur Hälfte verstärkten, zur anderen Hälfte schwächten (vgl. Figur), treten mit steigender Belastung des Motors mehr solche Leiter im Stator und Rotor sich gegenüber, die sich schwächen. Die Folge davon würde, wie beim belasteten Transformator, ein Schwächen des Statorfeldes sein, wenn nicht infolge der damit eintretenden geringeren Gegenspannung der Statorstrom sich verstärkte. Das bedeutet, der Motor nimmt nach Maßgabe seiner größeren Belastung eine größere Leistung auf, dargestellt durch einen stärkeren Strom und geringere Phasenverschiebung — alles wie beim Transformator, dessen Behandlung auch die Grundlage für das nähere Studium des Drehstrommotors bildet.

Verwickelt wird die Theorie des Drehstrommotors namentlich wegen der Trennung der beiden Wicklungen durch den Luftspalt. Es sollen die beiden Kraftliniensysteme, damit sie innig auf einander einwirken, möglichst gleichmäßig im Stator und Rotor verlaufen. Man macht den Luftspalt deshalb so klein als möglich und schließt meist die Nuten bis auf einen schmalen Schlitz zwischen den

Zähnen, um so den magnetischen Widerstand zwischen Stator und Rotor recht klein zu erhalten (Figur 68). Bei vollständigem Schließen der Nuten würden zu viel Kraftlinien unmittelbar zwischen den Zahnspitzen übergehen, ohne den Luftspalt zu durchsetzen. Trotzdem ist ein Abirren eines erheblichen Teiles der Kraftlinien von dem gewünschten Wege nicht zu vermeiden, das Streuen wächst mit der Stromstärke, die Statorströme bilden stärkere Felder, als in den Rotor eintreten, die Gegenspannung wird größer, als dem Nutzfelde entspricht, die Phasenverschiebung und damit der wattlose Anteil der Ströme steigt. Dadurch hauptsächlich ist die Leistung eines gegebenen Motors begrenzt, der im Uebrigen wie der Gleichstrommotor in seinen Einzelheiten so durchgeführt sein muß, daß die Verluste und die Erwärmung in zulässigen Grenzen bleiben.

Aus Figur 68 ist auch zu entnehmen, wie auf die größeren

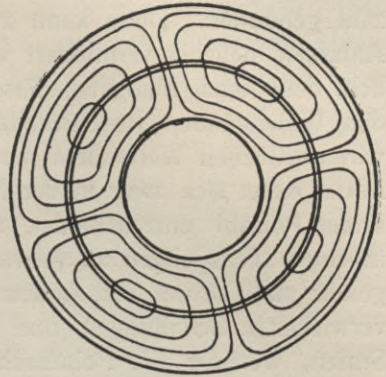


Figur 68.

daß man die Vorstellung eines wirklichen Drehfeldes mit einer gewissen Vorsicht benutzen muß. Wenn mit Gleichstrom erregte Pole um den Rotor gedreht würden, so müßte jeder Rotorleiter unter allen Umständen induziert werden, man hätte es dann in der Tat mit einem lückenlos fortschreitenden Drehfelde zu tun. Die Zahnteilung und die Wicklung des Drehstrommotors müssen für ein möglichst treues Nachbilden dieses wirklich wandernden Magnetismus sorgen.

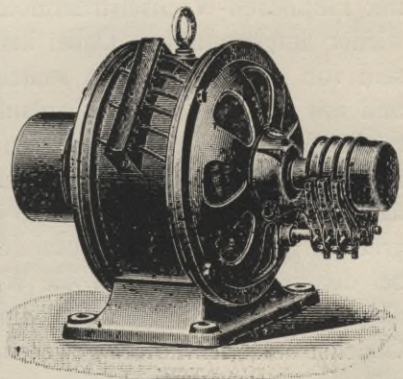
Zweipolige Drehstrommotoren, wie wir bisher betrachteten, kommen in Wirklichkeit kaum vor, da sie nahezu 3000 Drehungen in der Minute machen würden, wenn die übliche Frequenz (50) eingehalten werden soll. Auch die kleinsten Motoren führt man deshalb meist vierpolig aus, wobei eine Feldanordnung nach Figur 69 entsteht, bei annähernd 1500 Drehungen. Wie mit größerer Polzahl die Drehzahl abnimmt, ergibt sich aus dem über die Generatoren Gesagten.

Mit einem so einfachen Rotor, wie oben für den zweipoligen Motor angenommen wurde, kommen nur kleine Drehstrommotoren aus, weil im Augenblicke des Einschaltens die Geschwindigkeit der induzierenden Kraftlinien gegen die Rotorleiter so groß ist, daß übermäßig starke Ströme entstehen, und die Rückwirkung auf das Netz und die Zentrale elektrischer und mechanischer Hinsicht unzulässig wird. Wie beim Gleichstrommotor muß man deshalb durch vorgeschaltete Widerstände die Ströme im Motor während des Anlassens soweit als nötig schwächen, wenn man



Figur 69.

nicht ausnahmeweise die angelegte Spannung mit einem niedrigen Werte beginnen lassen kann. Wie das durch Widerstände in den Rotorstromkreisen geschehen kann, leuchtet aus seiner Wirkungsweise ein, ebenso, daß dann nicht mehr eine Verbindung aller Rotorleiter unter sich angewendet werden kann. Wickelt man aber den zweipoligen Rotor als Ring nach Figur 63 oder 64 und führt die drei Wicklungsenden zu Schleifringen auf der Motorwelle, so kann man feststehende, allmählich auszuschaltende Widerstände in den Rotor einfügen und jede vorgeschriebene Stromstärke einhalten. Mehrpolige Motoren erfordern selbstverständlich eine Berücksichtigung der Polzahl bei der Wicklung des Rotors, ebenso wie beim Stator. Gleich diesem wird auch der Rotor jetzt immer mit Trommelwicklung ausgeführt. Einen solchen Motor zeigt Fig. 70, aus der die drei Schleifringe deutlich zu ersehen sind.



Figur 70.

Der so einfache Drehstrommotor erfüllt vorzüglich alle Bedingungen, die an einen nahezu gleichmäßig umlaufenden Betriebsmotor gestellt werden, er ist aber an eine annähernd feste Drehzahl gebunden. Diese kann zwar durch Widerstände, wie beim Anlassen, beliebig vermindert werden, aber nur sehr unwirtschaftlich, denn nach Maßgabe dieser Verminderung wird Leistung in den Widerständen verschwendet, die Regelung gleicht in ihrem wirtschaftlichen Werte dem mechanischen Bremsen. Ein besseres Mittel bietet sich zwar in der Möglichkeit, den Motor hinsichtlich seiner Polzahl umzuschalten, also etwa einen vierpoligen Motor in einen sechspoligen zu verwandeln, womit die Drehzahl auf ungefähr zwei Drittel herabgesetzt würde. Das führt aber zu sehr verwickelten Schaltungen und ergibt nur Aenderungen in starken Stufen, weshalb die Polumschaltung nur selten zur Anwendung kommt.

Dem Drehstrommotor die große Schmiegsamkeit und die vielseitige Verwendbarkeit des Gleichstrommotors zu geben, ist nicht gelungen. Da besonders die elektrischen Bahnen weitgehende Regelbarkeit von ihren Motoren verlangen müssen, andererseits die Vorzüge des Wechselstromes auf den immer länger werdenden Linien nicht entbehren können, die drei Leitungen des Drehstromes im Bahnbetriebe auch immer eine erhebliche Unbequemlichkeit bedeuten, so sind in den letzten Jahren die früheren Versuche mit Einphasen-Wechselstrommotoren mit besonderem Nachdrucke wieder aufgenommen. Dabei kann selbstverständlich nur die Rede sein von asynchronen, in weiten Grenzen regelbaren, von selbst und mit starker Drehkraft anlaufenden Motoren. Unter den zahlreichen Vorschlägen zu Einphasenmotoren haben allein die Kollektormotoren Aussicht, den schwierigen Bedingungen zu genügen, denen der Gleichstrommotor innerhalb der für ihn zulässigen Spannungsgrenzen gerecht wird. Besonders interessant und lehrreich ist bei den neueren Arbeiten die Wiederaufnahme des alten, früher als untauglich schon aufgegebenen Kollektormotors nach Art des Gleichstromserienmotors gewesen. Die Fortschritte, die inzwischen mit den Gleichstrommaschinen namentlich hinsichtlich der Stromwendung gemacht waren, die vertiefte Einsicht in diese schwierige Frage, sind dabei dem Wechselstrommotor zugute gekommen, und haben besonders die zu berücksichtigenden Unterschiede erkennen lassen, die beim Stromwenden in den beiden Motorarten auftreten.

Der fortwährende Wechsel des Magnetismus im Anker des Einphasen-Kollektormotors induziert nämlich in die jeweilig kurz geschlossene Wicklungspule eine EMK, wie in der sekundären Wicklung eines Transformators, die bei dem geringen Widerstande einen erheblichen Strom in der Spule zur Folge hat, der außerdem aber nicht in Phase ist mit dem Kurzschlußstrom, wie er auch in Gleichstrommaschinen beim Vorbeigehen der Spulen auftritt. Der transformatorische Strom kann also auch nicht mit demselben Mittel bekämpft werden, das gegen den Kurzschlußstrom angewendet wird. Bei den Einphasen-Serienmotoren werden deshalb solche Mittel in geeigneter Ausgestaltung erhöhte Beachtung finden, die in Form besonderer Einrichtungen zum Stromwenden auftreten (vgl. Fig. 40). Außerdem sind beim Wechselstrommotor Gegenwindungen zum Aufheben der von den Ankerleitern erzeugten Felder besonders angezeigt, um die Phasenverschiebung im Motor niedrig zu halten.

Die Arbeiten auf dem zuletzt erwähnten Gebiete sind noch zu wenig abgeschlossen, um schon von bestimmten Musterformen des Einphasenmotors sprechen zu können. Doch werden aller Voraussicht nach Kollektormotoren auch für den Wechselstrom sich dauernd einführen, und diese Motorgattung, selbst eigentlich eine Wechselstrommaschine, lange ausschließlich dem Gleichstrom dienend und vom Wechselstrom wegen des schwierig zu behandelnden Kollektors mißachtet, wird vielleicht eine unentbehrliche Stütze des Wechselstromes werden.

*

Von der ungemein reichhaltigen Reihe der Maschinenformen, die sich in wenigen Jahrzehnten die Elektrotechnik geschaffen hat, konnten in der Kürze nur die wichtigsten ihrem Wesen nach besprochen werden. Einschneidende Aenderungen im jetzigen elektrischen Maschinenwesen werden nur zu erwarten sein, wenn der immer noch ohne Erfolg gesuchte leichte und einfach zu behandelnde Akkumulator erstanden sein wird, noch mehr, sobald die unmittelbare Umwandlung der in der Kohle angehäuften chemischen Energie in elektrische praktisch ermöglicht ist.

Maschinen zum Fördern von Flüssigkeiten und Gasen.

I.

Das wichtigste Element im Haushalte des Menschen ist das Wasser, und keine praktische Aufgabe hat ihn von Alters her mehr beschäftigt, als das von der Natur gebotene belebende Naß von dem Fundorte nach dem Gebrauchorte zu übertragen. Und während für seinen persönlichen Bedarf das einfache Schöpfen des Wassers mit Handgefäßen so lange genügte, als die weitläufigen Siedelungen sich noch bequem nach der Lage der Wasserstelle richten konnten, und erst mit dem Verdichten der Bevölkerung in den Städten die künstliche Zuleitung der Wassers ein Bedürfnis wurde, so ist doch schon sehr früh in alten Kulturgegenden die Notwendigkeit aufgetreten, größere Wassermengen für die Zwecke der Berieselung der Aecker und Wiesen zu bewegen, das will sagen, sie aus dem natürlichen Bette auf geringe Höhen zu heben, um sie in einfachen Kanälen über die Bodenfläche zu verteilen. Die klassischen Stätten für solche einfachen Verteilungsanlagen waren im Altertum Aegypten, Assyrien, Persien, und zum Ausführen der groben, eintönigen Arbeit entstanden dort Wasserhebemaschinen der verschiedensten Art, im Besonderen die Wasserschöpfräder, wenn es sich um Heben erheblicherer Wassermengen handelte.

Im ersten Bande (Motoren) ist schon darauf hingewiesen, wie aus einem Wassermotor, der die mechanische Arbeit des herabsinkenden Wassers aufnimmt und in zweckdienliche Form umsetzt, durch Umkehrung und wenn nötig angemessene Aenderung der Einzelheiten eine Wasserhebemaschine entsteht. Ein durch einen Motor angetriebenes unterschlächtiges Wasserrad erteilt dem Wasser in einem Kanale eine mehr oder weniger große Geschwindigkeit, sodaß es die schwach geneigte Sohle des Kanales entlang aufwärts fließen kann. Wie ein mittelschlächtiges Rad

(Motoren S. 63) bei umgekehrter Drehrichtung schon einen größeren Niveau-Unterschied des Wassers herstellen kann, lehrt die einfache Betrachtung der Figur. Ein overschlächtiges Rad endlich (Motoren S. 29) bedarf nur geringer Aenderungen, damit seine Zellen unten Wasser aufnehmen und oben in ein Gerinne entleeren, und solche Räder, die bei mäßigem Durchmesser schon beträchtliche Förderhöhen überwinden, und einfach als eine regelmäßige Reihe von Schöpfgefäßen in geeigneter Stellung am Umfange des Radkörpers anzusehen sind, kann man wohl als die verbreitetste Form der alten Wasserschöpfmaschine betrachten, für die das Schöpfen mit Handgefäßen vorbildlich war, und die an vielen Orten unter ähnlichen Bedingungen entstanden, sobald der entscheidende Schritt zur Maschine getan war, statt der absatzweisen Bewegungen des Schöpfens mit der Hand die gleichmäßige Drehung eines Rades zu benutzen. In China, Indien, Spanien, Holland und andern Ländern haben die Wasserhubräder in roherer und kunstreicherer Ausführung gedient und sind noch heute so wenig ganz ausgestorben, wie die primitiven Motor-Wasserräder, die in Gegenden ohne industrielle Entwicklung dem einfacheren Bedürfnisse genügen.

Kulturhistorisch kann es kaum einen reizvolleren und dankbareren Gegenstand des Studiums geben, als die Geräte zum Wasserheben, wie überhaupt die Wasserwirtschaft des Menschen. Ein weitergehendes Interesse in dieser Richtung wird beispielweise in einer Schrift eines hervorragenden, mit historisch-philosophischem Sinne begabten und beredten Technikers, Franz Reuleaux, Befriedigung finden. Unseren Absichten, die sich auf das Verständnis wichtiger moderner Maschinen richten, bieten die oben erwähnten alten Geräte nicht unmittelbar verwertbare Gesichtspunkte, und deshalb mag es mit den kurzen Andeutungen sein Bewenden haben, denen nur noch einige Ergänzungen angehängt werden sollen.

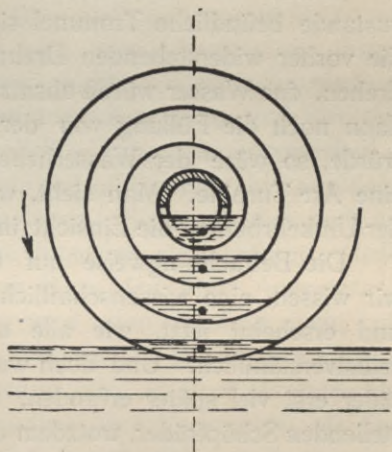
Die zum Fördern des Wassers erforderliche Leistung ist leicht aus dem in der Zeiteinheit zu hebenden Wassergewichte und der Hubhöhe zu finden, unter Berücksichtigung des je nach ihrer Ausführung verschiedenen Wirkungsgrades der Maschine. Sorgfältige Vermeidung von Stößen und Wirbeln kann, ganz wie bei den Wassermotoren, den Wirkungsgrad verbessern, aber natürlich wird auch im besten Falle immer etwas mehr Leistung auf den Wasserheber zu übertragen sein, als der Nutzleistung entspricht, gleichgültig welcher Art das Fördergerät ist. Das scheint selbst-

verständlich, aber die Erfahrungen, die der Techniker immer wieder zu machen Gelegenheit hat, zeigen zur Genüge, daß der Fundamentalsatz der Mechanik auch in unserer Zeit durchaus noch nicht so lebendig ist, um sonderbare, in ihren Wirkungen oft betrübliche Projekte zu verhindern. Die Vorstellung, alles Dagewesene zu überbieten, wenn das angeblich Neue nur ein etwas andres Gesicht hat, wirkt aber oft so berauschend, daß die einfachste nüchterne Prüfung verschmäht wird. So komisch aber solche Erscheinungen gelegentlich wirken können, wo die schweifende Phantasie nicht durch genügende Einsicht gezügelt wird, der Verständige wird doch nicht nur mit überlegenem Lächeln die unklaren Ideen abwehren, denn im Grunde sind sie doch nur die ersten Aeußerungen des Erfindungstriebes, ohne den Nichts geworden wäre. Das Ungenügen an dem Bestehenden ist allen Fortschrittes Anfang, und könnte man den verschlungenen Wegen der Phantasie genau genug folgen, so würden sich die Keime für manche wirkliche Erfindung oft genug in anfangs ganz verworrenen, spielenden Vorstellungen finden lassen. Auch das Betrachten der zahllosen Formen der Geräte zum Wasserheben, die uns überliefert sind, bietet genug Beispiele für den Drang nach dem bloßen Andersmachen, und doch wieder die tröstliche Erkenntnis, daß auch das Verkehrte ein Glied in der Entwicklung zu den wenigen zweckmäßigen Formen ist.

Der Motor zum Betriebe der Wasserheber ist natürlich zunächst der Mensch gewesen, der im Besonderen bei den radartigen Maschinen seine Leistung mit Hülfe des Tretrades entwickelte, eine dem Umfange des Rades angeschmiegte endlose Treppe, deren unausgesetztes Ersteigen ohne den Erfolg des Höherkommens als klassisches Beispiel einer Sklavenarbeit gelten kann. Erst später konnte das leistungsfähigere, aber weniger anpassungsfähige Zugtier das Wasserhubrad in Bewegung setzen. Denn zur Erzielung einer gleichmäßigen Drehung verlangt es eine ebene kreisrunde Bahn von nicht zu geringem Durchmesser und zur Betätigung des senkrechten Rades ein schon schwieriger herzustellendes Göpelwerk mit mehrfacher Uebersetzung, das in vollendeter Form bis in unsere Tage namentlich für landwirtschaftliche Betriebe in Verwendung ist. Wo aber aus fließendem Wasser zu schöpfen war, hat der Gedanke, dieses selbst zum Bewegen der Schöpfmaschine zu benutzen, immer so nahe gelegen, daß die Erfindung des Wassermotors von der des Schöpfrades nicht zu trennen ist.

Der Baustoff für die Räder war selbstverständlich bis in die neuere Zeit ausschließlich das Holz. Als aber die fortschreitende Eisen-technik in größeren Blechtafeln einen für sorgfältige Ausführung geeigneteren Baustoff bot, sind, ehe zweckmäßigere Mittel zur Anerkennung gekommen waren, Wasserschöpfräder hergestellt, die an sich schon etwas Vollkommenes darstellten. So wurden Ende des 18. Jahrhunderts von Perronet in Frankreich sogenannte Wassertrommeln eingeführt, und bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts häufig bei Ent- und Bewässerungen benutzt, die aus mehrfachen Gründen hier noch erläutert werden sollen. Die Maschine ist übrigens als die vollendetere Form einer schon von Vitruv beschriebenen anzusehen.

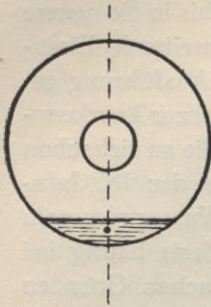
Wie dies schematische Darstellung (Figur 71) zeigt, hat die Wassertrommel (zwischen zwei kreisförmigen parallelen Seitenscheiben, die von der hohlen Welle getragen werden) eine spiralig von der Welle allmählich nach außen verlaufende Wand, die also einen an der Welle beginnenden, am Umfange der Trommel mündenden, fortlaufenden Kanal bildet. Beim Drehen der Trommel in der Pfeilrichtung schöpft die Kanalmündung in der Tieflage jedesmal eine gewisse Menge Wasser, die bei



Figur 71.

den folgenden Umdrehungen in immer höhere Kanalabschnitte gelangt, dann wie die Vorgänger schließlich in die hohle Welle und von da zur Seite fließt.

Da somit tatsächlich durch die Trommel Wasser gehoben wird, so muß sie dem drehenden Motor einen Widerstand entgegengesetzen. Bei näherer Betrachtung sieht man auch, daß die Schwerpunkte der Kanalfüllungen alle etwas rechts von der Drehachse liegen, also durch ihr Gewicht die Trommel rückwärts zu drehen suchen. Diese entgegengesetzten Drehmomente mal der Umdrehungsgeschwindigkeit sind das Maß für die Leistung des Motors. Diese Leistung wäre Null, abgesehen von den Reibungsverlusten, wenn die Kanalwand nicht spiralig die Welle umgäbe,



Figur 72.

sondern konzentrisch (Figur 72). Dann würde aber natürlich auch beim Drehen der Trommel das von der Wand getragene Wasser nicht gehoben, vielmehr würde es sich, immer von der geringen Reibung abgesehen, wie auf einer horizontalen Ebene bewegen. Die spiralgige Wand ist dagegen hinsichtlich der Hubarbeit wie eine vom Wasserspiegel zur Welle gehende schiefe Ebene anzusehen, und ihre Krümmung sorgt nur dafür, daß die an sich gestaltlose Wassermenge von Gefäßwänden gehalten wird.

Würde man andererseits die in dem gezeichneten Füllungszustande befindliche Trommel sich selbst überlassen, so würden die vorher widerstehenden Drehmomente die Trommel rückwärts drehen, das Wasser würde absatzweise wieder ausfließen, und wenn dann noch die Füllung von der hohlen Welle her immer ersetzt würde, so wäre der Wasserheber in einen Motor verwandelt, in eine Art Turbine. Man sieht, wie auch hier wieder das Prinzip der Umkehrbarkeit die Einsicht in das Wesen der Maschine vertieft.

Die Betrachtungsweise auf Grund der Umkehrarbeit ist, wie wir wissen, eine wissenschaftliche Errungenschaft der neueren Zeit und erscheint jetzt, wie alle umfassenden Wahrheiten, ziemlich selbstverständlich. Und doch wurden die oberflächlichen Wasserräder erst viel später erfunden, als die nur ihre Umkehrung darstellenden Schöpfräder, trotzdem diese vielfach von unterschlächtigen Wasserrädern angetrieben wurden. Die Wissenschaft entwickelt sich eben auf dem Boden der Beobachtung und faßt ökonomisch eine Summe einzelner Tatsachen zu einem Gesetze zusammen, das nach seiner Aufstellung wieder andere noch nicht beobachtete Tatsachen voraussehen läßt und ihren Verlauf bestimmt. Das ist der wirkliche Zusammenhang von Theorie und Praxis, die man so gern als Gegensätze auffaßt.

Die alten Wasserschöpfmaschinen waren im Verhältnisse zu ihrer Leistung ungefüge Geräte. Ihrer Natur nach nur für langsamen Gang befähigt, sind sie im modernen Maschinenbau einerseits durch die Kolbenpumpe, andererseits durch die Zentrifugalpumpe vollständig verdrängt; jene ebenfalls aus dem Altertum stammend, aber erst viel später durch die fortgeschrittene Herstellungstechnik zu dem uns jetzt so vertrauten Werkzeuge geworden

und besonders für die Förderung auf größere Höhen geeignet; diese, ein Kind der Neuzeit, und, bis jetzt wenigstens, hauptsächlich zum Bewegen großer Wassermengen bei geringeren Höhenunterschieden benutzt, vor den alten Rädern aber wegen ihrer großen Geschwindigkeit durch sehr geringe Abmessungen ausgezeichnet. Wir wenden uns nun der eingehenden Betrachtung zunächst der Kolbenpumpe zu.

II.

Die Kolbenpumpe stammt wie gesagt auch aus dem Altertume, ob man ihr aber ein bestimmtes Alter beilegen soll, wird ganz davon abhängen, was man unter einer Kolbenpumpe verstehen will.

Der Name Pumpe soll sich von dem griechischen *πέμπειν* herleiten, das bedeutet schleudern, werfen. Demnach würde die einfache Spritze schon als Pumpe anzusehen sein, und ihre technische Verwendung wird sie zweifellos zuerst als Feuerspritze gefunden haben, dazu bestimmt, einen freien Wasserstrahl in größerem Abstände zu dem Brandherde zu leiten. So verstanden muß man die Pumpe schon in das höhere Altertum zurückführen. Jedenfalls war sie in dieser einfachen Form den alten Aegyptern bekannt, und von ihrer Erfindung wird man insofern nicht reden können, als sie zu den einfachen Werkzeugen gehört, wie Hammer, Spaten, Pflug, Messer, deren Ursprung nicht an einer einzelnen Stelle zu suchen ist. Dafür spricht schon ihre Verbreitung als Spielzeug. Die männliche Dorfjugend fertigt sich im Sommer mit Vorliebe aus Hollunderrohr pumpenartige Geräte, die im Ansehen den berühmten Schlüsselbüchsen kaum nachstehen, und, jenachdem pneumatisch-akustische oder hydraulische Wirkungen beabsichtigt sind, oben mit dichtem Pfropfen oder mit verengender Spitze versehen werden. Die sozialen Verhältnisse nötigen zum Erwerbe des Hollunderholzstückes auf ungesetzlichem Wege, denn ein recht geeigneter Hollunderbaum ist immer selten. Aber trotz der Gefahren, die mit der Beschaffung des Stückes verbunden sind und trotz der oft üblen Folgen beim Gebrauche der kunstvoll gefertigten Waffe, entstehen doch immer wieder neue, und so wird es wohl überall gewesen sein und noch sein, wo die Natur für ein rohrartiges Gewächs sorgt. Das Spiel mit Beweglichem und nun gar mit Wasser hat auch nicht nur für die Jugend seinen

Reiz und wird oft genug den unbewußten Keim einer Erfindung bilden.

Nun liegt aber die Unbequemlichkeit einer einfachen Spritze für ernsthafte technische Zwecke auf der Hand. Die Mündung muß beim Vollsaugen immer wieder nach unten gekehrt werden, und wenn die jedesmalige Wassermenge nicht gar zu unbedeutend sein soll, so wird das ganze Gerät unhandlich. Da nun hat der als eigentliche Erfindung der Kolbenpumpe zu betrachtende Fortschritt eingesetzt, der dem Ktesibios zugeschrieben wird und etwa um 150 v. Chr. gemacht sein soll, nämlich die Kolbenpumpe mit selbsttätigen Ventilen, die bei unveränderter Lage der Pumpe durch bloßes Hin- und Herbewegen des Kolbens oder Stempels das abwechselnde Einsaugen und Ausstoßen der Füllung vor sich gehen lassen.

Das Entscheidende bei dieser Erfindung war offenbar die Anwendung von *zwei* Oeffnungen am Ende des Pumpenzylinders und das selbsttätige Verschließen je einer davon beim Hin- und Hergange des Kolbens, derart, daß Eintritt und Austritt des Wassers getrennt sind. Für die Abschlußorgane selbst aber, die Ventile, bietet die Natur so viele Vorbilder, daß ihre Form schon vorlag, als der Gedanke ihrer eigentümlichen Verwendung in der Pumpe entstand. Eigentlich hat die Natur freilich schon in sehr vollendeter Form eine Pumpe geschaffen, nämlich im Herzen der höheren Lebewesen, mit regelrechten Ventilklappen, die wechselweise in Wirkung treten, mit dem Unterschiede nur, daß statt des starren Pumpenkörpers ein elastischer Muskelsack dient, der sich rythmisch ausdehnt und zusammenzieht. Aber dieses Kunstwerk der Natur war zur Zeit des Ktesibios weder im Ganzen noch im Einzelnen so erkannt, daß es als Vorbild hätte wirken können. Dagegen bietet der Mund, die sanft zugehaltene Nase, die von frischen Stengeln abgezogenen und an der einen Seite flach gedrückten Baströhrchen und zahlreiche andre Gegenstände an uns und außer uns so vielfache Gelegenheit zur unwillkürlichen Beobachtung einer Ventilwirkung, daß es wohl nur darauf angekommen ist, die technisch zweckmäßige Form zu finden. Diese war früher und später bei allen Ausführungen, denen nur einfachere Mittel zu Gebote standen, die durch eine Scheibe versteifte und beschwerte Lederklappe.

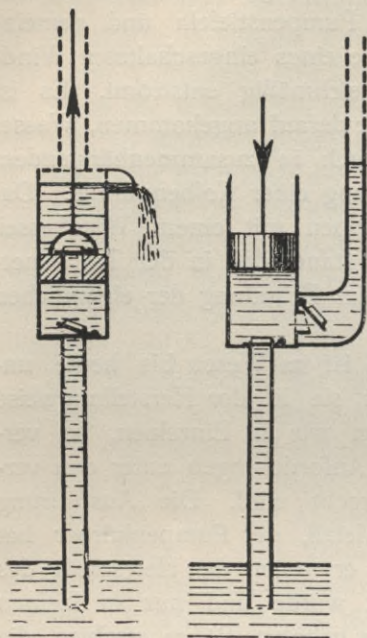
Die Erfindung des Ktesibios ist von Vitruv mitgeteilt, freilich ohne Zeichnung. Nach dem genauen Texte kann man aber mit

ziemlicher Sicherheit eine zeichnerische Ergänzung herstellen, und die zeigt dann in überraschender Vollständigkeit schematisch eine Feuerspritze unserer Tage, mit zwei Pumpenstiefeln und gemeinschaftlichem Druckrohre, dem infolge eines eingeschalteten Windkessels das Wasser einigermaßen gleichmäßig entströmt. Es ist Ktesibios also, nach Vitruv, nicht nur darauf angekommen, Wasser „sehr hoch“ zu heben, sondern auch in zusammenhängendem Strahle, trotz der absatzweisen Wirkung einer Kolbenpumpe. Daher die Anordnung von zwei Pumpen mit einem Windkessel. Daraus folgt aber, wie zu vermuten stand, daß in der Tat Feuerlöschzwecke den kräftigsten Anstoß zur Erfindung der eigentlichen Kolbenpumpe gegeben haben.

Die Kolbenpumpe des Ktesibios ist im Wesen bis heute unverändert geblieben, aber freilich ist sie in der Herstellungsweise und in der Formgebung, im Ganzen wie im Einzelnen, so vervollkommnet worden, daß sie allen Anforderungen unter den verschiedensten Arbeitbedingungen gerecht wird. Die Ausführung geschieht jetzt natürlich immer in Metall, der Pumpenkörper hat immer zylindrische Form, während er unter der Herrschaft des Holzes kastenartig zusammengesetzt wurde und nur in kleinen Exemplaren als in einen Baumstamm gebohrte Röhre erschien, die klassische Form der Brunnenpumpe, die nun auch schon zu den Seltenheiten gehört.

Es sind zwar zahlreiche Formen der Kolbenpumpe bekannt geworden, die besonderen Anwendungsfällen angepaßt sind, oder auch nur dem Streben nach „Andersmachen“ ihr Dasein verdanken, abweichende Formen, sowohl hinsichtlich der Pumpe selbst wie ihres Antriebmechanismus. Immer aber kommt es darauf an, einen Raum, den Pumpenstiefel oder Pumpenzylinder, durch Verschieben des möglichst dicht schließenden Kolbens zum Einsaugen des Wassers zu vergrößern und danach ihn wieder zu verkleinern, um das Wasser entgegen der widerstehenden Wassersäule hinauszudrücken. Die von der Pumpe dabei für jedes Spiel geforderte, von dem Motor aufzuwendende Arbeit setzt sich immer zusammen aus der gehobenen Wassermenge und der Hubhöhe. Hält man das fest, so ist die Wirkungsweise auch der scheinbar weniger einfachen Pumpenanordnungen leicht zu verstehen. Wir werden uns deshalb mit der Betrachtung der Grundform und ihrer Einzelheiten begnügen können.

Es ist vielfach üblich, Saugpumpen und Druckpumpen zu unterscheiden, aber diese Einteilung ist nur irreführend. Unter Saugpumpen versteht man dabei Pumpen nach der schematischen



Figur 73.

Figur 74.

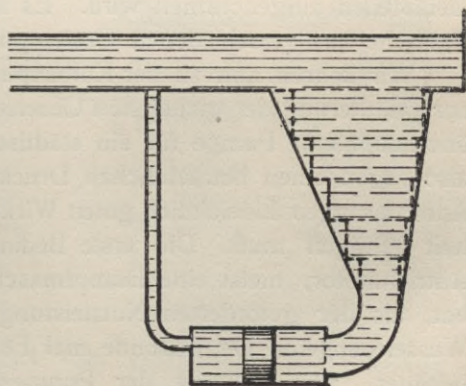
Figur 73, unter Druckpumpen solche nach Figur 74. Die ersteren, die das eine Ventil im Boden, das andere im Kolben haben, werden allerdings meist für nur geringe Förderhöhe gebraucht und diese wird fast ganz durch den Saughub überwunden. Man braucht sich den Pumpenzylinder aber nur durch ein aufgesetztes Druckrohr (in der Figur punktiert) nach oben verlängert zu denken, um eine Pumpe für größere Druckhöhen, also eine Druckpumpe zu erhalten. Die ganze bauliche Anordnung der Pumpe wird allerdings wesentlich dadurch beeinflusst, ob man einen Ventilkolben

oder einen nicht durchbrochenen verwendet, und eine Unterscheidung der Pumpen in dieser Hinsicht hat einen gewissen praktischen Wert, insofern dadurch für den Fachmann gleich bestimmte Gebrauchweisen festgelegt sind. Im Uebrigen aber gelten die wesentlichsten Gesetze gleichmäßig für beide Pumpenformen, und wir beschränken uns deshalb im Folgenden auf die wichtigste, die einen vollen Kolben benutzt.

*

Ehe wir weitergehen, wird es gut sein, eines berühmten Gesetzes der Hydraulik zu gedenken, dessen wir eigentlich schon bei den Wassersäulenmaschinen benötigt hätten, in Wirklichkeit aber auch benutzt haben, ohne es besonders erwähnen zu müssen. Das Gesetz ist unter dem Namen „hydrostatisches Paradoxon“ bekannt und besagt, daß der Druck einer Flüssigkeit auf eine

Gefäßwand nur von dem spezifischen Gewichte der Flüssigkeit, von ihrer senkrechten Höhe und von der Größe der Gefäßwand abhängt. Ob diese letztere dabei horizontal liegt, oder beliebig geneigt, ist gleichgültig, solange wenigstens die Ausdehnung der nicht horizontalen Fläche klein ist gegenüber der Höhe der Flüssigkeitssäule. Im anderen Falle kann nicht von einer einzigen Druckhöhe gesprochen werden, sondern verschiedenen, den einzelnen Flächenteilchen zukommenden. Der Grund für die Unabhängigkeit des Druckes von der Stellung der gedrückten Gefäßfläche liegt in der allseitigen Fortpflanzung des Druckes in Flüssigkeiten, ihre leicht verschieblichen Teilchen stützen sich nach allen Richtungen gegeneinander, wie es in *einer* Richtung etwa geschichtete Platten beim Zusammenpressen tun. — Nach dem hydrostatischen Paradoxon soll also der Druck auf ein Flächenstück, das wir der Anschaulichkeit wegen hier horizontal annehmen wollen, immer gleich sein dem Gewichte der senkrecht von ihm aufsteigenden Flüssigkeitssäule von überall demselben Querschnitte, gleichgültig wie in Wirklichkeit die Querschnitte der Säule wechseln, wie groß also in Wirklichkeit das Gewicht der Säule auch ist. In dieser Form klingt das Gesetz freilich paradox genug, das tritt aber kaum hervor, wenn man möglichst den Begriff der Arbeit verwendet, wie wir früher getan haben. Mit diesem Begriffe ist auch der Nachweis des Gesetzes leicht zu führen. Man denke sich (Figur 75) vom Boden eines größeren Behälters zwei Röhren von sehr ungleichem Querschnitte ausgehen und auf je einer Seite eines Zylinders mit leicht verschiebbarem Kolben enden. Das wirkliche Gewicht der Flüssigkeit in den beiden Röhren ist nun ersichtlich



Figur 75.

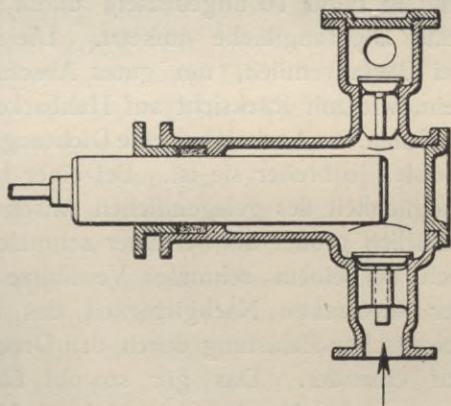
auch sehr verschieden. Wäre aber der Druck auf den Kolben von seiten der weiteren Röhre größer, so müßte der Kolben sich nach der Seite der engeren Röhre in Bewegung setzen. Damit müßte er aber eine Flüssigkeitsmenge in den oberen Behälter heben, die

genau gleich der auf der andern Seite aus dem Behälter zufließenden wäre. Der Zustand des Behälters würde dadurch nicht verändert, und wäre die vom Kolben bei der Bewegung geleistete Arbeit nicht genau gleich der erhaltenen, so würde Arbeit geleistet oder verschwunden sein ohne irgend ein Aequivalent. Sind aber die Arbeiten gleich, so müssen auch infolge des gleichen Verschiebungsweges für beide Kolbenseiten die Drucke gleich sein. — In einfacher Weise läßt sich übrigens das Gesetz auch erhalten durch Betrachtung kommunizierender Röhren, in denen die Flüssigkeit immer gleich hochstehen muß trotz verschiedener Weite der Röhren. In dieser Weise hat Galilei das Gesetz behandelt. Eine unmittelbare Versinnlichung des Gesetzes ergibt sich endlich durch Betrachtung der Druckrichtungen an den Gefäßwänden, die immer senkrecht zu diesen sein müssen, weil andernfalls eine Verschiebung der Flüssigkeit eintreten würde, während sie doch in Ruhe sein soll. Man sieht dann beispielweise leicht, wie in dem konischen Rohre rechts die Flüssigkeit teils von den Gefäßwänden, teils von dem Kolben getragen wird. Diese Vorstellung wird noch erleichtert, wenn man sich die Begrenzungen des Rohres treppenförmig denkt, wie punktiert angedeutet. Es bleibt dann für den Kolben eben nur der Teil zu tragen, der nicht von den seitlich einspringenden Gefäßteilen aufgenommen wird. Es ist immer nützlich, dieselbe Tatsache aus verschiedenen Gesichtspunkten zu betrachten.

Wir kehren nun zu der Kolbenpumpe zurück und wollen uns zur Erläuterung der wichtigsten Gesetze für diese Maschinengattung überhaupt eine Pumpe für ein städtisches Wasserwerk denken, die also gegen einen beträchtlichen Druck zu arbeiten hat und hohen Anforderungen hinsichtlich guten Wirkungsgrades und Betriebsicherheit genügen muß. Die erste Bedingung drückt aus, daß der Antriebmotor, meist eine Dampfmaschine, wenig mehr zu leisten hat, als der geforderten Nutzleistung entspricht, gegeben durch Wassermenge in der Sekunde mal Förderhöhe nach dem Wasserbehälter. Die Reibung der Pumpenteile und die Reibung des Wassers in der Pumpe müssen also gering sein, Wasserwirbel so gut als möglich vermieden werden, ebenso Verluste durch undichte Organe. Die Widerstände des Wassers in dem oft sehr langen Druckrohre bleiben für die Pumpe selbst natürlich außer Betracht. Die Forderung der Betriebsicherheit stellt ferner bei Wasserpumpen ganz andere Bedingungen in der Anordnung, als

bei Kolbenmaschinen für Dampf oder Gase. Das angesaugte Wasser enthält nämlich meist viele kleine mineralische Körper, mitunter auch größere, die auf die Metallteile wie ein Schleifmittel wirken und deshalb bei dauernd tätigen, gegen hohen Druck arbeitenden Pumpen Kolben mit federnder Metalldichtung verbieten, da diese bald durch Furchen und Risse mangelhaft werden würden. Schon das bloße Vorbeigleiten nicht ganz reinen Wassers an blanken Metallflächen läßt nach einiger Zeit die Wirkung der mitgerissenen festen Teilchen erkennen. Die Kolbenliderung muß deshalb weich und nachstellbar sein, und dem genügt ein an die Gleitfläche gepreßter Faserstoff, enthalten in einer Stopfbüchse, die der Maschinenbau in zahlreichen Formen verwendet. Der Pumpenkolben ist nun oft selbst zu einer Stopfbüchse ausgebildet, wie auch die Dampfkolben der früheren Zeit. Die leichtere Zugänglichkeit und bessere Beobachtung hat aber für Pumpen der hier betrachteten Art eine Anordnung gebräuchlich gemacht, bei der die Stopfbüchse feststeht.

Der Aufbau einer solchen Pumpe ist in Figur 76 schematisch dargestellt. Der hier als längerer Zylinder erscheinende, sogenannte Tauchkolben, an dessen Außenseite ein entsprechender Teil des Motors anzugreifen hat, ist von etwas geringerem Durchmesser als der Pumpenkörper und gleitet in der feststehenden Stopfbüchse, deren ringförmiger Hohlraum sorgfältig mit Hanf- oder Baumwollzöpfen verpackt ist und durch den mit Schrauben nachstellbaren Deckel zum Festpressen der Packung nach Bedarf verkleinert werden kann. Es wird nun immer leicht möglich sein, die Packung, die sich allmählich abnutzt und von Zeit zu Zeit erneuert werden muß, gerade so fest anzuziehen, daß beim Druckhube des Kolbens kein Wasser durchtritt. Dann erfährt der Kolben auch bei seiner Bewegung die geringste Reibung. — Es mag hier eine Bemerkung eingeschaltet sein. Man wird vielleicht befremdlich finden, wenn hier gelegentlich einer Einzelheit



Figur 76.

so viel Worte gewidmet werden. Das sind aber immer nur ganz wichtige, für den Aufbau und den Betrieb der Maschine bestimmende Einzelheiten. Diese zweckdienlich zu formen, bildet die hauptsächlichste Tätigkeit des Technikers, die bei oberflächlichem Hinsehen leicht als untergeordnet erscheinen kann. Aehnlich verhält es sich aber auf jedem andern Gebiete des Wissens und Könnens. Friedrichs d. Gr. Wort „Aimez donc les détails . . .“ gilt nicht nur in militärischen Dingen. —

Am geschlossenen Ende des Pumpenkörpers sind Saug- und Druckventil gelagert, die der Grundform nach Kegelventile sind, wie sie in der Anwendung auf Dampfmaschinen besprochen wurden (Motoren S. 190). Da derartige Ventile früher immer tatsächlich kegelförmig waren, so ist für den beweglichen Teil allgemein die Bezeichnung Ventilkegel gebräuchlich, wiewohl die dichtende Sitzfläche keineswegs kegelförmig sein muß, vielmehr häufig eben ist. Wesentlich ist nur, daß der Ventilkegel durch einen Stiel oder durch Flügel gut geführt wird (beide Führungarten sind in Figur 76 angedeutet), damit er sich immer genau auf die feste Dichtungfläche aufsetzt. Die Dichtungflächen selbst sollen bei Metallventilen, um gutes Abschließen zu erzielen, so schmal sein, wie mit Rücksicht auf Haltbarkeit verträglich ist. Das kann auffallen, weil scheinbar eine Dichtungfläche um so besser schließen müßte, je breiter sie ist. Bei einer breiten Sitzfläche ist aber die Möglichkeit des gelegentlichen Ansetzens eines festen Körperchens natürlich größer als bei einer schmalen, vor Allem aber schmiegen sich bei einem schmalen Ventilsitze die Dichtungflächen infolge der elastischen Nachgiebigkeit des Baustoffes und der höheren spezifischen Belastung durch den Druck auf den Ventilkegel inniger auf einander. Das gilt sowohl für die ganz in Metall, meist Bronze oder Messing, ausgeführten Ventile, wie für die, bei nicht zu hohen Drucken häufig mit einer Zwischenlage von Leder versehenen, wiewohl natürlich im letzteren Falle die Dichtungflächen viel breiter gewählt werden müssen.

Die Ventile, in der schematischen Figur nur als sogenannte einfache angedeutet, verlangen einen erheblichen Raum, und die Ventilgehäuse erscheinen deshalb immer als sehr massige Ansätze am Pumpenkörper. Bei der ganzen Ausbildung der Pumpe ist sorgfältig Rücksicht darauf zu nehmen, daß die mit dem Wasser angesaugte Luft sich nicht im Pumpenkörper ansammeln kann,

sondern beim Druckhube wieder durch das Druckventil ausgepreßt wird. Die Anfügung der Ventilgehäuse an den Pumpenkörper ist konstruktiv nur unter Belassung großer „schädlicher Räume“ durchzuführen, d. h. bei der inneren Endstellung füllt der Kolben den ganzen Hohlraum bei Weitem nicht aus. Solche Pumpen müssen deshalb vor dem Ingangsetzen mit Wasser gefüllt werden, denn sonst würde die beim Saughube sich ausdehnende Luft das Ansaugen des Wassers unter Umständen ganz verhindern. Das bezieht sich auch auf den Inhalt des Saugrohres, das zum Verhindern der allmählichen Entleerung bei stillstehender Pumpe unten mit einem besonderen Ventile, dem Fußventile, versehen wird.

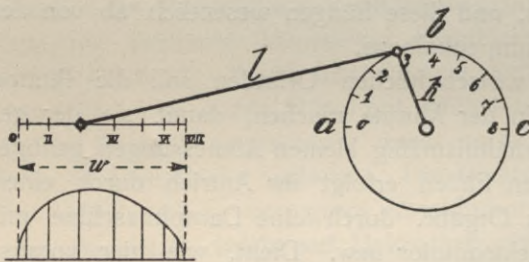
Die Arbeitsweise der Pumpe und die daraus sich ergebenden besonderen Bedingungen ergeben sich aus der Betrachtung der Vorgänge im Einzelnen, und diese hängen wesentlich ab von der Geschwindigkeit des Pumpenkolbens.

Aus allgemeinen wirtschaftlichen Gründen soll die Pumpe möglichst viele Spiele in der Minute machen, damit sie der gestellten Aufgabe bei verhältnismäßig kleinen Abmessungen genüge. In den weitaus meisten Fällen erfolgt ihr Antrieb durch einen Motor mit rotierendem Organe, durch eine Dampfmaschine mit Schwungrad, einen Elektromotor usw. Dient, wie hier vorausgesetzt, der Motor ausschließlich dem Pumpenantriebe, so erscheint wohl bei einem Kolbenmotor das Schwungrad entbehrlich, da die Bewegung des Motorkolbens durch möglichst wenig Zwischenglieder, wenn zugänglich unmittelbar durch die Kolbenstangen auf den Pumpenkolben übertragen wird. Schwungradlose Dampfpumpen sind früher auch vielfach ausgeführt, die neuere Zeit hat diese Form aber mehr auf kleinere oder besonderen Zwecken dienende Pumpen beschränkt, weil der allerdings großen Vereinfachung der ganzen Pumpenanlage die Forderung der Dampfökonomie gegenübersteht. Die bei hoher Dampfexpansion in weiten Grenzen schwankende Kolbenkraft verträgt sich schlecht mit dem gleichmäßigeren Widerstande des Pumpenkolbens. Der bei Anwendung eines Schwungrades erforderliche Kurbelmechanismus gibt außerdem eine sichere und sanft wirkende Hubbegrenzung für den Kolben. Da nun ohnehin Steigerung der Geschwindigkeit unter der sich stetig ausbreitenden Herrschaft des Elektromotors noch mehr als früher angestrebt wird, so ist der Antrieb der Kolbenpumpen unter Mithülfe eines Schwungrades oder allgemein eines

so wirkenden Drehkörpers die Regel, und der einfacheren Behandlung wegen sei nun auch noch die Drehgeschwindigkeit als gleichmäßig angenommen. Das trifft zwar genau für keinen solchen Drehkörper zu, im Gegenteil zeigen die Schwungräder von Dampfpumpen meist ohne Weiteres erkennbare starke Abweichungen, entsprechend der Wechselwirkung der stetig veränderlichen treibenden und widerstehenden Kräfte. Bei der vereinfachenden Annahme der gleichförmigen Drehgeschwindigkeit verlieren aber die folgenden Betrachtungen nicht an grundsätzlicher Geltung.

Der gleichmäßigen Drehung des Schwungrades entspricht die hin- und hergehende Bewegung des Pumpenkolbens, dessen Geschwindigkeit in den Endlagen Null ist und zwischen ihnen periodisch zunimmt und abnimmt. Ein genaueres Bild von dem steten

Wechsel der Geschwindigkeit erhält man leicht auf graphischem Wege nach Figur 77, der schematischen Darstellung des Kurbelgetriebes. Darin bedeutet k die Kurbel, l die daran angreifende Lenkstange



Figur 77.

und w den geradlinigen Weg des andern Endes der Lenkstange, gleichbedeutend mit dem Wege des Pumpenkolbens. Während nun der Kurbelzapfen gleichmäßig den Halbkreis $a-b-c$ beschreibt, die Wegstücke 1—8 also in gleichen Zeitabschnitten durchmißt, befindet sich das geradlinig geführte Ende der Lenkstange auf seinem Wege nach denselben Zeitabschnitten in den Punkten I bis VIII seiner Bahn, die leicht mit dem die Länge der Kurbelstange fassenden Zirkel zu finden ist. Diese Punkte I bis VIII sind aber nicht gleichmäßig auf der Linie verteilt, wie die entsprechenden Punkte 1 bis 8 auf dem Kurbelkreise, und das ist ein Ausdruck für die ungleichförmige Geschwindigkeit des Kolbens, denn in gleichen Zeitabschnitten werden ungleiche Wege zurückgelegt. Und da man nun aus den gegebenen Verhältnissen ohne Weiteres den Wert der gleichförmigen Geschwindigkeit des Kurbelzapfens auf seiner Kreisbahn finden kann, so ergibt der Vergleich der Abstände zweier der Punkte I bis VIII mit dem gleichmäßigen Abstände der Punkte 1 bis 8 von einander, welche Geschwindigkeit

der Kolben in dem entsprechenden Bahnabschnitte hat. Das gilt zwar nur angenähert, weil sich ja die Geschwindigkeit des Kolbens stetig ändert, aber je kleiner man die Zeitabschnitte bzw. die Abteilungen auf dem Kurbelkreise wählt, um so genauer erhält man die Kolbengeschwindigkeit in einem beliebigen Bahnpunkte, und dem wirklichen Werte der Geschwindigkeit kann man durch immer feinere Teilung so nahe kommen, als man nur will. — Auf solcher Betrachtungsweise beruht die von Leibniz und Newton geschaffene Differentialrechnung, die absolut genaue Werte der veränderlichen Größen ermittelt und zwar viel schneller, als es nach der beschriebenen graphischen Methode angenähert möglich ist. Dieser bleibt trotzdem der Vorzug großer Anschaulichkeit. Davon gibt die Kurve unterhalb des Kolbenweges einen Beweis. Wenn man nämlich die oben entwickelten angenäherten Geschwindigkeiten in irgend einem Maßstabe als Senkrechte auf der Grundlinie aufträgt, so ist der ihre oberen Punkte verbindende Kurvenzug ein Bild der Kolbengeschwindigkeiten, und für jeden Punkt des Kolbenweges kann man ohne Weiteres die zugehörige Geschwindigkeit abgreifen.

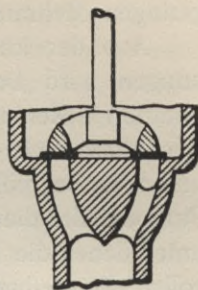
Auf der so gewonnenen Grundlage sind nun die Vorgänge in der Pumpe leicht zu verfolgen. Wir beginnen mit dem Saughube. Der nach außen gehende Kolben würde, da das Wasser praktisch ein unveränderliches Volumen hat, hinter sich ein Vakuum lassen, wenn nicht durch das Saugventil Wasser nachströmen könnte. Das Aufsteigen des Wassers im Saugrohre entgegen seiner Schwere besorgt der äußere Luftdruck. Denn das Luftmeer, so fein sein Stoff auch ist, lastet auf der Erde, wie jede andre Flüssigkeit auf der sie tragenden Unterlage. Das hat Torricelli 1643 erkannt aus der beschränkten Saughöhe der Pumpen und durch Versuche mit Flüssigkeiten verschiedenen spezifischen Gewichtes bestätigt. Der Luftdruck kann höchstens einer Wassersäule von sehr nahe 10 m das Gleichgewicht halten, beim Pumpenbetriebe wird aber dieses Maß von vornherein erheblich beschränkt. Erstens enthält das angesaugte Wasser immer mehr oder weniger Luft, in einer Menge, die mit dem Drucke steigt und fällt. Beim Ansaugen des Wassers wird also ein Teil der absorbierten Luft frei werden, ein Vorgang, den wir unter andern Druckverhältnissen an unsern kohlensäurehaltigen Getränken beobachten können. Weiter entspricht jeder Temperatur ein bestimmter Dampfdruck (Motoren S. 140), und endlich kann die Stopfbüchse das Durchschleichen von Luft

nie vollständig hindern. Aus diesen Gründen kann beim Saughube ein vollständiges Vakuum im Pumpenraume nicht entstehen. Nun soll aber das Wasser nicht nur überhaupt in die Pumpe gelangen, sondern mit einer Geschwindigkeit, die der des Kolbens entspricht. Das vorher ruhende Wasser muß deshalb von einer Kraft beschleunigt durch das Saugrohr stürzen, und diese Kraft kann nur der Ueberschuß des Luftdruckes über das unvollkommene Vakuum der Pumpe sein, der auch die verschiedentlichen Widerstände der Wasserbewegung überwinden muß. Man wird deshalb die Saughöhe der Pumpe tunlichst beschränken, denn für die ganze Leistung der Pumpe ist es natürlich gleichgültig, ob ein mehr oder weniger großer Teil davon auf den Saughub entfällt, und muß außerdem für ein genügend weites Saugrohr sorgen.

Sind aber die Verhältnisse nicht richtig gewählt, und kann das angesaugte Wasser dem Pumpenkolben in der Gegend seiner größeren Geschwindigkeit nicht folgen, so reißt die Wassersäule ab, es bildet sich an einer oder mehreren Stellen ein Vacuum, das sich bei Verminderung der Kolbengeschwindigkeit gegen Ende des Saughubes zwar wieder ausfüllt, aber unter Umständen stoßen dabei die getrennten Teile der im Saugrohre und Pumpenraume befindlichen Wassermassen heftig aufeinander, und hammerschlagartiges Getöse und Erzitterungen geben Kunde von verschwendeter Energie und von Gefährdung der ganzen Pmpenanlage. Solche heftigen Stöße kann man im Kleinen leicht beobachten an Quecksilberbarometern, die man bei senkrechter Haltung auf- und abbewegt.

Wie sich bei den Vorgängen das Saugventil verhält, war bisher noch ganz außer Acht gelassen. Es muß natürlich vor allem genügenden Durchflußquerschnitt haben, denn sonst könnte ja die reichliche Bemessung des Saugrohres nichts helfen. Wäre nun bei dem einfachen Ventile der Durchmesser gleich dem des erforderlichen Saugrohres, so müßte sich der Ventilkegel mindestens um ein Viertel dieses Durchmessers heben, damit das den Ventilkegel allseitig umfließende Wasser denselben Durchgangsquerschnitt fände, wie im Saugrohre. Das ist sehr leicht zu berechnen. Der Ventilhub würde dann schon bei Pumpen von einiger Größe mehrere Zentimeter betragen. Während nun der Ventilkegel bei dem ganz langsam beginnenden, gegen die Mitte an Geschwindigkeit zunehmenden Saughube dem Wasserstrom leicht nachgeben

kann, muß er sich frühzeitig vor Ende des Hubes, entgegen dem zwar auch nachlassenden, aber doch immer noch bestehenden Wasserströme wieder senken, damit er beim Hubwechsel wieder auf seinem Sitze ruht. Denn andernfalls würde wieder Wasser durch das Saugventil zurücktreten, und der nun umgekehrte Wasserstrom würde den Ventilkegel heftig auf den Sitz schleudern. Dadurch entsteht das gefürchtete Schlagen der Ventile, das offenbar nur durch sorgfältige Bemessung der Einzelheiten vermieden werden kann, wozu vor allem gehört, den Ventilhub tunlichst zu verkleinern. Damit aber trotzdem der genügende Durchflußweg erhalten bleibt, und da man diesen nicht durch beliebige Vergrößerung des Ventildurchmessers herstellen kann, so muß man bei größeren Pumpen von einfachen Ventilen überhaupt absehen und zusammengesetztere Formen verwenden, deren gebräuchlichstes Element das Ringventil ist (Figur 78). Dieses bietet ersichtlich beim Lüften fast den doppelten Durchflußweg wie das einfache und wird bei größeren Pumpen in mehrfacher Wiederholung verwendet. Solche umfangreichen Ventilbauten bilden ein kennzeichnendes Merkmal aller größeren Pumpenanlagen.



Figur 78.

Wie man übrigens das Schlagen des Saugventils ohne Rücksicht auf die andern Bedingungen verhindern kann, ist aus dem Vorstehenden leicht zu folgern, nämlich durch künstliches Beschweren des sonst verhältnismäßig leichten Ventilkegels. Dann kann dieser schneller in dem aufsteigenden Wasserströme fallen, und ein rechtzeitiger Schluß des Ventiles ist damit immer zu erzielen, freilich immer nur auf Kosten der Saugkraft, weil der Durchflußwiderstand sich entsprechend vergrößert, sodaß beim Saugventile dieses Mittel überhaupt nur bis zu einer gewissen Grenze anwendbar ist. Mit besserem Erfolge noch als durch Gewichtvergrößerung des Ventilkegels wird sein schnellerer Schluß durch Federkraft bewirkt, weil dabei die träge Ventilmasse nicht wächst, und deshalb eine größere Geschwindigkeit erzielt werden kann, als durch den freien Fall des beschwerten Kegels. Federbelastung muß ohnehin angewendet werden, wenn ausnahmeweise bei Wasserpumpen die Ventile nicht in der Senkrechten beweglich angeordnet werden können, und wegen ihrer sicheren Wirkung sind leichte

Ventilkegel mit richtig bemessenen Federn bei Luftpumpen überhaupt die Regel, wie weiterhin noch näher erwähnt werden wird.

Leichter als das Saugventil kann immer das Druckventil der Wasserpumpen behandelt werden, wiewohl die Anforderungen an Weite und Hub hinsichtlich geringer Reibungsverluste dieselben bleiben. Die künstliche Belastung des Ventils durch Gewicht oder Feder ist aber unbegrenzt, auf Kosten des Wirkungsgrades kann immer ein stoßfreies Arbeiten des Ventiles erzielt werden, und meist verursacht die etwa erforderliche Mehrbelastung nur einen geringen Mehraufwand von Motorleistung.

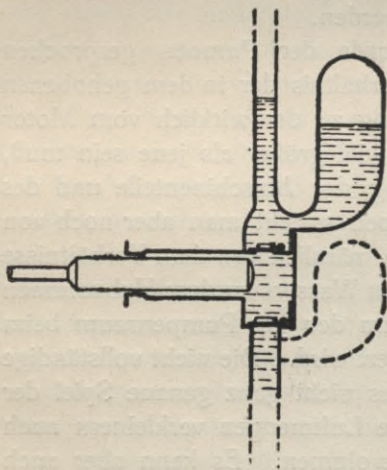
Aus der kurzen Betrachtung der hauptsächlichsten Erscheinungen wird hervorgehen, daß der Bau einer guten größeren Pumpe viel Kenntnisse und Erfahrungen voraussetzt, wenn ärgerliche Nachülfen nach dem ersten Ingangsetzen vermieden werden sollen, und es ist begreiflich, daß für die am schwierigsten zu behandelnden Pumpenteile, die Ventile, zahlreiche Verbesserungen versucht sind, unter denen die aussichtvollsten dahin zielen, die Ventile sich nicht vollständig selbst zu überlassen, sondern teilweise unter die Herrschaft von starren Organen zu bringen, wie die Steuerventile von Dampfmaschinen. Denkt man sich nämlich den freien Hub eines Ventiles durch einen Anschlag auf wenige Millimeter beschränkt, den Anschlag aber selbst von der Motorwelle aus so bewegt, daß er dem Ventilkegel im ersten Teile des Saughubes auf eine größere Strecke nachgibt, ihn aber gegen Ende des Saughubes wieder bis nahe auf den Sitz niederdrückt, so kann man offenbar den Ventilhub viel größer annehmen als bei ganz freiem Ventile, trotzdem wird aber der vollständige Schluß des Ventiles selbsttätig vor sich gehen. Der naheliegende Vorzug dieser Einrichtung besteht in der Anwendung einfacher Ventile geringer Weite ohne deren Unzuträglichkeiten, die sie sonst für größere Pumpen ausschließen. Daß man aber die Pumpenventile nicht vollständig zwangsläufig steuert, wie bei Dampfmaschinen, sondern ihnen wenigstens teilweise ihre Freiheit beläßt, ergibt sich aus der mangelnden Nachgibigkeit des Wassers. Würde nämlich das Druckventil nur ganz wenig vor dem Hubende des Kolbens geschlossen, so würde mindestens ein heftiger Stoß gegen das im Pumpenraume abgeschlossene Wasser erfolgen. Aehnliches würde eintreten bei zu frühem Schließen des Saugventiles, und andre, nie ganz zu vermeidende Ungenauigkeiten der Steuerbewegung würden

wenigstens unnötige Verluste verursachen. Die ausgleichende Wirkung der selbsttätigen Ventile ist deshalb nicht zu entbehren, wie andererseits das Hubventil sich auch hinsichtlich der Dauer als geeignetstes Abschlußorgan für Wasserpumpen bewährt hat, während metallene Gleitflächen, aus schon früher erwähnten Gründen, weniger zweckmäßig sind. Ventillose Wasserpumpen, wie man sie etwa erhält durch Umkehren des Wassermotors nach Schmid (Motoren (S. 82), die aber meist ähnlich den sogenannten rotierenden Dampfmaschinen ausgeführt werden, dienen in kleinen Abmessungen immer nur nebensächlichen Zwecken, wo weder große Druckhöhen zu überwinden sind, noch auf guten Wirkungsgrad Wert gelegt wird. Allerdings sind jetzt wieder Bestrebungen erkennbar, auch diese lange Zeit wenig beachtete Pumpenform sorgfältiger auszubilden, da sie sich für schnellen Gang in unmittelbarem Anschlusse an einen Elektromotor eignen. Ob aber, trotz einzelner achtbarer Fortschritte, auch größere Ausführungen dieses Systemes aufkommen werden, darf bezweifelt werden.

Wenn bisher vom Wirkungsgrade der Pumpen gesprochen wurde, so war damit immer das Verhältnis der in dem gehobenen Wasser nutzbar gemachten Leistung zu der wirklich vom Motor aufgewendeten gemeint, die um so viel größer als jene sein muß, als zum Ueberwinden der Reibung der Maschinenteile und des Wassers erforderlich ist. Bei Pumpen spricht man aber noch von einem volumetrischen Wirkungsgrade, nämlich von dem Verhältnisse des mit jedem Kolbenhube gehobenen Wassers zu dem Hubvolumen der Pumpe, d. h. zu dem Raum, um den der Pumpenraum beim Kolbenspiele vergrößert und verkleinert wird. Die nicht vollständige Dichtung der beweglichen Teile, das nicht ganz genaue Spiel der Ventile und geringe eingeschlichene Luftmengen verkleinern auch bei sonst guten Pumpen das Nutzvolumen. Es kann aber auch der sonderbare Fall eintreten, daß eine Pumpe mehr Wasser fördert, als ihrem Hubvolumen entspricht. Wenn nämlich bei geringer Saughöhe und auch verhältnismäßig kleiner Druckhöhe das Saugrohr um eine reichliche Länge nach der Seite zu führen ist, wenn also jedesmal beim Ansaugen eine lange Wassersäule in Bewegung gesetzt wird, dann kann ihre Bewegungsenergie, ihre „Wucht“, wie man jetzt sehr bezeichnend oft sagt, groß genug werden, um gegen Ende des Saughubes, wenn der Kolben schon sehr langsam geht, eine die Druckwassersäule überwindende Pressung auf den Pumpen-

inhalt auszuüben, sodaß schon Wasser durch das Druckventil tritt, ehe noch der Kolben seine Rückwärtsbewegung begonnen hat, während zu der damit schon gehobenen Wassermenge noch die nachher vom eindringenden Kolben geförderte tritt. An mechanischer Leistung wird dadurch selbstverständlich nichts gespart, denn es wird ja nur mehr Leistung beim Saughube aufgewendet, als die geringe Saughöhe an sich fordern würde. Ersichtlich kann aber auch eine lange Druckleitung eine ähnliche Wirkung haben, indem sie schon vor Ende des Druckhubes durch ihre Wucht anfängt, Wasser nachzusaugen. Die nur unter besonderen Umständen bemerkbare Erscheinung durfte hier noch erwähnt werden, weil sie den Einblick in die Vorgänge bei Wasserpumpen begünstigt, denn Ansätze dazu sind immer vorhanden, dank der absatzweisen Bewegung des Pumpenkolbens.

Diese absatzweise Bewegung ist indessen in den meisten Fällen nur störend. Oft soll, beispielweise bei Feuerspritzen, der aus-



Figur 79.

tretende Wasserstrahl nicht nur zusammenhängend, sondern auch möglichst gleichmäßig sein, und wenn in solchen Fällen auch mehrere Pumpen mit angemessen versetzten Arbeitperioden in die gemeinschaftliche Druckleitung zu fördern pflegen, so muß doch noch ein besonderes Mittel zum Ausgleich der Kolbenarbeiten angewendet werden, und als solches dient von Alters her — denn wahrscheinlich hat schon Vitruv seine Wirkung bei Kolbenpumpen gekannt — der Windkessel. Nahe

hinter dem Druckventile angeordnet (Figur 79) nimmt er bei jedem Druckhube des Kolbens einen Teil des Wassers auf, und das elastische Luftpolster in seinem oberen Teile drückt es beim Nachlassen der Kolbengeschwindigkeit und beim folgenden Saughube sanft und stoßfrei in die Druckleitung. Offenbar hängt es nur von der Größe des Windkessels ab, die Schwankungen im Ausfließen des Wassers an der Druckrohrmündung bis zu beliebigem Grade zu mildern. Auch bei Pumpen, deren Bestimmung an sich

nicht ist, einen gleichmäßigen Wasserstrahl zu liefern, ist ein Windkessel immer zweckmäßig, denn er hält die Druckwassersäule im Fluß und macht damit, weil er das Oeffnen des Druckventiles erleichtert, den Kolbendruck gleichmäßiger. Zu demselben Zwecke wird auch häufig ein Windkessel in der Nähe des Saugventils angeordnet, dessen Luftinhalt entsprechend dem Unterdrucke in der Saugleitung verdünnt ist, und der gegen Ende des Saughubes infolge der Wucht der Saugwassersäule einen Teil dieser aufnimmt und beim Wiederbeginn des Saughubes auf nächstem Wege der Pumpe zuführt. Auch der Saugwindkessel hält also die zugehörige Wassersäule mehr in Fluß, sie braucht also beim Saughube nicht erst von vollständiger Ruhe in Bewegung gesetzt zu werden, die Saughöhe kann etwas größer gewählt werden, und es wird Stößen in der Saugleitung wirksam vorgebeugt.

Bei aller Sorgfalt in der Ausbildung der Wasserpumpe behält sie aber natürlich ihre Eigenschaft als absatzweise wirkender Wasserheber. Sie muß immer das Wasser mit einer gewissen Geschwindigkeit ansaugen, zur Ruhe bringen und wieder beschleunigen und diese Tätigkeit wird, wie wir gesehen haben, besonders erschwert durch die Massenwirkung des schweren Wassers, durch seine Wucht, wie wir wieder kurz sagen können. Die Geschwindigkeit der Wasserpumpen ist dadurch sehr begrenzt, für größere bisher üblicher Form können 100 Doppelhube in der Minute schon als besondere Leistung gelten. Neuere Formen mit teilweise gesteuerten Ventilen gehen in ihrer Geschwindigkeit aber weit über diese Grenze, und zu Verbesserungen in dieser Richtung drängt namentlich die Anwendung des Elektromotors im Bergbau. Die Wasserhaltungsmaschinen der Bergwerke wurden nämlich früher immer durch über Tage aufgestellte Dampfmaschinen betrieben, die durch lange schwere Gestänge mit den im Schachte stehenden Pumpen verbunden waren. Diese massigen Gestänge erlaubten naturgemäß noch geringere Geschwindigkeiten, als die Pumpen selbst nötig machten, und da vielfach versuchte Ersatzmittel für die starren Gestänge keinen rechten Erfolg hatten, so kamen mehr und mehr im Schachte selbst aufgestellte Dampfmaschinen in unmittelbarer Verbindung mit der Pumpe zur Anwendung, denen der Betriebsdampf von oben zugeführt wurde. Dieses bewährte System muß aber unbedingt wieder dem elektrischen Antriebe weichen, da der Elektromotor so viel einfacher

ist, als die Dampfmaschine und bei gleicher Leitung viel weniger Raum einnimmt. Er ist dabei allerdings nur ein Glied der Uebertragung der von einem Motor über Tage gegebenen Leistung, aber dieser Motor kann dann doch wieder eine schnellaufende Dampfmaschine, oder eine Dampfturbine sein, oder auch eine der modernen Großgasmaschinen, in günstigen Fällen auch ein in größerer Entfernung arbeitender Wassermotor, die elektrische Primärmaschine kann auch noch sonstigen Zwecken dienstbar gemacht werden, in jedem Falle wird die unvergleichlich einfache Uebertragung der Leistung durch dünne Drähte gerade im Bergwesen dem Elektomotor immer weitere Anwendung verschaffen. Seine zweckmäßige große Geschwindigkeit fordert aber auch schnellaufende Pumpen, die möglichst ohne Zwischenglieder mit ihm gekuppelt werden können. Ob es gelingt, die Kolbenpumpe bis zu den wünschenswerten Geschwindigkeiten auszubilden, oder ob inzwischen die einfachere Kreiselpumpe für die in Frage kommenden großen Druckhöhen geeignet ausgestaltet werden wird, muß die Zukunft lehren.

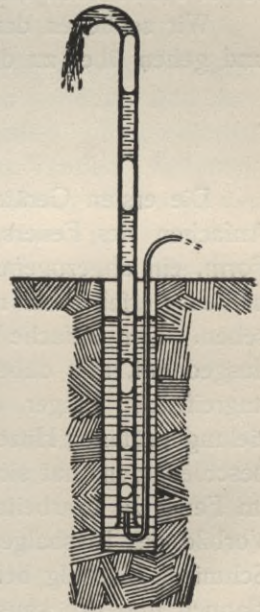
*

Alle die besonderen Anordnungen der Wasserpumpen, ob einfachwirkend oder doppelwirkend, liegend oder stehend, in welcher Weise mit dem Motor in Zusammenhang gebracht usw., können auf Grund des bisher Mitgeteilten beurteilt werden. Es mag nur noch eine Klasse von Wasserpumpen erwähnt werden, die durch einen erfolgreichen Vertreter in den letzten Jahren wieder Beachtung gefunden hat, die Pumpen nämlich, bei denen der feste Kolben durch Preßluft ersetzt ist.

Es war schon erwähnt, daß man sich seit Langem bemüht hatte, das Gestänge von Bergwerkspumpen durch weniger unbequeme Mittel zu ersetzen, und schon in der Mitte des 18. Jahrhunderts wurde von Höll in Ungarn ein Wasserheber ausgeführt, bei dem in einem geschlossenen Zylinder durch abwechselndes Zulassen und Auslassen von Druckwasser Luft komprimiert wurde, die durch ein Rohr in den Schacht geleitet in einem Pumpenzylinder als Kolben wirkte, ähnlich dem sogenannten Pulsometer (Motoren S. 118), der ja selbst hierher gerechnet werden kann. Voraussetzung für die wirtschaftliche Anwendung einer solchen

Einrichtung würde immer die bequeme Gewinnung des erforderlichen Druckwassers von nahen größeren Höhen sein, und diese Gunst der Verhältnisse kann nur in ganz seltenen Fällen eintreten. Der Höllsche Wasserheber hat deshalb keine Verbreitung gefunden, sein Betrieb durch anderweitig verdichtete Luft wäre aber unwirtschaftlich, aus Gründen, die aus dem früher (Motoren S. 289) über Druckluftübertragung Gesagten hervorgehen. Nun gab aber in den letzten Tagen seines Lebens Werner Siemens ein Pumpensystem an, das sich durch geniale Einfachheit auszeichnet und bei dem die wirkende Preßluft ganz ökonomisch arbeitet. Das System ist seitdem unter dem wenig bezeichnenden Namen „Mammuth-Pumpe“ weiteren Kreisen bekannt geworden.

In den Schacht oder Brunnen (Figur 80) taucht ein einfaches Rohr von genügender Weite und zwar weit unter den Wasserspiegel. In das untere Ende dieses Hubrohres ist ein engeres Rohr eingeführt, durch das von oben her Druckluft in das Hubrohr eingelassen wird. Die Luft steigt in Blasen in dem Wasser des Hubrohres auf, um oben wieder zu Tage zu treten. Das Hubrohr ist dann mit einer Mischung von Wasser und Luftblasen gefüllt, das mittlere spezifische Gewicht seiner Füllung also wesentlich geringer, wie das spezifische Gewicht des umgebenden Wassers, und dieser Zustand wird durch stetes Nachpumpen von Luft dauernd aufrecht erhalten. Ist nun bei genügender Luftzufuhr im Ganzen die Drucksäule im Hubrohre leichter als die des umgebenden Wassers, so tritt ein stetiges Aufwärtsfließen im Hubrohre ein, und für diese Wirkung ist nur Bedingung das Vorhandensein einer genügenden Tiefe unterhalb des Wasserspiegels, wodurch allerdings die Verwendbarkeit des Apparates stark eingeschränkt wird. Ob man sich nun die Luft als Bläschen im Hubrohre verteilt denkt, oder, wie in der Figur angedeutet, in jedesmal größerer Menge kolbenartig mit dem Wasser abwechselnd, immer wird der Widerstand des Wassers gegen das Aufsteigen der Luft das Fließen im Hubrohre bewirken, und insofern kann der



Figur 80.

Apparat mit den von früher bekannten, durch Druckluft betriebenen Wasserhebern verglichen werden.

Interessant ist an dem Apparate vor Allem die bei nicht zu übertreffender Einfachheit wirtschaftliche Ausnutzung der Druckluft. Damit sie in das Hubrohr eintreten kann, muß ihr Druck ein wenig größer sein, als der Druck des Außenwassers am unteren Rohrende. Beim Aufsteigen im Hubrohre und damit allmählich abnehmendem Drucke dehnt sich die Luft aber wieder bis zum Atmosphärendrucke aus, wie in der besten Expansionmaschine. Zudem kann sie sich beim Ausdehnen auch nicht wesentlich abkühlen, da sie vom Wasser Wärme aufnimmt. Diese günstige thermische Wirkung tritt bei Besprechung der Kompressoren deutlicher hervor. Schade nur, daß sich dieser geniale Wasserheber seiner Natur nach für allgemeinere Anwendung nicht eignet.

Wir schließen damit die Beschreibung der Wasserpumpen ab und gehen über zu den Luftpumpen.

*

Die ersten Geräte zum Fördern der Luft waren Gebläse zum Anfachen des Feuers der Metallarbeiter und ihre ursprüngliche Form, ein abgezogenes und bis auf zwei Oeffnungen wieder vernähtes Tierfell kann man noch heute bei wandernden Zigeunern sehen. Der einfache Windsack wird zusammengedrückt und wieder ausgedehnt, und dabei ersetzen die in der Nähe der einen Oeffnung angreifenden Finger das Saugventil. Die Notwendigkeit, zur Erzielung größerer Hitze die Verbrennung an bestimmten Stellen zu beschleunigen, hat sich immer eingestellt, wo man anfangs, Metalle im Feuer zu bearbeiten, und die menschliche Lunge ist dabei das Vorbild des Blasbalges gewesen. In verbesserter Form lebt der Schmiede-Blasbalg bekanntlich noch heute, mit selbsttätigen Ventilklappen und druckausgleichendem, ebenfalls blasbalgartigem Regulator oberhalb des eigentlichen Bläasers. Ein rechter Ersatz dieses alten Gefährten hat sich für den einzelnen Schmied noch nicht gefunden, und ebenso konservativ hat sich der Orgelbau verhalten. Bei Negervölkern Afrikas sollen aber auch einfache Kolbengebläse, wohl aus gehöhlten Baumstämmen hergestellt, gebräuchlich sein. Größere Luftmengen, wie sie die aufsteigende metallurgische Technik erforderte, wurden dann später durch Kolbengebläse der verschie-

densten Formen beschafft, die in Holz hergestellt und deshalb kastenartig, von dieser Form ihren Namen erhielten. Die eigentliche Maschinentechnik hat diese Kastengebläse zu Zylindergebläsen umgestaltet, ihnen zweckmäßigere Formen gegeben, statt der Ventilklappen vielfach Schieber, ähnlich den Dampfschiebern, eingeführt, das Wesen aber nicht geändert. Unter Gebläsen versteht man jetzt meist die Luftpumpen, die große Luftmengen bei niedrigem Drucke bewegen, wiewohl manche Gebläse, beispielweise die Gebläse für den Bessemer-Prozeß, die den Druck der flüssigen Eisensäule im Converter zu überwinden haben, sich schon den Kompressoren nähern, als welche man alle Luftpumpen für höheren Druck bezeichnet. Die Neuzeit hat die Zylindergebläse und ebenso ihre Gegenstücke, die im Bergwesen viel gebrauchten Luftsauger mehr und mehr durch Zentrifugalmaschinen ersetzt.

Luftpumpen schlechthin nennt man oft die Pumpen zum Verdünnen der Luft oder zum Absaugen von Dämpfen und Gasen, wie sie die chemische Großindustrie besonders benötigt, und derartige Pumpen kleinsten Maßstabes sind in jedem physikalischen Kabinett zu sehen, entweder mit selbsttätigen Ventilen versehen, oder mit in einfachster Weise gesteuertem (durch Reibung der Ventilstange in einer Durchbohrung des Kolbens mit geschlepptem) Saugventile, meist aber, da es sich hier immer um starke Verdünnungen handelt, mit von Hand bei jedem Kolbenspiele umgelegtem Dreiweghahne. Diese Luftpumpe ist von dem Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke (1602—1686) erfunden und ein Exemplar seiner Pumpe wird noch heute im Magdeburger Rathause aufbewahrt. Das Verdienst des gelehrten Physikers ist aber mit dem Titel „Erfinder der Luftpumpe“ nicht gut bezeichnet. Das Gerät selbst, das doch nur eine einfache Spritze war, brauchte eigentlich nicht erst erfunden zu werden. Neu war vielmehr die Art der Verwendung zum Auspumpen von Hohlräumen, und das Wichtige daran war die Bereicherung der Kenntnis von den Eigenschaften der Gase. Vor Guericke hatte man noch keine genaue Vorstellung, wodurch sich, außer durch ihre Leichtigkeit, die Gase von den tropfbaren Flüssigkeiten unterscheiden. So nahm man an, daß beim Auspumpen eines Hohlraumes die Luft sich ähnlich wie Wasser verhielte, das bei unveränderter Dichte mit fortschreitendem Auspumpen seinen Spiegel senkt, bis der Behälter ganz leer ist. Erst auf Guericques Versuchen beruht der Fortschritt in

der Erkenntnis, daß die Gase kein selbständiges Volumen haben, sondern beim Auspumpen den ganzen Raum mit immer abnehmender Dichte, aber immer gleichmäßig füllen.

Die Verdünnungspumpen mit Ventilen (von besonderen Pumpenformen, die sehr weitgehende Verdünnung herzustellen haben, und von Laboratorium-Geräten sehen wir hier ab), wie die Gebläse unterliegen durchaus den allgemeinen Gesetzen der Kolbenpumpen überhaupt und unterscheiden sich im Einzelnen von den Wasserpumpen nur durch die besondere Ausbildung, die den abweichenden Eigenschaften der Gase gerecht wird. Die Masse der Gase ist gegen die Masse des Wassers von demselben Volumen verschwindend klein, dagegen sind die Gase elastisch und unbegrenzter Ausdehnung fähig. Stöße infolge von Massenwirkungen kommen deshalb im Inneren von Luftpumpen — diese Bezeichnung hier wieder im allgemeineren Sinne gebraucht — nicht vor, um so mehr aber muß auf möglichste Verkleinerung der schädlichen Räume Bedacht genommen werden, die bei Wasserpumpen, nachdem sie einmal ganz mit Wasser gefüllt sind, gar nicht diese Bezeichnung verdienen. Im übrigen lassen sich alle wesentlichen Gesichtspunkte für Luftpumpen übersichtlich an den Luftverdichtern, den Compressoren zu erläutern.

Luftverdichter kleinen Maßstabes sind schon seit dem 17. Jahrhundert bekannt und haben später bei den nun ganz vergessenen Windbüchsen eine nicht unrühmliche Anwendung gefunden. Heute sind die kleinen Handpumpen für die Pneumatiks der Fahrräder in Aller Händen, und mit dem vertrauten Geräte lassen sich manche, außer ihrer eigentlichen Bestimmung liegende lehrreiche Versuche anstellen. Ueber das Wesen der kleinen Ventile und die Vorzüge der verschiedenen, oft mit wohlklingenden Namen belegten Systeme kann jeder Radler berichten. Von Motoren getriebene größere Kompressoren sind in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts namentlich für Gesteinbohrmaschinen, für pneumatische Fundierungen, Taucherapparate usw. nötig geworden. Die neueste Zeit hat mit der Technik der verflüssigten Gase, den Torpedos, den Druckluftwerkzeugen, den Kompression-Eismaschinen, und manchen anderen Verwendungarten für die Kompression neue Arbeitgebiete geschaffen.

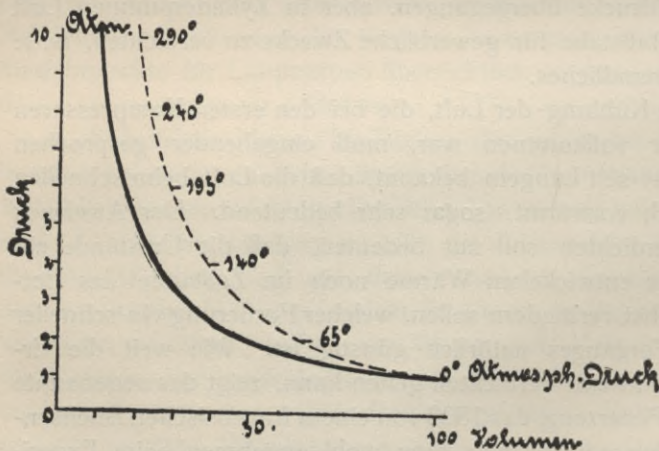
Die erste größere Anwendung fanden die Kompressoren in den 60er Jahren beim Bau des Montcenis-Tunnels durch Sommeiller

zum Betriebe der Gesteinbohrmaschinen, und zwar wurde dabei zunächst die Luft auf 5 Atm. komprimiert durch Druckwasser, das in diesem Falle zu bequemer Verfügung stand, ganz ähnlich wie bei dem Höll'schen Luft-Wasserheber. Es wurde also in größere luftdichte Behälter Druckwasser geleitet, das nach genügend fortgeschrittener Verdichtung die Luft zu weiterem Gebrauche in geeignete Sammler förderte, bis der Behälter ganz mit Wasser gefüllt war, um dann entleert und darauf von neuem mit Druckwasser gefüllt zu werden. Diese Kompressorform war einmal schon bekannt, wurde durch die lokalen Verhältnisse nahe gelegt und empfahl sich durch die zuverlässige Wirkung der Abschlußorgane, die ja nur gegen Wasser dicht zu halten hatten, endlich auch durch die ausgiebige Kühlung der Luft. Kolben, Ventile, Schieber und Stopfbüchsen gegen hochgespannte Gase und Dämpfe abzudichten, war noch nicht auf Grund vieler Erfahrungen so leicht möglich wie heute. Die Dampfmaschinen arbeiteten meist mit niederem Drucke, nur die Lokomotiven waren schon lange zu hohem Dampfdrucke übergegangen, aber in Zylinderpumpen Luft in größerem Maßstabe für gewerbliche Zwecke zu verdichten, hatte noch was Befremdliches.

Ueber die Kühlung der Luft, die bei den ersten Kompressoren allerdings sehr vollkommen war, muß eingehender gesprochen werden. Es ist seit Langem bekannt, daß die Luft beim schnellen Verdichten sich vorwärmt, sogar sehr bedeutend. Der Ausdruck „schnelles“ Verdichten soll nur bedeuten, daß die Umstände ein Entweichen der entwickelten Wärme noch im Zustande des Entstehens möglichst verhindern sollen, welcher Forderung ein schneller Verlauf des Vorganges natürlich günstig ist. Wie weit die Erhitzung der Luft beim Verdichten gehen kann, zeigt das sogenannte pneumatische Feuerzeug, das 1803 von einem französischen Büchsenmacher erfunden wurde, man kann wohl annehmen beim Experimentieren mit Windbüchsen, die damals größere Hoffnungen erregten, als sie später erfüllten. Das Feuerzeug also stellte einen schlanken Zylinder dar von etwa 1 cm Lichtweite und 10—15 cm Länge, unten geschlossen, mit gut gedichtetem, stempelartigem Kolben. Dieser wird herausgezogen an einem Häkchen der Innenseite mit etwas Zündschwamm versehen, darauf wieder in den Zylinder gebracht und nun mit äußerster Kraft schnell hineingestoßen. War das Gerät in Ordnung, so sieht man an dem

herausgezogenen Kolben den Zündschwamm glühen. Um das zu bewirken, mußte die Luft im Zylinder bei der schnellen Verdichtung vorübergehend auf eine Temperatur von etwa 600° gekommen sein! Recht merklich schon ist übrigens die Erwärmung der Luft in den Fahrrad-Luftpumpen, wiewohl die Luftverdichtung dabei kaum über 2 Atm. geht. Der aufmerksame Beobachter kann leicht erkennen, daß die Erwärmung nicht etwa nur von der Kolbenreibung herrührt.

Geht die Verdichtung langsam vor sich, oder überhaupt unter Umständen, die das Entweichen der entstehenden Wärme an die umgebenden Wände begünstigen, so erfolgt die Drucksteigerung mit abnehmendem Volumen nach dem einfachen Mariotte'schen Gesetze ohne Temperaturänderung, d. h. der Druck nimmt in dem Grade zu, wie das Volumen abnimmt, sodaß also bei halbem Volumen der doppelte Druck herrscht, bei $\frac{1}{4}$ des ursprünglichen Volumens der 4 fache Druck usw. Dieses Gesetz ist leicht graphisch darzustellen (Motoren S. 168), wenn man wieder die Volumina als Abscissen,



Figur 81.

die zugehörigen Drucke als Ordinaten aufträgt (Figur 81). Teilt man die Abscissen-Axe etwa in 100 gleiche Teile, so kann man den mittleren Druck bei der Ver-

verdichtung irgend eines Luftvolumens erhalten, wenn man dasselbe Verdichtungsverhältnis auf die eingeteilte Abscissen-Axe überträgt. Ueber den Gebrauch eines solchen Diagrammes ist unter „Watt's Indicator“ Näheres mitgeteilt (Motoren S. 157 ff.). Die beim Verdichten verbrauchte Arbeit ist dann wieder der Diagrammfläche zwischen den zugehörigen Grenzen proportional, beispielweise beim Verdichten von 1 auf 5 Atm., oder beim Verdichten von 100 auf 20 Volumteile.

Wird aber die Verdichtung so schnell bewirkt, daß während dessen so gut wie gar kein Wärmeübergang von der sich erhitzen- den Luft nach den kühleren Zylinderwänden stattfindet, so wächst der Druck mit abnehmendem Volumen wesentlich schneller. Denn dieselbe Luftmenge hat bei demselben Drucke, aber höherer Temperatur, ein größeres Volumen, oder demselben Volumen entspricht infolge der höheren Temperatur ein größerer Druck. Die Verdichtung erfolgt daher nach einem Gesetze, das durch die punktierte Linie (Figur 81) gegeben ist, die oberhalb der Mariotte'schen Linie liegt, und die Fläche zwischen beiden gibt das Mehr an Verdichtungsarbeit, wenn diese ohne Kühlung vor sich geht.

Kennt man die beim Verdichten erreichten Temperaturen, so kann man von der „isothermischen“ Linie (d. h. der Mariotte'schen Linie, weil bei ihr die Temperatur constant bleibt) zu der „adia- betischen“ (von *ἀ-διαβατικὴ* — d. h. bei der keine Wärme durch die Wände geht) gelangen, indem man die Volumina der ersteren durch Erwärmung bis auf die zugehörige Verdichtungstemperatur vergrößert, sodaß beispielweise Volumen 20 bei 5 Atm. und 0° übergeht in Volumen 32 bei 170°.

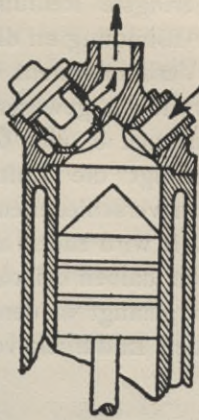
Als Ausdehnungskoeffizient der Luft ist $\frac{1}{273}$ zu setzen. Umgekehrt kann aus bekanntem adia- batischem Verdichtungsvolumen auf die Verdichtungstemperatur geschlossen werden. Leider ist die Ableitung der Beziehung zwischen Volumen, Druck und Temperatur bei der adiabatischen Verdichtung bzw. Ausdehnung auf elementarem Wege kaum möglich, wir müssen uns an dieser Stelle deshalb mit der Angabe der adia- batischen Linien in der Figur und einigen eingeschriebenen Tem- peraturen begnügen. Wie man sieht, steigt die Temperatur sehr schnell, bei 10 Atm. erreicht sie fast 300°, wenn die Ausgang- temperatur bei 1 Atm. 0° war.

Nun kühlt sich die Luft nach ihrem Austritte aus der Pumpe in dem Behälter oder in der Rohrleitung schnell ab, die entstehende Verdichtungswärme, die nur auf Kosten der Antriebsarbeit entstand, ist also für den Endzweck ohnehin verloren, daher man durch sorgfältige Kühlung die Verdichtung möglichst auf der Isotherme vor sich gehen lassen will. Bei den vorher erwähnten ersten Kompressoren des Montcenis-Tunnels war infolge der Langsamkeit des Vorganges und der Anwesenheit der beträchtlichen Wasser-

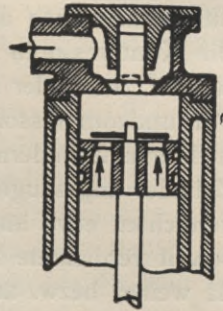
menge die Kühlung praktisch vollkommen, und als man der gleichmäßigeren Arbeit wegen von den unmittelbar den Wasserdruck benutzenden Compressoren zu richtigen Kolbenpumpen überging, behielt man das ausgiebig kühlende und gleichzeitig gut dichtende Wasser noch bei, d. h. man ließ als Kolben auf die Luft immer noch das Wasser wirken, das seinerseits durch den wirklichen Kolben im Pumpenraume bewegt wurde. Mit solchen „nassen“ Kompressoren ist denn auch die Hauptarbeit im Montcenis-Tunnel getan. Das kühlende, dichtende und auch die schädlichen Räume gut ausfüllende Wasser ließ aber keine große Geschwindigkeit der Pumpe zu, denn es hat natürlich starke Neigung zu unregelmäßigen Bewegungen in der Pumpe. Infolgedessen entwickelte sich der einfache Kolbenkompressor mit Einspritzwasser, das nun wesentlich nur das Kühlen zu besorgen hatte und deshalb, in verhältnismäßig kleiner Menge, bei jedem Saughube fein verteilt mit der Luft in den Pumpenraum gelangte. Die Kühlung durch unmittelbare Berührung zwischen Luft und Wasser ist nun zwar immer die wirksamste, macht aber auch die Luft sehr feucht, und da die spätere Ausdehnung der kühlen Druckluft beispielsweise in den Gesteinbohrmaschinen eine entsprechend große Temperaturerniedrigung im Gefolge hat, so tritt leicht Eisbildung ein, wenn nicht eine Vorwärmung der Druckluft vorgesehen werden kann (Motoren S. 289). Ist diese durch die Art des Betriebes ausgeschlossen, so sind die „trockenen“ Compressoren vorzuziehen, die nur äußere Zylinderkühlung anwenden, wie die Gasmotoren, und die im Ganzen jetzt die beliebteren sind, trotzdem bei ihnen die Kompressionkurve sich viel weniger der Isotherme nähert. Die Kompressoren mit Wasserfüllung sind jetzt überhaupt aufgegeben.

Die trocknen Kompressoren mit selbsttätigen Ventilen zeigen als übereinstimmendes Merkmal leichte, federbelastete Ventilkegel mit geringem Hube und möglichste Verkleinerung der schädlichen Räume. Das hat zur Anordnung der Ventilgehäuse in den Zylinderdeckeln geführt, und um dabei genügenden Raum für jene zu erhalten, sind die Deckel vielfach konisch geformt. Figur 82 gibt eine Vorstellung dieser Bauart. Wie bei den Wasserpumpen bereiten auch hier die Saugventile die größeren Schwierigkeiten. Oft hat man deshalb, bei einfachwirkenden Kompressoren, das Saugventil in den Kolben verlegt (Figur 83), was ein schnelles Schließen dieses Ventiles beim beginnenden Kolbenrückgange sichert.

Die schädlichen Räume lassen sich natürlich nicht ganz vermeiden, die in der Pumpe am Ende des Druckhubes verbleibende Druckluft muß sich also während des Saughubes erst bis zum Atmosphären-Drucke ausdehnen, ehe das Saugventil sich öffnen kann. Es wird dabei ein Teil der beim Druckhube angewendeten Arbeit zurückerstattet, ein wesentlicher Arbeitsverlust tritt also durch die schädlichen Räume nicht ein, wohl aber eine Verringerung der angesaugten Luftmenge.

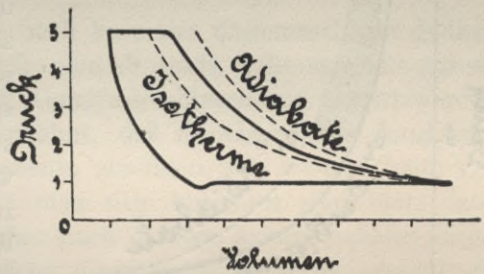


Figur 82.



Figur 83.

Das ist an einem Kompressordiagramme (Figur 84) deutlich zu sehen, das unter der allerdings übertriebenen Annahme von etwa 10% schädlichen Raumes gezeichnet ist.



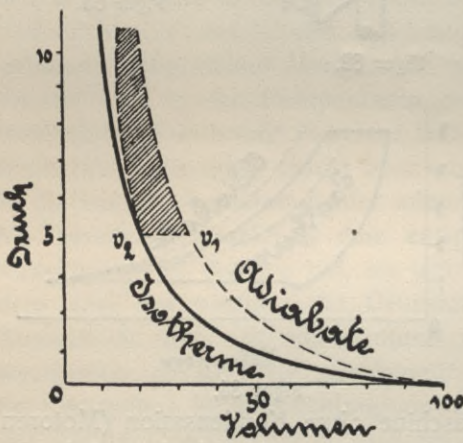
Figur 84.

Das Diagramm ist ganz ähnlich dem einer Dampfmaschine ohne Kondensation (Motoren S. 184), nur daß es im umgekehrten Sinne durchlaufen wird.

Aehnliche Gesichtspunkte wie bei den Wasserpumpen haben auch bei den größeren Kompressoren zur Anwendung von gesteuerten Ventilen geführt, oder wenigstens zur Unterstützung der Bewegung des Saugventils durch den Kolben. Mit Erfolg sind aber auch vollständige Schiebersteuerungen ausgeführt, da die elastische Luft nicht zu Stößen Anlaß geben kann, wie das Wasser, wenn die Druckverhältnisse im Pumpenraume nicht genau mit den Bewegungen der Abschlußorgane übereinstimmen. Besondere Einzelheiten haben den Eigentümlichkeiten des Kompressor-Betriebes in sehr befriedigender Weise Rechnung getragen.

Die heutige Maschinentechnik ermöglicht die Ausführung aller Teile des Kompressors in Metall bei praktisch vollständig dichtem Abschlusse. Der trockenen Wärme im Kompressor widersteht kein

anderer Stoff auf die Dauer, und die metallenen Gleitflächen verursachen auch die geringste Reibungarbeit. Die Kompressoren konnten sich in ihrer Ausbildung an die Hochdruck-Wärmemotoren anlehnen. Auch das Verbundsystem der Dampfmaschinen ist für die Kompressoren vorbildlich gewesen und wird vorteilhaft angewendet, wenn der Enddruck 5 oder 6 Atm. übersteigt. Bei dem Verbundkompressor erfolgt die Luftverdichtung stufenweise in mehreren Zylindern von verschiedenem Inhalte. Die vom größten Zylinder angesaugte Luft wird zuerst auf einen Teil des Enddruckes verdichtet, etwa auf den halben bei zweistufiger Kompression. Die soweit verdichtete Luft gelangt in den kleineren Zylinder und wird da weiter, bezw. auf den Enddruck verdichtet. In jedem Zylinder



Figur 85.

herrscht also ein weniger veränderlicher Druck, als wenn die ganze Verdichtung in nur einem Zylinder vor sich ginge, das Gestänge wird gleichmäßiger beansprucht, der Einfluß der schädlichen Räume wird weniger fühlbar. Läßt man zudem die Luft auf dem Wege von einem Zylinder zum andern in Zwischenbehältern vollständig abkühlen, so nehmen auch die Nachteile unvollkommener Kühlung ab. Wäre z. B. (Figur 85) die Luft im ersten Zylinder bis auf 5 Atm. verdichtet, im ungünstigsten Fall rein adiabatisch, so könnte sie sich vor Uebertritt in den zweiten Zylinder vom Volumen v_1 bis auf v_2 abkühlen. Die schraffierte Fläche zeigt dann die erhebliche Ersparnis an Verdichtungsarbeit. — Wie man sieht, besteht zwischen den Verbunddampfmaschinen und den Verbundkompressoren sowohl in mechanischer wie theoretischer Hinsicht große Aehnlichkeit, sofern man immer den umgekehrten Ablauf der Erscheinungen berücksichtigt.

Bei gleich sorgfältiger Ausbildung läßt die geringe Masse der elastischen Gase von vornherein bei modernen Kompressoren größere Geschwindigkeiten zu, wie den Wasserpumpen, sodaß man

herrscht also ein weniger veränderlicher Druck, als wenn die ganze Verdichtung in nur einem Zylinder vor sich ginge, das Gestänge wird gleichmäßiger beansprucht, der Einfluß der schädlichen Räume wird weniger fühlbar. Läßt man zudem die Luft auf dem Wege von einem Zylinder zum andern in Zwischenbehältern vollständig abkühlen, so nehmen auch die Nachteile unvollkommener Kühlung ab.

im Mittel 100—200 Umdrehungen in der Minute annehmen kann. Zu weiterer Steigerung der Geschwindigkeit hat auch hier der Elektromotor angeregt, und es ist gelungen, gut arbeitende Kompressoren für 700 und mehr Umdrehungen zu bauen, sogar mit selbsttätigen, allerdings besonders sorgfältig durchgebildeten Ventilen.

Der mechanische Wirkungsgrad guter Kompressoren kommt ungefähr dem der Dampfmaschinen gleich und kann zu 75—80 % angenommen werden. Wo bei sehr hohen Verdichtungsgraden weniger Wert auf den Wirkungsgrad als auf möglichste Dichte der Organe Wert zu legen ist, beispielweise bei den Kompressoren für Torpedos, die Luft von etwa 100 Atm. gebrauchen, finden sich auch besondere, von den betrachteten abweichende Formen der Einzelheiten.

*

An dieser Stelle mag noch kurz der Kältemaschinen gedacht werden, die in der Technik eine so große Rolle spielen und die jetzt immer als sogenannte Kompressor-Maschinen gebaut werden. Es war schon mehrfach erwähnt, daß die Gase beim Ausdehnen unter Arbeitleistung sich ebenso abkühlen, wie sie sich beim Verdichten erwärmen. Denkt man sich nun Luft verdichtet, dabei im Kompressor und nachher noch in dem Sammelbehälter durch Kühlwasser auf gewöhnliche Temperatur gebracht, darauf die Druckluft in einem Motor wieder Arbeit leistend, so verläßt sie diesen mit einer weit unter 0° liegenden Temperatur und kann so unmittelbar als Kühlluft verwendet werden, oder zum Abkühlen einer Flüssigkeit mit niedrigem Siedepunkte (z. B. Wasser mit Chlorcalcium) dienen, und diese wieder kann reines Wasser in eingehängten Gefäßen zum Gefrieren bringen. Die vom Kompressor geforderte Leistung wird dabei teilweise wieder vom Motor zurück-erstattet, nur teilweise, weil die Ausdehnung bei niedrigerer Temperatur, also mit kleineren Volumen vor sich geht, als die Verdichtung. Die Differenz beider Leistungen stellt den für den Kühlvorgang erforderlichen Aufwand von Arbeit dar. Um diese, hier nur im rohen Schema angedeuteten, Kaltluftmaschinen hat sich besonders Franz Windhausen verdient gemacht.

Da der Wärmeinhalt der Luft nur klein ist, anders gesagt, da der Luft beim Verdichten verhältnismäßig nur wenig Wärme zu

entziehen ist, und da die kalte Luft nach ihrer Arbeit im Motor der Kälteflüssigkeit nur wenig Wärme entnimmt, so erhalten solche Kaltluftmaschinen große Abmessungen und sind deshalb jetzt von den Kaltdampfmaschinen verdrängt, die als Ammoniakmaschinen in großem Maßstabe durch die Bemühungen von Professor Linde ausgebildet wurden.

Alle Gase und Dämpfe — zwischen beiden besteht ein Unterschied nur insofern, als sie sich mehr oder weniger weit vom Kondensationspunkte befinden, weshalb die Gase auch als überhitzte Dämpfe aufgefaßt werden können — sind durch Druck und Abkühlung in den flüssigen Zustand überzuführen. Die Kaltdampfmaschinen bezwecken nun, Gas oder Dampf zu verflüssigen, um nachher die Verdampfungswärme des wieder in den Gas- oder Dampfzustand übergehenden Mittels den zu kühlenden Körpern zu entnehmen, meist der erwähnten Flüssigkeit mit niedrigem Gefrierpunkte. Geeignet zu dem Kreisprozesse sind solche Gase oder Dämpfe, die bei nicht zu hohem Verflüssigungsdrucke eine verhältnismäßig große Verdampfungswärme haben. Ammoniakgas wird bei gewöhnlicher Temperatur mit etwa 12 Atmosphären flüssig. Stellt man also diesen Druck durch Verdichten des Ammoniaks in einem Kompressor her, unter möglicher Kühlung des Kompressors selbst und des Sammelbehälters durch reichliche Wasserbespülung von außen, und läßt man dann das flüssig gewordene Ammoniak wieder verdampfen, so erhält man ein ähnliches Schema des Arbeitsvorganges wie bei der Kaltluftmaschine, nur daß bei der großen Verdampfungswärme des Ammoniaks (ungefähr 300 Kalorien für 1 kg., also mehr als die halbe Verdampfungswärme des Wassers) einerseits die Wärmeentziehung bei der Verdichtung und umgekehrt bei der Verdampfung ungleich ausgiebiger ist, sodaß die Kaltdampfmaschinen im Verhältnisse zu ihrer Größe viel leistungsfähiger sind. Die wirkliche Ausführung der Kaltdampfmaschinen stellt immer ein geschlossenes System dar, in dem das verwendete Mittel stetig einen Kreisprozeß ausführt, in gleichmäßiger Folge von Verdichten, Kühlen, Verflüssigen, Verdampfen unter Arbeitsleistung, Verdichten u. s. f.

Außer Ammoniak sind als Vermittler des Kühlvorganges besonders noch schweflige Säure und Kohlensäure verwendet, die neben weniger günstigen Eigenschaften in theoretischer wie mechanischer Hinsicht gewisse Vorzüge haben. Unter den Technikern,

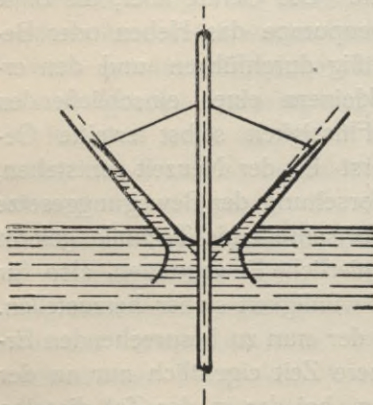
die sich durch hervorragende Leistungen auf dem Gebiete der Kältemaschinen ausgezeichnet haben, ist noch besonders der Schweizer Raoul Pictet zu nennen, derselbe, der als einer der Ersten im Jahre 1877 die Verflüssigung der bis dahin als „incoercibel“ betrachteten Gase durchführte. — Beachtenswert ist übrigens die in mancher Hinsicht ähnliche Entwicklung der Kältemaschine und der Wärmemotoren, das Aufgeben der Luftmaschinen und der Uebergang zu Maschinen mit einem Arbeitstoffe, der bei gleichem Volumen größere Wärmemengen aufzunehmen und abzugeben vermag.

III.

Das bisher behandelte wichtigste Gerät zum Fördern von tropfbaren und gasförmigen Flüssigkeiten, die Kolbenpumpe, hatte, wenn auch eine bestimmte Entstehungszeit nicht sicher angegeben werden kann, jedenfalls seinen Ursprung noch im Altertum. Der beliebig langsam zu gestaltende Vorgang, einen mit der Flüssigkeit gefüllten Raum durch einen eindringenden Kolben zu verkleinern und durch den aufgewendeten Druck den Inhalt auf eine größere Höhe zu heben oder ihm eine entsprechende Geschwindigkeit zu erteilen, kann zunächst mit sehr einfachen Mitteln durchgeführt werden und war deshalb auch bei ganz niedrigem Stande der physikalischen Erkenntnis und der Technik möglich. Die Geräte aber, die ohne die absatzweise Bewegung der Kolbenpumpe das Heben oder Beschleunigen der Flüssigkeit gleichmäßig durchführen und den erforderlichen Druck nicht durch Verkleinern eines einschließenden Gefäßes, sondern durch die der Flüssigkeit selbst erteilte Geschwindigkeit herstellen, konnten erst in der Neuzeit entstehen, nachdem seit Galilei die nähere Erforschung der Bewegungsgesetze eingeleitet war, und nachdem die fortschreitende Technik gelernt hatte, Maschinenelemente für kontinuierliche Bewegungen, also für Drehbewegungen, von großer Geschwindigkeit sicher herzustellen. Beobachtungen, die in den Rahmen der nun zu besprechenden Erscheinungen gehören, hatte die frühere Zeit eigentlich nur an der Töpferscheibe Gelegenheit anzustellen, bei der in der Tat dieselbe Kraft günstig wirksam ist, auf der die Zentrifugalpumpen beruhen. Indessen entzieht sich bei der Töpferscheibe mit ihrer geringen Geschwindigkeit meist ganz der Beachtung, in welchem Maße die Fliehkraft beiträgt, der plastischen Masse die Form eines Dreh-

körpers zu geben und zu erhalten. Andererseits lagen die leichter beobachtbaren Aeüßerungen der Fliehkraft im Altertum und Mittelalter, beispielweise bei den Schleudern, doch zu sehr auf andern Gebiete, um eine Uebertragung auf die Vorgänge im Wasser nahe zu legen, trotzdem die einfache Grundbeobachtung, die wahrscheinlich zur Erfindung der Zentrifugalpumpe geführt hat, zu jeder Zeit zu machen war. Aber die Erscheinungen der Wasserbewegung überhaupt sind erst in der Neuzeit eingehender betrachtet, und deshalb war es dieser vorbehalten, bestimmte, im Kleinen lange bekannte Erscheinungen für die Zwecke der Wasserförderung zu verwerten.

Wenn man in einem Becher den Wasserinhalt durch Umrühren in schnelle Drehung versetzt, so bildet sich bekanntlich in dem vorher ebenen Wasserspiegel eine Höhlung aus, das Wasser steigt an den Wänden in die Höhe und kommt bei genügender Drehgeschwindigkeit zum Ueberfließen. Die Wasserteilchen fliehen vom Mittelpunkte nach außen unter Wirkung der Zentrifugalkraft, die jetzt kürzer, wenn auch weniger bezeichnend, oft Fliehkraft genannt wird. Daß diese Erscheinung der Ausgang für die Zentrifugalpumpen (auch Schleuderpumpen genannt) gewesen ist, kann um so mehr angenommen werden, als die ersten Geräte dieser Art, die in der Mitte des 18. Jahrhunderts auftraten, in der Tat die Form eines Bechers hatten. Denkt man sich ein becherartiges,



Figur 86.

unten offenes Gefäß (Fig. 86) selbst um die Mittelachse gedreht, und durch innere Rippen oder Scheidewände das Mitnehmen des Wassers gesichert, so wird dieses sich mit steigender Geschwindigkeit an der geneigten Gefäßwand erheben und schliesslich über den Rand fließen, während der stetige Zufluß von Wasser zu der unteren Oeffnung bei hinreichend großer Geschwindigkeit den Vorgang ganz gleichmäßig werden läßt. Die trichterartige Form des Wassers

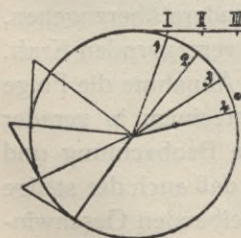
in dem gedachten Gefäße wird ersichtlich begünstigt durch ein doppelwandiges Gefäß, wie in der Figur punktiert angedeutet. Der Zweck wird aber auch erreicht, wenn die äußere Gefäßwand

stillsteht, und nur die innere, die dann mit den radialen Rippen zum Mitnehmen des Wassers versehen sein muß, in Drehung kommt, ebenso, wenn statt des trichterförmigen Hohlraumes zwischen den beiden Wänden nur eine beliebige Anzahl geneigter Röhren mit der Drehaxe in Verbindung ist. In dieser Form ist allerdings die Zentrifugalpumpe nur zur Förderung auf geringe Höhen geeignet, da ihre eigne Höhe der Förderhöhe entsprechen muß, und zu dem Gedanken, den erforderlichen Förderdruck in einem Gefäße mit Rohransätzen statt durch Kolbendruck durch den Zentrifugal-Druck kreisenden Wassers zu erzeugen, war gewiß noch ein bedeutender Schritt, der indessen erleichtert wurde durch das Interesse, das dem neuen Wasserheber auch in wissenschaftlichen Kreisen entgegengebracht wurde. So hat sich u. a. auch Euler, der schon den Turbinen seine Aufmerksamkeit zugewendet hatte, rechnerisch mit den nunmehr in größerem Maßstabe auftretenden Erscheinungen der Wasserbewegung mit Hilfe der Fliehkraft befaßt. Zur näheren Einsicht in das Wesen dieser Kraft, die bei allen nicht geradlinigen Bewegungen auftritt und deshalb auf den verschiedensten Gebieten eine wichtige Rolle spielt, ist nun aber eine eingehendere Betrachtung erforderlich.

*

Als erstes Axiom, d. h. als eine grundlegende Erfahrungstatsache, hat Newton in seiner 1686 erschienenen mathematischen Naturlehre den Satz aufgestellt: „Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.“ Aus der Ruhe eine Geschwindigkeit zu erlangen, oder von einer Geschwindigkeit in eine andere überzugehen, bedarf der Körper einer beschleunigenden oder verzögernden Kraft. Daß der Zuwachs an Geschwindigkeit oder ihre Abnahme die Folge einer bestimmten Ursache sein muß, lehrt bei einem in gerader Linie sich bewegenden Körper die einfachste Beobachtung und Empfindung. Schwieriger schon ist einzusehen, daß auch der stetige Richtungswechsel der ihrer Größe nach gleichbleibenden Geschwindigkeit eines Körpers in gekrümmter Bahn eine stetig wirkende Kraft erfordert. Unter gekrümmter Bahn können wir dabei immer eine Kreisbahn verstehen, denn jede andere Form, etwa eine

elliptische oder parabolische, kann an einer beliebigen Stelle auf eine mehr oder weniger lange Strecke mit beliebig gesteigerter Genauigkeit durch ein Stück Kreisbahn ersetzt werden. Daß nun eine Kraft erforderlich ist, einen bewegten Körper in einer Kreisbahn zu erhalten, lehren einfache Beobachtungen. Ein an einer Schnur im Kreise geschwungener Stein übt einen sehr merklichen Zug auf die Hand aus, und das Loslassen der Schnur bewirkt sofort das Aufhören der Kreisbewegung und das Fortteilen des Steines. Die alte Schleuder hat bekanntlich diesen Vorgang benutzt, um Steine auf größere Entfernung zu schleudern, als es der unbewaffneten Hand möglich ist. Die Kreisbewegung ist dabei nicht Endzweck, vielmehr nur das Mittel, dem Steine *allmählich* eine große Geschwindigkeit zu erteilen, in einer Form, die sich der menschlichen Wirkungsmöglichkeit anpaßt. Die den Körper in die Kreisbahn zwingende Kraft, in diesem Falle die Spannung der Schnur, die bei hinreichend gesteigerter Geschwindigkeit bis zum Zerreißen der Schnur anwachsen kann, steht nun immer senkrecht zur augenblicklichen Bewegungsrichtung des Körpers, unter dieser verstanden *die* Richtung, in der sich der Körper weiter bewegen würde, sobald der Zug der Schnur aufhörte. Entfällt aber dieser Zwang, so bewegt sich der Körper einfach zunächst in gerader Linie weiter, d. h. in Richtung der Tangente an dem Punkte seiner bisherigen Kreisbahn, an dem der Zwang aufhörte. Eine deutliche Empfindung dieser Verhältnisse erhält man beispielweise auch bei den Straßenbahnen, die Kurven mit starker Krümmung befahren müssen. Da nun die Wirkung einer Kraft auf einen beweglichen Körper immer in einer Aenderung seiner Geschwindigkeit bestehen soll, da aber auch bei gleichbleibender Geschwindigkeit der Kreisbewegung tatsächlich eine stetige Kraft wirkt, so hat es zunächst etwas Be-



Figur 87.

fremdliches, hier die gleiche Wirkung erkennen zu sollen. Darüber kommt man aber fort durch Vergleich der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, die ein ganz frei beweglicher Körper ausführen würde, mit der gleichförmigen Kreisbewegung unter Einfluß der senkrecht zu seiner Bahn wirkenden Kraft. Er würde im ersten Falle in gleichen Zeitabschnitten die Punkte I—IV erreichen (Figur 87), kommt aber in Wirklichkeit nach den

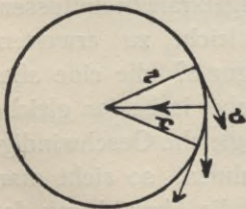
Punkten 1—4 der Kreisbahn, und daß er sich von deren Mittelpunkt nicht immer weiter entfernt, ist eben Folge der nach dem Mittelpunkte gerichteten Kraft, die ihm eine zentripetale Beschleunigung erteilt. Noch klarer wird das, wenn man sich die zentripetale Kraft nicht stetig wirkend denkt, sondern in ganz kurzen Zeitabschnitten absetzend. Der Körper tritt dann immer tangential ein Stückchen aus seiner Bahn heraus, um sofort wieder in diese hineingezogen zu werden (Figur 87 links). Je kleiner man sich die Zeitabschnitte denkt, um so näher kommt man der Vorstellung eines stetigen Verlaufes der Vorgänge. Aus dieser Darstellung erklären sich sofort die Ausdrücke „Zentripetalkraft“ und „Zentrifugalkraft“, beide bedeuten dasselbe, je nachdem man sich in den Körper versetzt denkt oder in den Mittelpunkt der Kreisbahn.

Es handelt sich nun um Bestimmung der Größe der Zentrifugalkraft. Von Einfluß auf sie können außer der Masse des Körpers nur sein die Krümmung der Bahn und die Geschwindigkeit, mit der sie durchlaufen wird. Denkt man sich vorn auf einem Straßenbahnwagen stehend und einer Gleiskurve entgegensehend, so hat man das ganz bestimmte Empfinden, daß beim Herumwerfen des Wagens in die neue Richtung bei gleichbleibender Geschwindigkeit der Gegendruck der Schienen, der hier die Spannung der Schnur in dem früheren Beispiele vertritt, um so größer sein muß, oder anders, daß der Wagen um so leichter aus den Schienen springen wird, je weniger sanft der Uebergang von der bisherigen geraden Strecke zu der an die Kurve anschließenden neuen ist, je stärker also die Kurve gekrümmt ist, das will sagen, je kleiner der Krümmungsradius ist. Und ebenso sicher erkennt man, daß der Uebergang um so schwieriger sein wird, je größer die Geschwindigkeit ist. Es handelt sich also nur noch um die Feststellung, in welchem *Maße* die beiden Größen die Zentrifugalkraft beeinflussen.

Der Einfluß des Krümmungsradius ist leicht zu erwerten. Zeichnet man sich zwei Figuren nach der Figur 87, die eine aber mit doppeltem Krümmungsradius, nimmt man aber in beiden gleiche Abstände der Punkte 1—4 und I—IV an, also gleiche Geschwindigkeiten in der geraden Bahn und den Kreisbahnen, so sieht man sofort, daß beim Durchlaufen derselben Wege die Abweichung der Kreisbahn von doppeltem Krümmungsradius nur halb so groß ist, wie die der anderen, daß also nur die halbe Beschleunigung nach dem Krümmungsmittelpunkte erforderlich ist. Allgemein aber, wie

man aus dem Vergleiche von Kreisbahnen sehr verschiedener Krümmung erkennt, muß die Beschleunigung in dem Maße größer sein, je mehr bei gleichbleibender Geschwindigkeit der Krümmungsradius abnimmt. Die Zentifugalbeschleunigung ist umgekehrt proportional dem Krümmungsradius. Dasselbe ergibt sich durch Vergleichen der absatzweisen Wirkung nach Figur 87 bei verschieden großen Kreisen. Beide Betrachtungsweisen sind nur besondere Ausdrücke für die Tatsache, daß zum beschleunigten Durcheilen verschiedener Strecken — und das sind hier die Abweichungen der Kreisbahnen von der Geraden — die Beschleunigungen verkehrt proportional den Strecken sein müssen, wenn die Vorgänge — das ist hier das Zurücklegen gleicher Bogenlängen auf den verschiedenen Kreisen — sich in gleichen Zeiten vollziehen sollen. Vielleicht gibt folgende Vorstellung noch eine klarere Einsicht: Ein Bahnwagen, der in einer vollständigen Kreisbahn läuft, hat nach jedesmaligem Umlaufe eine ganze Wendung ausgeführt. Bei gleicher Geschwindigkeit braucht er zu dieser Wendung um so weniger Zeit, je kleiner der Durchmesser der Bahn, also auch ihre Länge ist, im umgekehrten Verhältnisse größer muß aber auch die drehende Kraft sein, nämlich der Gegendruck der Schienen.

Dieses Bild kann auch gleich dazu dienen, den Einfluß der Geschwindigkeit zu schätzen. Wenn dieselbe Kreisbahn mit einfacher und mit doppelter Geschwindigkeit durchlaufen wird, so erfolgt im zweiten Falle die ganze Wendung doppelt so schnell, gleichzeitig aber auch zweimal, und das gilt ebenso für einen beliebigen kleinen Teil der Bahn. In jedem Zeitteilchen wirkt also die vierfache Kraft, die die vierfache Zentripetalbeschleunigung entspricht. Die dreifache Geschwindigkeit ergibt die neunfache Beschleunigung u. s. f., allgemein ist diese dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional.

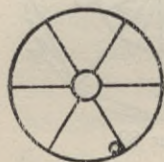


Figur 88.

Daß die Abweichungen der Kreisbahn bei vermehrter Geschwindigkeit nicht im einfachen Verhältnisse dieser Berechnung zunehmen, zeigt auch schon ein Blick auf Figur 87. Diese potenzierte Wirkung der Geschwindigkeit läßt sich schärfer erkennen an Hand einer Darstellung des englischen Mathematikers Hamilton (1805 bis 1865), die unter dem Namen Hodograph ein wertvolles Mittel zur Untersuchung von

Bewegungserscheinungen geworden ist. In der einfachsten Form, für

wichtige Wert kann übrigens auch in noch anderer Form ausgedrückt werden, nämlich mit Hilfe der Winkelgeschwindigkeit, die mit den oben verwendeten Größen in einfacher Beziehung steht. Wie groß nun aber die Fliehkraft selbst ist, das läßt sich einfach finden durch Vergleich der Zentripetalbeschleunigung mit der Erdbeschleunigung. Diese beträgt für jeden Körper annähernd 10 m (genau 9,81 m in unseren Breiten), die sie erzeugende Kraft nennen wir das Gewicht eines Körpers, und das Gewicht eines Kilogrammstückes ist das übliche technische Kraftmaß. Die Fliehkraft eines Körpers in Kilogrammen ausgedrückt ist demnach so viel mal größer oder kleiner als sein Gewicht, wie die Zentripetalbeschleunigung größer oder kleiner ist, als die konstante Erdbeschleunigung.



Figur 90.

Mit der gewonnenen Erkenntnis läßt sich nun gleich folgende Aufgabe lösen. Eine Trommel (Fig. 90) drehe sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit um ihre horizontale Achse. Sie möge innen mit radialen Scheidewänden versehen sein. In einem der Fächer befinde sich lose ein Körper. Welche Geschwindigkeit muß nun die Trommel haben, damit der Körper durch die Fliehkraft dauernd gegen den Trommelmantel gedrückt wird und nicht herabfällt, wenn er im obersten Punkte seiner Kreisbahn ankommt? Offenbar muß zu dem Ende seine Zentripetalbeschleunigung mindestens gleich der Erdbeschleunigung sein. Hätte die Trommel einen Radius von 1 m und machte sie in der Sekunde eine halbe Umdrehung, dann würden die beiden Beschleunigungen einander sehr nahezu gleich sein, wie man nach Obigem leicht berechnen kann. Die Fliehkraft würde dann gerade noch bewirken, daß der Körper am obersten Punkte mit dem Trommelmantel in Berührung bleibt, sie würde aber im untersten Punkte den Druck gegen den Trommelmantel verdoppeln, denn zu dem Gewichte kommt noch die hier in demselben Sinne wirkende Fliehkraft hinzu. Bei 10 mal mehr Umdrehungen der Trommel in der Sekunde steigt aber die Fliehkraft auf das 100fache, ein Kilogrammstück drückt also oben mit 99 kg gegen den Trommelmantel, unten mit 101 kg, und man sieht, wie mit zunehmender Geschwindigkeit der Beitrag der Schwerkraft zu dem ganzen Drucke mehr und mehr verschwindet. In ganz derselben Weise wäre die Spannung einer Schnur zu berechnen, die statt des Trommelmantels dem Körper in gleichem Abstände vom Drehmittelpunkt hielte.

Ist nun etwas Wasser in einer drehbaren Trommel, und ihre Geschwindigkeit so groß, daß sich eine annähernd gleichmäßige dünne Wasserschicht am Trommelmantel ausbilden kann, dann entsteht die Frage nach dem spezifischen Drucke des Wassers gegen den Mantel oder überhaupt der eingefüllten Flüssigkeit. Dieser Druck wird meist angegeben in Kilogrammen für 1 Quadratcentimeter, oder in Atmosphären. Je größer also die Zentripetalbeschleunigung der Wasserschicht ist, als die Erdbeschleunigung, um so stärker drückt die mit der Trommel rotierende Wasserschicht gegen den Mantel, als eine ruhende horizontale Schicht gleicher Dicke auf den Gefäßboden. Daraus ist der Druck in Atmosphären oder die äquivalente Wassersäule bezw. Flüssigkeitsäule sofort anzugeben. Und wenn nun endlich statt einer dünnen Wasserschicht eine vollständige Trommelfüllung vorhanden ist, so läßt sich diese in eine große Zahl dünner Schichten zerlegen, und der spezifische Druck gegen die Trommelwand setzt sich zusammen aus der Summe der gesondert berechneten Beiträge der einzelnen Schichten. Sehr dünne Schichten bei dieser Berechnung anzunehmen, würde natürlich sehr mühsam sein. Man erhält aber schon praktisch brauchbare Näherungswerte, wenn man die Schichtenzahl beschränkt, beispielsweise auf 8 oder 10 dickere Schichten, deren mittleren Radius man zu der Rechnung benutzt. Die Durchführung solcher Rechnungen für bestimmte Abmessungen der Trommel ist sehr lehrreich, namentlich wenn man zuerst vielleicht nur 4, dann 8, 16 u. s. w. Teilschichten annimmt. Man sieht dann, wie die berechneten Werte für die Schichten gesetzmäßig fortschreiten, ebenso die Unterschiede der Werte bei größerer oder geringerer Unterteilung in einzelne Schichten. Solche Summierung von gesetzmäßig fortschreitenden Größen ist Gegenstand der Integralrechnung, die allgemeine Regeln aufstellt, nach denen die besonderen Fälle schnell und nicht nur annähernd behandelt werden können. Der Wert derartiger höherer Rechnungsmethoden ist demnach ein ökonomischer, sie können und sollen aber nicht etwa unmittelbar die Einsicht in den elementaren Naturgang an sich fördern. Im Gegenteil ist zur klaren Erfassung der physikalischen Grundwahrheiten jedes, wenn auch noch so elegante, dem eigentlichen Probleme aber zunächst fremdartige mathematische Beiwerk möglichst auszuschließen, und erst bei der weiteren Verwertung der Grunderkenntnis für weniger einfache Fälle tritt die mathematische Behandlung im engeren Sinne

wieder als machtvolles Hülfmittel hervor. Es braucht im Uebrigen nicht gesagt zu werden, daß jedes, auf die Ergründung des Zusammenhanges von Naturvorgängen gerichtete Denken ein mathematisches Denken im weiteren Sinne ist.

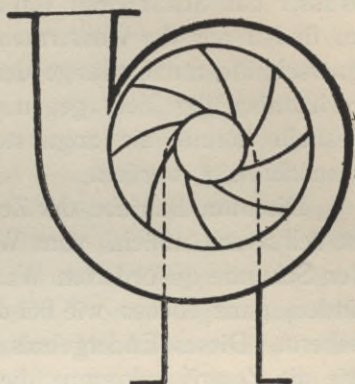
In der geschilderten Weise ist nun also die Berechnung möglich, welchen Druck das Wasser am Umfange der Trommel hat. Derselbe Druck herrscht natürlich auch, wenn die Trommel selbst still steht und nur die radialen Schaufeln sich drehen. Damit ist auch die Höhe gegeben, zu der das Wasser ansteigen würde, wenn in dem Trommelmantel eine Oeffnung mit Rohransatz wäre. Und sollte nun ein gleichmäßiges Heben von Wasser eintreten, so müßte nur noch dafür gesorgt werden, daß seitlich in die Trommel, nahe der Axe, das zu fördernde Wasser zufließen kann. So waren auch die ersten Zentrifugalpumpen mit besonderem Steigrohre gebaut, aber sie konnten nicht entfernt gegen die Kolbenpumpen aufkommen, weil sie eine arge Verschwendung an Leistung verursachten, wie sich leicht ergibt, wenn man auf den Wechsel der Geschwindigkeit des Wassers in der Pumpe achtet.

Zunächst muß die Einströmöffnung in der Nähe der Axe eine gewisse Größe haben, die Schaufeln fassen also das Wasser an ihrem inneren Ende schon mit einer erheblichen Geschwindigkeit, sie erteilen ihm in der Drehrichtung einen Stoß, der einen entsprechenden Verlust an Leistung darstellt. In ihrem weiteren Gange die Schaufeln entlang erhalten die Wasserteile eine immer größere Drehgeschwindigkeit, ohne weiteren Stoß freilich, aber wenn sie vom Außenrande der Schaufeln wegfließen, so treffen sie auf annähernd ruhiges Wasser, wenn die Trommel selbst wesentlich größer gedacht wird, als das Schaufelsystem, sie verlieren also ihre ganze Geschwindigkeit durch Stoß, und ebenso, wenn der Rohransatz nicht tangential zur Trommel steht. Wie groß der damit verbundene Verlust an Leistung ist, läßt sich immer leicht schätzen, wenn man aus der Fallhöhen-Tabelle (Motoren S. 46) die den verlorenen Geschwindigkeiten entsprechende Höhe entnimmt und mit dem in der Sekunde geförderten Wassergewichte multipliziert. Sollen die Verluste fortfallen, so müssen alle plötzlichen Geschwindigkeitänderungen vermieden werden, und damit kommt man auf ganz dieselben Leitsätze, die auch bei den Turbinen (Motoren S. 67 ff.) maßgebend waren.

Diese Verhältnisse sind bei den Zentrifugalpumpen erst seit Mitte des vorigen Jahrhunderts sorgfältiger beachtet, und in England

sind damals zuerst richtig geformte Zentrifugalpumpen entstanden, von denen die Figur 91 eine Vorstellung gibt. Das Wesentliche daran sind die nunmehr gekrümmten Schaufeln und die besondere Form des Umschlußgehäuses. Die Drehrichtung ist im Uhrzeigersinne angenommen.

Das innere Ende der Schaufeln ist immer in Bezug auf die Drehrichtung stark nach rückwärts geneigt, damit es das von den Seiten des Gehäuses her eintretende und dann zunächst radial nach den Schaufeln sich bewegende Wasser ohne Stoß anfaßt. Wäre diese zunächst radiale Geschwindigkeit des Wassers sehr klein, so müßten die inneren Schaufelenden fast tangential zu ihrem begrenzenden Kreise stehen. In Wirklichkeit aber fließt das Wasser mit schon erheblicher Geschwindigkeit in die Schaufeln, die ihm deshalb gewissermaßen etwas entgegenkommen müssen, damit kein Stoß stattfindet. In welchem Winkel aber die Schaufeln an ihrem



Figur 91.

äußeren Grenzkreise enden, das hängt wesentlich ab von der Form des Anschlußgefäßes und der Geschwindigkeit des von ihm nach dem Ausflußrohre geleiteten Wassers. Soll ein Stoß zwischen diesem und dem gleichmäßig die Schaufeln verlassenden vermieden werden, so müssen beide Geschwindigkeiten in Richtung und Größe gleich sein. Die Geschwindigkeit im Gehäuse ist nahezu tangential zu dem Schaufelkreise — nicht genau wegen der nach der Mündung zunehmenden Weite des Gehäuses — und bei gegebener Umfangsgeschwindigkeit des Schaufelrades, die zunächst größer als die Geschwindigkeit im Gehäuse sein mag, muß deshalb das austretende Wasser in dem Maße der Drehrichtung entgegen, also relativ rückwärts geleitet werden, daß seine verbleibende tangentielle Geschwindigkeit gleich der Geschwindigkeit im Gehäuse ist. Das wird erreicht durch angemessenes Zurückbiegen der äußeren Schaufelenden, wie die Figur zeigt, sodaß die Schaufeln in ihrem ganzen Verlaufe nach rückwärts geneigt bleiben. Wäre aber die Wassergeschwindigkeit im Gehäuse gleich der Umfangsgeschwindigkeit des Schaufelrades, so müßten die Schaufeln einfach

radial am äußeren Grenzkreise enden. Sie müßten sogar in der Drehrichtung vorwärts geneigt sein, wenn das Schaufelrad noch langsamer liefe. Alle drei Fälle kommen vor, wobei aber festzuhalten ist, daß die inneren Schaufelenden immer rückwärts geneigt bleiben. — Es war oben mehrfach betont, daß diese Betrachtungen nur annähernd das Richtige treffen, weil nämlich bei der Sorge um Vermeidung des Stoßes von Wasser gegen Wasser auch die radiale Geschwindigkeit berücksichtigt werden muß, mit der das Wasser das Schaufelrad verläßt. Diese Geschwindigkeit ist leicht zu finden aus der Wassermenge in der Sekunde und dem Ausflußquerschnitte am Umfange des Schaufelrades, sie ist aber immer verhältnismäßig klein gegen die tangentielle Geschwindigkeit, und deshalb konnte sie zugunsten der einfacheren Darstellung hier vernachlässigt werden.

Die zum Betriebe der Zentrifugalpumpe erforderliche Leistung ist selbstverständlich, vom Wirkungsgrade abgesehen, aus dem in der Sekunde geförderten Wassergewichte und der Förderhöhe zu finden, ganz ebenso wie bei der Kolbenpumpe und andern Wasserhebern. Dieses Endergebnis sagt aber noch nichts über die Art, wie die Zentrifugalpumpe die Leistung auf das Wasser überträgt. Schließt man die Mündung der Pumpe vollständig ab, läßt man also dieselbe Füllung in der Pumpe nur kreisen, so ist der Druck im Gehäuse einfach als Summe der Zentrifugalkräfte zu berechnen, wie wir früher gesehen haben. Denn es ist für das mit den Schaufeln kreisende Wasser ganz gleichgültig, welche Krümmung jene haben. Bei offener Gehäusemündung aber hängt die Kreisgeschwindigkeit des Wassers von der Schaufelform ab, wie wir gesehen haben, deshalb auch seine Zentrifugalkraft. Dagegen erhält auf seinem Wege von der Pumpenmitte nach außen das Wasser durch die Schaufeln eine immer größere Geschwindigkeit. Die Hubarbeit der Pumpe ist deshalb abhängig von dem Zentrifugaldrucke, wie von der Geschwindigkeit des nach der Mündung des Gehäuses geführten Wassers. Dies ist zu beachten, damit nicht etwa aus dem Zentrifugaldrucke allein auf die Hubkraft der Pumpe geschlossen wird.

Wie die Kolbenpumpen, so sind auch die Zentrifugalpumpen in vielen Formen ausgebildet, wiewohl die in Figur 91 angeordnete die jetzt gebräuchlichste ist. Zu Abweichungen davon hat namentlich der immer noch nicht befriedigende Wirkungsgrad Anlaß ge-

geben, den man durch sanftere Zuführung des Wassers nach der Pumpenmitte, durch sorgfältige Formgebung und durch Leitschaufeln im Gehäuse, wie bei den Turbinen, zu verbessern gesucht hat. Trotzdem ist der Wirkungsgrad im günstigsten Falle kaum über 70 % gestiegen, und im Allgemeinen muß man sich mit einem wesentlich niedrigeren begnügen, wobei immer noch geringere Druckhöhen vorausgesetzt sind, denn mit größeren Höhen nimmt die Güte der Zentrifugalpumpe schnell ab. Sie ist deshalb bis jetzt praktisch beschränkt geblieben auf Förderung großer Wassermengen auf mäßige Höhen, und darin ist sie freilich der Kolbenpumpe bei ihrer großen Einfachheit und Unempfindlichkeit gegen Verunreinigungen des Wassers wesentlich überlegen. Störend beim Antriebe durch Kolbenmotoren ist andererseits wieder ihre große Geschwindigkeit. Als Anhalt und Beispiel dafür möge dienen, daß in einer Serie gleichartiger Zentrifugalpumpen verschiedener Größe bei einer Förderhöhe von 10—12 m die kleinste fast 2000 Umdrehungen in der Minute machte für 150 l Förderung in derselben Zeit, während die größere bei 400 Umdrehungen ungefähr das Hundertfache leistete. Diese großen Umdrehungszahlen sind nun aber wieder sehr geeignet für den Elektromotor, und deshalb sind in der letzten Zeit viele Mühen aufgewendet, die Zentrifugalpumpe bei besserem Wirkungsgrade namentlich für größere Förderhöhen geeignet zu machen. Teilweise wird der letzteren Forderung genügt durch Hintereinanderschalten mehrerer Pumpen, von denen die eine das Wasser aus der vorhergehenden entnimmt, jede einzelne also nur gegen einen Teil der ganzen Druckhöhe zu fördern hat. Da auf diesem Wege aber ein befriedigender Wirkungsgrad schwer zu erreichen sein wird, so muß auf eine grundlegende Verbesserung der einfachen Zentrifugalpumpe gewartet werden. Auffallend ist ja ohnehin, daß diese bis jetzt sich als ein so schwer zu behandelndes Element erwiesen haben, während sich doch ihre Gegenstücke, die Turbinen, von vornherein gerade für sehr große Druckhöhen geeignet erwiesen, und das Peltonrad (Motoren S. 79) in seiner nicht zu übertreffenden Einfachheit bei sehr hohem Drucke bis 80 % Wirkungsgrad erreicht.

*

Bisher hatten wir die Zentrifugalpumpe ausschließlich als Wasserheber betrachtet, die entwickelten Gesetze gelten aber für

Flüssigkeiten überhaupt, wobei der erzielbare Druck unter sonst gleichen Umständen abhängt von der Dichte der Flüssigkeit. Denn wir maßen ja den Zentrifugaldruck an der Höhe der Flüssigkeitssäule, der er das Gleichgewicht halten kann, gleiche Flüssigkeitssäulen sind aber um so schwerer, je größer ihr spezifisches Gewicht ist. Wasser ist nun etwa 800 mal so schwer, als atm. Luft mittlerer Temperatur, und deshalb ergeben Zentrifugalpumpen für Luftförderung vergleichsweise nur sehr geringen Druck, werden deshalb auch meist für sehr hohe Geschwindigkeit eingerichtet. Als Gebläse für niederen Druck sind sie aber vielfach in Anwendung, in großem Maßstabe beispielweise für die Wetterhaltung in Bergwerken.

*

Zur Klasse der Fördergeräte für Flüssigkeiten, die nicht auf ein abgeschlossenes Volumen einen Druck ausüben, wie die Kolbenpumpen und damit verwandte, sondern auf der Aenderung des Bewegungszustandes der Flüssigkeit beruhen, zählen außer den eben behandelten Zentrifugalpumpen noch andere Arten, wie die Schraubenpumpen, die in der Wirkung Aehnlichkeit mit der Schiffschraube haben. Ihrer geringeren Wichtigkeit wegen sollen sie hier übergangen, und nur noch zwei besondere Arten behandelt werden, die zwar auch beschränkteren praktischen Wert haben, als Beispiele für die Eigenschaften bewegter Flüssigkeiten aber interessant sind.

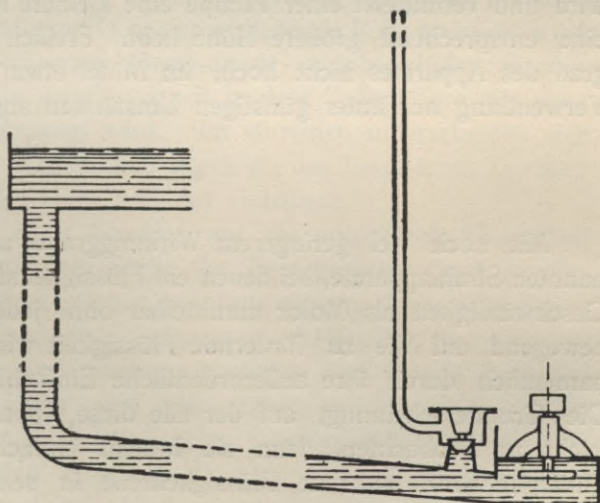
Gegen Ende des 18. Jahrhunderts erfand Michel Montgolfier (1740—1810), der in Gemeinschaft mit seinem Bruder der Schöpfer der Luftschiffahrt wurde, einen Apparat, der bei uns unter dem Namen Stoßheber oder hydraulischer Widder bekannt ist und der von einer gewissen Höhe herabfließendes Wasser nur durch sich selbst auf eine größere Höhe zu heben im Stande ist. Das klingt zunächst paradox, es wird sich aber zeigen, daß nur diese kurze, unvollkommene Angabe seiner Wirkung paradox ist. Der Apparat beruht auf folgender Beobachtung: Wenn man das aus einem Rohre ausströmende Wasser plötzlich durch einen Hahn am Weiterfließen verhindert, so hört man, wenn das Wasser vorher genügende Geschwindigkeit hatte, einen scharfen Schlag im Rohre und spürt auch dessen Erzittern. Die bekannte Erscheinung legt durch ihre charakteristische Form die Deutung selbst nahe: Das

in dem Rohre befindliche Wasser hatte in der Bewegung eine erhebliche Energie, die sich beim plötzlichen Stillsetzen als Stoß auf die Rohrwand äußert. Unter geeigneten Umständen ist der Stoß, also die plötzliche Druckerhöhung im Rohre, so stark, daß ein Reißen des Rohres eintritt, während es dem Drucke des ruhenden Wassers mit mehrfacher Sicherheit widersteht. Aus einer absichtlich verschwächten Stelle des Rohres würde also das Wasser schnell vorübergehend unter viel größerem Drucke hervorspritzen, als der ruhenden Wassersäule vor der Zapfstelle entspricht, diese Wassermenge könnte also auf eine viel größere Höhe steigen. In Wirklichkeit muß das Eintreten dieser gefährlichen Erscheinung in Rohrleitungen für Wasser immer sorgfältig vermieden werden, weshalb auch nicht die schnellabsperrenden Hähne, sondern die langsam schließenden Schraubventile verwendet werden. Der Apparat von Montgolfier macht umgekehrt die Erscheinung nutzbar und bewirkt selbsttätig eine fortwährende Wiederholung des Spieles.

Aus dem größeren Behälter (Fig. 92) links strömt Wasser durch ein langes Rohr nach dem Stoßventile auf der rechten Seite.

Das Ventil ist jetzt offen und außerdem so belastet, daß es von dem dagegenströmenden Wasser erst gehoben werden kann, wenn dieses

nach vorhergehender Ruhe annähernd seine größte Geschwindigkeit erlangt



Figur 92.

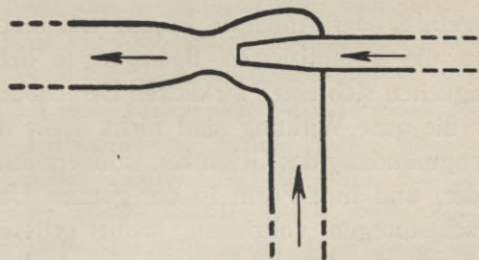
hat. In diesem Augenblicke schließt sich das Ventil, und zwar plötzlich, da es nach einmal begonnener Aufwärtsbewegung den Wasserdurchfluß sofort verengt, also vermehrten Bewegungsantrieb erhält. Es würde sich damit der oben besprochene Wasserschlag vollständig ausbilden, wenn nicht das kleinere Ventil (links von

dem Stoßventile) sich unter dem vergrößerten Drucke nach dem Steigrohre öffnete und einen Teil des Wassers auf die größere Höhe steigen ließe. Bei gleich wieder sinkendem Drucke schließt sich das kleinere Ventil, die Belastung des Stoßventiles öffnet dieses, das Wasser beginnt wieder aus dem Behälter abzufließen, das Spiel beginnt von Neuem. Daß hier kein Perpetuum mobile vorliegt, erkennt man aber sofort daran, daß immer erst eine größere Wassermenge aus dem Stoßventile abfließen muß, ehe eine kleinere Menge auf die größere Höhe gehoben werden kann. Frappierend wirkt freilich auf den ersten Blick eine gelegentlich anzutreffende Demonstrationform des Apparates, bei der das Druckwasser wieder in den Hauptbehälter zurückfließt, scheinbar also immer denselben Kreislauf macht. Man sieht aber gleich, wie trotzdem der Inhalt des Behälters schnell abnimmt, weil ja das durch das Stoßventil abfließende Wasser nicht dahin zurückgelangt. In der Arbeitsweise ist also der Apparat zu vergleichen mit einem Wassermotor, der durch Wasser von großem Drucke und gewisser Menge betrieben wird und vermittelt einer Pumpe eine kleinere Menge Wasser auf eine entsprechend größere Höhe hebt. Freilich ist der Wirkungsgrad des Apparates nicht hoch, im Mittel etwa 30 %, und seine Verwendung nur unter günstigen Umständen angezeigt.

*

Mit noch viel geringerem Wirkungsgrade arbeiten die sogenannten Strahlapparate, bei denen ein Flüssigkeitstrahl von größerer Geschwindigkeit als Motor unmittelbar ohne jedes Zwischenmittel bewegend auf die zu fördernde Flüssigkeit wirkt, die sich also namentlich durch ihre außerordentliche Einfachheit auszeichnen. Die Grunderscheinung, auf der alle diese Apparate beruhen, ist leicht zu beobachten, denn sie besteht einfach darin, daß ein Flüssigkeitstrahl ruhende Flüssigkeitteile in seiner Nähe in Mitleidenschaft zieht, an deren Stelle dann andere Teile treten u. s. f. Die Strahlapparate haben die Aufgabe, diese Erscheinung in zweckdienlicher Form verlaufen zu lassen. Die kleinen, mit dem Munde angeblasenen Wasserzerstäuber zum Besprengen von Blumen geben ein Beispiel von Strahlapparaten, da sie das Wasser in dem senkrechten Saugrohre durch die geringe Luftverdünnung haben, die der quer über die Mündung des Saugrohres geblasene Luftstrahl

hervorbringt. Einen Strahlapparat in der Dampfmaschinenteknik



Figur 93.

haben wir früher (Motoren S. 237) in dem Injector von Giffard kennen gelernt. Der Schwerpunkt dieses Apparates liegt indessen in seinen eigentümlichen thermisch-mechanischen Eigenschaften. Als allgemeines Schema für die Strahlapparate kann man die Verbindung eines engen Rohres (Düse) mit einem weiteren Rohre nach Figur 93 ansehen. Die Motor-Flüssigkeit, gleichgültig zunächst, welcher Art sie ist, strömt aus der Düse mit größerer Geschwindigkeit aus und reißt durch Reibung und Stoß die Flüssigkeit in dem weiteren Rohre mit, sodaß ein gleichmäßiges Fließen in Richtung der Pfeile eintritt, wobei die gesamte Flüssigkeit mit einer gewissen Geschwindigkeit in das anschließende Rohr gedrückt wird, also einen entsprechenden Gegendruck zu überwinden vermag, während andererseits die Flüssigkeit in dem Zuflußrohre mit einer gewissen Kraft angesaugt wird. Im einzelnen unterscheiden sich die Strahlapparate vornehmlich durch die den besonderen Zwecken angepaßte Form der Düse und des Gehäuses.

Die Wirkung eines Strahles auf die umgebende Flüssigkeit beruht natürlich auf dem Stoße der Teile größerer Geschwindigkeit auf die noch unbeweglichen oder langsameren. Die schnelleren Teile müssen also genügende Gelegenheit erhalten, mit langsameren zusammenzutreffen und nach geschehener Vereinigung muß das Ganze am Abweichen von der erhaltenen Richtung möglichst gehindert werden, d. h., seine Geschwindigkeit muß groß genug sein, um den entgegenstehenden Druck zu überwinden. Ist dieser gering, so kann offenbar der bewegende Strahl bei gegebener Geschwindigkeit eine verhältnismäßig große Menge Flüssigkeit fördern, die Düse ist klein gegenüber dem Gehäuse. Mit grösserem Gegendrucke muß aber das auffangende Mundstück des Gehäuses immer kleiner werden und ist dann oft nur wenig weiter als die Düse. Die Gelegenheit zu schneller Mischung der bewegenden und bewegten Flüssigkeit wird aber geschaffen durch genügenden Umfang des Strahles. Bei grösseren Appa-

raten wird deshalb kein voller, sondern ein rohrförmiger Strahl verwendet.

Die besondere Formgebung der Apparate ist nur auf empirischem Wege möglich, da die komplizierten Bewegungen beim Zusammentreten der Flüssigkeiten sich einer wirklichen Berechnung entziehen. Wesentlich für die gute Wirkung sind nicht allein die Weite der Düse und der Fangmündung des Gehäuses, sondern auch ihre Stellung gegeneinander und ihre Form in der ganzen Umgebung, wo sich die Erscheinungen vollziehen, wobei grössere Unterschiede namentlich durch die Art der Flüssigkeiten bedingt werden.

Das Strahlprinzip ist anwendbar für tropfbare und gasförmige Flüssigkeiten, wie für gleichartige und ungleichartige. Es kann Wasser durch Druckwasser gefördert werden, oder durch Druckluft und Dampf, wie umgekehrt, in größerem Umfange werden aber die Strahlapparate zum Fördern von Luft durch Dampf benutzt, namentlich als Gebläse für Dampfkesselfeuerungen. In der Eisenbahntechnik sind sie in Gebrauch zum Erzeugen des Vakuums bei gewissen Luftbremsen. Bei diesen Strahlsaugern, die eine starke Luftverdünnung herstellen müssen, hat der hohle Dampfstrahl etwa 5 cm Durchmesser, aber nur einen Bruchteil Millimeter Wanddicke. Als Gegenbeispiel dazu möge ein Gebläse für einen Gasgenerator angeführt werden, das die Luft gegen den nur geringen Druck mit einem massiven Dampfstrahle von 5 mm Dicke fördert, der einer Fangmündung des Gehäuses von 35 mm Durchmesser gegenübersteht. Diese Beispiele sollen hier nur zur Veranschaulichung der Unterschiede dienen, die durch die besonderen Arbeitsbedingungen herbeigeführt werden. Eine besondere Ausbildungform haben die Strahlapparate durch Anwendung mehrfacher Düsen erfahren, die hintereinander in gemeinschaftlichem Gehäuse angeordnet sind. Die erste Strahldüse saugt dabei einen Teil der zu fördernden Flüssigkeit an, die in der folgenden Düse ihrerseits als fördernder Strahl wirkt, um ihre Saugmenge vermehrt weiter in eine Strahldüse tritt, und unter Umständen wird dieser Vorgang noch öfter wiederholt. Der Vorzug dieser Einrichtung zur besseren Regelung der Flüssigkeitsbewegungen leuchtet von selbst ein. Strahlgebläse mit Wasserbetrieb waren früher in größerem Maßstabe als sogenannte Wassertrommelgebläse in Hüttenwerken in Anwendung, kommen jetzt aber wohl nur noch als kleine be-

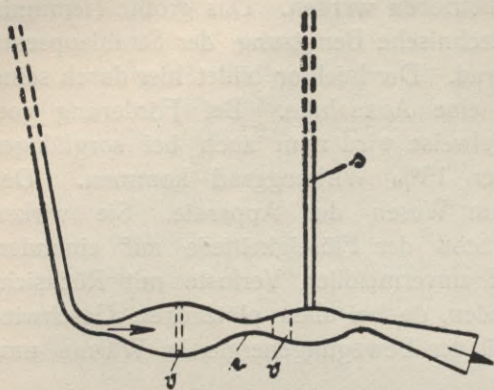
queme Laboratoriumgeräte vor, namentlich als Sauger, die durch Wasser oder Quecksilber betrieben werden. Das größte Hemmnis für die umfangreichere technische Benutzung der Strahlapparate ist ihr niedriger Wirkungsgrad. Der Injektor bildet hier durch seine besondere Wirkungsweise eine Ausnahme. Bei Förderung von Wasser mit Wasser beispielweise wird man auch bei sorgfältiger Durchbildung selten über 15% Wirkungsgrad kommen. Der Grund dafür liegt in dem Wesen der Apparate. Sie wirken in allen Fällen durch Stoß der Flüssigkeitsteile auf einander, und mit dem Stoße sind unvermeidlich Verluste mit Rücksicht auf den Endzweck verbunden, da bei allen plötzlichen Geschwindigkeitänderungen ein Teil der Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt wird.

*

Bei manchen der hierher gehörenden Apparate tritt das Strahlprinzip, so wie es im Vorstehenden entwickelt wurde, weniger auffällig hervor, als die Erscheinung des „hydraulischen“ Druckes, so genannt im Gegensatze zu dem „hydrostatischen“ Drucke, d. h. der Druck bewegten Wassers auf die Röhrenwandungen im Gegensatze zu dem des ruhenden. Die Erscheinung ist für die Mechanik der Flüssigkeiten von besonderer Wichtigkeit, und deshalb möge ihre eingehendere Betrachtung den Schluß bilden.

Die Ausflußgeschwindigkeit des Wassers aus einer Gefäßöffnung ist, wie wir wissen, gleich der Geschwindigkeit, die das Wasser um die Druckhöhe frei herabfallend erlangen würde. Das folgt aus dem Energiegesetze, denn die von der Schwerkraft an einem Wasserteilchen geleistete Arbeit ist dieselbe, ob es langsam in dem Gefäße sinkt, oder um die ganze Höhe der Wassersäule schnell herabfällt. Unten angekommen muß die Arbeit in dem Wasserteilchen in beiden Fällen als gleich große Bewegungsenergie enthalten sein. Aus der Falltabelle, die leicht herzustellen ist (Motoren S. 46), wenn man weiß, daß die Geschwindigkeitszunahme eines fallenden Körpers in jeder Sekunde nahezu 10 m (genauer 9,81 m) beträgt, ist also für jede Druckhöhe die ihr zukommende Ausflußgeschwindigkeit zu entnehmen, und umgekehrt. Die Ausflußgeschwindigkeit durch anschließende Röhren wird durch die Widerstände, Reibung und etwaige plötzliche Querschnittänderungen,

vermindert, oft in beträchtlichem Maße. Wesentlich ist hier aber



Figur 94.

zunächst nur, daß in einem Rohre von wechselndem Querschnitte (Fig. 94), das einen Teil der ganzen Abflußleitung eines Behälters bildet, sich sehr bald nach Beginn des Ausflusses ein stationärer Bewegungszustand herstellt, die Geschwindigkeiten der Wasserteilchen an den einzelnen Stellen des Rohres behalten immer denselben Wert. Dabei ist eine unbeschränkte Größe des Behälters vorausgesetzt, damit während beliebig langer Zeit die wirkende Druckhöhe als unveränderlich angesehen werden kann, und ebenso soll diese Druckhöhe verhältnismäßig groß sein, damit Druckunterschiede infolge der Weite des hier annähernd horizontal gedachten Rohres vernachlässigt werden können.

Nach Eintritt der stationären Wasserbewegung gehen nun offenbar in derselben Zeit gleiche Wassermengen durch alle Rohrquerschnitte. Sind ferner die Uebergänge von den kleineren zu den größeren Querschnitten recht sanft, wie die Figur andeutet, so kann man annehmen, was die Erfahrung auch mit genügender Annäherung bestätigt, daß in jedem Querschnitte des Rohres die einzelnen Wasserteilchen dieselbe Geschwindigkeit haben. Ein von zwei beliebigen Querschnitten begrenzt gedachtes Wasservolumen v wird sich also so vorwärts schieben, daß es seine Gestalt mit den Querschnitten ändert, seine Dicke, in Richtung der Bewegung, wächst bei abnehmender Rohrweite und umgekehrt, und ein einzelnes Wasserteilchen hat um so größere Geschwindigkeit, je kleiner der Rohrquerschnitt ist, an dem es sich zur Zeit befindet. Der Druck, der dabei im Rohre herrscht, kann an jeder Stelle der Rohrwand durch ein enges, oben offenes Standrohr s von genügender Höhe gemessen werden.

Ist das Ausflußrohr an seiner Mündung rechts geschlossen, so ist, unter der oben gemachten Voraussetzung, der Druck im ganzen Rohre gleich der Höhe der Wassersäule bis zum Behälter,

bei offener Mündung zeigt sich aber der Druck in den Rohrquerschnitten sehr verschieden. Er ist immer kleiner, als der Druck der wirksamen Wassersäule von dem großen Behälter her, er wechselt mit den Rohrquerschnitten und ist am kleinsten an den engsten Stellen. Unter Umständen kann sogar der Druck unter den Atmosphärendruck herabgehen, sodaß in dem an der betreffenden Stelle angebrachten Standrohr gar keine Wassersäule steht, sondern umgekehrt Luft durch das Standrohr in das Ausflußrohr eindringt.

Daß von fließendem Wasser gelegentlich gar kein Druck auf die umschließende Rohrwand ausgeübt wird, folgt schon aus der Möglichkeit freier Wasserstrahlen. Denkt man sich etwa einen Springbrunnenstrahl, soweit er von selbst zusammenhängend ist, durch ein Rohr umkleidet, das ihn eben berührt, so ist offenbar der Zustand des drucklosen Wasserrohres hergestellt. Denkt man sich weiter an einer Stelle des Rohres plötzlich ein geringes Hindernis, so wird sich vor ihm ein gewisser Druck auf die Rohrwand einstellen, und um so mehr, wie das Hindernis zunimmt. Man hat es so in der Hand, den Druck im Rohre vor dem Hindernisse bis zur vollen Höhe des Druckes ansteigen zu lassen, der den vorher freien Wasserstrahl erzeugte. Dieser Vorgang mag einigen Anhalt geben zur ersten empfindungsgemäßen Erklärung der Aenderung des Druckes mit der Geschwindigkeit, die sich genauer mittelst des Energieprinzipes übersehen läßt.

Ein einzelnes Wasserteilchen, so sahen wir, wechselt beim Durchgange durch das Ausflußrohr seine Geschwindigkeit umgekehrt wie die Querschnitte, die es durchheilt. Wenn aber beispielweise die Wasserteilchen an der engen Stelle eine viel größere Geschwindigkeit haben, als in der vorhergehenden bauchigen Rohrgegend, so müssen sie auf dem Wege von daher beschleunigt werden, durch einen Druck, der auf sie nur von den rückwärtigen, langsameren Wasserteilchen ausgeübt werden kann. Dieser Druck kann aber die Beschleunigung nur bewirken, wenn die zu beschleunigenden Wasserteilchen selbst sich unter geringerem Drucke befinden. Umgekehrt, wenn beim Uebergange von einer engeren Stelle zu einer weiteren die Geschwindigkeit der Wasserteilchen wieder abnimmt, so muß ihr Druck wieder wachsen, denn sie müssen ja nunmehr die ankommenden schnelleren Teile verzögern, auf diese also einen Druck in entgegengesetzter Richtung ausüben.

Die sanften Uebergänge beim Wechsel der Querschnitte sorgen dabei für den stoßfreien Ablauf der Vorgänge. Da also keine Energieverluste stattfinden, so gewinnt das Wasserteilchen bei seinem Wege durch das Rohr von wechselndem Querschnitte immer soviel an Geschwindigkeithöhe, wie seine Druckhöhe abnimmt. Der größte Druck, der in dem Rohre herrschen kann, ist der hydrostatische, entsprechend dem Drucke der ganzen Wassersäule von der unbewegten Oberfläche des Behälters bis zu dem hier betrachteten Rohrstücke, und der hydraulische Druck ist immer um die Geschwindigkeithöhe kleiner, als der hydrostatische. Würde aber die Oberfläche des Behälters so klein sein, daß sie sich während des Ausflusses merklich senkte, würde also das Wasser an der Oberfläche selbst schon eine gewisse Geschwindigkeithöhe haben, so würde von dem hydrostatischen Drucke an der betrachteten Rohrstelle nur der Ueberschuß an Geschwindigkeithöhe abzuziehen sein, den die Wasserteilchen an dieser Stelle haben gegenüber denen an der Oberfläche des Behälters. Denn nur dieser Ueberschuß an Geschwindigkeithöhe würde ja durch die inneren Druckkräfte zu leisten sein. Anstelle der Wassersäule von einem Behälter aus kann natürlich auch der Druck eines Kolbens treten, der ja immer einer Wassersäule äquivalent gesetzt werden kann. Die Betrachtungen behalten also auch für diesen Fall ihre Gültigkeit.

Der in dieser Weise mit Hülfe der Falltabelle für eine gewisse Strömungsgeschwindigkeit im Ausflußrohr leicht zu berechnende hydraulische Druck kann nun, wie oben schon angedeutet, selbst unter den Atmosphärendruck fallen. Dann würde Luft, oder, wenn das Standrohr s umgebogen sein freies Ende in Wasser tauchte, von diesem in das Ausflußrohr eindringen, und die dadurch angezeigte Saugkraft der Rohrstelle kann sich bis zum Heben einer dem Atmosphärendrucke entsprechenden Wassersäule steigern. Wie diese Tatsache für Saugapparate nutzbar werden kann, liegt auf der Hand.

Die Erscheinungen des hydraulischen Druckes sind in ihren Einzelheiten nicht immer leicht zu verstehen und geben gelegentlich Anlaß zu Zweifeln. So erscheint es fast paradox, daß zunehmende Verengung des Ausflußrohres eine Abnahme des Druckes zur Folge haben soll, während man doch geneigt ist, solche Verengung als Hindernis aufzufassen, das einen vermehrten Druck des Wassers

erfahren müßte. Um diesen Zweifel zu beseitigen, muß man bedenken, daß an der vorhergehenden Erweiterung des Rohres eine Druckvergrößerung entsteht, dort also gewissermaßen das Hindernis zu suchen ist.

Zu einer interessanten Folgerung gibt noch das konisch gebaute freie Ende des Ausflußrohres Anlaß. In diesem konischen Ansatz muß nach dem Vorstehenden gegenüber der engeren vorhergehenden Stelle ein größerer Druck herrschen. Da dieser Druck selbst aber an der Mündung nur gleich dem Atmosphärendrucke ist, so muß der Druck an der engeren Anfangstelle niedriger als der Atmosphärendruck sein. Der konische Ansatz wirkt also saugend, und natürlich nicht nur, wenn er das Ende eines längeren Ausflußrohres bildet, wie hier, sondern wenn er selbst das Ausflußrohr darstellt. Durch Ansetzen eines solchen konischen Rohres an eine Gefäßöffnung wird also die Ausflußgeschwindigkeit aus der Oeffnung vergrößert. Das scheint aber dem Energiegesetze zu widersprechen, nach dem die Ausflußgeschwindigkeit gleich der des freien Falles sein sollte. In Wirklichkeit aber bestätigt sich hier nur das Energiegesetz. Die Ausflußgeschwindigkeit bei konischem Ansatzrohre ist allerdings tatsächlich größer, als bei freier Oeffnung und kann nicht mehr unmittelbar aus der Falltabelle entnommen werden. Dafür findet man aber für das Wasser an der Mündung des Konus eine geringere Geschwindigkeit und die aus Geschwindigkeithöhe und ausgeflossenem Wassergewichte zu berechnende Bewegungsenergie ist nicht größer, als wenn dasselbe Wassergewicht frei ausgeflossen wäre. Die Wirkung des konischen Ansatzes hat also nur in einer scheinbaren Vergrößerung der Ausflußöffnung bestanden. Diese Schlüsse gelten aber nur, wenn das Ansatzrohr während des Vorganges auch wirklich mit Wasser angefüllt ist, denn eine zu starke Erweiterung würde die Ausbildung eines freien Wasserstrahles in dem Rohre zur Folge haben, dieses also unnütz machen.

Die Gesetze des hydraulischen Druckes gelten für alle Flüssigkeiten, also auch für Gase, nur sind die absoluten Werte der Drucke im Verhältnis der viel geringeren Dichten kleiner.

Das Wesen des hydraulischen Druckes ist zuerst von Daniel Bernouilli (1700—1782) klar erfaßt und aus dem Energieprinzip abgeleitet, das von da an in der Mechanik der Flüssigkeiten eine ausschlaggebende Bedeutung gewann.

Fuhrwerke.

I.

Im Jahre 1817 trat der Forstmeister Drais in Mannheim mit einer eigenartigen Erfindung hervor. Die Zeitgenossen mögen an das Steckenpferd des Knaben gedacht haben, wenn sie sahen, wie der ernste, vielleicht durch gelegentliche Sonderbarkeiten auffallende Herr rittlings auf einem Fahrgestelle saß, das vorn und hinten ein Rad hatte, wovon das erstere durch einen Querschwengel steuerbar war. Ein Antriebmechanismus fehlte, denn das der Körperlänge anzupassende Gestell sollte dem Reiter gestatten, wie beim Gehen die Füße auf den Boden zu setzen und dergestalt mit Fußschlägen das Gefährt vorwärts zu treiben. Drais selbst soll von da an sich immer seines Geisteskindes bedient haben, und benutzbar muß das wohl gewesen sein, denn es wurde bald Gegenstand des Sportes. Es entstanden richtige Fahrschulen, um im Gebrauche des Vehikels gründlich zu unterweisen, und ein alter Stich aus der damaligen Zeit zeigt eine Anzahl Sportjünger im Biedermeier-Aufzuge mit dem obligaten großen Zylinder auf dem Haupte sich in der Bahn tummelnd, von den bequemeren Genossen ohne Rad durch das mit affektierter Wichtigkeit gehandhabte, damals noch etwas unförmige Binocle beobachtet. Lange hat wohl der Enthusiasmus nicht angehalten, was nur auf den Sport und die Neuigkeitsucht gestellt ist, hat keinen langen Bestand, und zum ernsthafteren Gebrauche war das Gebilde Drais' noch zu unvollkommen. Auch als es viel später durch einen rationellen Antriebmechanismus verbessert war, konnte es nur langsam Fuß fassen, wurde immer als Gegenstand harmlosen Spottes aufgefaßt, und noch in den 70er Jahren sprach ein sehr bekannter technischer Schriftsteller von dem „Schwindel- und Kunstreiterfuhrwerk“. Späterhin aber hat man dem Vater dieses Fuhrwerks in Karlsruhe ein Denkmal gesetzt.

Den Erfindungsgedanken Drais' können wir jetzt besser würdigen als seine Zeitgenossen. Beim Gehen führen wir den Körper, solange wir auf ebener horizontaler Bahn bleiben, in gerader Linie vorwärts, wir heben ihn nicht der Schwerkraft entgegen um merkliche Höhen, wie beim Treppensteigen, wir leisten also scheinbar keine Arbeit, und doch ermüden wir fühlbar. Wir ermüden allerdings auch beim Stehen oder beim ruhigen Halten einer Last, weil die Anspannung der Muskeln einen Verbrauch an physiologischer Arbeit zur Folge hat, aber die Geharbeit ist doch, genauer betrachtet, tatsächlich ein stetes Heben des Körpergewichtes um kleine Beträge und ein fortwährendes Beschleunigen der immer wieder verzögerten Masse. Das ist leicht zu beobachten. Der Körper bewegt sich beim Gehen nicht gleichmäßig vorwärts, sondern mehr ruckweise. Er ruht abwechselnd auf dem einen und andern Beine, wird von dem augenblicklich am Boden befindlichen vorwärts geschoben, von dem vorgestreckten beim Aufsetzen wieder etwas verzögert, gleichzeitig rythmisch gehoben und gesenkt, der Schwerpunkt des Körpers bewegt sich mit wechselnder Geschwindigkeit und nicht in genau horizontaler, sondern in flacher Wellenlinie vorwärts, und die bei jedem Schritt zu leistende, an sich geringe Hubarbeit wird zum großen Teile in den Stößen der Füße gegen den Boden verschwendet. Dabei spielt auch noch die rein physiologische Arbeit des Aufrechterhaltens und Balancierens eine wichtige Rolle. Der „elastische“ Gang des gewandten Menschen besteht in der möglichsten Vermeidung schroffer Wechsel in der Geschwindigkeit und der Schwerpunktlage beim Gehen, und wie durch planmäßige Ausbildung ein unzuweckmäßiger, weil zu viel Arbeit verbrauchender Gang in einen besseren verwandelt werden kann, lernen jährlich viele tausend Rekruten unbewußt kennen. Der Soldat hat auch beste Gelegenheit zu beobachten, wie jedes Kilogramm Mehrbelastung des Körpers die Geharbeit erschwert, und wie ein Marsch von 25 Kilometern, den ein mäßiger Tourist spielend bewältigt, als eine schwere Tagesarbeit erscheint, wenn er mit Gepäck und Waffen ausgeführt werden muß.

Wäre also das Körpergewicht mit seinen Anhängseln nicht zu tragen, und wären nur die geringen Hindernisse der Vorwärtsbewegung zu überwinden, die der nicht ganz ebene Boden und der wechselnde Luftwiderstand unvermeidlich bieten, so müßte die Marschleistung des Menschen ungemein wachsen. Fühlt man

doch schon eine merkliche Erleichterung beim Gehen, wenn man mittelst eines Stockes einen Arm mit zur Geharbeit heranzieht, und eine besonders große Steigerung der Marschleistung bei Anwendung von zwei Stöcken. — Das Alles klingt fast trivial, und doch wurde der Forstmeister Drais verlacht, als er die Folgerung daraus zog, durch ein Fahrgerät die Beine vom Körpergewichte zu entlasten, und für den einzelnen Menschen in einfachster Weise das zu erreichen suchte, was doch schon durch den Jahrtausende alten Gebrauch des Wagens in Uebung war. Es gibt wenige Beispiele der Verkennung einer Erfindung, die so handgreiflich zur Vorsicht in der Beurteilung des Neuen mahnen, wie der Ursprung des Fahrrades, wenn auch wieder betont werden muß, daß die unvollkommene Form, in der es sich zunächst zeigte, den leitenden Gedanken des Erfinders nur unklar zum Ausdruck brachte. An dem jetzigen Fahrrad läßt sich die Berechtigung von Drais' Bestrebungen sehr leicht nachweisen, aber die Lehre sollte aus dem Entwicklungsgange gezogen werden, daß doch vielleicht auch das heutige Fahrrad noch nicht die beste Verwirklichung seiner Grundidee darstellt, und daß noch ganz andre Formen aufkommen können, die eine wesentlich vollkommenere Lösung der Aufgabe darstellen.

Ein Gegenstück zu der Erfindung des Fahrrades mag in der Erfindung des überhaupt einfachsten Fuhrwerkes gesehen werden, des Schubkarren, dem man in seinen verschiedenen Formen vielleicht ein biblisches Alter zuerkennen möchte. Der Schubkarren ist aber noch recht jungen Datums, erst einige hundert Jahre alt und nicht vor 1400 nachweisbar. Die Franzosen haben sogar die Ehre der Erfindung einem ihrer Besten zugeschrieben, dem Philosophen und Mathematiker Blaise Pascal (1623—1662). Mit Unrecht zwar, aber es hat fast etwas Rührendes, dem großen Manne, der in der letzten Zeit seines ohnehin so kurzen Lebens alles Irdische abzutun strebte, die Ehre einer Erfindung zu verleihen, die der groben Werkeltagsarbeit dient, wohl in dem Empfinden, daß es seiner besonders würdig sei, sich in seiner lichten Höhe des dürftigen Arbeiters erbarmt zu haben.

Die beiden Beispiele geben eine eindringliche Lehre zur Geschichte der Erfindungen, und gerade, weil es sich um einfache Dinge handelt. Dort der bloße Spott für eine geniale, aber unverständene Idee, hier die fast überschwängliche Schätzung einer

Leistung, die der Jetztzeit als kaum noch des Aufhebens wert erscheint. Sollte sich nicht auch etwas von der Sinnesart der beiden Völker in der verschiedenen Bewertung ausdrücken? Für unseren näheren Zweck aber weisen die Erfindungen des Fahrrades und des Schubkarrens daraufhin, wie das Einfachste sich oft spät entwickelt, und daß nur die Beachtung des Entwicklungsganges zu einer gerechten Würdigung des in dem Einfachen ausgeprägten Fortschrittes führt.

*

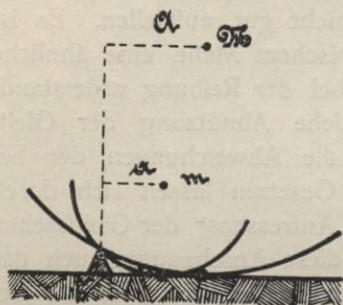
Die Erfindung der Räderfuhrwerke überhaupt ist in Dunkel gehüllt, schon die ältesten Ueberlieferungen erwähnen ihrer. Wie sie aber entstanden sind, jedenfalls auch unabhängig bei verschiedenen Völkern, können wir uns recht gut vorstellen. Das einfachste Transportmittel für Lasten ist sicher überall die Schleife gewesen, die in unseren Schlitten, auch in den Schleifen für niedere landwirtschaftliche Arbeiten noch fortlebt, unter besonderen Umständen sogar, wie auf Madeira, in sorgfältiger ausgebildeter Form. Als eigentlicher Ausgangspunkt des Räderfuhrwerkes kann aber zweifellos die Schleife mit untergelegten Walzen gelten. Zu der Beobachtung, daß schon ein einfacher runder Stab, der zwischen Schleife und Boden gerät, ins Rollen kommen kann und dabei die erforderliche Zugkraft auffallend verkleinert, bietet sich ungesucht und oft Gelegenheit, und auch die Erkenntnis ist leicht zu machen, daß mit zunehmendem Durchmesser des runden Zwischenstückes seine günstige Wirkung wächst. Die Fortbewegung großer Lasten auf untergelegten Walzen ist denn auch ein von Alters her bis heute geübtes Verfahren, das freilich auf kurze Strecken beschränkt ist, weil die Walzen nicht nur auf dem Boden abrollen, sondern auch an der aufruhenden Last, deshalb beim Freiwerden auf der Rückseite immer wieder vorn untergelegt werden müssen, und weil ferner die geringe Lenkbarkeit des Ganzen nur ganz geringe Geschwindigkeiten zuläßt. Das ganze Verfahren erhält damit den Charakter der gelegentlichen Aushilfe. Wie aber weitere Beobachtungen an dem kunstlosen Fuhrwerke die Erfindung des mit der Last dauernd verbundenen Rades nahelegen, läßt sich zwanglos verstehen, wenn man sich die Erfahrungen vergegenwärtigt, die beim Fortbewegen von Körpern auf einer Unterlage zunächst ganz unbewußt gesammelt werden.

Bei der horizontalen Verschiebung von Körpern ist keine Arbeit gegen die Schwerkraft zu leisten, sie erfordert aber trotzdem eine Kraft, die, das ist die nächstliegende Beobachtung, vom Zustande der aufeinander gleitenden Flächen abhängig ist. Je glatter und härter diese sind, um so geringer ist die erforderliche Verschiebungskraft. Systematische Untersuchungen über die Größe dieser Kraft sind erst verhältnismäßig spät angestellt, nachdem der sich entwickelnde Maschinenbau das Bedürfnis geschaffen hatte, die als Hindernisse der Bewegung auftretende Reibung im Voraus abzuschätzen. Für alle Stoffe und Belastungen, die im Maschinenbau auftreten, hat namentlich der französische Genie-General Morin umfangreiche Versuche angestellt, die seitdem durch zahllose Versuche vervollständigt sind. Die Ergebnisse aller Erfahrungen inbezug auf die gleitende Reibung kann man annähernd zutreffend dahin zusammenfassen: Bei einem gewissen Drucke der aufeinander gleitenden Körper ist die Reibung einfach proportional diesem Drucke und weiter abhängig von den Stoffen oder Gleitflächen und ihrem Zustande. Durch flüssige Zwischenmittel, Wasser und namentlich Fette, kann die Reibung wesentlich vermindert werden. Die Reibung ist aber unabhängig von der Größe der Gleitflächen und von der Geschwindigkeit. Als einfachstes Maß der Reibung dient die Angabe, welcher Bruchteil der die Körper gegeneinander pressenden Kraft erforderlich ist, um sie mit gleichförmiger Geschwindigkeit längs ihrer Berührungfläche zu verschieben. In anderer Form wird der sogenannte Reibung-Koeffizient ausgedrückt durch den Winkel, der einer Gleitbahn gegen die Horizontale zu geben ist, damit der auf ihr ruhende Körper gleichförmig von selbst abwärts gleite. In diesem Falle bildet der Steigungswinkel der Bahn ein Maß für den Teil der Schwerkraft des bewegten Körpers, der längs der Bahn zur Geltung kommt. Diese, wie gesagt, nur annähernd geltenden Gesetze sind noch zu vervollständigen durch Unterscheidung der Reibung der Ruhe von der Reibung der Bewegung. Den ruhenden Körper erst in Bewegung zu versetzen, ist immer eine größere Kraft erforderlich, als ihn in der Bewegung zu erhalten, ganz abgesehen von der zur Ueberwindung seiner Massenträgheit aufzuwendenden beschleunigenden Kraft. Der Reibung-Koeffizient der Ruhe ist oft mehrfach größer, als der der Bewegung, manchmal bis zum Zehnfachen.

Alle diese annähernden Gesetze gelten aber auch nur bei genügend widerstandsfähigen Gleitflächen, die bei dem Vorgange keine merklichen Aenderungen erfahren. Die ganze Anschauung der Gleitung trifft nicht mehr zu, wenn man sich etwa weichen Boden denkt, der beim Darüberschleifen eines Körpers aufgewühlt und gefurcht wird. Für solchen unregelmäßigen Vorgang lassen sich offenbar allgemeinere Gesetze nicht gut aufstellen. Es ist auch anzunehmen, daß in mikroskopischem Maße eine ähnliche Veränderung der Gleitflächen schon bei der Reibung widerstandsfähiger Körper eintritt. Die allmähliche Abnützung der Gleitflächen ist ein Beweis dafür, und die Abweichungen der besonderen Fälle von den allgemeinen Gesetzen lassen sich durch die Vorstellung des unvermeidlichen „Anfressens“ der Gleitflächen erklären. Namentlich vervollständigt diese Anschauung auch das Gesetz der Unabhängigkeit der Reibung von der Größe der Berührungflächen. Denn wie eine Schleife das Gewicht des geschleppten Körpers auf eine größere Fläche verteilt und damit das Aufwühlen des Bodens einschränkt, so ist auch bei harten Körpern eine gewisse Größe der den Druck aufnehmenden Fläche erforderlich, um zu starkes Angreifen zu verhindern, das sich unmittelbar durch die steigende Reibung zu erkennen gibt.

Außer der vorstehend betrachteten gleitenden Reibung spricht man auch von der rollenden Reibung, wiewohl diese Bezeichnung nur insofern berechtigt ist, als sie ebenfalls ein der Bewegung widerstehendes Hindernis bedeutet, das von der Art der Berührungflächen abhängt. Die rollende Reibung ist viel kleiner, als die gleitende, dafür ist ja der beste Beweis die günstige Wirkung der Walzen, und es läßt sich auch leicht übersehen, von welchen Umständen sie wesentlich abhängig ist. Wenn man es mit absolut festen und glatten Körpern zu tun hätte, so würde es offenbar gleichgültig sein, ob zwischen zwei gegeneinander zu verschiebende ebene Flächen Walzen von geringerem oder größerem Durchmesser gelegt würden, um das Gleiten in ein Rollen zu verwandeln. Auch die Annahme einer gewissen, vollkommen elastischen Nachgiebigkeit der Körper würde daran nichts ändern, denn bei Wegfall bleibender Aenderungen der Druckstellen würde auch keine Arbeit beim Bewegen geleistet werden, also kein Widerstand der rollenden Reibung vorhanden sein. In Wirklichkeit aber treten immer dauernde Formänderungen beim Rollen ein, im

Besonderen an der Bahn, die offenbar um so geringer werden, je weniger tief die Walze oder das Rad in die Bahn eindringt. Dieser Forderung wird um so besser genügt, je größer der Durchmesser des Rollkörpers ist, denn um so breiter ist die Auflagefläche, die sich unter der anpressenden Last herstellt, um so mehr ist also die Last verteilt. Vor Allem aber



Figur 95.

erklärt folgende einfache Erwägung den geringeren Widerstand eines Rollkörpers von größerem Durchmesser. Betrachtet man zwei Walzen oder Räder verschiedener Größe, die eben vor einem Hindernisse der sonst glatten Bahn ankommen (Figur 95), so zeigt sich der Abstand A des Mittelpunktes M von der Senkrechten über dem

Hindernisse größer als der des Mittelpunktes m des kleinen Rades. Bei gleicher horizontaler Geschwindigkeit der beiden Mittelpunkte dauert es also bei dem größeren Rade längere Zeit, bis es gerade über dem Hindernisse steht, der Vorgang des Aufsteigens ist sanfter, der Stoß bei der ersten Berührung des Hindernisses milder, wiewohl in beiden Fällen dieselbe Hubarbeit zu leisten ist. Dazu kommt noch bei dem größeren Rade die erhöhte Fähigkeit, Löcher in der Bahn zu überbrücken, denn es sinkt zwischen zwei nahen Erhöhungen weniger tief ein, als das kleine Rad. Daraus folgt auch, daß eine Vergrößerung der Räder um so mehr von günstigem Einflusse sein wird, je weniger eben die Bahn ist, auf Landstraßen wird das größere Rad sich durch Verringerung der Stöße viel bemerklicher machen, als auf den glatten Schienenwegen.

Auch der Widerstand der rollenden Reibung ist in Bruchteilen des Druckes anzugeben, der den Rollkörper auf die Bahn drückt, er ist aber in hohem Grade, außer vom Durchmesser jenes, abhängig von der Geschwindigkeit, wie ohne Weiteres verständlich ist aus der Rolle, die der Stoß infolge Unebenheiten der Bahn dabei spielt, wie auch deren Zustand — man denke einerseits an glatte Schienenbahnen, andererseits an frisch beschottete Chausseen — den Widerstand in noch viel weiteren Grenzen schwanken läßt, als den der gleitenden Reibung. Genaue Zahlen für beide Widerstände lassen sich überhaupt nicht geben, zum Vergleiche werden

aber einige Mittelzahlen nützlich sein. Die gleitende Reibung gut gegebener Metallflächen auf einander kann zu $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{5}$ ihres gegenseitigen Druckes angenommen werden, sie kann aber bei sorgfältig ausgeführten und gefetteten Maschinenteilen, z. B. bei Drehzapfen, bis auf $\frac{1}{10}$ dieser Werte sinken. Dagegen darf man die rollende Reibung von Eisenbahnradern auf Schienen bei mäßiger Geschwindigkeit mit etwa $\frac{1}{200}$ ansetzen, für auf gutem Pflaster laufende Räder mit $\frac{1}{50}$. In allen Fällen jedenfalls, ob man nun überhaupt noch einigermaßen zutreffende Werte der Reibungskoeffizienten bestimmen kann oder nicht, erweist sich die rollende Reibung als die weitaus geringere, und ein Ausdruck für diese sich überall aufdrängende Tatsache ist eben die in die frühesten Zeiten zurückgehende Schaffung der Räderfuhrwerke, die mit fortschreitender Technik eine immer größere Bedeutung gewonnen haben.

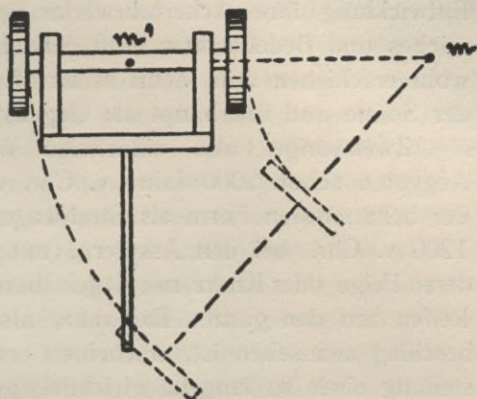
*

Die einfache Schleife mit untergelegten Walzen, von der wir oben ausgingen, ist noch kein Fuhrwerk im engeren Sinne, denn dazu gehört die feste Verbindung des Rollkörpers mit der die Last aufnehmenden Platte, ohne Beeinträchtigung natürlich der Rollbewegung. Würde man versuchen, diese Verbindung auszuführen in Form von muldenartigen Ausnehmungen der Platte als Aufnahmelager der Walzen, deren Verschieben gegen die Platte dadurch allerdings gesichert wäre, so würde man doch gleich sehen, daß dann, wenn die Walzen auf dem Boden auch wirklich noch rollen, ein Gleiten um dieselbe Weglänge in den Lagern eintreten müßte. Dieser Vorgang kann eintreten, wenn die Reibung der Walzen am Boden größer ist, wie in den glatten Lagern. Damit würde aber wenig gewonnen sein, es würde nur soviel bedeuten, wie eine mäßige Verbesserung der Bahn, bei weicherem Boden wäre aber mehr geschadet als genützt, denn die Walzen würden wesentlich tiefer eindringen, als die große Fläche der Platte, und trotz des Rollens der Walzen auf der einen Seite würde der Widerstand der Fortbewegung vielleicht gewachsen sein. An diesem Punkte mußte die Erfindung einsetzen, bestehend in der relativen Vergrößerung der Walzen in Bezug auf den Boden und ihrer Verkleinerung hinsichtlich des Lagers in der Platte, anders gesagt, in der Verbindung einer tunlichst großen Walze mit einer Achse von

geringerem Durchmesser. Wenn nunmehr die Walzen bei der Fortbewegung des Fahrzeuges abrollen, so ist der Weg, den ein Punkt am Umfange der Achse unter Gleiten im Lager zurücklegt, soviel kürzer als der Vorschub des Fahrzeuges, wie die Achse kleineren Durchmesser hat, als die Walze. Auch wenn die Reibung der Achse im Lager nicht kleiner wäre, als wenn die Platte unmittelbar auf dem Boden gleiten würde, so würde doch die Reibungsarbeit im Verhältnisse der Gleitwege abnehmen, die erforderliche Zugkraft also in demselben Maße kleiner sein. Auch die umgekehrte Vorstellung gibt ein zutreffendes Bild der Verhältnisse. Die Reibung der Achse im Lager wird durch eine am größerem Hebelarme (dem Walzenhalbmesser) angreifende Kraft überwunden, infolgedessen ist die Zugkraft kleiner, also auch die Arbeit beim Zurücklegen einer gewissen Wegstrecke. Man kann also wohl annehmen, daß eine Walze ein Stück Baumstamm, das durch einige Nachhülfe noch besser gerundet wurde, im längeren Mittelteile durch reichliche Wegnahme von Stoff den Charakter einer Achse erhielt, an dem die stehen gebliebenen Seitenscheiben die Räder bildeten. Hatte man diese kunstlose Form eines Radgestelles gefunden, so ergab der einfachste Versuch den Beweis für den wesentlich geringeren Reibungswiderstand des nun als Fuhrwerk zu bezeichnenden Gefährtes. In dieser Weise scheint dessen Erfindung sich ungezwungener zu erklären, als wenn man die Erfindung des einzelnen, auf der Axe unabhängig von dem anderen drehbaren Rades vorausgehend annimmt, wiewohl andererseits die Notwendigkeit der unabhängigen Räder sich bald ergeben mußte, wenn das Fuhrwerk genügende Lenkbarkeit erhalten sollte. Wäre die Erfindung des einzelnen Rades vorgegangen, so müßte man wohl auch annehmen, daß die Schubkarre das erste Gefährt gewesen wäre, während die alten Ueberlieferungen immer nur von zweirädrigen Wagen berichten.

Das Einzelrad mußte sich aber bald ergeben, um, wie gesagt, den Wagen leicht lenkbar zu machen. Denkt man sich nämlich (Fig. 96) ein zweirädriges Gefährt bei fester Verbindung der Räder mit der Axe auf ebenem Boden geradeaus fahrend, so treten zwar die Vorzüge gegenüber der rohen Schleife voll in die Erscheinung, bei Kurven aber werden diese Vorzüge teilweise wieder aufgehoben. Denn bei Beschreiben eines Kreisbogens mit dem Mittelpunkte m legt das innere Rad einen kleineren Weg zurück, als das äußere,

eines der beiden Räder muß also teilweise gleiten. Wenn aber gar das Gefährt auf dem Flecke wenden soll, also sich um den inneren Mittelpunkt m dreht, dann bewegen sich die beiden Räder in entgegengesetzter Richtung, sie werden demnach beide gleiten, oder das eine wird sich drehen, das andere umsomehr gleiten. Und da die Räder natürlich in weniger festem Boden mehr einsinken, als eine plattenartige Unterlage, so



Figur 96.

wird das Wenden eines solchen Gefährtes schwieriger sein, als wenn statt der Räder größere ebene Auflageflächen vorhanden wären. So können sich die Vorzüge der Räder erst voll entfalten, wenn sie von einander unabhängig drehbar sind, und die bald zu machende Beobachtung der gegenseitigen Störung der abhängigen Räder wird zunächst dazu geführt haben, zwei Räder mit durchgehenden parallelen Axen anzuwenden. Denn die lose auf Endzapfen einer gemeinschaftlichen Achse gesteckten Räder, wodurch beide Räder wieder in gleiche Lage zum Gestelle zu bringen sind, setzen schon eine gewisse fortgeschrittenere Technik voraus, weil das lose Einzelrad zur Sicherung seiner Stabilität eine längere Nabe erforderlich macht. Dieser Umstand, der das Einsetzen einer besonderen Nabe in das zunächst als volle Scheibe zu denkende Rad nahe legt, wird auch bewirkt haben, daß man sehr bald zur Herstellung des zusammengesetzten Rades überhaupt gelangte, das aus Nabe, Speichen und Felge besteht, dessen nunmehr einzeln herzustellende Teile die für die Festigkeit zweckmäßige Form unter richtiger Auswahl der Hölzer erhielten, wobei auch an frühzeitige Verwendung eiserner Reifen zur Verstärkung der Nabe gedacht werden kann. Jedenfalls erscheint das zusammengesetzte Rad, meist mit 6 Speichen ausgeführt, schon auf den frühesten Darstellungen von Wagen, und man könnte sich auch nicht denken, wie etwa ein Kriegswagen mit den ganz groben, aus einem Baumstamme abgesägten, oder aus Brettern zu vollen Scheiben zusammengefügt Rädern brauchbar gewesen sein sollte,

mit denen noch heute die Morlaken und andre Völker geringer Entwicklung ihre Ackerfuhrwerke versehen. Als etwas Kunstreiches und Bedeutsames muß den alten Völkern das Speichenrad wohl erschienen sein, denn es ist oft als symbolische Darstellung der Sonne und überhaupt als Gegenstand des Kultus anzutreffen.

Zweirädrige, also einachsige Wagen sind nachweisbar in Aegypten schon 2000 Jahre v. Chr. vorhanden gewesen, und in der bekanntesten Form als Streitwagen erschienen sie schon um 1200 v. Chr. bei den Assyern, mit zusammengesetzten Rädern, deren Felge oder Kranz mit Nägeln beschlagen ist. Die metallenen Reifen um den ganzen Radkranz, als deren Vorstufe der Nägelbeschlag anzusehen ist, erscheinen erst viel später, denn die Herstellung eines so langen, gleichmäßigen Metallbandes muß auch auf einer Entwicklungsstufe noch sehr schwierig gewesen sein, wo schon kleinere Metallarbeiten kunstvoll ausgeführt wurden. Von den Kriegswagen Davids und den Lastkarren Sanheribs (700 v. Chr.) berichtet die Bibel, die Sichelwagen der Perser, an deren Wirkung im Schlachtengedrange man nur mit einigem Schaudern denken kann, sind jedem Knaben bekannt, während die Vorgerückteren sich von Homer mit gemischten Empfindungen von Achilles Streitwagen, mit dem er den Leichnam Hektors um die Mauern von Troja schlefte, und von den Lastwagen der Griechen erzählen lassen. Verwandt mit den Streitwagen und ihnen in der Form gleich waren die Rennwagen, die im römischen Zirkus der Kaiserzeit eine so große Rolle spielten, deren kunstvolle Lenkung aber auch schon die Griechen, zum Mißfallen Platons, bewunderten.

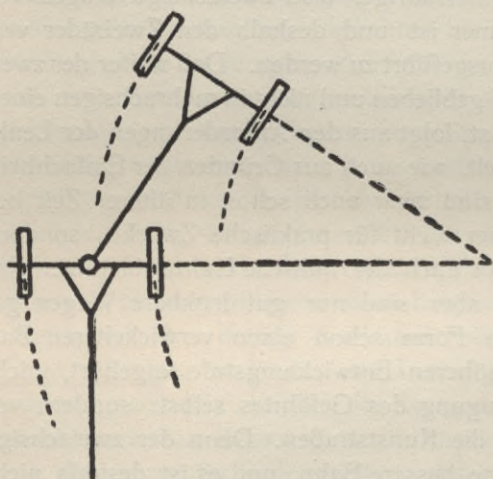
Alle älteren Wagen für den praktischen Gebrauch waren ihrer Art nach zweirädrige Karren, weil diese mit der größten Einfachheit vollkommene Lenkbarkeit verbinden und zu ihrer sicheren Leitung nur einer festen Deichsel bedürfen. Sie drehen auf der Stelle, ohne Zuhilfenahme anderer mechanischer Mittel als der unabhängigen Räder, und schmiegen sich jeder Geländeform leichter als alle anderen Fuhrwerke an. Wenn sie trotzdem jetzt selten geworden und auf gebirgige Gegenden beschränkt sind, im Flachlande nur ab und an für leichtere Arbeiten gebraucht werden, wie die Jinrikischa der Japaner, wenn sie nicht, wie in den Niederlanden und Nordfrankreich, mehr gewohnheitmäßig als durch die Verhältnisse noch begründet fortleben, und höchstens noch der Sport gelegentlich neue zweirädrige Fuhrwerke entstehen läßt, so

ist der Grund dafür in der mangelnden Stabilität der Länge nach leicht zu erkennen. Gegen das Vorneigen und das Umschlagen nach rückwärts schützt nur die sichere Verbindung mit dem Zugtiere, und um dieses nicht unzweckmäßig anzustrengen, muß der Schwerpunkt der Last so gut als möglich gerade über der Achse liegen. Dazu ist sorgfältige Verteilung der Ladung erforderlich unter angemessener Sicherung ihrer Lage, wie bei Schiffen, die daraus folgenden Unbequemlichkeiten werden aber mit der Länge des Gefährtes immer größer. Das stete Streben nach einem standfesten Fuhrwerke bedarf wohl überhaupt keiner besonderen Begründung, und daß der vierrädrige, also zweiachsige Wagen vor Allem sicherer und bequemer ist und deshalb den Zweiräder verdrängt hat, braucht nicht ausgeführt zu werden. Daß weiter der zweiachsige Wagen herrschend geblieben und nicht in mehrachsigen einen Mitbewerber bekommen hat, folgt aus den Anforderungen der Lenkbarkeit und Schmiegsamkeit, wie auch aus Gründen der Einfachheit.

Zweiachsige Wagen sind zwar auch schon in älterer Zeit bekannt gewesen, meist aber nicht für praktische Zwecke, sondern für religiöse, für die sie ja auch der indische Kultus benutzt. Für den wirklichen Gebrauch aber sind nur gut lenkbare Wagen geeignet, deren zweiachsige Form schon einen verwickelteren Bau darstellt, deshalb einer höheren Entwicklungsstufe angehört, nicht nur hinsichtlich der Erzeugung des Gefährtes selbst, sondern vor Allem mit Rücksicht auf die Kunststraßen. Denn der zweiachsige Wagen verlangt schon eine bessere Bahn, und es ist deshalb nicht zu verwundern, daß die eigentliche Entwicklung des jetzigen Wagens namentlich von den Römern gefördert wurde, deren großartige Straßenbauten alle früheren bei den Aegyptern, Persern und Griechen, über die Herodot und Xenophon berichten, in den Schatten stellen. Die römische Kaiserzeit ließ ein vollständiges Straßennetz entstehen, das mit dem Rückgange der Römer wieder in Verfall geriet. Den römischen Leistungen gegenüber, angeregt durch praktisches Verständnis und ermöglicht durch ein kraftvolles Staatswesen, war die Sorge für gute Straßen während des ganzen Mittelalters kümmerlich, und auch Herrscher wie Karl der Große konnten nur wenig, wenigstens für die Erhaltung des Vorhandenen, tun. Eine Wendung zum Besseren hebt erst mit dem 16. Jahrhundert an, und bekannt ist, wie später besonders die Franzosen in planmäßiger Ausbildung der Straßen vorangegangen sind.

Die guten römischen Straßen ermöglichten also die allgemeinere Verwendung von zweiachsigen Wagen, die als Reisewagen eine ziemliche Rolle gespielt zu haben scheinen, und deren eine Achse beweglich sein mußte, um die erforderliche Lenkbarkeit zu bewirken. Von dieser Notwendigkeit kann man sich leicht überzeugen, wenn man an einem kleineren Vierräder die bewegliche Achse feststellt und versucht, beim Schieben eine bestimmte Richtung inne zu halten. Schon bei einem unserer jetzigen Fahrräder kann man nach Feststellen des Vorderrades bemerken, wie eigensinnig das sonst so lenksame Gerät gegen den Willen des Schiebenden

seine Richtung wählt. Der Grund dafür wird an einer einfachen geometrischen Betrachtung leicht klar. Wenn ein zweiachsiges Gefährt (Fig. 97) in einer Krümmung laufen soll, so müssen alle Räder senkrecht stehen auf ihrer Verbindungslinie mit dem augenblicklichen Krümmungsmittelpunkte, denn nur dann werden sie ausschließlich auf einem Kreise



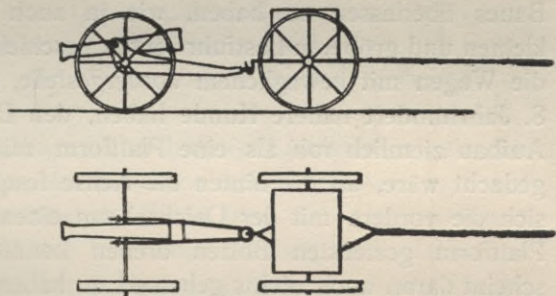
Figur 97.

um den Mittelpunkt rollen, Unabhängigkeit aller vorausgesetzt, denn sie laufen auf verschiedenen großen Kreisen. Würden aber ihre Bahnen bei der gezeichneten Stellung von den Kreisen abweichen, etwa weil das Gefährt gleichzeitig durch eine Kraft seitwärts verschoben wird, so müßten die Räder teilweise gleiten. Man kann sich diesen Vorgang sehr anschaulich vorführen, wenn man ein Rädchen an einem Stocke, der seine verlängerte Achse bildet, auf dem Tische hin und her rollen läßt. Der Bedingung nun, das Rollen ohne Gleiten zu ermöglichen, kann genügt werden durch gelenkige Verbindung der Vorderachse mit der Hinterachse, wie in der Figur angedeutet. Wir werden später sehen, daß die Bedingung auch in anderer Weise erfüllt werden kann, das durch die Figur angegebene Schema ist aber gültig für alle durch eine

Deichsel gelenkten Fuhrwerke und stellt offenbar die einfachste Form der Verbindung einer Deichsel mit den Vorderrädern dar.

Die Lenkbarkeit in horizontaler Richtung ist aber nur ein Teil der Forderungen, die an ein zweiachsiges Fuhrwerk zu stellen sind. Die Unebenheit des Bodens macht auch eine gewisse Schmiegsamkeit nötig, damit die Last möglichst gleichmäßig auf alle vier Räder verteilt bleibt. Ein einachsiges Fuhrwerk stellt sich von selbst schräg, wenn der Boden von einem Rade zum andern geneigt ist, oder wenn das eine Rad in eine Vertiefung gelangt. Wenn aber zwei Achsen durch ein Gestell vereinigt sind, so muß den Achsen verschiedene Neigung ermöglicht sein, denn sonst würde, da der Boden doch niemals genau eben ist, eines der Räder immer in der Luft schweben. Diese Verhältnisse lassen sich am einfachsten übersehen an einem Gefährt, an dessen Manövrierfähigkeit die

größten Anforderungen gestellt werden müssen, an dem Feldgeschütze. Das Rohr des aufgezprotzten Geschützes (Figur 98) wird, mit etwas Hintergewicht, getragen von der Lafette, der Lafettenschwanz endet in einer starken Oese, die auf



Figur 98.

den Nagel der Protze gehakt ist. Damit ist die Lenkbarkeit in horizontaler Richtung nach dem Schema Fig. 97 gesichert. Die Oese und der Protznagel bilden aber ein Gelenk, das auch eine Schrägstellung der beiden Achsen gegen einander in senkrechtem Sinne gestattet, so daß beim Fahren das eine Rad über einen größeren Stein gehen kann, ohne daß dadurch ein anderes Rad die Berührung mit dem Boden verliert. Lafette und Protze haben gleichzeitig auch große Bewegungsfreiheit in den Vertikalen, wie beim Durchfahren von Mulden besonders erwünscht ist. Die besonderen Anforderungen an ein Geschütz, die Notwendigkeit, es zum Feuern abzuprotzen, haben seine Form Jahrhunderte lang im Wesen unverändert erhalten, sie ist aber auch typisch für alle von Tieren gezogenen Straßenfuhrwerke, die nur in der Durchbildung der Einzelheiten abweichen.

Zu einem lenkbaren und schmiegsamen zweiachsigen Fuhrwerke könnte man offenbar gelangen, wenn man zwei einachsige in der Weise hintereinander kuppelte, daß die Deichsel des Hinterwagens so an den Vorderwagen gehängt würde, wie der Lafettenschwanz an die Protze. Eine solche Kupplung brauchte nicht mal mit einem richtigen Gelenk ausgeführt werden, sondern könnte mit Strick oder Riemen leicht improvisiert werden, und ein schon ziemlich brauchbarer zweiachsiger Wagen wäre fertig, wenn man sich über die Untergestelle einige Bretter geschnürt dächte, die eine etwas nachgibige Unterlage für den Wagenkasten abgäben. Eine solche Verbindung liegt recht nahe, und sie mag wohl gelegentlich vorbildlich gewirkt haben. Indessen scheint der ältere Wagenbau keine besondere Rücksicht auf die Schmiegsamkeit genommen und die Sorge dafür im Wesentlichen der Nachgibigkeit des ganzen Baues überlassen zu haben, wie ja auch heute noch bei ganz kleinen und gröberen Lastfuhrwerken geschieht. Wenigstens machen die Wagen mit beweglichem Vordergestelle, über die wir seit dem 8. Jahrhundert nähere Kunde haben, den Eindruck, als wenn der Aufbau ziemlich roh als eine Plattform mit aufgesetztem Kasten gedacht wäre, an die hinten die Achse festgenagelt war, während sich die vordere mit der Deichsel um einen einfachen, durch die Plattform gesteckten Bolzen drehen konnte. Die folgende Zeit scheint daran auch nichts gebessert zu haben, die deutschen Kaiser bis zum Ende des 13. Jahrhunderts haben sich jedenfalls wohler auf dem Rücken der Pferde gefühlt, was ohnehin als schicklicher galt, als in einem Reisewagen, und erst seitdem nahmen die Fuhrwerke die Form an, die unsre heutigen Lastwagen ohne Federn annähernd noch haben, und die man kurz kennzeichnen kann als bestehend aus einem lenkbaren und schmiegsamen Untergestelle, nach dem Schema der Figuren 97 und 98, und dem darauf gesetzten, in sich nachgibigen Kasten, der, vollwandig oder als Gitterwerk ausgeführt, die Schmiegsamkeit des Ganzen innerhalb der nötigen Grenzen aufrecht erhält.

Als die wesentlichste, schon seit dem 15. Jahrhundert gebräuchliche Abweichung des Lastwagens von dem allseitig biegsamen und schmiegsamen Geschützfuhrwerke erscheint das Lenkscheit (Figur 99), ein kräftiges Querstück s an den Enden der nach hinten gegabelten Deichsel, das unter dem von der Hinterachse kommenden Langbaume durchgeht und zum Tragen der Deichsel

dient. Für die Arbeit der Zugtiere ist es offenbar besser, die immerhin schwere Deichsel, oder die Gabel bei Einspannern, schwebend zu erhalten. Beim Geschütze wird das, soweit dabei zweckdienlich, erreicht durch die Anordnung des Protznagels hinter der Vorderachse, ohne dadurch die Beweglichkeit des Ganzen zu beeinträchtigen. Unter der bei Lastfuhrwerken zulässigen Preisgabe der vertikalen freien Beweglichkeit für die Deichsel sichert das Lenkscheit die annähernd horizontale Lage der Deichsel auch im unbeschwerten Zustande des Wagens, und gleichzeitig wird die Durchbildung des beweglichen Vordergestelles erleichtert, da nur noch auf die horizontale Drehbarkeit des Vordergestelles gegen den Kasten Rücksicht zu nehmen ist. Der elastische Bau des ganzen Wagens gibt übrigens immer noch eine hinreichende Nachgiebigkeit der Deichsel auch in vertikaler Richtung.

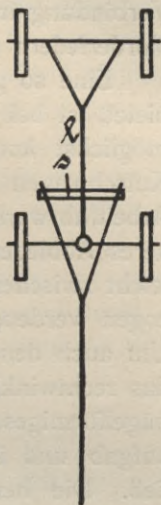


Figure 99.

Wer auf federlosem Wagen über holprige Landstraßen gefahren ist, auf einer Protze oder einem Pontonhacket gesessen hat und ohne lindernde Zwischenmittel die Stöße über sich ergehen lassen mußte, der begreift leicht das frühzeitige Streben nach elastischen Sitzen bei Personenuhrwerken. Das rohe, wenn auch recht wirksame Mittel, die Stöße durch eine dicke Schütte losen Strohes weniger fühlbar zu machen, wurde schon gegen 1500 ergänzt durch frei in Riemen an den Seitenwänden des Wagens hängende Sitze, die auf dem Lande jetzt noch vielfach in Gebrauch sind und in der Tat das Fahren wesentlich angenehmer machen, da allen Erschütterungen in horizontaler Richtung wirksam begegnet ist. Gegen 1600 wird schon unsre Kutschenform erkennbar, die den ganzen Wagenkasten in Riemen hängend zeigt, bei der auch schon die Riemen selbst von federnden Holzteilen ausgehen. Seit Ludwig XIV. wurde diese Wagenform durch die Anwendung stählerner Federn vervollkommnet, und von daher stammen die bekannten großen C-förmigen Blattfedersysteme vor und hinter dem Wagenkasten, die diesen an Riemen schwebend halten. Unsere Staatskarossen zeigen noch diese voluminöse Wagenform, die für den gewöhnlichen Gebrauch ganz durch die wesentlich kürzere verdrängt ist, bei der unter dem Wagenkasten angeordnete Blatt-

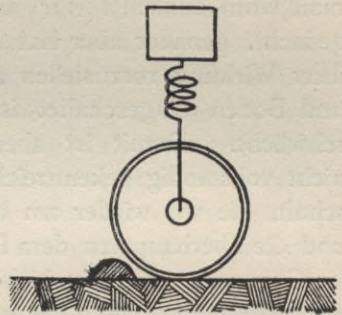
federn die Verbindung mit den Achsen bilden, eine unmittelbare Verbindung indessen nur mit der Hinterachse, während zwischen Vorderfedern und Kasten der Drehschemel eingeschaltet ist.

Eine so große Beweglichkeit, wie sie der einachsige Wagen bietet, ist bei zweiachsigen natürlich nicht zu erreichen, um aber möglichst kurze Wendungen ausführen zu können, werden die Kutschwagen mit unterlaufenden Vorderrädern gebaut. Bei den Arbeitfuhrwerken verhindert das tiefgehende Obergestell ein stärkeres Abbiegen des Vorderwagens, die Kutschwagen konnten aber leicht zwischen Bock und eigentlichem Wagenkasten so hochgezogen werden, daß die Vorderräder zwischen ihnen Platz haben. Um auch den Langbaum nicht mehr hinderlich zu machen für das rechtwinklige Abbiegen des Vorderwagens fügte man dann ein bügelförmiges Stück von Eisen ein, bis man den Langbaum ganz aufgab und ihn durch den steifen Wagenkasten selbst vertreten ließ. Die heutigen Kutschwagen zeigen deshalb den stark geschwungenen Wagenkasten, der vermittelt der Hinterfedern auf der Hinterachse mit größeren Rädern ruht, und vorn unter dem Bocke sich auf den kreisförmigen, ähnlich gefederten Drehschemel stützt. Dieser vertritt das Lenkscheit (Figur 99) und hat sich aus der Forderung größerer seitlicher Biegsamkeit des Gefährtes ergeben. Man kann ihn betrachten als zwei kreisförmige auf einander um den senkrechten Lenkbolzen drehbare horizontale Scheiben. Dieses ganze Vordergestell ist ein aus Schienen und Stangen bestehendes leichtes System, dessen Bestimmung sich bei aufmerksamer Betrachtung sofort verstehen läßt. Wie die notwendige Schmiegsamkeit des Wagens bei der geschilderten Form im Wesentlichen durch die Federn erzielt wird, ergibt sich von selbst, auch daß hier der Schmiegsamkeit viel engere Grenzen gezogen sind, wie etwa bei dem Feldgeschütze. Der jetzige Kutschwagen ist eben nur für gute Straßen berechnet. Es sei endlich noch erwähnt, daß, teilweise durch gesetzliche Vorschriften veranlaßt, alle Wagen gleiche Spurweite haben, die bei uns etwa $1\frac{1}{2}$ m beträgt.

*

Auf die mannigfaltigen Einzelheiten, die im Laufe der Zeit eine sorgfältige Durchbildung erfahren haben, näher einzugehen, würde hier zu weit führen, eine besondere Betrachtung verlangen aber

noch die Räder in ihrem Zusammenhange mit der Federung. Wir haben nur obenhin von der Bestimmung der Federn gesprochen, die durch Unebenheiten der Bahn veranlaßte Stöße für den Insassen des Wagens abschwächen sollen. Stöße sind unter allen Umständen Ursache von Energieverlusten, die auf Kosten der Zugtiere eintreten, und die Größe der Verluste hängt offenbar außer von der Heftigkeit und Häufigkeit der Stöße von den Massen ab, die den Stößen ausgesetzt sind. Die Wagenfedern also möglichst unmittelbar hinter den starren Rädern einzuschalten, um recht geringe Massen des Wagens an den Stößen teilnehmen zu lassen, ist nicht nur eine Forderung zu Gunsten der Bequemlichkeit der Fahrenden, sondern auch der zweckmäßigen Ausnutzung der Motorleistung. Denkt man sich nun ein lasttragendes Rad (Figur 100) ganz langsam über ein Hindernis hinweggehen, so wird die zwischen Achse und Last eingeschaltete Feder gar nicht zur Geltung kommen, denn sie bleibt bei der sanften Bewegung gleichmäßig gespannt und wirkt nur wie ein starres Zwischenglied, die Last wird durch das Hindernis ebenso hoch gehoben, wie das Rad selbst. Mit steigender Geschwindigkeit des Rades aber muß die Last eine größere senkrechte Beschleunigung erfahren, sie folgt deshalb nicht mehr so vollkommen dem sich hebenden Rade, die Feder wird mehr zusammengedrückt, die Last, wenn es sich nur um ein schmales Hindernis handelt, erfährt eine geringere Hebung und drückt umgekehrt vermittelst der gespannten Feder das Rad hinter dem Hindernisse schneller nieder, als es allein unter dem Einflusse der Schwerkraft sinken würde. Anstelle des harten Stoßes erfährt die Last einen sanfteren Druck und statt ihres Hebens um die ganze Höhe des Hindernisses treten nur kleinere Schwingungen um ihre Mittellage ein. Die Schwingungen dürfen natürlich auch nicht zu ausgiebig werden, und zwischen Last und Feder muß ein zweckmäßiges Verhältnis bestehen, das von der Art des Wagens abhängt. Einem Kutschwagen wird man ein relativ weiches Federsystem geben, als einem Arbeitwagen, die ja heute in den Städten auch schon zum großen Teile mit Federn ausgerüstet werden.



Figur 100.

Trotz der handgreiflich günstigen Wirkung der Federn machen sich doch gerade die vielen kleinen harten Unebenheiten der Pflasterstraßen unangenehm spürbar, und namentlich störend ist das auch bei der besten Federung dröhnende und rasselnde Geräusch der eisenbereiften Räder auf den Steinen. Es war deshalb ein wesentlicher Fortschritt, als in den 60er Jahren die Gummibereifung der Räder aufkam, die zwar teuer und deshalb bisher nur als Luxus zu betrachten ist, aber in der Tat dem durch die Wagenfedern nicht zu beseitigenden Uebelstande schon recht weitgehend abhilft. „Auf Gummi fahren“ ist eine Redewendung geworden, die einen recht angenehmen Ausblick auf Bequemlichkeit wie Wohlhabenheit eröffnet. Bei Schaffung der Gummiräder hat man wohl zunächst nur an eine weiche Beschuhung der Räder gedacht, genauer aber hat man sich die dicken Gummireifen in ihrer Wirkung vorzustellen als ein Federsystem, das zwischen Rad und Boden eingeschaltet ist und auch die Stöße auf das Rad schwächt. Damit ist aber das Wesen des Gummireifens noch nicht vollständig gekennzeichnet, er hat vielmehr noch eine Eigenschaft, die wir wieder am besten als Schmiegsamkeit bezeichnen, und die überhaupt zu dem Begriffe des schmiegsamen Rades führt, im Gegensatze zu dem bisher allein betrachteten starren, oder genauer gesagt, zu dem Unterschiede zwischen dem Rade mit starrer und dem mit schmiegsamer Felge. Das Wesen der Schmiegsamkeit läßt sich aber besser erläutern an dem in dieser Hinsicht noch viel vollkommeneren Rade mit Pneumatik-Reifen.

Das Pneumatik-Rad ist in den 80er Jahren von dem Schotten Dunlop erfunden, der aber wohl eine richtige Vorstellung davon nur insofern hatte, als er den elastischen vollen Gummireifen ersetzen wollte durch einen Luftreifen, aus Gründen der Leichtigkeit und Sparsamkeit. Die elastische Eigenschaft ist aber von der Schmiegsamkeit wohl zu unterscheiden, wie wir gleich sehen werden.

Das starre Rad muß den Unebenheiten des festen Bodens vollständig folgen, und um Klarheit in den ganzen Vorgang zu bringen, stellen wir uns oben das starre Rad mal ganz langsam, mal schnell über einen Buckel der sonst ebenen Straße gehend vor. Solcher Buckel bietet das Straßenpflaster eine stete Folge, und so geringe Höhen sie an sich haben, bei gutem Pflaster kaum mehr als etwa 1 cm im Mittel, so störend wirken sie doch. Das Rollen des starren Rades über das Pflaster bedeutet deshalb ein fort-

währendes Heben und Senken um kleine Höhen. — Nun stelle man sich ein Pneumatik-Rad unter angemessener Belastung auf einem Buckel stehend vor, wie in karrikiertem Darstellung Fig. 101 zeigt. Wie es vorher auf ebenem Boden in einer größeren Fläche aufruhete, so wird es jetzt von dem Buckel zwar mit getragen, aber seitlich von dem Buckel ruhen noch



Figur 101.

größere Teile der Tragfläche des Reifens auf dem Boden, und zwar unter dem gleichmäßigen Luftdrucke von etwa 1—2 Atmosphären. Das Rad wird deshalb nicht mehr, wie das starre, von den Buckel allein unterstützt, das bedeutet, es braucht sich nicht beim Ueberrollen des Buckels um dessen ganze Höhe zu heben, die Hubhöhe wird vielmehr in dem Maße erniedrigt, wie der auf dem Buckel kommende Teil der Tragfläche des Luftreifens kleiner ist, als die ganze Tragfläche. Das gilt natürlich nur annähernd, denn die Spannung des Schlauches in der Nähe des Buckels macht die Bestimmung des auf die eingebeulte Stelle entfallenden Teiles der Tragfläche zu unsicher. Aber die zutreffende Vorstellung wird man aus dem Gesagten gewinnen, wie durch die Pneumatik mit gleichmäßigem innerem Drucke die kleinen Höhenunterschiede der Fahrbahn gewissermaßen erniedrigt werden, und zwar in starkem Maße. Denkt man sich dazu noch die erhebliche elastische Wirkung des Luftreifens, so leuchtet ein, von welchem Einflusse er auf den ruhigen Gang des Rades ist. Will man sich praktisch davon überzeugen, so braucht man nur mit seinem Fahrrad dieselbe Wegstrecke einmal mit normal aufgeblasener Pneumatik zu befahren, das andere Mal nach Ablassen der Druckluft. Man wird sehen, wie wenig die bloße Sattelfederung im Stande ist, das Fahren selbst auf gutem Pflaster erträglich zu machen. Aus dem Gesagten erhellt auch, daß der volle Gummireifen, wie schon erwähnt, ebenfalls die Eigenschaft der Schmiegsamkeit hat, wenn auch in niederem Grade, denn der gleichmäßige Druck auf die Tragfläche fehlt, der Gummi ist schon beim Aufliegen auf ebenem Boden in der Mitte stärker zusammengedrückt, noch vielmehr natürlich beim Ueberrollen eines Buckels. Das richtige Verständnis des schmiegsamen Rades, das zweifellos eine zunehmende Bedeutung gewinnen wird, ist so wichtig, daß es sich lohnt durch einige einfache Versuche sich eine empfindungsgemäße Ueberzeugung von

der Wirkung zu verschaffen. Man nehme zu dem Ende einen hohlen Gummiball und lasse ihn unter stärkerem Drucke zwischen der Tischplatte und einem darübergelegten Brette hin und her rollen. Dann markiere man durch Stricknadel, Bleistift, Federhalter usw. ein Fahrbahnhindernis, stelle auch vielleicht einen Vergleich mit einem massiven Gummiballe an. Um die Wirkung der Elastizität und der Schmiegsamkeit einigermaßen auseinander zu halten, kann man noch folgendermaßen verfahren. Man fülle ein Tierblase einmal mit Luft und dann mit Wasser, beide Male mit nur geringer Spannung. Bei Wiederholung der obigen Versuche wird man sehen, in welchem hohem Grade die Schmiegsamkeit trotz möglichst ausgeschalteter Elastizität der Blase die Fahrbahnhindernisse glättet.

Der riesige Erfolg des Pneumatik-Reifens hat zahllose Ideen angeregt, dieses, wie jeder Radler weiß, recht empfindliche Maschinenelement durch derbere Teile zu ersetzen. Unter der Bezeichnung „federndes Rad“ bringt fast jede neue Patentliste mehrere Vorschläge, die als Ersatz des Pneumatik-Reifens dienen sollen. Fast immer ist dabei aber die steife Felge verwendet, und in dieser Richtung wandernde Ideen sind von selbst gerichtet. Der Begriff der Schmiegsamkeit der Felge hat offenbar noch keinen allgemeinen Eingang gefunden. Wohl kann ein in sich federndes Rad mit steifer Felge, wenn es einfach genug wäre, gewisse Vorzüge haben, die aber nur bestehen können in der Einschaltung der Federung in möglichster Nähe des Bodens. Die Schmiegsamkeit ist dadurch aber, wie wir gesehen haben, nicht zu ersetzen. Dem Gummimantel, wie gelegentlich auch vorgeschlagen ist, statt des Luftkissens innen eine dichtgestellte Reihe von kurzen Spiralfedern zu geben, ist auch eine verfehlte Idee. Denn erstens wäre damit überhaupt wenig gewonnen, und dann würde auch das Rad, da die einzelnen Federn doch abwechselnd die ganze Last tragen müßten, viel zu schwer werden. Das Problem muß also ganz anders angefaßt werden. Es ist aber wohl zu erwarten, daß ein schmiegsames Rad ohne Luftreifen, das dessen gute Eigenschaften in erhöhtem Maße zeigt ohne seine Empfindlichkeit, mal auftreten wird, und das könnte dann freilich von erheblichem Einflusse sein auf den Bau der Fuhrwerke überhaupt, weil es die bis jetzt erforderlichen Federn am Wagengestelle entbehrlich machen würde. Das ganze Straßenfuhrwesen wartet eigentlich auf ein solches Rad, das namentlich den bis jetzt noch schüchternen Be-

strebungen auf Verminderung des Straßenlärmes eine erhebliche Stütze geben würde.

*

Als Motor für die Straßenfuhrwerke haben wir bisher immer nur das vorgespannte Zugtier angenommen, über dessen mögliche Leistung nun einige Angaben am Platze sein werden, wenn auch die Praxis lange genügende Erfahrungen an die Hand gegeben hat, um für die gewöhnlichen Fälle die geeigneten Tiere auszuwählen und das ihnen zugemutete Pensum zu schätzen, ohne bestimmte Zahlen dabei zu Grunde zu legen. In zweifelhaften Fällen sind aber bestimmte Angaben immer nützlich, und die Zahlen bilden immer gute Vergleichswerte, namentlich wenn der Vergleich zwischen belebten und unbelebten Motoren anzustellen ist, wie jetzt schon häufig genug. Als Zugtier betrachten wir hier übrigens nur das Pferd.

Watt hat seiner Zeit als Einheit für die Motorleistung überhaupt die eines kräftigen Pferdes eingeführt, die während 8 Stunden etwa unter geeigneten Bedingungen ausgeübt werden kann. Er bestimmte dies „Pferd“ zu 75 Kilogrammster in der Sekunde. Der Zusatz „während 8 Stunden“ drückt schon den wesentlichsten Unterschied zwischen belebtem und unbelebtem Motor aus. Während dieser seine Leistung ganz unbeschränkt hergeben kann, bedarf das Tier nach einer gewissen Zeit längerer Ruhe, außerdem müßten bei ihm bestimmte Rücksichten namentlich auf die Geschwindigkeit genommen werden. Die 8 Stunden gelten beim Pferde nur für ruhigen, räumigen Schritt, soll es traben, so muß die Arbeitszeit stark gekürzt werden. So gehen die Pferde vor den Straßenbahnen, trotz Einschaltens häufiger kurzer Pausen, nur etwa vier Stunden, andernfalls würden sie, trotzdem ihre Leistung vielleicht gar nicht mal die sonst mögliche durchschnittliche Höhe erreicht, zu sehr angestrengt und zu früh invalide werden. Die Beobachtung kann man ja auch leicht an sich selbst machen, daß bei normaler Marschgeschwindigkeit bedeutende Wegstrecken zurückgelegt werden können, während der beschleunigte Marsch ungemein schnell erschöpft, und die Erhöhung der Leistung gar nicht im Verhältnisse zu der vermehrten Anstrengung steht. Andererseits ist der belebte Motor für kurze Zeit einer sehr bedeutenden Steigerung seiner Leistung fähig. Ein gesunder

Mann von rund 75 kg. Gewicht kann beim Treppensteigen wohl 5 Stufen in der Sekunde nehmen und hebt damit sein Gewicht in der Sekunde um etwa 1 m, er leistet also 1 Pferd, während man seine durchschnittliche Leistung nur zu ungefähr $\frac{1}{10}$ Pferd ansetzen darf! Diese gewaltige Steigerung der Leistung ist aber nur minutenweise möglich, und Aehnliches gilt bei sportlichen Betätigungen im Rudern, Radeln, Laufen usw. Der bedeutende Willensakt, der zu einer solchen Anstrengung erforderlich ist, kann selbstverständlich von Tieren nicht verlangt werden, indessen gibt auch dieses vorübergehend ein Mehrfaches seiner normalen Leistung her. Und was von der Leistung gesagt ist, bezieht sich auch auf dessen einen Faktor, die Zugkraft, die bei Mensch und Tier im Notfalle eine erstaunliche Steigerung erfahren kann. Der belebte und der unbelebte Motor lassen sich deshalb nur bedingungsweise vergleichen. Dieser ist viel enger begrenzt in der Leistungssteigerung, nur der Elektromotor ähnelt darin etwas dem belebten. Dafür ist der unbelebte Motor aber unbegrenzt hinsichtlich der Leistungsdauer.

Die physiologisch günstige Geschwindigkeit für ein Arbeitpferd ist etwa $1\frac{1}{5}$ bis $1\frac{1}{4}$ m in der Sekunde, und dem entspricht eine normale Zugkraft von 50—60 kg. Unter diesen Umständen legt das Pferd in 8 Stunden 30—35 klm. zurück. Diese Werte können im Sinne des oben Gesagten zeitweise gesteigert werden, und daraus folgt der besondere Vorzug des Zugtieres für Bahnen mit stark wechselndem Widerstande, und es erklärt sich, warum beim Ersatze des Tieres durch einen unbelebten Motor dieser immer für eine viel größere Leistung bestimmt werden muß, als man beim Vergleiche von tierischem Pferd mit Maschinenpferd zunächst schließen möchte.

Welche Wagenlast nun der Motor bei gegebener Zugkraft zu schleppen vermag, hängt natürlich ganz von dem Zustande der Straße ab. Bei der allgemeinen Betrachtung des Rades ist schon mitgeteilt, daß man die zulässige Gesamtlast des Fuhrwerkes als Mehrfaches der Zugkraft ausdrückt, oder umgekehrt die erforderliche Zugkraft als Teil der gezogenen Last. Dieser Bruchteil wird auch kurz als Widerstandcoefficient oder schlechtweg als Widerstand des Fuhrwerkes bezeichnet. Die ersten planvollen Versuche zur Bestimmung dieses Widerstandes wurden von Robert Telford angestellt, dem berühmten englischen Straßen- und Brückenbauer, als ihm genaue Unterlagen zum Entwurfe seiner Landstraßen

nötig waren. Aus dem seither sehr umfangreich gewordenen Stoffe sollen hier nur wenige Zahlen und Angaben als Anhalt mitgeteilt werden, und auch nur für Räder der üblichen Durchmesser von ungefähr 1 m. Daß der Widerstand mit zunehmendem Raddurchmesser noch abnehmen würde, ist früher schon begründet. Der gesamte Widerstand wächst, der heftigen Stöße wegen, wie auch schon ausgeführt, mit der Geschwindigkeit, besonders wenn diese 1 m überschreitet. Er ist etwa $\frac{1}{70}$ bei sehr gutem Pflaster, steigt aber bei weichem, sandigem Boden vielleicht auf das Zehnfache, bei Schotterstraßen auf $\frac{1}{30}$, im großen Mittel kann er zu $\frac{1}{50}$ veranschlagt werden. Diese Zahlen beziehen sich indessen hauptsächlich auf die langsameren Lastfuhrwerke ohne Federn. Als neuer, einflußreicher Umstand ist nun aber die Tatsache zu erwähnen, daß der gefederte Wagen einen wesentlich geringeren Widerstand bietet, wenigstens sobald das Fuhrwerk in Bewegung ist, was aber nach den Betrachtungen über den Stoß der Räder und seine Verminderung durch die Federn nicht auffallen kann. Beim ersten Anziehen können natürlich die Federn nicht stoßlindernd wirken und sind deshalb einflußlos. Der erheblich größere Widerstand beim Anziehen folgt aus der größeren Reibung der Ruhe und aus der Notwendigkeit, die gezogene Masse erst durch Beschleunigen auf die normale Geschwindigkeit zu bringen. Die bedeutende Anstrengung der Zugtiere beim Anziehen ist leicht zu beobachten.

*

Bisher war auch stillschweigend eine horizontale Fahrbahn vorausgesetzt. Wie die geneigte Bahn größere Anforderungen hinsichtlich der Zugkraft stellt, ist leicht einzusehen, denn bei ihr muß ja, im Gegensatze zur horizontalen Bahn, ein Teil der Schwerkraft überwunden werden. Von einer horizontalen Ebene wird eine leicht bewegliche Last, etwa eine Kugel, vollständig getragen, von einer vertikalen Ebene gar nicht, von einer geneigten nach Maßgabe ihres Anstieges. Dieser Anstieg der Bahn wird herkömmlich ausgedrückt als das Verhältnis der vertikalen Erhebung zur horizontalen Länge. Eine Bahn, die auf 50 m Länge um 2 m sich hebt, hat eine Steigung von $\frac{1}{25}$. Eine ganz glatte Kugel wird von ganz glatter geneigter Bahn widerstandlos herabrollen,

aber nicht mehr unter dem Einflusse der ganzen Schwerkraft, denn ein Teil davon wird ja durch die Bahn aufgehoben. Wie groß aber der andre Teil ist, der die Kugel abwärts treibt, oder der beim Fuhrwerke als vermehrter Widerstand auftritt, der vom Motor zu überwinden ist, läßt sich schnell übersehen. Ob ein Gewicht senkrecht auf eine gewisse Höhe gehoben wird, oder auf einer geneigten Bahn, ist für die Hubarbeit (Gewicht mal Höhe) gleichgültig. Denn man brauchte sich ja nur die geneigte Bahn durch eine vielstufige ersetzt zu denken, bei der die Arbeit in Absätzen verrichtet wird, während die horizontalen Zwischenstrecken ohne Aufwand von Arbeit zurückgelegt werden, die Abwesenheit aller Reibungswiderstände natürlich vorausgesetzt. Die Summe der kleinen Hubarbeiten würde dann immer gleich der vorher in einem Zuge verrichteten Arbeit sein. Also, da die Arbeiten auf dem kurzen senkrechten und auf dem langen geneigten Wege gleich sind, so müssen sich die Kräfte umgekehrt verhalten, wie die Weglängen, denn das Produkt aus Kraft und Weg muß immer dasselbe bleiben. Das bedeutet aber, daß die Schwerkraft längs einer geneigten Bahn um so weniger wirksam ist, je geringer ihre senkrechte Erhebung gegenüber der Länge ist, diese gemessen auf der Bahn selbst. Die horizontale Länge, von der oben gesprochen wurde, ist kürzer als jene, bei den geringen Neigungen der Straßen ist der Unterschied aber nur unbedeutend, man kann also ohne erheblichen Fehler als Bruchteil der längs der geneigten Bahn wirkenden Schwerkraft das Neigungsverhältnis setzen. Demnach wird bei $\frac{1}{25}$ Straßenneigung nur derselbe Bruchteil der Last als zusätzlicher Widerstand zu überwinden sein. Da wir aber im Mittel den Widerstand der horizontalen Fahrbahn zu rund $\frac{1}{50}$ annehmen konnten, so würde bei $\frac{1}{25}$ Neigung der gesamte Widerstand schon auf das Dreifache gestiegen sein. Man sieht daraus, welchen Einfluß schon so scheinbar geringe Neigungen auf die Zugkraft haben, und wird nicht verwundert sein, wenn schon Telford die Neigungen tunlichst unter $\frac{1}{30}$ gehalten wissen wollte und nur im Notfalle und auf kurzen Strecken bis zu $\frac{1}{25}$ ging. — So klein übrigens diese Neigungen zahlenmäßig erscheinen, so erheblich sind sie doch in Wirklichkeit, schon für den Fußgänger. Der Radler wird bereits bei viel geringeren Neigungen ärgerlich und sitzt auf längere Strecken von $\frac{1}{50}$ Steigung sicher ab. Ein Ausdruck für diese erfahrungsgemäß stark hemmende Wirkung ist

die Tatsache der auffallenden Ueberschätzung des Zahlenwertes beim Anblicke von Steigungen.

Mancher Leser wird vielleicht verwundert gewesen sein, von den gewöhnlichen Straßenfuhrwerken soviel Aufhebens gemacht zu sehen, die er bisher nur als Erzeugnisse rein handwerkmäßiger Routine betrachtet hatte, oder überhaupt nicht beachtet hatte. Das trifft zum großen Teile auch zu, aber hoffentlich ist aus dem Mitgeteilten einleuchtend geworden, wie viel systematische Arbeit auch auf diesem Gebiete aufgewendet werden mußte, um Unterlagen für die richtige Formgebung der Grundtypen zu erhalten. In größtem Maßstabe hat die Armeeverwaltung schon lange die sorgfältigste Behandlung aller ihrer Fahrzeuge eintreten lassen, die im ganzen Entwürfe wie in der Durchbildung der Einzelheiten alle Erkenntnisse und Erfahrungen gewissenhaft benutzt und ihre Erzeugnisse als moderne Maschinen im besten Sinne des Wortes erscheinen läßt.

III.

Von der nüchternen Betrachtung der einfachen Fuhrwerke kommen wir nun auf ein Gebiet, das während der Entwicklung der mechanischen Technik im jetzigen Sinne immer die Phantasie lebhaft angezogen und häufig sonderbare Erscheinungen gezeitigt hat. Zu den „Selbstfahrern“, die wir meinen — das Wort sei gestattet, wiewohl es nur ganz bedingte Berechtigung hat — wird gelegentlich schon die einfache Beobachtung angeregt haben, daß es unter Umständen tatsächlich keines Vorspannes bedarf, um die Bewegung eines Fahrgestelles zu erzielen. Auf einer genügend geneigten Bahn läuft dieses von selbst und erfordert nur ein wirksames Steuer. Auf horizontaler Bahn aber kann der auf einem kleinen Fuhrwerke Stehende mit Stangen sich vorwärts schieben, wie in einem Kahne, und nachdem kunstvolle Mechanismen entstanden waren, Uhren, Mühlen, feinere Webstühle und andre verwickelte Maschinen, mit denen man gelernt hatte, die Bewegungen zweckdienlich zu beherrschen, mußte wohl der Gedanke kommen, einen brauchbaren Selbstfahrer herstellen zu können, unter Ersatz der einfachen Mittel, wie der Stangen, durch eine richtige „Maschine“, in dem Glauben, daß die ungenügende Wirkung des rohen Werkzeuges eben nur in seiner Einfachheit begründet sei.

Die noch fehlende Erkenntnis des Gesetzes der Erhaltung der Energie kann die verkehrten Bestrebungen früherer Zeit wohl entschuldigen, wiewohl die schöpferischen Geister der Mechanik in dem unbewußten Empfinden dieses Gesetzes sich von den verschwommenen Vorstellungen, die schließlich nur auf Erzeugung von Energie aus nichts hinausliefen, immer frei gehalten haben. Ob aber das Gesetz bisher allgemein klärend gewirkt hat, wird von jedem Techniker bezweifelt werden, denn oft genug nahen sich ihm aus seinem Bekanntenkreise Ideen, die ganz des tiftelnden Uhrmachers in Wilhelm Raabes „Wunnigel“ würdig sind, der mit seinem Selbstfahrer zwar verunglückte, aber trotzdem bis zuletzt des frohen Glaubens war, daß seine Erfindung doch „nach den richtigsten Prinzipiiis konstruiert war“. Ein Boot durch Ruder zu bewegen, mag für geringe Ansprüche genügen, aber dem Boote eine Schraube geben und diese durch ein „Räderwerk“ mit Leichtigkeit zu drehen, das ist ein Gedanke, der nur dem Techniker zur fachmäßigen Ausbildung übergeben zu werden braucht. Und solche Erfinder sind selten Leute von an sich niedrigem Bildungsgrade. Wenn noch in Tafelwerken, die vor weniger als 100 Jahren erschienen, selbstfahrende Kutschen dargestellt sind, deren Insassen mit heiterer Miene durch sanften Fußdruck den Anlaß zu ersichtlich beträchtlicher Geschwindigkeit geben, so kann man daraus allerdings einige Hoffnung auf endliches Durchdringen des Grundgesetzes aller heutigen Technik schöpfen, denn wenigstens ernsthafte Veröffentlichungen solcher freien Phantasiegebilde würden heute nicht mehr zu erwarten sein. Andererseits überrascht angenehm, auch schon in früherer Zeit gelegentlich einem richtigen Empfinden für das Mögliche in den Entwürfen von Selbstfahrern zu begegnen. So sehen wir in einer Holzschnittfolge „Der Triumphzug des Kaisers Maximilian“ von Albrecht Dürer (1471 bis 1528), dem Künstler und Techniker nach Art des Leonardo da Vinci, einen reich mit Bildwerken geschmückten Wagen abgebildet, der von zwei darauf stehenden Männern an langen Schubstangen angetrieben wird. Der ganze Mechanismus ist nicht unähnlich dem Triebwerke unserer Lokomotiven. Die beiden Männer arbeiten einzeln an je zwei unter sich gekuppelten Kurbeln, wobei allem Anscheine nach, um die Todtpunkte zu vermeiden, die Kurbelpaare gegeneinander rechtwinklig versetzt sind. Beachtet man die Verhältnisse der tunlichst einfachen Zwischenglieder nach

den Wagenrädern hin, so sieht man auch, wie Albrecht Dürer weit entfernt war, von diesen Zwischengliedern irgend eine Steigerung der Motorleistung zu erwarten. Er hat, wohl ohne besondere Absichten nach dieser Richtung, instinktiv ein grundsätzlich ganz gesundes technisches Gebilde entworfen, und es mag diese gute Gelegenheit nicht unbenutzt bleiben, um wieder auf die Wesen- gleichheit von künstlerischem und technischem Schaffen hinzu- weisen. Vielleicht ist Albrecht Dürer von der Erkenntnis des berechtigten Kernes der Selbstfahrer mit belebtem Motor gar nicht weit entfernt gewesen, den später Drais in voller Klarheit entwickelte.

*

Im Vorbeigehen mag hier übrigens noch der Versuche gedacht werden, den Wind zum Treiben der Fuhrwerke zu benutzen, die an sich gewiß nicht unverständlich sind, wenn auch die Verhältnisse auf dem festen Lande eine aussichtvolle Weiterbildung des Systems verhindern. In Holland hat es um 1600 größere Segelwagen gegeben, in China soll noch heute günstiger Wind von Wagenführern vermittelt kleiner Segel benutzt werden. Mancher Radler wird eigenen gelegentlichen Gedanken begegnen, wenn er hört, daß schon in der ersten Entwicklungszeit des jetzigen Fahrrades in den 60er Jahren der Vorschlag zu einem Segel-Velociped gemacht ist, auch auf dem Papiere nicht übel aussieht. Schon mehr ins Reich der Phantastik gehören die Vorschläge von Segelwagen mit Windrad, die von der Richtung des Windes unabhängig machen und die Wagen auch gegen den Wind fahren lassen sollten. Unmöglich, wie man wohl behaupten hört, ist das nicht, und der Verfasser erinnert sich einer Wette unter jungen Leuten, von denen der Eine den Beweis für die Möglichkeit an einem kleinen Modelle wirklich führte. Aber wie leicht einzusehen, scheitert die Nutzbarmachung der Idee schon an der Größe des Windrades, die ein stabiles Fahrzeug von vornherein ausschließt. Als Gegenstand des Sportes soll der Segelwagen auf amerikanischen Eisenbahnen manchmal zu sehen sein, sofern der geringe Verkehr auf der Strecke noch dazu Gelegenheit zuläßt. Bei uns hat sich das Segeln auf fester Bahn nur in den Segelschlitten und in dem Schlittschuh-Segeln erhalten.

*

Das uns jetzt so selbstverständlich erscheinende Antreiben des einfachsten Selbstfahrers, des Fahrrades, durch Tretkurbeln ist verhältnismäßig spät erfunden, und hat dann zu schneller Weiterbildung des Fahrrades geführt. Vom Erfinden dieses Triebwerkes (durch den Mechaniker Fischer) muß man schon reden, wenn man die vorhergehenden Versuche ansieht, durch Handkurbeln den Antrieb zu bewirken, oft unter Zuhilfenahme eines unnötig verwickelten Räderwerkes, das immer ein unbestimmtes Vertrauen auf „Potenzierung“ der Menschenkraft einzuflößen scheint. Auch die bekannte Eisenbahn-Draisine, die übrigens nichts mit der eigentlichen Erfindung ihres Namensgebers zu tun hat, wird durch Handhebel bewegt. Drais hat zwar schon die richtige Idee gehabt, die Beine zum Antriebe zu benutzen, ist aber vielleicht zu sehr in der an sich richtigen, überhaupt grundlegenden Vorstellung befangen gewesen, die Beine nur vom Gewichte des Körpers zu entlasten, die Vorwärtsbewegung aber ihnen zu überlassen, so daß er an der Schritt-Tätigkeit festhielt, oder er wollte auch von vornherein die allereinfachste Form schaffen. Jedenfalls hat er nicht den abschließenden Gedanken hinzugefügt, auch die Art der Bein-Betätigung zweckmäßig umzuwandeln. Als dann die Tretkurbel auf das Velociped, wie es damals hieß, angewendet wurde, trat wieder eine Art Hindernis ein, das aus dem Verhältnisse zwischen der möglichen und erwünschten Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung zu dem durch physiologische Gründe gegebenen Takte des Tretens folgte. Wie der Mensch beim Gehen seine Schrittzahl unbewußt auf die günstigste Entfaltung seiner Leistung einstellt, wobei im Besonderen die natürliche Schwingungsdauer des pendelnden Beines maßgebend ist, so besteht auch zwischen dem Auf- und Abgehen des Fußes an der Tretkurbel und der bei dieser zweiten Bewegung aufzuwendenden Kraft ein bestimmtes günstiges Verhältnis, was schon lange vorher bei anderen mit dem Fuße bewegten Maschinen, Drehbänken, Schleifsteinen, Spinnrädern usw. beachtet wurde. Setzte man nun bei Rädern von dem jetzt gebräuchlichen kleinen Durchmesser die Tretkurbel unmittelbar auf die Achse, so entsprach der Vortrieb bei jedesmaliger vollständiger Beinbewegung nicht dem ohne wesentliche Anstrengung erzielbaren Maße, und die zu geringe Fahrgeschwindigkeit konnte nicht zur Benutzung der Fahrmaschine anreizen. Die Steigerung der Geschwindigkeit war aber nur durch ermüdende Erhöhung der Tritt-Zahl möglich. Man hat später

als gelegentlichen Clownscherz die sogenannte Uebersetzung an dem Niederrade umgekehrt, das kleine Rad des Kettentriebes an die Kurbelaxe, das größere an die Radaxe gesteckt, so daß diese statt einer Vergrößerung der Umdrehzahl eine entsprechende Erniedrigung erfuhr. Der Fahrer muß sich auf einem solchen Rade ungeheuer abzappeln, um eine lächerlich kleine Geschwindigkeit zu erzielen, was einen sehr komischen Anblick gewährt. Dieser Scherz zeigt recht drastisch, wie notwendig das Erhalten eines günstigen Verhältnisses zwischen der Tretgeschwindigkeit und der Rollgeschwindigkeit ist. Um diesem Verhältnisse gerecht zu werden, nahm man nun das Rad mit den Tretkurbeln sehr groß, etwa $1\frac{1}{2}$ m im Durchmesser, und es entstand das bekannte Hochrad, gekennzeichnet durch das lenkbare große Vorderrad mit den Tretkurbeln, über dem der Reiter bedenklich nahe über der Achse saß, und das infolgedessen nur schwach belastete kleine Hinterrad, das wenigstens die notwendigste Stabilität zu sichern hatte. Damit war nun zwar eine hinreichend große Geschwindigkeit bei Wahrung der zweckmäßigen Trittzahl erzielt, denn eine Umdrehung des großen Rades gab nun einen seiner Vergrößerung entsprechenden Vortrieb, aber die ganze Maschine war ihrem Charakter nach doch mehr für den Sport geeignet, wie zum allgemeinen Gebrauche, und das Wort „Kunstreiterfuhrwerk“ hatte eine gewisse Berechtigung. Der Reiter saß sehr hoch und so weit nach vorn, daß ein Ueberschlagen nicht zu den Seltenheiten gehörte. Schon das Aufsteigen erforderte eine größere Gewandtheit, als die meisten Zeitgenossen aufbringen wollen, im Straßengetriebe war jedenfalls das oft notwendige Absitzen und Aufsitzen nicht mit der erforderlichen Schnelligkeit auszuführen, das Fahrzeug blieb mehr auf die Landstraße beschränkt, auf der die Kilometerjäger bekannte Erscheinungen wurden. Entwicklungsgeschichtlich mag noch bemerkt werden, daß schon Ende der 60er Jahre das Velociped ein vielbenutzter Gegenstand der Karrikatur wurde, namentlich, nachdem auch unternehmende Damen sich des neuen Sportmittels zu bedienen angingen. Die verschiedenen Carambolagen der Reiter — diese Bezeichnung paßt für das Wesen des Hochrades wohl mehr, als die jetzige „Radler“ — und die möglichen Gefährdungen der Hochthronenden zeitigte eine Fülle von Bildwitzen, die einen ganz anderen Charakter hatten, als die später dem Niederrade gewidmeten. Vielleicht nimmt ein kulturhistorisch Veranlagter diesen Hinweis mal auf.

Um nun zu dem Niederrade zu gelangen, das bei jeder Kurbeldrehung denselben Vortrieb gibt wie das Hochrad, mußte zu einer Uebersetzung der Trittbewegung ins Schnelle gegriffen werden, die an sich freilich wieder eine gewisse Komplikation bedeutete, aber nicht zu umgehen war. Beim Niederrade ist also eine besondere Kurbelachse vorgesehen, zwischen den beiden Radachsen, mit einem größeren Zahnrade, dem ein kleineres Zahnrad auf der Hinterachse entspricht und zur Verbindung der Zahnräder dient eine genau geteilte Kette, deren Glieder sich um und zwischen die Zähne legen. Das Uebersetzungsverhältnis ist durch die Zähnezahlen gegeben. Um zu wissen, wie viel Umdrehungen die Hinterachse macht, hat man nur die Umdrehungen der Kurbelachse zu multiplizieren mit der Zähnezahl des größeren Zahnrades und das Produkt zu dividieren durch die Zähnezahl des kleineren auf der Hinterachse. Ein solcher Kettentrieb ist im Allgemeinen kein sehr beliebtes Element im Maschinenbau. Er muß gelegentlich als Ersatz des Riementriebes angewendet werden, wenn dieser unter den besonderen Umständen unzulässig ist, er hat vor dem Riementriebe den Vorzug der sicheren Kupplung der Räder ohne Gleiten, er läuft aber nicht so sanft und stoßfrei. Daß er gerade beim Fahrrad sich so zweifellos bewähren sollte, konnte deshalb kaum vorausgesehen werden, er ist aber in überwiegender Verwendung geblieben, trotz vieler Versuche, ihn durch den reinen Zahnradtrieb zu ersetzen. Der Kettentrieb, trotz mancher Mängel, die er auch beim Fahrrad zeigt, hat hier seine sonst übelste Eigenschaft, nicht recht stoßfrei zu laufen, nachdem die Kettenglieder im Gebrauche sich etwas gelängt und abgenutzt haben, nicht wesentlich störend geltend gemacht, er ist aber andererseits ein verhältnismäßig unempfindlicher Mechanismus, wie schon aus dem Vergleiche seiner groben Zähne mit der viel feineren Teilung der Räder beim reinen Zahntriebe sich ergibt, und aus diesem Grunde besonders für das Fahrrad geeignet. Die schnelle Entwicklung des Niederrades ist zum Teil der glücklichen Wahl des Kettentriebes zu verdanken.

Die früher schon besprochene Erfindung des Pneumatik-Reifens ist ein weiterer glücklicher Umstand für das Niederrad gewesen. Das Hochrad konnte mit einem ziemlich dünnen massiven Gummireifen auskommen, da infolge der Größe des hauptsächlich belasteten Vorderrades die Unebenheiten der Straße nicht zu unzulässigen Stößen führten. Beim Niederrade aber würde ein gleicher

Gummireifen bei Weitem nicht zu einem für den Fahrer angenehmen Gange genügen, um so mehr, als in dieser Richtung erhöhte Anforderungen zu stellen waren, um den allgemeineren Gebrauch des Niederrades zu begünstigen. Niederrad und Pneumatikreifen, oder besser, um etwa noch Kommendes zu berücksichtigen, Niederrad und sehr schmiegsame Radfelge gehören deshalb eng zusammen.

Die Sicherheit des Fahrers auf dem Niederrade folgt einmal aus dem niedrigen Sitze, der ein müheloses schnelles Abspringen ermöglicht, und aus der Beseitigung der Gefahr, nach vorn überzuschlagen, durch das weit vor dem Sitze stehende vordere Lenkrad. Zu beachten bei diesem ist noch die Anordnung seiner Achse etwas vor der Steuerachse, d. h. vor der verlängert zu denkenden, zur Senkrechten schwach geneigten Steuerstange mit Gabel. Durch diese Lagerung der Achse wird das Steuern unterstützt, da die Steuerstange bei geringer Abweichung des Vorderrades von der Mittelstellung das Bestreben hat, von selbst nach der Richtung der Ausweichung weiter umzuschlagen.

Zum Befördern kleiner Lasten sind bekanntlich auch Dreiräder verschiedenster Form im Gebrauche, sehr selten aber, und nur aus Gründen besonderer Vorsicht, als bloße Personenräder. Es liegt da die Frage nahe, weshalb das Zweirad sich so überwiegend eingeführt hat. Die größere Einfachheit und die geringere Sperrigkeit ist gewiß schon ein Grund dafür, viel wichtiger aber ist die größere Lenkbarkeit, überhaupt die bessere Manövriertfähigkeit, die das Zweirad seinem prosaischen Kollegen gegenüber so überlegen macht. Dazu kommt aber noch der wesentlich leichtere Gang. Beim Dreirade müssen die beiden Hinterräder an der Axe fest sein, weil es die treibende Axe ist, und die Reibung des einzelnen, nur die halbe Hinterlast tragenden Rades am Boden oft nicht für den sicheren Antrieb genügen würde. Das Räderpaar zeigt also die Nachteile der nicht unabhängigen Räder, sowohl beim Geradeausfahren wie besonders in Kurven, und der vermehrte Aufwand von Körperkraft macht den Unterschied gegen das Zweirad sehr bemerkbar.

*

Es ist aber endlich noch nötig, die eigentlich wichtigste Frage beim Zweirade wenigstens kurz zu behandeln, welchem Umstande es seine Stabilität beim Fahren verdankt. Die Tatsache ist uns

durch den täglichen Anblick jetzt so geläufig geworden, daß sie bei der primitiven Gehmaschine von Drais gar nicht erwähnt zu werden brauchte, wiewohl auch diese nicht stetig durch die Beine gegen Umkippen gestützt zu werden brauchte, sie hätte sonst überhaupt ihren Zweck verfehlt gehabt. Denn sie sollte ja den Körper schwebend erhalten, während die Füße, nur leicht mit dem Boden in Berührung kommend, in immerhin verhältnismäßig langen Pausen den Antrieb besorgten. Es muß sogar, da ein eigentliches Vorbild in dieser Richtung nicht vorhanden war, der Gedanke von Drais, die fehlende statische Stabilität beim Fahren durch die dynamische zu ersetzen, mit als sein besonderes Verdienst angesehen werden. Daß ein Zweirad im Ruhezustande nicht von selbst steht, sowenig ein nicht rotierender Kreisel auf die Spitze gestellt werden kann, ist verständlich, denn es gelingt nur mit großer Mühe, den Schwerpunkt gerade über den Stützpunkt oder über die Verbindungslinie der beiden Stützpunkte zu bringen, und der leichteste Anstoß nach der Seite, schon ein leiser Windhauch läßt es wieder umkippen. Der Kniff des Kolumbus ist nicht anwendbar, und nur der Vorwärtsbewegung ist es zu danken, daß der Fahrer keine bewußte Mühe aufzuwenden braucht, um im Sattel zu bleiben, wozu immer ein gewisses Minimum an Geschwindigkeit erforderlich ist. Wir müssen uns hier darauf beschränken, die dynamische Stabilität an Hand einiger leicht beobachtbarer verwandter Erscheinungen zu erklären. Wer sich für diese Fragen näher interessiert, findet in dem kleinen Buche des englischen Mathematikers Perry „Drehkreisel“ (Leipzig 1904) leicht verständlichen Aufschluß über die mannigfaltigsten hierher gehörigen Probleme. An einem rollenden Geldstücke oder Teller, überhaupt an jedem frei rotierenden Körper ist leicht zu beobachten, wie die Drehbewegung stabile Stellungen des Drehkörpers ermöglicht, die im Ruhezustande ausgeschlossen sind. Mit welcher Kraft ein solcher Körper der Aenderung seiner Stellung während des Drehens widersteht, läßt sich an dem gewöhnlichen Kreisel fühlbar zeigen, noch besser an den kleinen, in einem Ringe gelagerten Schwungrädchen, die jetzt als Spielzeug käuflich sind. Der Drehkörper sucht vermöge der Drehung seine augenblickliche Drehaxe zu erhalten. Auf das Fahrrad angewendet bedeutet das: Die beiden Räder widerstehen mit einer erheblichen Kraft den kleinen auf Umfallen wirkenden Antrieben, denen sie in der Ruhe ohne

weiteres folgen. Wie man ferner auf einem Schlittschuh stehend nur mit Mühe balancieren kann, dagegen ganz mühelos bei erheblicher Geschwindigkeit auf ihm in gerader Linie oder in einer Kurve dahinfährt, und wie der Kunstreiter auf dem Pferde viel sicherer steht, wenn es galoppiert, als wenn es stillsteht, so erhält auch das Fahrrad mit Fahrer im Ganzen durch die Vorwärtsbewegung eine vermehrte Festigkeit im Erhalten seiner aufrechten Stellung. Daß diese dynamische Stabilität nicht hinreicht, um überhaupt das Umfallen zu verhüten, zeigt schon die Notwendigkeit, das Fahren zu erlernen. Aber dies aus der Geschwindigkeit folgende längere Beharren in der Fahrstellung gibt dem Fahrer mehr Zeit, durch Neigen des Körpers nach der einen oder andern Seite dem Umfallen entgegen zu arbeiten, das Fahrenlernen besteht im Erwerben der Uebung, dieses Verlegen des Körperschwerpunktes unwillkürlich vorzunehmen, so schnell und so geschickt, daß beim geübten Fahrer überhaupt nichts mehr von den balanzierenden Bewegungen der Körpers zu sehen ist, ganz ähnlich wie beim Reiten auf dem Pferde. Die Vorwärtsbewegung wirkt also gewissermaßen wie die Balanzierstange beim Seiltänzer, die auch den Zweck hat, durch Verlangsamung der seitlichen Bewegungen infolge ihrer weit abstehenden Masse dem Träger mehr Zeit zu lassen, seine Stellung auf dem schwanken Seile zweckmäßig und unwillkürlich zu korrigieren. Das Erlernen des Radelns ist schließlich doch zu einfach, sonst wäre man gewiß schon auf den Gedanken gekommen, es durch Balanzierstangen zu erleichtern, die am Rade befestigt sind und mit fortschreitender Uebung immer kürzer gewählt werden.

In dem jetzigen Fahrrade haben die Bestrebungen ihren vorläufigen Abschluß gefunden, die den Antrieb von Fahrzeugen durch die Insassen selbst bezwecken. Von allen, meist unklaren und vielfach bloß phantastischen Ideen ist das einfache Gerät verblieben, zu dem Drais in richtiger Erkenntnis der mechanischen und physiologischen Bedingungen den Anstoß gegeben hat. Auch diese in ihrer Grundform seit längerem nun unveränderte Maschine hat sich dauernd mancher unzweckmäßigen Vorschläge zu „Verbesserungen“ zu erwehren. In Ansehung des starken Dranges erregter Erfinder zu sonderbaren Seitensprüngen von der Bahn sorgsamem und mühevollen Ueberlegens muß aber fast auffallen, daß die Idee, auch den Zugtieren eine Art Fahrmaschine zu geben, die

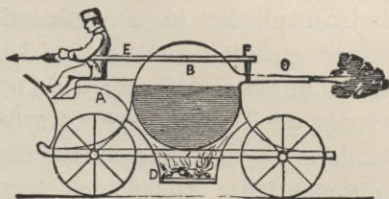
ihre Körperlast ganz oder teilweise aufnimmt, wie es scheint, noch nicht bearbeitet ist, wenn von dem Zirkus-Elephanten auf dem Fahrrade abgesehen wird. Vielleicht ist die Idee in ihrem Keime eigentlich zu verständig, um Gegenstand umstürzlerischer Phantasien zu werden, denn die Entlastung der Pferdebeine von dem Körpergewichte könnte nach den leitenden Gesichtspunkten von Drais nur den Erfolg erhöhter Nutzleistung haben. Freilich würden Bemühungen in dieser Richtung nicht lohnen, denn die unbelebten Motoren, die jetzt allmählich dem Zugdienste beim Straßenfuhrwerke nutzbar werden, bieten erfreulicherweise Ersatzmittel für die geplagten Vierfüßler.

IV.

Wenn die Entwicklung immer so wäre, wie sie sein sollte, nämlich wie man sie sich nachträglich konstruieren kann, so müßte eigentlich aus dem Selbstfahrer mit Menschenkraft der Motorwagen, und daraus als höhere Sondergattung der Motorwagen auf Schienengleisen entstanden sein. Bekanntlich ist die Entwicklung aber ganz anders gewesen, ohne weniger folgerichtig verfahren zu haben. Zwar ist in der Tat der durch die eigene Kraft des Fahrenden bewegte Wagen, in der Idee wenigstens, der Vorgänger der Motorwagen gewesen, wie wir sahen, aber doch nicht das Vorbild, das durch Zugabe eines unbelebten Motors vervollständigt wäre, wie etwa aus dem einfachen Zweirade das Motorzweirad wurde. Vielmehr muß die Quelle des Motorwagens in dem unwillkürlichen Streben gesehen werden, den seit dem 17. Jahrhundert im ersten Entstehen begriffenen Wärmemotor zur Fortbewegung überhaupt zu benutzen, und der Anreiz dazu wird in der großen Leistung des Motors auf verhältnismäßig kleinem Raume zu sehen sein. Wie in der Dampfmaschine ein Ersatz für den alten Pferdegöpel entstand und bis dahin ungeahnte Leistungen ermöglichte, so wird auch der Gedanke nahe gelegen haben, das Pferd vor dem Wagen durch den mächtigen Wärmemotor zu ersetzen. Und da es ein Gesetz der Entwicklung ist, daß die Pläne zur besonderen Verwertung des erst Keimenden immer weit der Befestigung des Grundlegenden vorauszuweichen pflegen, so ist nicht zu verwundern, daß schon Savary daran dachte, den Dampf zum Bewegen von Wagen zu benutzen, daß auch Papin nach kaum

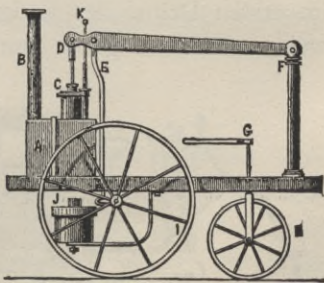
fertigem Entwurfe eines Dampfmotors überhaupt dazu übergang, mit ihm Schiffe zu treiben.

Die ersten Dampfwagen aber soll der Zeitgenosse Papins, der große Isaak Newton (1642—1726) entworfen haben, zugleich den einzigen, der unmittelbar die Zugkraft der Pferde ersetzen wollte, indem nämlich (Figur 102) der aus dem Dampfkessel nach hinten ausströmende Dampfstrahl den Wagen raketenartig vorwärts treiben sollte. Wir wissen jetzt, daß auch die Geschwindigkeit des Wagens raketenartig sein müßte,



Figur 102.

wenn in dieser Weise ein Wirkungsgrad eintreten sollte, der dem Aufwande an Dampf entspräche, und es kann auch wohl bezweifelt werden, daß der große Physiker, der die Grundlagen der modernen Mechanik festlegte, in seinem Dampfswagen mehr gesehen hat, als ein gelegentliches Spiel der Phantasie. Den Urhebern der späteren zahlreichen Projekte von Dampfswagen war schon die Anschauung der Kolbendampfmaschine geläufig, die zum Drehen der Wagenräder benutzt wurde. Nur ist dabei nicht gleich der einfachste Mechanismus, die umlaufende Kurbel, benutzt worden, wie ja auch die ortsfeste Dampfmaschine erst in einem vorgeschrittenen Stadium dieses jetzt so selbstverständliche Element zur Umwandlung der geradlinigen Kolbenbewegung erhielt. So ist der erste ausgeführte Dampfswagen, von dem Franzosen Cugnot, der 1769 gebaut sein soll, nur mit schwingenden Armen versehen gewesen, die den Antrieb der Achse in einer Richtung durch Vermittlung von Sperrklinken besorgten. Daß den Vater der modernen Dampfmaschine, James Watt, auch der Gedanke eines Dampfwegens beschäftigt hat, ist wohl selbstverständlich, und von seinem Gehülfen Murdoch wurde wenigstens ein gangfähiges Modell gebaut (Figur 103), das die nunmehr im Wesentlichen abgeschlossene Dampfmaschine benutzen konnte und alle Grundelemente enthielt, die an späteren größeren Ausführungen, angemessen umgebildet und verbessert, immer wiederkehrten. Nament-

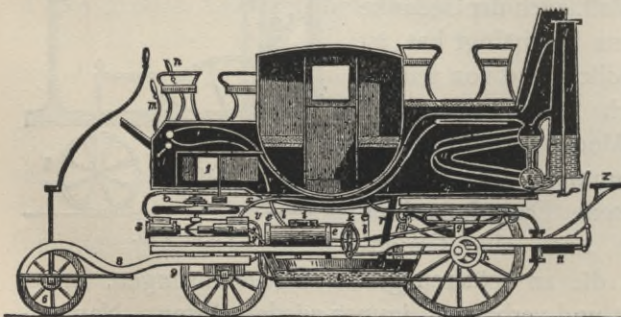


Figur 103.

lich machte Murdoch Gebrauch von der einfachen Kurbel an der Triebachse, nach dem Muster der ortfesten Maschinen aus den Werkstätten von Watt & Boulton, auch der Halb-Balancier deutet die Herkunft an. Diese für alle von Dampf getriebenen Fahrzeuge typische Grundform, bei der die Kurbel auf der Triebachse durch Zwischenglieder in unveränderliche Verbindung mit dem Dampfkolben gebracht ist, entspricht also ganz der ortfesten Dampfmaschine überhaupt, nur wirkt bei ihr als Schwungmasse zum Ueberwinden der Todtpunkte der Kurbel nicht ein besonderes Schwungrad, sondern die fahrende Masse der Maschine selbst einschließlich des Wagengestelles, sodaß auch einzylindrige Maschinen, wie beim Modelle von Murdoch, hinreichen, einen annähernd gleichmäßigen Gang zu sichern. Zum Anfahren und bei geringen Geschwindigkeiten erweist sich indessen eine zweite Maschine als notwendig, deren Kurbel um etwa 90° gegen die erste versetzt ist, sodaß ein gegenseitiges Aushelfen der Maschinen in den ungünstigen Kurbelstellungen stattfindet.

*

Die eigentliche Entwicklung der dampfbewegten Fahrzeuge hat mit dem Anfange des vorigen Jahrhunderts eingesetzt, und sehr bald hat sich die Scheidung vollzogen zwischen Straßenfuhrwerken und Schienenfuhrwerken. Vorübergehend hat man wohl gedacht, daß der Personenverkehr im Wesentlichen den ersteren zufallen würde, während die Eisenbahnen hauptsächlich dem Transporte von Massengütern dienen sollten. Jedenfalls sind in England im ersten Drittel des vorigen Jahrhunderts Dampfwagen von teilweise auffallend guter Durchbildung entstanden, und als Dampf-



Figur 104.

omnibusse oder Dampfpostkutschen sind auf den guten Straßen Englands manchejahrelang in regelmäßigem Betrieb gewesen. So der Dampfswagen Gurney's

aus dem Jahre 1827 (Figur 104). Daß diese Gefährte wieder verschwanden, hatte seinen Grund einfach in ihrer Entbehrlichkeit neben den sich mit großer Schnelligkeit ausbreitenden Eisenbahnen. Für den Verkehr auf den Straßen genügten die von Pferden gezogenen Wagen, die schließlich auch im Ganzen ein in der Anschaffung billigeres und in der Behandlung einfacheres Fuhrwerk darstellten. Erst die weitere Steigerung des Verkehres hat in den letzten Jahrzehnten wieder kräftig zum Bau von Motorwagen angeregt. Vollständig geruht haben zwar die Anstrengungen in dieser Richtung nie. Meist aber lag immer die Absicht vor „Straßenlokomotiven“ zum Schleppen von Lastfuhrwerken zu bauen, die Eisenbahnen also zu ergänzen durch von ihnen entnommene, soweit nötig umgestaltete Einrichtungen. Die vielen Mißerfolge in dieser Hinsicht ließen dann längere Zeit den Motorbetrieb auf Straßen überhaupt als ganz unzulässig erscheinen, und nur in besonderen Formen blieb die Straßenlokomotive erhalten, so in den halb lokomotiven halb lokomobilen Maschinen der Dampfpflüge und in den Dampfwalzen für den Straßenbau. An dem neuerdings erfolgten Aufschwunge des Automobilwesens lassen sich jetzt auch die Gründe erkennen, die früher den Erfolg verhinderten, die auch noch in den 80er Jahren einen mit erheblichen Mitteln unternommenen Versuch zur Einführung gut ausgebildeter Dampf-Fuhrwerke scheitern ließen. Der Straßenbetrieb stellt eigentümliche Anforderungen, denen mit den Mitteln des Eisenbahnbetriebes nicht genügt werden kann, die Schienen-Lokomotive, und was ihr nachgebildet ist, eignet sich in ihren ganzen Betriebsverhältnissen nicht für den Straßenwagen, der wesentlich als Einzel-fuhrwerk dienen soll und ein Ersatz für das Pferdegespann sein will.

*

Wir haben früher gesehen, wie die Dampfmaschine vornehmlich für größere Leistungen geeignet ist. Es ist nicht gelungen, ihren kleineren Ausführungen eine annähernd gleich gute Ausnutzung des Brennstoffes zu sichern, ebensowenig, sie selbständig und gefahrlos zu machen, wie den Gasmotor. Der Dampfkessel muß während des Betriebes beständig überwacht werden, die Kohlefeuerung ist für kleine Kessel zu umständlich, die Feuerung mit flüssigen Brennstoffen im Allgemeinen zu teuer, in Ansehung

des verhältnismäßig niedrigen thermischen Wirkungsgrades der kleinen Maschine, und sie bedarf ebenfalls der beständigen Regelung nach den Bedürfnissen des Kessels. Man hat zwar für kleine Betriebe besondere Kesselsysteme geschaffen, so namentlich den von Serpollet sorgfältig ausgebildeten Kessel, der aus einem einzigen engen Schlangenrohre besteht, dem auf der einen Seite das Speisewasser zugeführt, auf der andern der Dampf entnommen wird. Es ist auf diesem Wege gelungen, die Dampferzeuger auf einen erstaunlich kleinen Raum zusammenzudrängen. So hat der Kessel für ein Dampf-Automobil von Grout bei etwa 10pferdiger Maschine einen Durchmesser von nur 40 cm und eben solche Höhe. Diese Kessel können auch leicht so bemessen werden, daß sie gleichzeitig als Ueberhitzer dienen, was schon deshalb erwünscht ist, um den Dampf nicht naß in die Maschine gelangen zu lassen. Bei dem eben erwähnten Kessel wird der Dampf von 20—25 Atmosphären um etwa 150° überhitzt. Es ist ja auch wohl denkbar, den Betrieb einer derartigen Dampfmaschine ganz selbsttätig zu machen, etwa durch einen thermometerartigen Apparat, der auf die Kesselspeisung und die Feuerung mit flüssigem Brennstoffe so einwirkt, daß in Betriebspausen wenig oder gar kein Dampf gebildet wird. Damit ist aber notwendig eine große Verwicklung des ganzen Systemes verbunden. Eine kleine, ganz fein regelbare Speisepumpe, eine ebenso regelbare Brennstoff- und Luftzuführung, ein empfindlicher Thermostat, der gleichwohl genügende Stellkraft auf die vorgenannten Apparate ausüben muß, wären notwendig, um der Bedingung der Selbsttätigkeit annähernd zu genügen. Dazu aber kommt noch die Notwendigkeit einer genau arbeitenden Steuerung, die außerdem umkehrbar sein muß, wenn der Vorzug der Dampfmaschine, der unmittelbare Antrieb der Achsen erhalten bleiben soll. Und trotzdem würde diese ihrer Kleinheit wegen keinen hohen thermischen Wirkungsgrad erreichen. Bei alledem ist von Serpellot und Anderen die Ausbildung von Dampf-Automobilen unverdrossen versucht, sicher indessen läßt sich die Dampfmaschine nicht für ganz kleine Leistungen ausführen. Ein Motorzweirad beispielweise ist mit einer Dampfmaschine nicht denkbar. Wie störend ferner das Mitführen einer größeren Wassermenge ist, oder die Wiedergewinnung des Wassers durch vollständige Kondensation des Dampfes, braucht nur erwähnt zu werden. Endlich steht der günstigen Eigenschaft der ganzen Dampfmaschine, im Kessel einen

großen Energiesammler zu besitzen, und deshalb absatzweisen oder beliebig verlangsamten Betrieb zu gestatten, der Nachteil umständlichen und zeitraubenden Anheizens gegenüber. Der eigentliche Motor für Straßenwagen ist deshalb der Gasmotor geworden, im Besonderen der Benzinmotor, der nur verdrängt werden könnte durch den Elektromotor, wenn es gelänge, für diesen einen leichten und billigen elektrischen Sammler zu schaffen, wozu vorläufig aber noch gar keine Aussicht ist.

*

Der Gasmotor der Automobilen ist immer ein Kompressionsmotor nach Otto's Prinzip (Motoren S. 268), in denen das Gas durch Benzindampf ersetzt ist, oder auch durch Spiritusdampf. Die Arbeitsweise des Motors vollzieht sich bekanntlich in einem Zyklus von 4 Kolbenhuben oder 2 Kurbelumdrehungen. Beim ersten Vorgehen des Kolbens wird das Arbeitsgemisch eingesaugt, beim folgenden Zurückgehen verdichtet, in diesem Zustande vor Beginn des zweiten Vorgehens des Kolbens entzündet, durch das erneute Zurückgehen werden die Verbrennungsgase ausgestoßen. Die Arbeit des Motors ist gleich dem Ueberschusse der Arbeit beim zweiten Vorgehen des Kolbens über die verbrauchte Verdichtungsarbeit. Das ganze Spiel läßt sich, soweit der Zylinder allein in Betracht kommt, mit ausserordentlich einfachen Mitteln durchführen. Nur das Auslaßventil am Zylinder muß notwendig gesteuert werden, das Einlassen des Arbeitsgemisches kann durch ein selbsttätiges Ventil erfolgen, wie bei einer Pumpe, als welche der Motor beim Sauggange des Kolbens ja auch arbeitet. Leider nehmen die übrigen zum Betriebe erforderlichen Einzelheiten dem Motor zum Teil wieder den Charakter der Einfachheit.

Zunächst hat die Herstellung des richtigen Gemisches von Luft und Benzindampf viele Schwierigkeiten verursacht, und deshalb zu zahlreichen Formen von Verdampfapparaten für das Benzin geführt, die hier den Namen Carburator haben. Die Schwierigkeiten liegen besonders in der minimalen Menge des flüssigen Brennstoffes, die bei jeder Ladung des Zylinders auf die angesaugte Luft kommt, die außerdem mit wechselnder Luftmenge regelbar sein muß. Das Volumenverhältnis des flüssigen Benzins zu der erforderlichen Verbrennungsluft ist etwa 1:12 000. Ein Zylinder

von 1 Liter Hubvolumen, eine bei den hohen Geschwindigkeiten der Automotoren schon erhebliche Größe, erfordert deshalb bei jeder Ladung nur ungefähr 2 Tropfen Benzin. Eine Pumpe für so kleine Leistung, die noch dazu regelbar sein soll, wäre ein Uhrmacherstück, und ihr sicheres Arbeiten würde immer zweifelhaft sein. Die früheren Versuche, solche Pümpchen zu verwenden, hat man deshalb bei Automotoren ganz aufgegeben und zieht vor, die Dosierung des Brennstoffes bei größerem Volumen vorzunehmen, nämlich das Benzin der Luft als Dampf beizumischen. Man läßt die Luft deshalb ganz oder teilweise durch ein mit Benzin gefülltes Gefäß gehen, unterstützt die Verdampfung durch Schaffung größerer Oberflächen, durch Zerstäuben, Erwärmen usw. und sucht durch sorgfältiges experimentelles Einstellen der regelnden Organe das richtige Mischungsverhältnis zu sichern. Alle Schwierigkeiten würden beseitigt sein, wenn es einen Apparat gäbe, der in irgend einer Weise auf den Gehalt der Mischung an Benzindampf reagierte. Zur Herstellung eines solchen Apparates ist aber noch kein gangbarer Weg bekannt geworden. Immerhin ist der Mischapparat, dieser empfindlichste, für die Arbeit des Motors aber wichtigste Teil durch viele Mühe so ausgebildet, daß er nicht mehr störend auf die Weiterentwicklung des Ganzen wirken kann, wenschon an seiner Verbesserung noch lange gearbeitet werden wird.

Zur Zündung des Arbeitgemisches, das bei den Gasmotoren von Otto ursprünglich immer durch ein Zündflämmchen in Verbindung mit vermittelnden Kanälen im Schieber erfolgte, ist bei den Automotoren der elektrische Funkengeber besonders beliebt geworden, wie ihn schon Lenoir in freilich noch unvollkommener Form verwandte. Der Vorzug der elektrischen Zündung liegt außer in ihrer sicheren Wirkung in der leicht zu erreichenden luftdichten Einführung der Zündspitzen in das Innere des Zylinders. Die elektrischen Zündapparate selbst sind ebenfalls in zahlreichen Formen ausgeführt. Eine Erschwerung für den Betrieb bilden sie nicht mehr, nachdem sich in längerer Praxis zuverlässige und einfache Konstruktionen herausgebildet haben.

Die notwendige Kühlung des Zylinders hat unter den besonderen Verhältnissen der Automotoren zu in vieler Hinsicht von den ortfesten Motoren abweichenden Einrichtungen geführt. Bei diesen erfolgt die Kühlung immer durch Wasser, und diese Methode ist bei den größeren Automotoren auch unentbehrlich. Die große

Wärmeaufnahmefähigkeit des Wassers, sowohl dem Volumen wie dem Gewichte nach, hat eine so energische Wärmeabfuhr von den Zylinderwänden zur Folge, wie sie erfahrungsgemäß erforderlich ist. Nur kleinere Motoren, deren Zylinder große Oberflächen im Verhältnisse zu ihrem Hubvolumen haben, können sich, wenn die Oberfläche noch durch Rippen sehr vergrößert und beim Arbeiten starkem Luftzuge ausgesetzt ist, mit der viel weniger wirksamen Luftkühlung begnügen. Ist nun die Wasserkühlung schon bei ortfesten Motoren manchmal nicht gerade bequem, so erwächst bei den Automobilmotoren noch die Notwendigkeit, mit einer möglichst geringen Wassermenge auszukommen, deshalb das Wasser nach Verlassen des Zylindermantels schnell zu kühlen. Als Kühlmittel für das warme Wasser steht natürlich nur die Luft zur Verfügung, die man in Kühlapparaten mit großer Oberfläche, beispielweise in Rippenrohrsystemen wirken läßt. Mittelbar also erfolgt die Kühlung des Zylinders schließlich doch durch die Luft, nur daß man gewissermaßen seine Oberfläche durch Vermittlung des Wassers auf die Oberfläche des Wasserkühlers vergrößert hat.

Die Automobilmotoren arbeiten, wie wir nachher sehen werden, im Gegensatze zu der Lokomotiv-Dampfmaschine unter denselben Bedingungen wie die ortfesten Motoren, bedürfen also der selbsttätigen Regelung der Geschwindigkeit. Die Otto'schen Motoren ließen zu dem Ende den Zentrifugalregulator in der Weise wirken, daß bei Ueberschreiten der größten Geschwindigkeit das Gasventil geschlossen blieb, der Motor also periodisch mit aussetzenden Ladungen arbeitete. Aehnliche und andere Regelungsmethoden sind auch bei den Automobilmotoren zur Anwendung gekommen, besonders bewährt hat sich aber die einfache Drosselung der Saugluft, veranlaßt durch den Zentrifugalregulator, der mit steigender Geschwindigkeit den Luftweg mehr und mehr verengt. Der Zylinder füllt sich dabei mit mehr oder weniger verdünnter Ladung, die Kompression sinkt, ebenso der Druck während des Arbeitshubes, die heißen Gase expandieren auch weiter, und ihr Auspuff wird weniger stoßartig. Diese Regelung ist also ebenso einfach wie wirkungvoll, sie setzt natürlich, soll nicht eine Verschwendung von Brennstoff stattfinden, das Erhalten des günstigen Mischungsverhältnisses, also einen gutarbeitenden Karburator voraus.

Der Gasmotor und der ihm wesengleiche Benzinmotor hat nicht wie die Dampfmaschine, einen großen Energiesammler, kann deshalb nicht wie diese beliebig abgestellt und angelassen werden, seine Geschwindigkeit darf nur in viel engeren Grenzen verändert werden. Er behält, wie schon erwähnt, auch als Automobilmotor ganz den Charakter des ortfesten und muß in ganz anderer Weise mit der Wagenachse in Verbindung gebracht werden, als wir von der Dampflokomotive her gewöhnt sind. Er arbeitet dafür ganz selbsttätig, und diese Eigenschaft ist eben entscheidend für seine Anwendung bei Automobilen geworden. Nur durch sie ist der Führer in den Stand gesetzt, seine Aufmerksamkeit ungeteilt auf das Lenken des Fahrzeuges zu richten, und sie hat auch die Ausbildung ganz kleiner Fahrzeuge ermöglicht. Wenn somit der Automobilmotor im Ganzen den bekannten Aufbau zeigt — einfacher Zylinder, Schubstange, Kurbelwelle mit Schwungrad — so hat er sich doch den besonderen Anforderungen anpassen müssen, bei möglichst geringem Gewichte und Raumbedarf eine große Leistung zu entwickeln, und das hat er natürlich nur gekonnt durch bedeutende Steigerung seiner Geschwindigkeit, bei selbstverständlich größter Oekonomie in den Gewichten, namentlich des Gestelles. Während die ortfesten Gasmotoren selten über 200 Umdrehungen in der Minute zeigten, müssen auch größere Automobilmotoren mit 800—1000 Umdrehungen laufen, kleinere hat man oft auf 2000 gebracht. Das sind also 13—17 und 33 Umdrehungen in einer Sekunde! Es herrscht jetzt zwar die Neigung vor, diese teilweise stark übertriebenen Geschwindigkeiten herabzusetzen, ein Schnellläufer muß der Automobilmotor aber immer bleiben, wenn er nicht an Gewicht und Raum mehr beanspruchen will, als ihm zugestanden werden kann. Besonderer Nachdruck muß deshalb auf gutes Ausbalanzieren der ohnehin möglichst gering zu haltenden hin- und hergehenden Massen gelegt werden, damit nicht unzulässige Stöße eintreten, und der ganze Wagen in Schwingungen gerät. Aus diesem Grunde werden, außer bei den kleinsten Fahrzeugen, Doppelmotoren angewendet, mit entgegengesetzten Kurbelstellungen, sodaß die gleichen Massen der beiden Motoren sich in ihren Wirkungen soweit aufheben, wie der Abstand der Zylindermitten gestattet. Diese Gesichtspunkte und räumliche Verhältnisse haben auch zur Anwendung von mehr als zwei Motoren geführt, die nur das Gestell, Kühlapparat, Karburator und Regulator gemein-

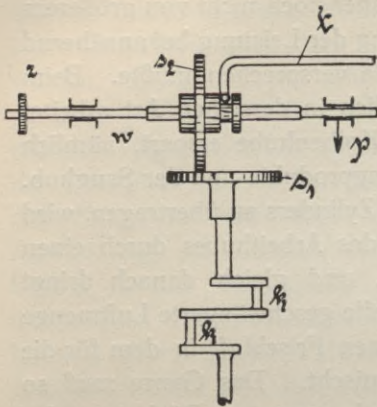
schaftlich haben. Fast immer sind die einzelnen Motoren nach dem Viertakt-Prinzip eingerichtet, der Zweitakt, bei dem auf je eine Kurbeldrehung ein Arbeitshub kommt, ist bisher noch nicht von größerem Erfolge gewesen, trotzdem die Steigerung der Leistung bei annähernd gleichen Abmessungen große Vorteile versprechen müßte. Beim Zweitaktmotor, der übrigens wesentlich in derselben Art arbeitet wie der Viertaktmotor, werden zwei Kolbenhube erspart, nämlich der für das Ausstoßen der Verbrennungprodukte und der Saughub. Statt dem Kolben das Entleeren des Zylinders zu übertragen, wird das verbrauchte Gemisch am Ende des Arbeitshubes durch einen kräftigen Luftstrahl „ausgewaschen“, und gleich danach dringt eine mit dem dampfförmigen Brennstoffe geschwängerte Luftmenge ein, die sich mit der eben eingeblasenen Frischluft in dem für die Ladung erforderlichen Verhältnisse mischt. Das Ganze muß so schnell vor sich gehen, daß bald nach begonnenem Rückgange des Kolbens alle Zulaßkanäle wieder geschlossen werden können, und die Kompressionperiode einsetzen kann. Offenbar erfordert dieses Spiel eine besondere Pumpe für die Frischluft und die Ladung, die allerdings nur für ganz geringen Druck bemessen zu sein braucht und deshalb auch durch die Einkapselung der Kurbel ersetzt werden kann, in die der Kolben des Arbeitzylinders beim Vorgange eindringt. Das Ganze stellt doch aber wieder eine weitere Verwicklung des Motors dar, und man hat deshalb bisher meist den Viertaktmotor vorgezogen, der bei entsprechend größeren Zylinderabmessungen doch die einfachere und zuverlässigere Form, übrigens auch dem Zweitaktmotor relativ insofern überlegen ist, als dieser zur Ausführung der die beiden Kolbenhube ersetzenden Vorgänge geringere Geschwindigkeit erforderlich macht, da diese Vorgänge sich vollständig vollziehen müssen, solange der Kolben sich in der Nähe seiner Außenstellung befindet.

Alle vorstehenden Betrachtungen beziehen sich auch auf den Spiritusmotor, für den aus bekannten Gründen lebhaft Stimmung gemacht wird, dessen Betriebskosten sich aber immer noch für einen erfolgreichen Wettbewerb zu hoch stellen.

*

Die Art nun, wie der dauernd mit gleichmäßiger Geschwindigkeit laufende Motor auf die Treibachse des Wagens wirkt, läßt sich grundsätzlich erläutern an der schematischen Figur 105. Darin bedeuten *kk* die Kurbeln des Motors, *s*₁ eine Scheibe an der

Motorwelle, s_2 eine senkrecht auf ihr stehende Scheibe, die auf der im Mittelteile kantigen Welle w durch die Stange t verschoben werden kann.



Figur 105.

Das linke Ende der Welle w möge ein Zahnrad z tragen, das etwa durch eine Kette auf die Wagenachse wirkt. Durch ein geeignetes Stellstück bei p können die Scheiben s_1 und s_2 fest aufeinander gedrückt werden, sie sind dann durch die Reibung an der Berührungstelle gekuppelt, die Kurbelwelle treibt die Kettenwelle w in bestimmtem Sinne mit bestimmter Geschwindigkeit an.

Stände die Scheibe s_2 gerade auf dem Mittelpunkte von s_1 ,

so würde sie offenbar gar keine Drehung erfahren, denn der Mittelpunkt hat keine Geschwindigkeit. Je weiter s_2 aber nach dem Rande von s_1 verschoben wird, in um so größeren Kreisen wälzt sie sich auf dieser ab, um so größere Geschwindigkeit muß ihr Umfang erhalten, und wenn, wie in der Figur angenommen, beide Scheiben denselben Durchmesser hätten, so würde, sobald die Ränder beider Scheiben sich berühren, die Welle w sich gerade so schnell drehen, wie die Kurbelwelle. Durch Verschieben der getriebenen Scheibe s_2 auf der treibenden s_1 vom Mittelpunkte nach dem Rande läßt sich also die Drehgeschwindigkeit der Kettenwelle allmählich von Null bis zu dem durch die gewählten Abmessungen der Scheiben möglichen Maximum steigern. Dasselbe gilt von der Verschiebung der getriebenen Scheibe über den Mittelpunkt der Triebwelle hinaus nach der anderen Seite, die Geschwindigkeitsverhältnisse sind bei den entsprechenden Stellungen der Scheiben zu einander dieselben, aber der Drehsinn der getriebenen Scheibe ist dem vorigen entgegengesetzt. Also, dreht sich die Kurbelwelle des Motors mit gleichmäßiger Geschwindigkeit immer in demselben Sinne, so ist die Drehgeschwindigkeit der Kettenwelle, damit der Wagenachse, um so größer, je weiter s_2 vom Mittelpunkte der s_1 absteht, und die Kettenwelle läuft vorwärts oder rückwärts, je nachdem s_2 links oder rechts vom Mittelpunkte der s_1 steht. Das bedeutet, bei unveränderter Drehge-

schwindigkeit des Motors kann man, nur durch Verstellen der getriebenen Scheibe, den Wagen mit größerer oder geringerer Geschwindigkeit, vorwärts oder rückwärts laufen lassen.

Von der Stellung der Scheiben zu einander ist auch die von der Kurbelwelle auf die Kettenwelle übertragene Drehkraft abhängig. Berühren sich die Räder der — hier als gleich angenommenen — Scheiben, so befindet sich die Kettenwelle, wie hinsichtlich der Geschwindigkeit, so auch mit Rücksicht auf die erhaltene Drehkraft in demselben Zustande, als wenn sie unmittelbar vom Motor angetrieben würde. Steht die getriebene Scheibe, wie in der Figur, halbwegs zwischen Rand und Mittelpunkt der Tribscheibe, so ist die Drehgeschwindigkeit der Kettenwelle halb so groß, wie die der Kurbelwelle, aber deren Drehkraft auf die erstere ist verdoppelt. Denn in jedem Augenblicke wirkt auf den konstanten Hebelarm der getriebenen Scheibe, dargestellt durch den Abstand ihrer Achse von dem jeweiligen Berührungspunkte, der nur halb so lange Hebelarm der Tribscheibe, gegeben durch den Abstand des Berührungspunktes von ihrem Mittelpunkte. Allgemein also wächst die von der Kurbelwelle auf die Kettenwelle übertragene Drehkraft umgekehrt wie die Geschwindigkeit der getriebenen Scheibe, nämlich umgekehrt wie deren Abstand vom Mittelpunkte der Tribscheibe.

Nun stellen wir uns vor, der Motor habe zunächst keinen Regulator, und die Scheibenränder berührten sich. Der Motor erhält dann immer seine normale Ladung, und der Wagen wird eine bestimmte Geschwindigkeit annehmen, die Geschwindigkeit nämlich, bei der unter den gegebenen Wegeverhältnissen der Widerstand des Wagens gerade der Drehkraft des Motors entspricht. Würde dieser Widerstand, etwa infolge einer Steigung der Straße, zunehmen, so müßte der Motor stehen bleiben, denn mehr als seine maximale Drehkraft, die vorher gerade hinreichte, den Widerstand des Wagens zu überwinden, kann er nicht ausüben. Er würde aber sofort weitergehen, wenn die getriebene Scheibe soweit vom Rande der Treibscheibe verschoben würde, daß die Kettenwelle eine angemessen vergrößerte Drehkraft erhielte. Dann wäre die Geschwindigkeit des Motors dieselbe geblieben, damit auch seine Leistung, denn er soll ja nach der Voraussetzung immer dieselbe Ladung erhalten, die Geschwindigkeit des Wagens aber wäre nach Maßgabe seines vermehrten Widerstandes gesunken.

Dächte man nun wieder den Motor mit einem Zentrifugalregulator versehen, diesen aber nicht auf die Ladung wirkend, sondern auf die Stellstange t , derart, daß diese die getriebene Scheibe vom Rande der Treibscheibe abrückte, sobald der Motor infolge zu großer Last anfinge, etwas langsamer zu gehen, so würde sich die Geschwindigkeit des Wagens den Wegeverhältnissen entsprechend selbsttätig regeln, der Motor aber immer dieselbe Geschwindigkeit und Leistung haben, wenigstens annähernd, da die Wirkungsweise des Zentrifugalregulators ein geringes Schwanken der Motorgeschwindigkeit bedingt. Der Wagenführer muß aber immer die Möglichkeit haben, seinerseits die Geschwindigkeit des Wagens zu beeinflussen, bis zum Stillstande. Das könnte geschehen durch ein von Hand bewegtes Stellzeug, das die Ladung des Motors ändert, etwa durch ein Drosselventil, wie oben erwähnt. Dann würde der Motor eine kleinere Drehkraft ausüben, infolge des unveränderten Zentrifugalregulators wäre aber die Geschwindigkeit des Motors erhalten, nur würde jener jetzt im Mittel kleinere Abstände der getriebenen Scheibe vom Zentrum der Treibscheibe einstellen, also geringere mittlere Geschwindigkeit des Wagens verursachen, ohne aber die Selbstregelung der Wagen- geschwindigkeit gemäß des Widerstandes aufzuheben. Nur wenn der Wagenführer eine so verdünnte Ladung des Motors einstellte, daß dieser damit nur gerade noch leer laufen könnte, dann würde der Zentrifugalregulator die getriebene Scheibe immer in der Mitte der Treibscheibe halten, der Wagen stände also still. Das ganze System aber könnte man sich noch endlich vervollständigt denken durch ein Stellzeug, das auf die Federbelastung des Zentrifugalregulators wirkt. Damit würde offenbar noch die Möglichkeit hergestellt werden, die Geschwindigkeit des Motors innerhalb der überhaupt zulässigen Grenzen zu regeln, im Uebrigen aber würden ganz dieselben Ueberlegungen wie vorher platzgreifen.

Die beschriebene Regelungweise des Wagens mit unabhängigem Motor — wie man diese Bauart wohl bezeichnen kann im Gegensatze zu den Lokomotiven im üblichen Sinne — ist nun gewiß eine ideale zu nennen, denn sie ermöglicht die beste Ausnutzung des Motors bei der für ihn geeignetsten Geschwindigkeit, sie macht selbsttätig die Wagengeschwindigkeit abhängig von seinem Widerstande, verhindert ein Stehenbleiben des Motors infolge zu großen Widerstandes und gestattet deshalb die Wahl eines

verhältnismäßig kleinen Motors ohne überflüssige Leistung. Diese selbsttätige Regelung gleicht der des Zugtieres, und nur der Elektromotor hat, und zwar in sich selbst, in mancher Hinsicht ähnlich günstige Eigenschaften. Tatsächlich wird sie aber nicht angewendet, denn ihre mechanische Durchbildung würde zu großen Schwierigkeiten begegnen, die hauptsächlich begründet sind in der Unmöglichkeit, einen einfachen und hier notwendig kleinen Centrifugalregulator für eine so ausgiebige Stellarbeit zu bauen (Motoren S. 195), eine mittelbare Einwirkung des Regulators auf die Verstellung der Scheiben, die grundsätzlich wohl durchführbar wäre, würde den ohnehin schon verwickelten Mechanismus noch schwerfälliger machen. Trotzdem ist das Durchdenken der beschriebenen Regelung nützlich, denn es erleichtert den Einblick in die eigentümlichen Betriebsverhältnisse aller Motorwagen überhaupt. In Wirklichkeit aber läßt man den Centrifugalregulator, wenn ein solcher überhaupt verwendet wird, die Motorladung beeinflussen, also beispielweise das Drosselventil im Saughube des Kolbens, und verstellt von Hand die Scheiben, es dem Wagenführer überlassend, die angemessene Geschwindigkeit des Wagens zu wählen. Das setzt aber auch einen großen Ueberschuß an Motorleistung bzw. an Drehkraft voraus, damit nicht bei einem stärkeren Widerstande der ganze Treibapparat versagt. Immerhin würde dabei noch das Uebersetzungsgetriebe nach Fig. 105, die stellbaren Ringscheiben, den großen Vorzug haben, einen allmählichen Untergang von einer Geschwindigkeit zur andern, wie auch den einfachsten Wechsel der Drehrichtung bzw. der Fahrrichtung zu ermöglichen. Leider aber hat dieses Reib-Getriebe seine günstigen Eigenschaften nur in rein kinematischer Hinsicht, nämlich nur soweit die Bewegungen in Betracht kommen, nicht aber mit Rücksicht auf die wirkenden Kräfte.

Die Uebertragung der Drehkraft vom Motor auf die Wagenachse vermittelt bei dem Getriebe die Reibung der Scheiben an der Berührungstelle. Rein geometrisch betrachtet würde die Berührung nur an einem Punkte stattfinden, wenn wie üblich die angetriebene Scheibe am Rande schwach gerundet ist, in Wirklichkeit ist die Berührungfläche eine kleine Fläche infolge der elastischen Nachgiebigkeit des Stoffes. Wie groß der Druck an der Berührungstelle sein muß, um die Kupplung der Scheiben ohne Gleiten herbeizuführen, läßt sich so genau berechnen, wie man überhaupt be-

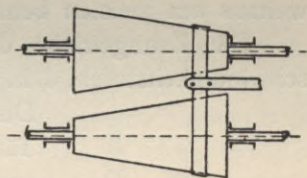
stimmte Werte der Reibungskoeffizienten zu Grunde legen kann. Diese Werte sind aber sehr schwankend je nach dem Zustande der Reibflächen und ihrer Stoffe, einige Tropfen Oel auf die vorher trockenen Reibflächen gebracht lassen den, hier möglichst groß zu wünschenden, Reibungskoeffizienten vielleicht auf die Hälfte und darunter sinken. Man muß deshalb mit einem gewissen unteren Werte rechnen und kann auch nicht durch Rauhen, wie es zuerst nahe zu liegen scheint, den Reibungswiderstand erhöhen, denn in kurzer Zeit würden sich die Reibflächen doch gegenseitig geglättet haben. Auch in der Wahl der Stoffe ist man sehr beschränkt. Des hohen Druckes wegen kann für die Treibscheibe im Allgemeinen nur Metall in Frage kommen, für die treibende Scheibe wird dagegen oft hartes Holz, Rohhaut oder dergl. gewählt, die durch einschließende metallene Seitenscheiben die nötige Festigkeit erhalten. Damit wird die Reibung etwas erhöht, der Sicherheit wegen wird man sie aber kaum höher als wie zu $\frac{1}{10}$ des Druckes an der Berührungstelle schätzen dürfen, der Druck wird also unter dieser Annahme etwa zehn mal so groß sein, wie der von der Treibscheibe zu übertragende Zug am Umfange der Scheibe. Dieser, die getriebene Scheibe mitnehmende Zug ist aber leicht zu finden. Geht man aus von der größten Leistung des Motors bei bestimmter Drehgeschwindigkeit, so ist auch, unter Berücksichtigung der gewählten Abmessungen der Scheiben, die Geschwindigkeit an der augenblicklichen Berührungstelle gegeben, und deren Produkt mit dem übertragenen Zuge muß numerisch gleich der Motorleistung sein. Um diesen Zug und damit den erforderlichen Druck der Scheiben tunlichst klein zu halten, wird man also zweckmäßig die Scheiben so groß wählen, wie unter den gegebenen Verhältnissen möglich ist. Im bestimmten Falle wird sich nun der Scheibendruck immer als sehr groß ergeben, was starke Beanspruchung der Teile auf Festigkeit, große Reibung in den Wellanlegern und erheblichen Energieverlust durch die damit unvermeidlich verbundene schädliche Lagerreibung zur Folge hat. So einfach deshalb das Reibgetriebe nach Figur 105 aussieht, so schwierig ist in Wirklichkeit seine konstruktive Behandlung, und wenn alle Umstände berücksichtigt werden, die seine Festigkeit, Dauer*) und Wirkungsgrad beeinflussen,

*) Die Dauer der Reibflächen wird wesentlich beeinflusst durch die nie vollständig rollende Bewegung der Scheiben aufeinander. Es treten dabei ähnliche Erscheinungen auf, wie bei der Rollmühle (Motoren S. 13).

so verliert es erheblich an Einfachheit, ohne doch in der Sicherheit der Uebertragung beispielweise die Zahngetriebe zu erreichen. Aus diesem Grunde ist es, wie im Maschinenbau überhaupt, so auch für Automobilen seltener in Anwendung, und seine breitere Behandlung hier hatte hauptsächlich den Wert, eine einfache Einsicht in die Aufgabe des Wechselgetriebes für Motorwagen überhaupt zu gewinnen.

Ein sicheres Wechselgetriebe, das eine stetige Aenderung der Geschwindigkeitsverhältnisse gestattet wie das betrachtete Reibgetriebe, gibt es überhaupt nicht, trotz zahlloser Bemühungen in dieser Richtung. Man ist immer wieder auf das Zahngetriebe zurückgekommen, das bei richtiger Form die sicherste Kupplung der Radwellen bietet, und hat sich begnügen müssen, mehrere Radpaare von verschiedenen Uebersetzungsverhältnissen anzuwenden, die freilich nur eine stufenweise Aenderung der Geschwindigkeit gestatten. Kommen geringere Kräfte in Frage, dann gibt allerdings

der Riementrieb mit konischen Trommeln (Fig. 106) einigen Ersatz für das Scheibengetriebe, denn durch Verstellen des Riemens läßt sich ersichtlich wieder eine stetige Geschwindigkeitsänderung herbeiführen, wenn auch nicht ein Wechsel der Drehrichtung, für die in anderer



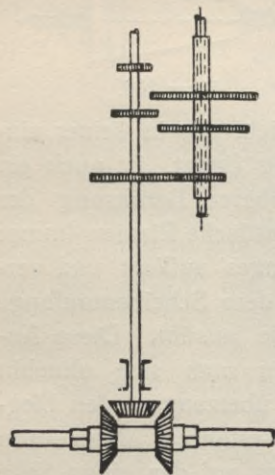
Figur 106.

Weise gesorgt werden muß. Der Riementrieb, der in seiner einfachsten Form so umfangreiche Anwendung findet, ist auch ein Reibgetriebe, hat aber dem mit unmittelbarer Berührung der Scheiben gegenüber den Vorzug, daß der elastische Riemen immer auf einer großen Fläche des Scheibenumfanges aufliegt und vermöge seiner steten Richtungsänderung auf dem Scheibenumfange immer erneuten Druck auf die Flächenteile ausübt. Diese Andeutung muß hier genügen, praktisch kann man sich ohnehin leicht von dem großen Reibungswiderstande überzeugen, den biegsame Elemente auf einem runden Körper erfahren. Man kann leicht feststellen, wie viel größer ein Gewicht auf der einen Seite einer um eine feste Walze gelegten Schnur sein muß, um das Gewicht auf der anderen Seite hochzuziehen, und bekannt ist, wie nur wenige Windungen einer Schnur um einen runden Stock erforderlich sind, um jedes Gleiten, auch bei noch so großer Zugkraft, zu verhindern. Ein guter Riementrieb muß nun aber möglichste Schonung des empfindlichen Riemens anstreben, ihn vor

Allem gleichmäßig beanspruchen, wenn er von genügender Dauer sein soll. In dieser Hinsicht wirkt der konische Riementrieb ungünstig. Denn ersichtlich muß sich der Riemen beim Anschmiegen an die konischen Trommeln abwechselnd nach den Seiten verschieden stark dehnen, und das ist seiner Haltbarkeit so abträglich, daß dieses Getriebe für erheblichere Kräfte nur im Notfalle verwendet wird, und auch da nur bei größerem Abstände der Trommeln, damit sich die einseitigen Dehnungen auf größere Längen verteilen. Ein Riemen ist außerdem überhaupt kein recht geeignetes Element für einen Motorwagen, sein Ersatz durch ein Drahtgewebe oder durch Drahtspiralen, die eine zeitlang von sich reden machten, ist auch nicht gelungen, eine Kette verlangt genau passende Zähne auf den Scheiben, ist also bei konischen Trommeln nicht anwendbar. Aus diesem Grunde ist das konische Getriebe für Motorwagen wohl versucht, aber nicht in Aufnahme gekommen, weitaus am meisten benutzt sind die Zahnradgetriebe.

Die Zahngetriebe der Automobilen haben meist drei Geschwindigkeitstufen, d. h. es sind drei Räderpaare von verschiedenem

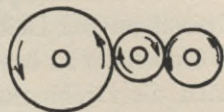
Durchmesser vorhanden, die abwechselnd in Tätigkeit treten. In Figur 107 möge die Welle rechts mit dem Motor, die links mit der Wagenachse gekuppelt sein. Durch Längsverschiebung der einen Welle kann man nun immer je eines der Räderpaare in Eingriff bringen und damit das Geschwindigkeitsverhältnis der Wellen ganz wie bei dem Reibgetriebe ändern, nur daß eben die allmählichen Uebergänge fehlen. Man kann die Räderpaare aber auch so anordnen, daß sie dauernd in Eingriff bleiben, muß dann aber wenigstens die Räder auf der einen Welle lose lassen und nach Bedarf immer nur das eine mit der Welle festkuppeln. Die



Figur 107.

erste Art läßt sich im Ganzen einfacher durchführen und ist deshalb jetzt die beliebtere, beiden natürlich fehlt aber die Eigenschaft des Dreh-Wechsels. Und diesen zu erreichen kann man auf der Wagenachse, oder auf der Kettenachse, wenn nach der Wagenachse noch ein Kettentrieb eingeschaltet ist, eine verschiebbare Hülse mit zwei gleichen Kegel-

zahnradern vorsehen, wie in der Figur angedeutet, und kann dann durch Einrücken des einen oder anderen in das zu ihnen passende Kegelrad an der verlängerten Triebwelle die Fahrtrichtung nach Belieben einstellen, nach beiden Richtungen auch dieselben Uebersetzungsverhältnisse verwenden. Das Rückwärtsfahren des Wagens hat indessen nur geringe Bedeutung und dient nur bei langsamen Stellungwechseln, es erfordert also selten mehr als eine Geschwindigkeitstufe. Diese ist nun einfacher zu erhalten durch Einschalten eines Mittelrades in ein auf den Wellen festes Radpaar (Figur 108), mit dem Erfolge, daß die Wellen, die bei unmittelbarem Eingriffe ihrer Zahnräder in umgekehrtem Sinne laufen würden, nunmehr dieselbe Drehrichtung haben,

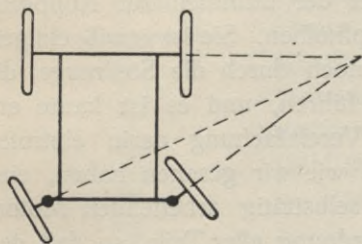


Figur 108.

dem Wagen also entgegengesetzte Fahrt geben. Diese Anordnung, die also drei Geschwindigkeitstufen nach vorwärts und nur eine für den Rückwärtsgang ergibt, ist die jetzt beliebteste, weil mit den einfachsten Elementen durchführbar. Um die Zahnräder vor Störungen zu schützen, sie recht leicht gehend zu machen und ihr Geräusch zu dämpfen, sind sie meist in ein gemeinschaftliches Gehäuse eingebaut, wo sie gleichmäßige reichliche Oelung erhalten.

Die vorstehend in großen Zügen betrachtete Uebersetzung vom Motor auf die Wagenachse kann ebenso als Nachteil wie als Vorzug betrachtet werden gegenüber der unmittelbaren Kupplung der Lokomotivachsen mit dem Dampfkolben. Sie ist gewiß einigermaßen verwickelt, besonders auch noch durch die Stellzeuge, die vom Führersitze zu den Getrieben führen, und es ist kaum anzunehmen, daß eine wesentliche Vereinfachung darin eintreten kann. Sie erlaubt aber andererseits, wie wir gesehen haben, eine vorteilhafte Ausnutzung des ganz selbsttätig arbeitenden Motors und gibt große Freiheit in der Anordnung aller Teile, so daß den Anforderungen der verschiedenen Wagenarten leicht genügt werden kann, und innerhalb der Arten selbst große Abweichungen herrschen. Es gibt wohl wenige Gebiete der Technik, in denen sich der Konstrukteur so frei bewegen kann, wie im Bau von Motorwagen, in denen so vielseitige Kenntnisse und Erfahrungen zur Geltung gebracht werden können, andererseits aber auch dem dilettierenden Jünger so viel Spielraum zu mehr phantistischer als fördernder Betätigung gelassen ist.

Eine festere Gestalt als der Triebmechanismus hat das Fahr-
gestell selbst angenommen, dessen Grundform bei den Auto-
mobilen im gebräuchlichen engeren Sinne ja auch gegeben ist als
ein im wesentlichen viereckiger Rahmen mit zwei Achsen, die
durch Federn mit ihm verbunden sind, und deren Räder bei Per-
sonenwagen selbst noch durch massive Gummireifen oder Luft-
reifen den sanften Gang befördern. Ganz verschieden von den
Wagen für Zugtiere ist aber bei den Automobilen die Verdrehung
des einen Räderpaares zum Lenken durchgeführt. Die Zugtiere
haben an der Deichsel bei Wendungen auch das Schrägstellen der
Vorderräder zu besorgen, und als einfachster Mechanismus dafür hat
sich die Drehbarkeit der ganzen Vorderachse ergeben, die durch
den Drehschemel mit dem Wagenkasten zusammenhängt. Ein
Nachteil dieser Einrichtung ist in allen Fällen die starke Aenderung
der Radstellung (vergl. Figur 97). Die Vorderachse nähert sich
beim Ausbiegen der Längsaxe des Wagens und verringert damit
dessen Stabilität, was beim Motorwagen schon bedenklich sein
würde. Der Drehschemel erfordert auch ziemlich viel Platz und er
hat hier infolge der wesentlich verschiedenen Bedingungen überhaupt
keine Berechtigung mehr. Statt dessen wird auch die Vorderachse
federnd aber sonst fest mit dem Gestelle verbunden, dagegen jedes
Vorderrad für sich drehbar eingerichtet, indem ihre Zapfen un-



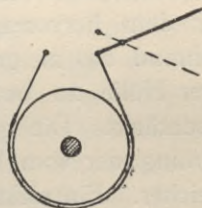
Figur 109.

mittelbar hinter der Radnabe um
senkrechte Bolzen drehbar sind
(Figur 109). Die Zapfen sind natür-
lich durch ein Gestänge so gek-
kuppelt, daß die Räder durch den-
selben Handgriff verdreht werden
und dabei immer die richtige
Stellung zu einander haben. Sie
dürfen nämlich, unähnlich der
Drehschemel-Lagerung, einander

nur parallel sein bei der Fahrt geradeaus. Beim Kurvenfahren
müssen aber wieder die Drehzapfen aller Räder in ihren Ver-
längerungen sich in einem Punkte schneiden, denn nur dann
rollen die Räder um den gemeinschaftlichen Mittelpunkt. Diese
Bedingung ist bei der Drehschemel-Lagerung nach Figur 97 von
selbst erfüllt, hier dagegen nur, wenn die Drehwinkel der Vorder-
räder etwas verschieden sind, wie aus Figur 109 zu erkennen ist.

Bei den Rädern der Hinterachse, die hier, da diese Achse die Treibachse ist, starr mit ihr gekuppelt sind, findet ohnehin in Kurven ein teilweises Gleiten statt. Die annähernd richtigen Stellwinkel der Vorderräder sind übrigens durch passende Wahl der Stellzeugeteile unschwer zu erreichen. Aus dem Vergleiche der Figuren 97 und 109 ergibt sich sofort die verschiedene Wirkung der beiden Lenksysteme: Die gesondert verstellbaren Vorderräder schwenken nahezu auf der Stelle, bilden also immer Stützpunkte im selben Abstände vom Wagengestelle, das außerdem infolge Wegfall des Drehschemels den Vorderraum zum Einbau anderer Teile freibehält.

Da beim Motorwagen die aufhaltende Kraft der Zugtiere fortfällt, so müssen sie mit wirksamen Bremsen versehen sein, und diesem Punkte ist aus Sicherheitsgründen sogar besondere Aufmerksamkeit zu schenken, sodaß vielfach mehrere unabhängige Bremssysteme zur Anwendung kommen. Der Gummibelag bezw. die Luftreifen der Personenwagen schließt die sonst üblichen, unmittelbar an die Radreifen gepreßten Bremsschuhe aus, an deren Stelle treten meist Bandbremsen, die auf besondere Scheiben der Treibachse wirken. Um eine solche Scheibe (Figur 110) ist ein kräftiges Stahlband gelegt, dessen eines Ende fest am Gestelle ist, während das andere durch einen Hebel nach Bedarf angespannt werden kann. Die Verhältnisse sind so gewählt, daß bei nicht angezogener Bremse das Bremsband in einigem Abstände von der Brems Scheibe bleibt. — Ein mehr oder weniger starkes Bremsen tritt übrigens auch ein, wenn man bei eingrücktem Getriebe den Motor nicht arbeiten, sondern umgekehrt vom Wagen drehen läßt.



Figur 110.

*

Mit den im Vorstehenden in ihren wesentlichen Eigenschaften betrachteten Elementen werden bekanntlich Wagen der verschiedensten Formen und Bestimmung ausgeführt, von der leichten Kalesche bis zum schweren Arbeitwagen, für den täglichen Gebrauch wie ausschließlich für Sportzwecke, für mäßige wie für möglichst große Geschwindigkeiten. Den Anforderungen ent-

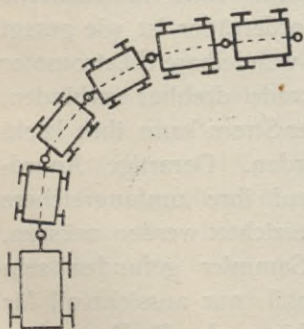
sprechend werden die Motorleistungen gewählt, die immer, verglichen mit der Zahl der unter ähnlichen Verhältnissen verwendeten Zugpferde, aus früher entwickelten Gründen verhältnismäßig groß erscheinen. So wird ein ganz leichter Kutschwagen kaum einen kleineren als dreipferdigen Motor erhalten, schwerere Arbeitswagen bedürfen je nach ihrer Schwere und ihrer Geschwindigkeit eines 6- bis 20pferdigen Motors, Rennwagen gehen noch weit darüber hinaus. Eine besondere Klasse bilden die Motor-Zweiräder, die als eine Verbindung des gewöhnlichen Fahrrades mit Fußantrieb und eines Motorwagens erscheinen, und, ohnehin auf möglichste Vereinfachung ihres Mechanismus angewiesen und die Rückwärtsbewegung ganz ausschließend, sich mit einer einfachen Riemenübersetzung begnügen und das Regeln der Geschwindigkeit in engeren Grenzen nur durch Drosselung des Motors bewirken.

Wenn vorläufig nur von Automobilen mit Wärmemotor gesprochen und die meisten Erörterungen auf sie bezogen wurde, so war der Grund dafür die noch geringe Bedeutung des Elektromotors auf diesem Gebiete. Es sind zwar schon viele Elektromobilen in Tätigkeit und sie zeichnen sich aus durch Einfachheit, Sauberkeit und richtiges Arbeiten, aber sie danken ihr Entstehen nur dem hervorragenden Eigenschaften des Elektromotors selbst, während das zu große Gewicht der elektrischen Sammler die mit ihrer Hülfe zu bewegenden Fuhrwerke auf günstige Verhältnisse beschränkt. Die ganze Frage beantwortet sich einfach durch Beachtung der vom Wagen mitgeschleppten Gewichte der Energiespeicher. Ein elektrischer Sammler zum Unterhalten einer Pferdestärke für eine Stunde wiegt kaum unter 40 kg, ein Benzinmotor braucht für dieselbe Stundenleistung etwa $\frac{1}{100}$ dieses Gewichtes an Brennstoff. Ihr zu großes Gewicht hat die elektrischen Sammler auch auf den Straßenbahnen nicht festen Fuß fassen lassen, trotzdem man z. Zt. ihrer ersten Benutzung im Großen gerade für Transportzwecke viel von ihnen erhoffte, und ihr tatsächlich großer Nutzen als Ausgleicher in elektrischen Zentralen damals noch wenig beachtet wurde. Hier sind in wenigen Jahren die Sammler zu unentbehrlichen Gliedern der Gleichstromnetze geworden. Wie nun die Sammler wieder aus den Straßenbahnwagen verschwanden und in die Bahnzentralen verlegt wurden, die durch den Fahrdrabt den Wagenmotoren den Strom zuführen, so hat man auch mit Erfolg versucht, das Elektromobil, unter Aufgabe seiner völligen

Selbständigkeit, für den Omnibusverkehr auf Landstraßen durch den Fahrdraht zu speisen. Es hat sich gezeigt, daß durch einen genügend langen Arm für die Kontaktrolle die nötige Beweglichkeit zum Ausweichen wohl zu erreichen ist. Wie sehr aber der Elektromotor an sich für den Wagenbetrieb geeignet ist, zeigt der Umstand, daß man sich zu dem Versuche entschloß, auf dem Wagen selbst eine Art elektrischer Zentrale einzurichten, bestehend aus Wärmemotor und Dynamomaschine, zum Antriebe der Elektromotoren an den Achsen, ein Gedanke, dem wir in der Heilmann-Lokomotive wieder begegnen werden. Die Einfachheit und Regelmäßigkeit des Elektromotors hat diesen Versuch wenigstens nicht als aussichtslos erscheinen lassen.

Noch in besonderer Weise könnte der Elektromotor auf den Bau der Automobilen einwirken, wenn es gelänge, der ihm entgegenstehenden Schwierigkeit besser als bisher zu begegnen. Er ermöglicht nämlich die Durchführung des Vorderradantriebes. Als Antriebsachse für die auf dem Wagengestelle aufgebauten Motoren ist nur die Hinterachse geeignet, denn die Uebertragung auf die beweglichen Vorderräder würde viel zu verwickelt ausfallen. Erwünscht aber würde der Antrieb der Vorderräder deshalb sein, weil sie bei der gewissermaßen schiebenden Tätigkeit der Hinterräder in Kurven einen Seitendruck erhalten, der infolge des teilweisen Gleitens ihrer Dauer abträglich ist und auch den Wirkungsgrad verringert. Sind aber die Vorderräder die für den Vortrieb wirksamen, so ziehen sie, ganz ähnlich wie die Zugtiere, den Wagen in der gewünschten Richtung. Diese Verhältnisse lassen sich an Hand der Fig. 109 leicht erkennen. Eine mechanische Uebertragung der Motorleistung auf die Vorderräder ist wie gesagt fast ausgeschlossen, der schmiegsame und wandelbare Elektromotor läßt sich aber mit dem einzelnen Lenkrade drehbar verbinden, sogar in das Rad selbst einbauen, denn der Strom kann ihm leicht durch biegsame Leitungen zugeführt werden. Derartige Anordnungen sind schon vielfach ausgeführt, auf ihre umfangreichere Benutzung wird freilich im Allgemeinen verzichtet werden müssen, bis der lang ersehnte leichte elektrische Sammler gefunden sein wird. Bis dahin erscheint das Elektromobil nur aussichtsvoll für Fuhrwerke zu kürzeren Fahrten im Stadtgebiete, also für Droschken und Omnibusse.

Bei allen bisher erwähnten Motorwagen war immer nur an den Einzelwagen gedacht, der als Kutsche oder Arbeitwagen Treibapparat und Lastaufnehmer in sich vereinigt. Die Erfolge der Motorwagen haben aber auch die alten Versuche zum Bau zweckmäßiger Straßenlokomotiven in neuer Form wieder aufleben lassen, und namentlich die Heeresverwaltungen haben von vornherein ein großes Interesse dafür gezeigt, um bei dem riesigen Bedarfe der modernen Heere an Zugtieren etwaigem Mangel möglichst vorzubeugen. Dient ein Motorwagen als Schlepper für angehängte Lastwagen, so gewinnt ein Umstand wesentliche Bedeutung, der bisher noch nicht betont zu werden brauchte und der eingehender erst bei Besprechung der Eisenbahnen behandelt werden soll. Der Vortrieb aller Motorwagen setzt natürlich genügende Reibung der Treibräder am Boden voraus, denn jedes Gleiten der Räder ist der Vorwärtsbewegung abträglich und bedeutet gleichzeitig einen Leistungsverlust. Bei den Einzelwagen ist erfahrungsgemäß die Reibung am Boden groß genug, namentlich bei den schmiegsamen Rädern, um den Vortrieb auch bei den üblichen Steigungen zu sichern, aber die Bildung ganzer Schleppzüge begegnet viel größeren Schwierigkeiten, als bei den Eisenbahnen, weil bei dem ungleichmäßigeren Zustande der Straßen der Widerstand der Fuhrwerke in weiteren Grenzen schwankt und sich an einzelnen Stellen des Zuges gelegentlich bedeutend steigert. Zu dieser Unsicherheit kommt der Mangel einer festen Führung der angehängten Wagen in Kurven, die bei den Eisenbahnen durch die Schienen gewährleistet ist. Man denke sich an den vorgespannten Motor-



Figur 111.

wagen eine Anzahl Lastwagen gehängt (Fig. 111) und den Zug eine Kurve bildend. Der Zug im Ganzen verhält sich dann ähnlich einer Schnur, die im Bogen auf den Tisch gelegt in der Richtung des einen Endes gezogen wird und dabei eine immer flachere Krümmung erhält. Die Anhängewagen werden also mehr und mehr an die innere Seite der Straßenbiegung gedrängt, und kleinere Kurven können

auch bei aufmerksamer Steuerung der einzelnen Wagen nicht mehr sicher genommen werden.

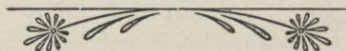
Diesen beiden Schwierigkeiten, der unzureichenden Adhäsion des vorderen Zugwagens am Boden und dem Bestreben des Zuges, die Kurve zu verflachen, will der französische Oberst Renard*), der sich früher schon auf dem Gebiete der Luftschiffahrt einen guten Namen gemacht hat, begegnen durch eine solche Kupplung der Wagen miteinander, daß die Motorleistung vom Vorderwagen über den ganzen Zug verteilt wird, jeder Wagen also selbst zu einem Motorwagen wird. Zu dem Ende haben alle Wagen in ihrer Längsrichtung eine Welle, die mit der vorhergehenden und folgenden durch ein sogenanntes Universalgelenk gekuppelt ist, sodaß die Drehung der vorderen, vom Motor angetriebenen Welle sich auf den ganzen Wellenstrang fortpflanzt. Die Drehung der Wellen wird dann durch Zahnräder auf die Achsen der einzelnen Wagen übertragen. Man sieht leicht ein, daß in dieser Weise, wo die Wagen nicht mehr auf die von vorn kommende Zugkraft angewiesen sind, sondern selbst ihren Vorschub bewirken, das Gewicht des ganzen Zuges für die Adhäsion am Boden nutzbar gemacht wird, und die Neigung des Zuges, sich bei Kurven in der Richtung des andern Wagens zu strecken, aufgehoben wird. Das System Renard ist übrigens nicht mehr bloßes Projekt geblieben, sondern durch praktische Ausführungen erprobt. Es wird angegeben, daß ein Motorwagen von etwa 50 Pferd mit fünf schweren Anhängewagen auf wagrechter Chaussee eine Geschwindigkeit von 60 km in der Stunde erreicht habe.

*

Bei der Jugend der Motorwagen ist nicht zu verwundern, daß ihr Wert sehr verschiedener Schätzung begegnet. Diese Jugendllichkeit zeigt sich ja manchmal in wenig liebenswürdiger Weise, denn bei dem besonderen Interesse, das der Sport an den Selbstfahrern genommen hat, ist das Streben nach recht großer Geschwindigkeit vorherrschend und nicht gerade förderlich für die Ruhe und Sicherheit der Straßen. In zu ausschließlicher Berücksichtigung dieser Erscheinungsform ist die Ansicht ausgesprochen, man werde den Automobilen mit der Zeit besondere Straßen oder Straßenstreifen anweisen, die ausschließlich ihnen vorbehalten

*) Inzwischen verstorben.

bleiben. Das würde dann notwendig zu einer bestimmten Fahrordnung führen müssen, und bei vorgeschriebener Strecke und Folge würde sich die Fahrbahn in einen Schienenweg verwandeln, die frei beweglichen Selbstfahrer würden dahin zurückkehren, woher sie gekommen, zur Eisenbahn. — Diese Ansicht wird berechtigten Zweifeln begegnen. Der Entwicklungsgang, um gleich den letzten Punkt aufzufassen, ist eigentlich umgekehrt gewesen und beweist auch nichts. Denn auf's Ganze hin angesehen zeigt sich im Automobilwesen, unbeschadet einigen Unwesens, doch das berechtigte Streben, bei freibeweglichen Fuhrwerken, die trotz aller Schienenwege unentbehrlich geblieben sind und sein werden, die Zugtiere durch unbelebte Motoren zu ersetzen. Und da in dieser Richtung in kurzer Zeit doch erhebliche Fortschritte gemacht sind, so ist an dem Erfolge der Selbstfahrer nicht zu zweifeln, soviel Wandlungen und namentlich Vereinfachungen sie auch noch erfahren müssen, um die alten Fuhrwerke zu verdrängen, oder sie wenigstens auf den Luxusgebrauch zu beschränken.



Schienenfuhrwerke.

I.

Die Entwicklung des Eisenbahnwesens hebt mit dem Oktober 1829 an. In diesen denkwürdigen Tagen fanden auf der neuen Liverpool-Manchester-Bahn vergleichende Versuche mit Lokomotiven statt, die verschiedene Bewerber gestellt hatten, und die Lokomotive von Georg Stephenson trug den Sieg davon, entschied mit dem Siege nicht nur endgültig die Frage des Zugsystems überhaupt zu Gunsten der Lokomotive, sondern gab für diese auch den Typus an, den sie bis in unsre Tage behalten hat. Noch mehr, die Prüfungsergebnisse auf der Strecke bei Rainhill wurden vom englischen Volke gleich in ihrer ganzen Bedeutung erkannt, ein seltener Fall in der Geschichte der Erfindungen und nur erklärlich durch das Jahrzehnte lange Warten auf das Beförderungsmittel, das seit der Vollendung der Dampfmaschine durch James Watt sich vorbereitet hatte, und dessen Entwicklung sich durch einen, jetzt fast sonderbar erscheinenden Umstand verzögert hatte. Dieses Hemmnis bestand in dem lange gehegten Glauben der ungenügenden Adhäsion der Lokomotivräder an glatten Schienen.

Schienenbahnen selbst waren seit Langem bekannt. Je glatter die Bahn, um so geringer der Widerstand der Räder, und je schmaler die Unterlagen für diese, um so ökonomischer lassen sich die Straßen herstellen. Nach diesem Gesichtspunkte verfahren schon die alten Römer, als sie in ihre Straßenkörper Fliesenstreifen von mäßiger Breite als Spuren für die Räder einließen. Wie nahe es liegt, Holzbohlen als glatte und tragfähige Unterlage für Fuhrwerke zu benutzen, lehrt jeder Tag, und es bedarf nur noch des Anstoßes, das Abweichen der Räder von ihrer Bahn zu verhindern und somit das Lenken des Fahrzeuges zu ersparen, um zur Schiene zu gelangen, als deren erste Form wohl die schmale Bohle mit Seitenleisten angesehen werden kann. Die Schienenbahnen sollen

zuerst, schon vor mehreren hundert Jahren, in Bergwerken vorgekommen sein, was aus den besonderen Verhältnissen der Gruben erklärlich genug erscheint. Entscheidend für den Sieg der Schiene sind die beiden Umstände gewesen, geringer Widerstand und sicheres Leiten der Fuhrwerke, das ebenso den Betrieb erleichtert und die größte Geschwindigkeit zuläßt, wie die geringste Breite der Fahrbahnen, also beste Oekonomie der Herstellung ermöglicht. Es ist nicht schwer, sich von der Entwicklung der Schiene bis zum Aufkommen der Dampfeisenbahnen eine Vorstellung zu machen. Die Holzbahnen werden zur Erhöhung ihrer Dauer zunächst mit Bandeisen beschlagen sein, die auch schon frühzeitig entstandenen Räder mit Flanschen machten die Seitenleisten entbehrlich, deren Aufgabe eben von den Flanschen übernommen wurde, und der dann verbleibende schmale, eisenbeschlagene Holzbalken wurde weiter zu gunsten der Dauerhaftigkeit durch kürzere gußeiserne Schienenstücke ersetzt. Diese, der Ersparnis wegen als fischbauchförmige Träger ausgeführten Schienen sind vor Stephenson vielfach in Gebrauch gewesen, die Gießereitechnik war der Walztechnik noch wesentlich voraus. Mit den Dampfeisenbahnen mußte die Walzeisenschiene in den Vordergrund treten, weil sie ungleich zuverlässiger ist und viel größere Längen der einzelnen Stücke zuläßt, auch sicherer vermittelt besonderer Halter, den Schienenstühlen, auf den hölzernen Querschwellen zu befestigen war. Zugleich bot diese Form eine günstige Verwendung des Eisens hinsichtlich der Festigkeit, da das Material vornehmlich auf die beim Biegen am meisten beanspruchten Enden des Querschnittes verlegt war. Die jetzt gebräuchliche, in Deutschland nach dem Franzosen Vignoles benannte Schiene, im Querschnitte aus breitem Fuße, dünnem Stege und wulstigem Kopfe bestehende Schiene, wurde zuerst von dem Amerikaner Stevens gerade zur Zeit von Stephenson's Triumphen angewendet.

Zu Anfang des 19. Jahrhunderts waren Schienenwege von oft beträchtlicher Länge schon in großem Umfange im Betriebe, namentlich zum Transport von Kohlen, deren die entstehende Großindustrie dringend bedurfte. Als Zugmittel dienten Pferde, die lange Reihen von Wagen schleppten. Diese Pferdebahnen waren schon eine bedeutende Errungenschaft, eine Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit konnte nicht erwartet werden, alles drängte auf den Betrieb mit Dampfmaschinen hin. Dampffuhrwerke auf Straßen waren,

wie wir gesehen haben, schon seit längerer Zeit in teilweise ganz befriedigendem Gebrauche, die Uebertragung auf den Schienenweg hätte, so sollte man meinen, sehr nahe liegen müssen. Immer aber stand das Bedenken im Wege, auf glatten Schienen könne die Zugkraft des vorgespannten Dampfzuges nur gering sein, und deshalb sei das bei Straßen-Dampfwagen längst bekannte Prinzip, die Dampfmaschine unmittelbar zum Drehen der Räder zu benutzen, für die Schienenwege nicht anwendbar.

Die Adhäsion des Rades auf seiner Unterlage ist abhängig von der gleitenden Reibung und der Kraft, die das Rad auf die Unterlage preßt. Die Kraft ist das vom Rade getragene Gewicht, das durch die Festigkeit des Rades, der Achse und der Unterlage beschränkt ist. Denkt man sich die Radachse festgestellt, so gehört je nach den Umständen ein bestimmter Zug längs der Fahrbahn dazu, das Rad über die Unterlage gleiten zu machen, und diesen Zug vermag umgekehrt das Rad auszuüben, wenn es in entgegengesetzter Richtung von einem Motor gedreht vorwärts rollt. Darüber hinaus bleibt auch der stärkste Motor wirkungslos. Es schien nun lange unmöglich, dem Rade auf den glatten Schienen unter Anwendung der zulässigen Belastung eine solche Adhäsion zu geben, wie der durch ökonomische Rücksichten bestimmten Last des angehängten Zuges entsprach, und man hielt besondere Mittel für nötig, die Adhäsion über die durch die bloße gleitende Reibung erzeugte zu erhöhen. Als nächstes Mittel bot sich die Verzahnung der Schienen, oder die Anwendung einer besonderen Zahnschiene, oder auch eines kettenartigen Gebildes zwischen den Schienen, damit die Lastwagen ihrerseits auf der bewährten glatten Bahn rollen könnten, ein System, das später bei steilen Bergbahnen wieder in Aufnahme gekommen ist. Wenigstens aber schien eine wellenartige Form der Schienen notwendig, also eine sanftere Verzahnung, wenn man nicht andere Mittel anwenden wollte, so den Seilzug mittelst ortsfester Maschinen, oder ganz abenteuerliche, wie Stoßstangen, die von der Lokomotive abwechselnd gegen den Boden gestemmt werden und wieder angeholt werden sollten. Die Verzahnung erwies sich dabei immer noch als das aussichtvollste Mittel, und Grubenlokomotiven auf Zahnschienen wurden in den Jahren 1815—1818 auch von der Königlichen Eisengießerei in Berlin geliefert. Der erste aber, der die Ausführung einer glattschienenigen Lokomotivbahn wagte, war der Engländer Richard Trevethick, ein

genialer Techniker, der durch Watt's Schule gegangen war, dessen Ideenreichtum und Unternehmungslust aber nicht durch genügende Ausdauer unterstützt zu sein scheinen. Nichtsdestoweniger gebührt dem Weitblickenden, auch wohl durch die Verhältnisse wenig begünstigten Manne ein ehrenvoller Platz in die Geschichte der Eisenbahnen, denn wenn auch seine beiden 1804 und 1808 gebauten glattschienigen kurzen Lokomotivbahnen keinen nachhaltigen Erfolg hatten und für die Möglichkeit des Systems überhaupt, nach der Auffassung des Erbauers selbst, keinen entscheidenden Beweis brachten, so hinterließ er dem glücklicheren Stephenson doch einzelne Elemente, die in dessen Hand zu den wichtigsten Grundlagen der Lokomotiven wurden.

Trevethik hatte bei seinen Studien und Versuchen erkannt, daß gegenüber den Anforderungen an Einfachheit und Manövrierfähigkeit die Kondensation-Dampfmaschinen für Lokomotiven sich nicht eignen, daß allein die Hochdruckmaschinen den eigentlichen Betriebsbedingungen der Eisenbahn genügen können. Die Schwierigkeiten der Hochdruckmaschine lagen damals im Dampfkessel, der aus Gründen der Festigkeit nicht nach dem Muster der Niederdruckkessel gebaut werden konnte. Es mußten hauptsächlich zylindrische Formen zur Anwendung kommen, denen aber schwer die nötige Heizfläche bei geringem Raumbedarfe zu geben war. Dieses Hemmnis hat Trevethik auch nicht zu überwinden vermocht, seine Lokomotiven scheinen sich deshalb immer als zu schwach erwiesen zu haben. Dagegen hat er in der richtigen Erkenntnis, daß auch die Feuerung nicht den Platz beanspruchen dürfe, den sie bei ortfesten Maschinen erhalten kann, und als Ersatz für den ohnehin nicht in genügender Höhe anwendbaren Schornstein die lebhaftere Verbrennung auf dem Roste der Lokomotive ermöglicht durch Einführung des Blasrohres, jenes wenig beachteten, aber äußerst wichtigen Teiles auch der heutigen Lokomotiven. Besondere Gebläse zur Erzeugung des hinreichenden Zuges in der Feuerung hatten sich zwar schon bei den früher gebauten Straßendampfwagen als nötig erwiesen, das Blasrohr löste aber die Aufgabe ohne weitere Verwicklung der Maschine, und wir werden später sehen, wie sich gerade dieses einfache Mittel den Betriebsbedingungen der Lokomotive vorzüglich anpaßt. Trevethik hat endlich als Vorkämpfer der glatten Schiene seine besondere Aufmerksamkeit der Adhäsion der Lokomotivräder zu-

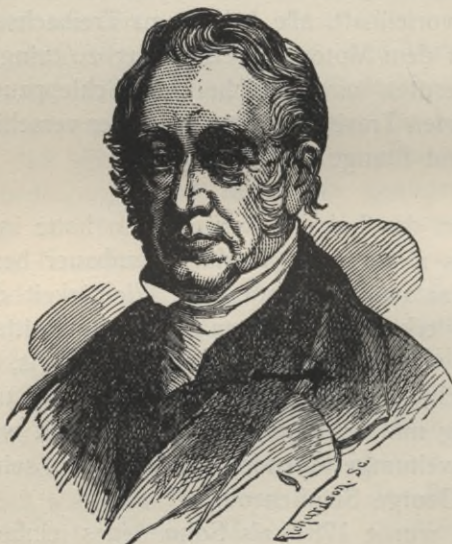
gewendet und dabei die Kupplung der Räder erfunden, zu dem Zwecke, das ganze Gewicht der Lokomotive für diese Adhäsion nutzbar zu machen. Der eine bedingende Faktor für die Adhäsion ist, wie wir sehen, das vom Rade getragene Gewicht. Das ganze Gewicht eines Fuhrwerkes verteilt sich auf die Räder, und sowohl für Straßenfuhrwerke wie für Schienenfuhrwerke ist annähernd gleichmäßige Verteilung wünschenswert, um einzelne Räder und Achsen nicht zu schwer zu belasten, ihr Einsinken in die Unterlage einzuschränken, beziehungsweise den Schienenstrang nicht an einzelnen Punkten zu sehr zu beanspruchen. Um nun einem ziehenden Wagen die notwendige Adhäsion zu geben, die man nicht durch übermäßigen Druck einzelner Räder herstellen darf, ist es offenbar vorteilhaft, alle Achsen zu Treibachsen zu machen, sie also alle mit dem Motor in Verbindung zu bringen. Ähnliche Gesichtspunkte lernten wir schon bei dem Schleppluge von Renard kennen, sie führten Trevethik dazu, die Räder verschiedener Achsen durch Kurbel und Stange zu kuppeln.

*

Das Problem der Lokomotiv-Eisenbahn hatte im Anfange des 19. Jahrhunderts nicht nur viele Maschinenbauer beschäftigt, auch weitblickende Staatsmänner hatten die Wichtigkeit des wenigstens in den Anfängen erkennbaren neuen Beförderungsmittels eingesehen, und namentlich war der Amerikaner John Stevens, der Vater des Erfinders der Schiene mit breitem Fuße, in Wort und Schrift für seine Ausbildung und Einführung tätig. Die Zeit war reif für die Aufnahme des weltumgestaltenden Gebildes, und sein glücklichster Meister wurde George Stephenson.

Stephenson wurde 1781 als Sohn eines einfachen Arbeiters geboren und begann seine Laufbahn als Maschinenwärter in Gruben seiner Heimat. Der damals mächtig aufstrebende Maschinenbau gab jungen Talenten freien Raum zu einer wenig schulmäßigen, aber um so fruchtbareren Entwicklung, und es wurde Stephenson möglich, bald die ersten Stufen seines Aufstieges zu erklimmen. Schon in jungen Jahren galt er als tüchtiger Mechaniker, der sich mit Glück auf den verschiedensten Gebieten der Technik versuchte. Besonders bekannt machte er sich in seiner engeren Heimat durch die Erfindung einer Sicherheitlampe für Gruben, fast zur selben Zeit, als die von Davy entstand, die mit der seinen dasselbe physikalische Prinzip gemein hatte, lange Zeit aber als die weniger

zuverlässige angesehen wurde. Wie seinem älteren Landsmanne James Watt war Stephenson auch eine Vielseitigkeit eigen, die das Merkmal aller Erfinder ist. Unähnlich dem, freilich weitaus genialeren Watt ist an Stephenson aber gleichzeitig eine geschäftliche Nüchternheit und praktische Tatkraft bemerkbar, die ihn fast stetig aufwärts geführt hat, ihn auch frühzeitig sich auf das besondere Gebiet des Eisenbahn-Ingenieurs beschränken ließ. Schon im Jahre 1814 baute er für ein Kohlenwerk seine erste Lokomotive, der bald weitere folgten, die wichtigsten Vorarbeiten zu seinem entscheidenden Werke konnte er aber seit 1823 als Ingenieur der Stokton-Darlington-Bahn machen, die ursprünglich als Pferde-



George Stephenson.

bahn für den Kohlentransport geplant, durch Stephenson's Hartnäckigkeit aber bald zu einer Lokomotivbahn wurde, zunächst nur für den Güterverkehr, später auch für Personenbeförderung. Dieser Bahnbau war auch dadurch bemerkenswert, daß auf Stephenson's Rat an Stelle der immer noch vorherrschenden gußeisernen Schiene die schmiedeeiserne zur vollen Geltung kam.

Als schon rühmlich bekannter Eisenbahnmann, der in allen Zweigen des Bahnbau's Proben seines Talentes gegeben hatte, kam Stephenson als leitender Ingenieur an die eben begonnene Bahn

von Manchester nach Liverpool, für die er alle Einzelheiten des Bahnkörpers entwarf und ausführte, ohne schon sicher zu sein, daß ihr Betrieb mit Lokomotiven erfolgen würde. Denn in der Direktion gab es noch immer Stimmen für den Gebrauch der Pferde, und auch der Seilzug mit stationären Maschinen und andere Projekte fanden noch Fürsprecher. Der Beharrlichkeit Stephenson's gelang jedoch, den Lokomotiv-Betrieb zur Annahme zu bringen, und in der Form eines Preisausschreibens wurde der Anstoß zu vergleichenden Versuchen mit Lokomotiven verschiedener Herkunft gegeben, aus denen die Stephenson'sche „Rocket“ siegreich hervorging.

Die Bedingungen, denen die zum Wettbewerb gelangenden Lokomotiven genügen sollten, waren nach jetzigen Begriffen hinsichtlich Geschwindigkeit und Zugkraft natürlich sehr bescheiden, trotzdem stellten sich nur vier Lokomotiven zur Prüfung, darunter eine von dem schwedischen Ingenieur Ericsson, der später in Amerika zu hohem Ansehen gelangte und weiteren Kreisen durch seinen „Monitor“, das Drehturm-Panzerschiff, bekannt wurde. Die Formen der vier

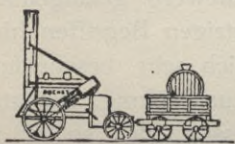
Lokomotiven waren sehr verschieden, und auch die „Rocket“ (Figur 112) erscheint jetzt nur wie ein größeres Modell, aber in ihrem ganzen Aufbau wie in den Einzelheiten brachte sie den Typus der Lokomotive, der seitdem nur ver-



Figur 112.

größert und verbessert für alle Nachfolgerinnen mustergiltig geblieben ist. Den Sieg der „Rocket“ entschied der vielrohrige Dampfkessel, der kurz vorher von Booth angegeben war, und in dem Stephenson das für Lokomotiven geeignetste Mittel erkannt hatte, auf dem notwendig sehr beschränkten Raume die genügende Dampfmenge zu erzeugen.

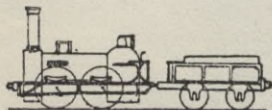
Zur Würdigung von Stephenson's Leistungen genügt diese eine Tatsache, daß er mit glücklichem Griff die herrschend gewordene Vorbild schuf und nicht nur dem Lokomotivbau die Wege wies, sondern für die Ausgestaltung des ganzen Eisenbahnwesens bestimmend wurde. In ihm vereinigten sich nach mühevoller, stetiger Arbeit eines Menschenalters die Kenntnisse und Erfahrungen, die von ihm und vielen anderen in dem Bestreben gewonnen waren, die Dampfmaschine für die schnelle Bewegung großer Massen nutzbar zu machen, und vielleicht gerade weil er nicht zu den eigentlich großen Erfindern gehörte, die ihre ganze Kraft an die



„Rakete“
Lokomotive Stephenson, 1829.



„Komet“
von Stephenson, 1832.



1834.



1897.

Figur 113.

Entwicklung gelangte, bilden die Brüder Werner, Wilhelm und Friedrich Siemens eine kaum wiederkehrende Ausnahme. Alles überwindender Fleiß, Beharrlichkeit und glückliches Erfassen des günstigen Augenblicks, das Talent mit Charakter gepaart, haben Stephenson zu einem der erfolgreichsten Techniker aller Zeiten

Bewältigung einiger bestimmter Aufgaben setzen, sondern alles Vorhandene mit sicherem Takte in zweckdienlicher Ausgestaltung zur Erreichung des klar erkannten Zieles benutzte, konnte er der Vater des modernen Eisenbahnwesens werden, der er mit Recht genannt wird. Die Namen Watt und Stephenson bezeichnen die beiden Richtungen der schöpferischen technischen Tätigkeit, die zum Anbahnen großer Fortschritte zusammenwirken müssen und die selten in einer Person vereint getroffen werden. In dieser Vereinigung, die gleichzeitig in mehreren Gliedern derselben Familie zur Ent-

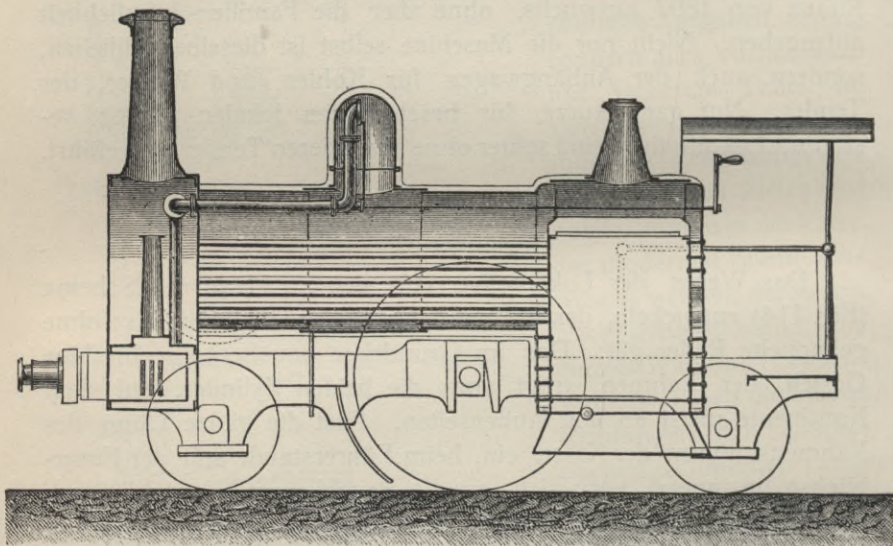
gemacht, und wie um das anziehende Bild des Mannes harmonisch abzurunden, hat ihm das Schicksal erlaubt, seinen Lebensabend — er starb 1848 — mit seinen *landwirtschaftlichen* Liebhabereien zu beschließen.

Was aus der Lokomotive wurde, und in welchem Maße die alte „Rocket“ vorbildlich wirkte, läßt sich sehr anschaulich an den vier Formen erkennen, die eine englische Zeitschrift vor einigen Jahren mitteilte (Fig. 113). Man sieht, wie schon im Jahre 1832 die Lokomotive mit gekuppelten Rädern und vorn liegenden Zylindern versehen war, und wie der Zwerg von 1829 allmählich in den Riesen von 1897 auswuchs, ohne aber die Familien-Aehnlichkeit aufzugeben. Nicht nur die Maschine selbst ist dieselbe geblieben, sondern auch der Anhängwagen für Kohlen und Wasser, der Tender. Nur ganz kurze, für beschränkten lokalen Dienst bestimmte Lokomotiven sind später ohne besonderen Tender ausgeführt.

II.

Das Wesen der Lokomotive läßt sich an Hand des Schema (Fig. 114) entwickeln, das für eine ältere Schnellzuglokomotive ohne gekuppelte Räder gilt. Das im Grundrisse annähernd rechteckige Gestell, der Rahmen, trägt vorn die beiden Zylinder, auf dem Kontinente meist an den Außenseiten. Fast die ganze Länge des Rahmens nimmt der Kessel ein, beim Führerstande mit der Feuerbüchse beginnend, vorn sich an die Rauchkammer anschließend. Die doppelwandige Feuerbüchse nimmt den Rost auf, die Feuerung ist also ganz von wasserberührten Kesselteilen umgeben, die an der Stirnseite nur durch die kleine Feuertür unterbrochen sind. Die eckige Form der Feuerbüchse widerspricht eigentlich dem Grundsatz, für Dampfkessel mit hohem Drucke (bei Lokomotiven zwischen 10 und 20 Atmosphären) nur Formen von an sich großer Festigkeit, also besonders zylindrische zu verwenden. Die räumlichen Verhältnisse der Lokomotive haben aber die Abweichung nahe gelegt und die Erfahrung hat sie gebilligt, für die nötige Festigkeit und Dauer bürgt aber die allseitige Verbindung der Außen- und Innenwände mit einander durch sogenannte Stehbolzen. Die Neigung der flachen Wände zum Ausbeulen unter dem Dampfdrucke nach außen und nach innen wird durch die verbindenden Bolzen aufgehoben, die unvermeidlichen Verzerrungen

der Form infolge der Einwirkung des Druckes und der Hitze werden durch bestes und genügend nachgiebiges Material, meist Kupfer, unschädlich gemacht. Von der Feuerbüchse nach der Stirnseite des zylindrischen Kesselteiles streicht ein Bündel Röhren von etwa 5 cm Durchmesser, die wenigstens $\frac{9}{10}$ der gesamten Kesselheizfläche bilden, und deren Zahl sich nach dieser bestimmt. Da die Heizfläche der normalen Lokomotive je nach ihrer Größe zwischen 100 und 200 qm beträgt, so ergibt sich immer eine verhältnismäßig sehr große Röhrenzahl. Durch diese engen Röhren wird aber die Masse der vom Roste aufsteigenden Heizgase in



Figur 114.

viele dünne Fäden zerteilt, sodaß trotz der schnellen Bewegung durch die Röhren die Gasteilchen reichlich Gelegenheit haben, ihre Wärme an die Heizfläche abzugeben.

Die Verbrennung der Kohlen erfolgt in verhältnismäßig sehr hoher Schicht, wodurch einerseits die Bedienung erleichtert wird, da bei jeder Beschickung immer viel Kohlen aufgeworfen werden können, andererseits die Verbrennungsluft ohne stete Nachhülfe durch Schüren sicher in Berührung mit den Kohlen gebracht wird. Die bei ortfesten Kesseln übliche niedrige Schicht würde unter dem Rütteln der Maschine nicht die ihr notwendige gleichmäßige Verteilung behalten. Die hohe Kohlschicht bietet aber auch der

durchziehenden Luft größeren Widerstand, diese muß zudem die Schicht schnell durchheilen, damit die unten gebildete Kohlensäure sich nicht in Kohlenoxyd verwandelt (Motoren S. 231), ein besonders lebhafter Zug ist also nicht nur eine aus der hohen Brennschicht folgende Bedingung, sondern auch durch die Notwendigkeit geboten, auf dem verhältnismäßig kleinen Roste viel zu verbrennen. Der durch den niedrigen Schornstein ermöglichte Zug ist aber nur unbedeutend, die Lokomotive ist deshalb unbedingt auf künstliche Zugerzeugung angewiesen, und als einfachstes und bestes Mittel dazu hat sich das Blasrohr unter dem Schornsteine erwiesen, durch das der Abdampf der Zylinder nach Art der Strahlpumpe saugend auf die abgekühlten Brenngase in der Rauchkammer wirkt. Zwar muß zu dem Ende der Abdampf mit einigem Drucke aus dem Blasrohre ausströmen, und dieser Druck wirkt etwas hemmend auf die Kolbenbewegung, kommt aber bei dem hohen Drucke des Arbeitsdampfes wenig in Betracht. Wie nun das Blasrohr das denkbar einfachste Mittel zur Zugerzeugung ist, so auch das den Betriebverhältnissen am besten angepaßte. Denn offenbar ist die Blaswirkung um so ausgiebiger, je größer die Geschwindigkeit des auspuffenden Dampfes, je größer also seine Menge ist. Diese aber steigt nach Maßgabe der geforderten Leistung, und so wird der Zug und damit die Verbrennung und Dampfbildung um so energischer, je größeren Widerstand die Lokomotive zu überwinden hat. Feuerung, Kessel, Dampfzylinder und Blasrohr stehen somit in innigem Zusammenhange, und das Abstimmen ihrer Verhältnisse hat einen wesentlichen Teil der Durchbildungsarbeit an der Lokomotive erfordert. Allein das simple, aber so wichtige Blasrohr ist Gegenstand vieler sorgfältiger Versuche gewesen und hat seine wichtigste Förderung erfahren durch die theoretischen Arbeiten des gelehrten Zeuner, der nachwies, daß die durch das Blasrohr geförderte Luftmenge gerade dem Dampfverbrauche der Lokomotive proportional ist. Es sei noch erwähnt, daß der Wunsch, die Wirkung des Blasrohres auch durch Verengern und Erweitern der Mündung regeln zu können, zur Anordnung einer vom Führerstande stellbaren Klappe geführt hat, und daß bei Stillstand der Lokomotive das Blasrohr auch durch Frischdampf gespeist werden kann. Die genauere Kenntniss der Blasrohrwirkung ist übrigens auch auf die Form des Schornsteins von Einfluß gewesen, seine vielfach konische Form ist darauf zurückzuführen.

Alle Räder der Lokomotive, wie der Eisenbahnwagen überhaupt, sind gefedert, die Achslager deshalb in Schlitzen des Rahmens beweglich, wie in dem Schema Fig. 114 angedeutet. Bei der großen Geschwindigkeit der Fahrzeuge sind die Stöße auf die Räder trotz der glatten Schienen, namentlich an den Schienenstößen, sehr heftig, und schnelles Fahren ohne Federn wäre nicht nur für die Personen unerträglich, sondern aus technischen Gründen gar nicht möglich. Denn die früher als Schmiegsamkeit bezeichnete notwendige Eigenschaft aller Fahrzeuge muß auch der Eisenbahnwagen in hohem Grade besitzen, trotz der sorgfältig abgeglichenen, aber doch nicht genau ebenen Bahn, wenn die Räder gleichmäßig tragen sollen. Die *federnde* Schmiegsamkeit ist aber nötig, damit die Räder nach gelegentlichem Hochspringen möglichst schnell wieder auf der Schiene Fuß fassen. In welchem Maße übrigens der Schienenstrang selbst sich an der Federung beteiligt, kann man leicht beobachten, wenn man dicht an einem vorbeifahrenden Zuge das Verhalten des Geleises beobachtet. Es ist natürlich Alles wichtig an dem ganzen Eisenbahn-Fahrapparat, aber die Federsysteme sollte man mit besonderer Aufmerksamkeit betrachten.

*

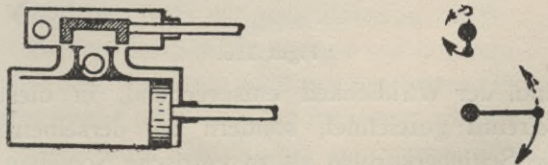
Die Bestimmung der Lokomotive für Flachbahnen oder Gebirgsbahnen, für Personen-, Schnell- oder Güterzüge ist maßgebend für ihre Leistung und Zugkraft, also für ihre Größe und für die Anzahl der gekuppelten Räder. Das ist nach dem früher Gesagten ohne Weiteres klar, wie auch der Einfluß besonders des letzteren Umstandes auf die ganze Anordnung. Die Radkupplung ihrerseits ist auch abhängig von den kleinsten Bahnkurven, denn je mehr Räder gekuppelt sind, umso länger wird der als starr zu betrachtende Teil der Lokomotive, und diese Länge ist begrenzt durch den geringen Spielraum der Räder zwischen den Schienen, der zwar in Kurven durch etwas weitere Spur vergrößert wird, aber doch nur um das zulässige geringe Maß. Um der Lokomotive möglichste Biegsamkeit zu erhalten, ist deshalb der Tender ebensowenig starr mit ihr gekuppelt, wie die Anhängewagen unter sich. Zur Förderung der Biegsamkeit dienen auch die aus Amerika stammenden, bei uns mehr und mehr Eingang findenden Drehgestelle, sowohl bei den Lokomotiven wie bei den Wagen, die als untergeschobene selbständige zweiachsige niedrige Wagen zu betrachten sind, mit

einem Gelenkbolzen in der Mitte, also den Vorgestellen der Straßenfuhrwerke mit Drehschemel ähnelnd. Eine Vorstellung ihres Einbaus bei Lokomotiven gibt die letzte Skizze der Figur 113. Besonders für die billig gebauten amerikanischen Eisenbahnen mit ihren kleinen Kurven ist diese Lokomotivform typisch geworden, man braucht sie sich nur durch den großen schneepflugartigen Bahnräumer (cowcatcher) vervollständigt zu denken.

*

Die Forderung der Einfachheit wird bei Lokomotiven immer von besonderer Bedeutung sein, und der Wunsch nach möglichst ökonomischem Betriebe erst in zweiter Linie berücksichtigt werden können. Deshalb ist der Lokomotivbau immer sehr zurückhaltend gewesen in der Anwendung der feineren Mittel zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades, die ortfeste und Schiffsmaschinen schon lange als selbstverständlich verwenden. Verwickeltere Steuerungssysteme zur Erzielung weitgehender Expansion nach der theoretisch günstigsten Druckkurve sind deshalb nicht gebräuchlich geworden, nur das Verbundsystem, das neben seinen unmittelbaren theoretischen Vorzügen (Motoren S. 197) auch höhere Expansionsgrade bei einfacher Steuerung im Gefolge hat, ist zu umfangreicherer Anwendung gekommen, wobei die Betriebsverhältnisse der Lokomotiven namentlich in der Hinsicht besondere Ausgestaltung des Systemes gefordert haben, daß beim Anfahren die Maschine als Zwillingmaschine dienen kann und erst auf der Strecke als Verbundmaschine fährt. Im Uebrigen ist die Umsteuerung mit einfachem Schieber herrschend geblieben, im Wesentlichen in der Form, wie sie auch schon Stephenson angewendet hatte, und es ist angezeigt, noch dieses wichtige Glied der Maschine näher zu betrachten, das sich in seinen Grundeigenschaften sehr leicht aus seiner Entwicklung verstehen läßt.

Figur 115 zeigt schematisch einen der Zylinder der Lokomotive. Der Kolben ist in seiner äußersten Lage rechts angegeben, die zugehörige Stellung seiner Pleuel in der Verlängerung seiner

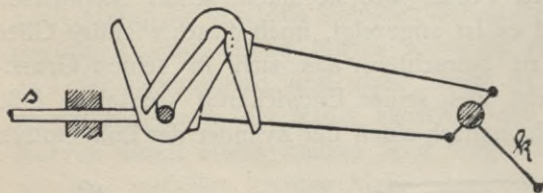


Figur 115.

Kolbenstange angedeutet. Um die Verhältnisse recht über-

sichtlich zu machen, ist von jeder „Deckung“ des Schiebers (Motoren S. 191) also auch von der Voreilung der Schieberkurbel abgesehen. Diese (oberhalb der Hauptkurbel angegeben, in Wirklichkeit mit ihr konaxial zu denken) steht deshalb senkrecht zur Hauptkurbel, denn der Schieber muß bei der angegebenen Endstellung des Kolbens gerade in der Mitte seiner Bahn stehen, bereit, im nächsten Augenblicke den rechten Dampfkanal nach dem Zylinder zu öffnen. Ueber den toten Punkt, den die Hauptkurbel gerade hat, hilft ihr die Kurbel des anderen Zylinders hinweg, die gegen die erstere um 90° versetzt ist, jetzt also gerade in ihrer günstigsten Stellung ist. Die Drehung möge im Sinne des Uhrzeigers erfolgen, der Kolben geht aus seiner Endstellung nach links, der Schieber aus seiner Mittelstellung ebenfalls weiter nach links. Sollte die Drehung aber entgegengesetzt dem Uhrzeiger erfolgen, so müßten doch Kolben und Schieber dieselben Bewegungen annehmen, wie vorher, denn der Kolben kann überhaupt keine andre Bewegung machen, und der Schieber muß ihm Dampf in demselben Sinne wie vorher zuleiten. Das ist aber nur möglich, wenn der Schieber nicht mehr von derselben, der unteren Schieberkurbel bewegt wird, wie bei der zuerst angenommenen Drehung im Uhrzeigersinne, sondern von der ihr entgegengesetzten oberen. Das gilt, wie man sich überzeugen kann, von jeder Stellung der Kurbeln. Soll also eine Umsteuerung eintreten, so müssen für jeden Zylinder zwei Schieberkurbeln vorgesehen sein, und je nach dem Drehsinne muß bald die eine bald die andre mit dem Schieber gekuppelt sein. Diese wechselnde

Kupplung wurde nun bei den ersten Lokomotiven durch den in Fig. 116 angedeuteten Mechanismus bewirkt. Die Hauptkurbel *k* und die Schieberkurbeln



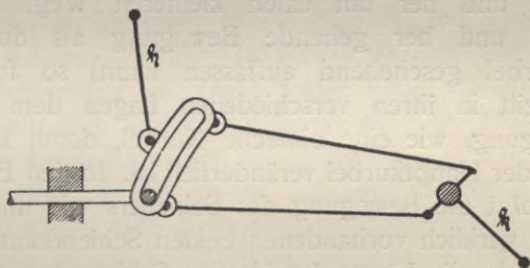
Figur 116.

sind, der Wirklichkeit entsprechend, in dieser Figur nicht mehr getrennt gezeichnet, sondern auf derselben Achse sitzend, wobei die Schieberkurbeln als exzentrische Scheiben zu denken sind. In der gezeichneten Stellung der Teile ist die Schieberstange *s* mit der tiefer stehenden Schieberkurbel gekuppelt. Soil in dieser

Stellung ein Umsteuern erfolgen, so muß die bisher wirkende Lenkstange den Endzapfen der Schieberstange loslassen, die andere Lenkstange muß ihn dagegen fassen, wobei der Schieber so verstellt werden muß, daß der Zapfen der Schieberstange näher an die Kurbelachse gelangt. Das ist ermöglicht durch die gabelartigen Ansätze an den Lenkstangen, und man braucht sich nur vorzustellen, daß die beiden Lenkstangen durch ein gemeinschaftliches Glied gehoben oder gesenkt werden können, um einzusehen, daß bei jeder Stellung der Kurbeln eine der Gabeln den Zapfen der Schieberstange zu fassen und den Schieber zum Umsteuern in die erforderliche Lage zu zwingen vermag.

Die wesentlichste Verbesserung dieses etwas sperrigen und, wie wir gleich sehen werden, noch unvollkommenen Mechanismus bestand nun in dem von Stephenson eingeführten Ersatze der getrennten Gabeln durch ein einfaches gemeinschaftliches

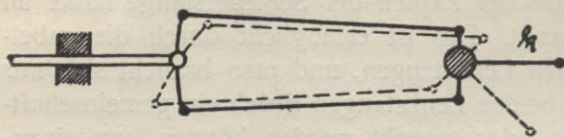
Glied, diesogenannte Kulissee (Fig. 117), deren Bestimmung sich aus dem Vergleiche der Figuren 116 und 117 sofort ergibt. Denn die geschlitzte Kulissee ist offenbar nichts anderes, als die durch



Figur 117.

den linken Schenkel der oberen Gabel und den rechten der unteren gebildete Mitnehmer-Verbindung für den Zapfen der Schieberstange. Durch Heben und Senken der an der schwingenden Stange h aufgehängten Kulissee kann man in der Tat genau wie vorher die wechselnde Kupplung des Schiebers mit seinen beiden Kurbeln und seine dabei erforderliche Verschiebung erzielen. Die Wirkungsweise der beiden Mechanismen in der gezeichneten gleichen Stellung der Teile ist ganz dieselbe. Während aber die Gabeln den Zapfen der Schieberstange nur in ihrem Scheitelpunkte fest umschließen, also nur in ihren Endlagen, in den Zwischenlagen ihn aber mehr oder weniger freilassen, nimmt die Kulissee den Zapfen unter allen Umständen mit, wenn der Drehpunkt ihrer Hängestange h festgestellt ist. Das gibt nun ersichtlich ein sicheres Kuppeln der Schieberstange in allen

Stellungen, die Möglichkeit aber, auch die Zwischenlagen der Kulisse zum Bewegen des Schiebers zu benutzen, führt noch viel wesentlichere Vorteile herbei. In der Mittellage der Kulisse



Figur 118.

nämlich (Figur 118) bleibt der Schieber vollständig stehen, denn die beiden Schieberkurbeln geben dabei nur den

Kulissenenden dieselben Verschiebungen im entgegengesetzten Sinne, lassen sie also um den Zapfen der Schieberstange einfach schwingen. Es ist demnach möglich, nur mit der Umsteuerung den Schieber still zu stellen, das ist aber gleichbedeutend mit Absperrung des Dampfes. In den Zwischenlagen der Kulisse dagegen erfolgt die Bewegung des Schiebers hin und her um einen kleineren Weg, und da man jede hin und her gehende Bewegung als durch eine einfache Kurbel geschehend auffassen kann, so folgt: Die Kulisse erteilt in ihren verschiedenen Lagen dem Schieber eine Bewegung, wie eine einfache Kurbel, deren Länge und Stellung zu der Hauptkurbel veränderlich ist. In den Endlagen der Kulisse erfolgt die Bewegung des Schiebers wie unmittelbar von einer der wirklich vorhandenen beiden Schieberkurbeln, in der Mittellage ist die Länge der ideellen Schieberkurbel gleich Null.

Diese Verhältnisse werden verwickelter durch die dem Schieber in Wirklichkeit gegebene starke Deckung und dadurch erforderliche Voreilung, und die genaue Untersuchung und Bestimmung des ganzen Getriebes für die verschiedenen Kulissenstellungen erfordert einen größeren Aufwand von mathematischem Apparat, neben sehr viel Geduld, bildet deshalb immer einen Schrecken für angehende Techniker. Da aber auch schon aus der Darstellung unter möglichst vereinfachten Bedingungen hervorgeht, daß man den Schieberhub mit der Kurbelsteuerung verändern kann, so wird einleuchten, daß man damit auch die Expansion im Zylinder bestimmen kann, wengleich man eine Dampfverteilung nach den genauen Dampfdruck-Kurven nicht erzielen kann. Die Abweichungen davon müssen zugunsten der Einfachheit des Steuerapparates mit in Kauf genommen werden.

Die Stephenson'sche Kulissensteuerung hat im Laufe der Zeit

viele Aenderungen erfahren, die den ihr anhaftenden Ungenauigkeiten je nach den Anforderungen des besonderen Falles begegnen sollen, sie ist aber grundlegend geblieben für alle Lokomotivsteuerungen. Wie durch sie in Verbindung mit dem Dampf-Absperrschieber, der hier „Regulator“ genannt wird, die Leistung der Lokomotive geregelt werden kann, teils durch Verstellen des Expansionsgrades, teils durch Drosselung des Dampfes, wird aus dem Vorstehenden verständlich geworden sein.

*

Wie die Lokomotive überhaupt eine besondere Stellung unter den Dampfmaschinen einnimmt, so hat sie sich auch schon frühzeitig an Umdrehzahlen gewöhnen müssen, die für ortfeste Maschinen nur als Ausnahmen angesehen werden. Eine Schnellzuglokomotive beispielweise, deren Treibräder etwa $1\frac{1}{2}$ m Durchmesser haben, macht, bei einer Fahrgeschwindigkeit von 72 km in der Stunde, nahezu 250 doppelte Kolbenspiele in der Minute, wie leicht zu berechnen ist. Diese große Geschwindigkeit der hin und her gehenden Massen erfordert ein sorgfältiges Ausbalancieren, was durch Anordnen einseitiger Massen in den Treibrädern erzielt wird, in dem Sinne, daß der Kolbenbewegung in der einen Richtung eine Bewegung der Gegenmassen in der anderen Richtung entspricht. Vollkommen kann damit das Ausbalancieren nicht erreicht werden, da die geradlinige Bewegung des Kolbens und die teilweise geradlinige Bewegung des Gestänges der Kreisbewegung der Räder gegenübersteht. Die Schwierigkeiten wachsen noch durch die Verstellung der Kurbeln gegeneinander, so daß ähnliche Bewegungsverhältnisse auf beiden Lokomotivseiten zu verschiedenen Zeiten auftreten. Die Lokomotive erfährt infolgedessen, ganz abgesehen von den Stößen seitens des Bahnkörpers, durch die fortwährende Verlegung eigener Massen, die nicht vollständig auszugleichen sind, erhebliche Erzitterungen und Schwankungen, die nicht unähnlich den Schiffsbewegungen sind und deshalb auch nach diesen bezeichnet werden. Das „Stampfen“, nämlich die Schaukelbewegung in der Längsrichtung, auch Galoppieren genannt, das man auch gelegentlich bei Straßenbahnwagen beobachten kann, ist nicht minder störend wie das „Schlingern“, die wiegende Bewegung in der

Querrichtung. Es bedarf eines sehr sorgfältigen Studiums der Massenbewegungen und vieler Beobachtung und Erfahrung, um die genannten Störungen auf ein zulässiges Maß zu beschränken. Es würden sonst Geschwindigkeiten bis 90 km in der Stunde (25 m in der Sekunde), die für heutige Lokomotiven etwa die obere Grenze bilden, einfach unmöglich sein.

*

Die Zugkraft der Lokomotive ist abhängig von dem Drucke, den die mit den Kolben gekuppelten Räder auf die Schienen ausüben. Das ganze Gewicht moderner Lokomotiven für den Ferndienst beträgt je nach ihrer Größe und Art zwischen 30 und 60 t (t = Tonne = 1000 kg), das auf die Räder verschieden verteilt ist, im besonderen, soweit zulässig, auf die gekuppelten Räder. Die Grenze von deren Belastung ist bestimmt durch die zulässige Belastung der Schienen an einer einzelnen Stelle. Diese Grenze soll bei dem üblichen Oberbau (Schienen mit Unterlagen) 7 t nicht überschreiten. Ist nun die Belastung aller Treibräder bekannt, so ergibt sich die größtmögliche Zugkraft aus der Summe dieser Belastungen multipliziert mit dem Koeffizienten der gleitenden Reibung der Räder auf den Schienen. Um sicher zu sein, daß wirklich nur ein Rollen der Räder eintritt und kein Gleiten, darf dieser Koeffizient nicht zu hoch angenommen werden, im besten Falle zu $\frac{1}{5}$, gewöhnlich aber nur zu $\frac{1}{10}$. Damit nun die Lokomotive die nach ihrem Gewichte und nach dessen Verteilung mögliche Zugkraft ausüben kann, müssen die Kolbenquerschnitte und der Dampfdruck richtig gewählt sein, unter Berücksichtigung des Umstandes, daß die Kurbeln in den Totlagen gar keine Drehkraft auf die Räder ausüben, und bei solcher Stellung der einen Kurbel die auf der anderen Seite allein für den Antrieb aufzukommen hat. Das gilt indessen nur für das Anfahren, denn nachdem schon einige Geschwindigkeit erreicht ist, wirkt die ganze Masse des Zuges gewissermaßen als Schwungrad, wie schon früher bemerkt, so daß die ungleichmäßige Arbeit der Dampfzylinder sich nicht mehr störend auf die Zugkraft bemerklich macht.

Ganz nach dem schon früher erörterten Gesichtspunkte ist zu beurteilen, welche Last von der Lokomotive gegebener Zug-

kraft geschleppt werden kann, die ja für den Widerstand der Fahrzeuge verbraucht wird. Auch bei den Eisenbahnen kann man einen konstanten Teil des Fahrwiderstandes unterscheiden von dem mit der Geschwindigkeit wachsenden, jener vornehmlich durch die Reibung verursacht, dieser durch die Stöße auf die Räder, die mit zunehmender Geschwindigkeit immer heftiger werden und unter allen Umständen einen Verlust darstellen. Bei den großen Geschwindigkeiten der Eisenbahnen kommt aber auch ein erheblicher und, wie die einfachsten Beobachtungen lehren, ebenfalls mit der Geschwindigkeit wachsender Widerstand der Luft hinzu, die bei Windstille sich mit der Fahr- geschwindigkeit relativ gegen die Lokomotive bewegt und an dem Zuge wirbelnd entlang gleitet, beim Fahren gegen den Wind ihre hemmende Wirkung aber nach Maßgabe der größeren Relativgeschwindigkeit steigert. Welchen ungemein starken Ein- fluß ferner die Steigungen haben, ist schon früher erörtert, eben- so ist einleuchtend, daß in Kurven der Widerstand steigen muß, einmal wegen des Seitendruckes auf die Schienen infolge der Zentrifugalkraft, dann wegen der unvermeidlichen teilweisen gleitenden Reibung der nicht unabhängigen Räder auf den Schienen infolge verschiedener Weglängen, wie bei den Straßen- fuhrwerken besprochen. Endlich muß immer noch auf zufällige Widerstände gerechnet werden.

Für alle diese den Bau und Betrieb der Bahn beeinflussen- den Umstände liegt natürlich dem entwerfenden Techniker ein riesiges Material an theoretischen Untersuchungen und prak- tischen Beobachtungen vor. Der Anschaulichkeit wegen wird es nützlich sein, hier wenigstens einige rohe Zahlen mitzuteilen.

Der Reibungswiderstand, bestehend aus der Zapfenreibung und der rollenden Reibung der Räder eines Wagens auf einer Schienenbahn kann zu etwa $\frac{1}{3}$ % der Belastung (Wagen mit Nutzlast) geschätzt werden. Der Widerstand derselben Last unter sonst gleichen Umständen auf bester Chaussee ist ungefähr 6 mal, auf schlechterer vielleicht 15 mal so groß. Diese Zahlen zeigen deutlich die Ueberlegenheit der Förderung auf Schienen. Der gesamte Widerstand einer Personenzug-Lokomotive bei normaler Geschwindigkeit auf horizontaler Strecke kann für jede Tonne ihres Gewichtes im Mittel mit 6 kg angesetzt werden, für Güter- zug-Lokomotiven, mit einer größeren Zahl gekuppelter Räder,

nahezu mit dem Doppelten. Für die Wagen kann man — natürlich auch nur ganz roh — 4 kg für jede Tonne setzen. Die Werte für die Anfahrt steigen auf das Mehrfache. Wie der Einfluß der Steigungen zu schätzen ist, wurde schon früher erörtert. Danach kann nicht auffallen, daß schon bei der geringen Steigung von 1 : 250 der Widerstand von 4 kg der horizontalen Strecke auf das Doppelte wächst, bei 1 : 50 auf das 6fache. Daher der zunächst auffallend niedrig erscheinende Wert der größeren zulässigen Steigung, der bei Hauptbahnen tunlichst 1 : 100 nicht überschreiten soll. Für solche geringen Steigungen läßt sich die leicht zu behaltende Regel ableiten: Der Zugwiderstand nimmt für jeden Millimeter Steigung auf 1 Meter Länge um 1 kg für die Tonne zu. Der vermehrte Widerstand in Kurven wird meist verglichen mit dem Widerstande einer gleichwertigen Steigung. Er ist natürlich um so größer, je stärker die Krümmung der Kurve ist, aber von vielen Umständen abhängig, deshalb sehr schwankend, übrigens aber nicht erheblich. Der Sicherheitszuschlag für zufällige Widerstände kann mit 50 % als reichlich angenommen werden, da verschiedene ungünstige Ursachen selten gleichzeitig auftreten werden.

Mit Unterlagen solcher Art ist nun beim Entwerfen einer Bahn zwischen den beiden Endpunkten die Linie auszusuchen, deren Wahl die Bahn am wirtschaftlichsten macht, nicht also nur die Baukosten, sondern auch die Betriebskosten berücksichtigt. Die einfachste Erfahrung und Anschauung lehrt, daß die gerade Linie, sofern sie überhaupt möglich wäre, im allgemeinen weder im Bau noch im Betriebe die billigste sein wird, daß eine stärkere Steigung durch eine längere, aber schwächer geneigte Strecke wirtschaftlicher ersetzt werden kann. Um nun beim Vergleiche mehrerer möglichen Linien einen bequemen und anschaulichen Maßstab zu erhalten, hat sich die Methode eingeführt, für die zu vergleichenden Linien die „virtuelle Länge“ zu ermitteln, das ist die Länge einer ganz geraden, horizontalen Bahn, die mit einer bestimmten Linie gleiche Betriebskosten hat. Linien gleicher virtueller Länge sind also wirtschaftlich gleichwertig, verschiedene virtuelle Längen drücken in einfachster Weise die wirtschaftliche Ueberlegenheit einer der Linien aus. Die Wirtschaftlichkeit einer Bahn ist übrigens auch in hohem Grade abhängig von der Güte des Wagenparkes, wie kaum gesagt zu werden braucht. Jeder

Wagen stellt selbst eine erhebliche Belastung des Zuges dar. Bei guten offenen Güterwagen kann das Ladegewicht etwa doppelt so groß angenommen werden, wie das Wagengewicht, bei gedeckten Wagen nur ungefähr gleich dem Eigengewichte.

*

Bei Betrachtung der Automobilen konnte auf den grundsätzlich sehr vollkommenen Antrieb durch den Motor hingewiesen werden, der bei größerem Widerstande mit einem kleineren Uebersetzungsverhältnisse auf die Treibräder wirkt, bei gleicher Leistung also dem Fahrzeuge eine dem Wegwiderstande umgekehrt proportionale Geschwindigkeit zu geben vermag, oder einen gelegentlichen größeren Widerstand durch ein günstigeres Hebelverhältnis zwischen Motorwelle und Radachse überwinden kann. Die Folge dieser Antriebweise ist die Möglichkeit, ohne zu großen Ueberschuß an Drehkraft seitens des Motors auszukommen. Dieses, auch bei Automobilen nur annähernd zu verwirklichende Prinzip, ist bei der Dampflokomotive wegen der ungleich größeren bei ihr auftretenden Kräfte nicht durchführbar, die Dampfkolben sind unmittelbar mit den Rädern gekuppelt, müssen deshalb auch einen viel größeren Ueberschuß an Drehkraft ausüben können, um in allen Fällen den Zug in Bewegung zu halten, vor allem ihn in Bewegung zu setzen. Denn beim Anfahren muß nicht nur der Widerstand der Bewegung überwunden, sondern die ganze Masse des Zuges auch beschleunigt werden, und die dazu nötige Kraft hängt ganz von der Zeit ab, in der die volle Fahrgeschwindigkeit erreicht werden soll. Eine Vorstellung von der beim Anfahren geforderten Mehrleistung der Lokomotive ist zu gewinnen aus der nach Erreichen der normalen Geschwindigkeit in dem Zuge aufgespeicherten Bewegungsenergie. Ein Schnellzug von einigen 70 km Geschwindigkeit in der Stunde, demnach von mehr als 20 m in der Sekunde, könnte vermöge dieser Geschwindigkeit (wie aus der Fallhöhentabelle zu entnehmen) ohne Rücksicht auf die Widerstände die Höhe eines vierstöckigen Hauses erklimmen. Die Leistung der Lokomotive beim Anfahren muß also dem Heben des ganzen Zuges auf eine solche Höhe in der vorgeschriebenen Zeit entsprechen. Diese Leistung ist aber umgekehrt beim Anhalten des Zuges wieder zu vernichten.

Die Bewegungsenergie durch den Widerstand des Zuges selbst aufzehren zu lassen, würde zwar an sich wirtschaftlich sein, weil die Lokomotive dabei keine Leistung herzugeben hätte, ist aber unzulässig wegen des viel zu langen Weges, den der Zug vermöge seiner Trägheit bis zum Stillstande zurücklegen würde, ganz abgesehen von der Notwendigkeit, den Zug auf geneigten Strecken halten zu können, ihn überhaupt so weit als möglich zu beherrschen. Die künstlichen Mittel zum Verlangsamen der Fahrt, die Bremsen, spielen deshalb bei Eisenbahnen eine besonders wichtige Rolle und müssen der sicheren Wirkung wegen ebenso sorgfältig entworfen wie unterhalten werden. Die Lokomotive selbst bietet zwar ein Mittel zur Verzögerung, da sie durch Umlegen der Steuerung in die der augenblicklichen Fahrt entgegengesetzte Richtung aus einem Motor zu einem Kompressor wird, der sogar in beschränktem Maße ein Aufspeichern der dem Zuge genommenen Energie bewirkt, dieses, für die Maschinenteile ohnehin angreifende Mittel, ist aber nur im Notfalle anzuwenden und kann die Bremse nicht ersetzen.

Als Bremsen der Eisenbahnfahrzeuge dienen fast immer die Wagenräder selbst, an die vermittels der Bremsgestänge die Bremsklötze mit mehr oder weniger Kraft gedrückt werden. Vorgezogen werden dabei immer zweiseitig wirkende Bremsen, die, um die Achslager nicht übermäßig anzustrengen, zu beiden Seiten der Achse Bremsklötze mit gleicher Kraft gegen das Rad drücken.

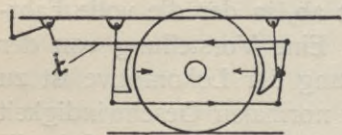


Fig. 119.

Ein Beispiel dieser Anordnung gibt Figur 119. Es bedarf ersichtlich nur des Anziehens der Stange t , um das Bremsgestänge zum gleichzeitigen Anlegen der beiden Bremsklötze an den Radumfang zu veranlassen, wobei die Drucke der Bremsklötze sich

gegenseitig aufheben, das Achslager also nur wenig beansprucht wird. Das Anziehen der Bremsen geschah nun früher immer von Hand durch die Schaffner, die auf ein Signal von der Lokomotive die Bremskurbeln in Bewegung setzten. Die Wirkung dieser Handbremsen ist aber weder gleichmäßig noch schnell genug, bei der immer mehr gesteigerten Fahrgeschwindigkeit sind deshalb wirksamere Bremsmittel notwendig geworden und als

sogenannte kontinuierliche oder durchgehende mechanische Bremsen für die Personenzüge durchgängig eingeführt.

Es ist vielfach versucht, die Verbindung der Bremsen untereinander zwecks gemeinsamer Betätigung lediglich durch gelenkige Glieder zu bewirken, und als eines der besten Systeme dieser Art hat sich das

von Heberlein erwiesen, von dem Figur 120 eine schematische Darstellung gibt. Die Bremsklötze sind wieder wie in Fig. 119 zu zweiseitiger Wirkung durch Hebel verbunden, statt aber zum Bremsen den Hebel rechts unmittelbar anzuziehen,

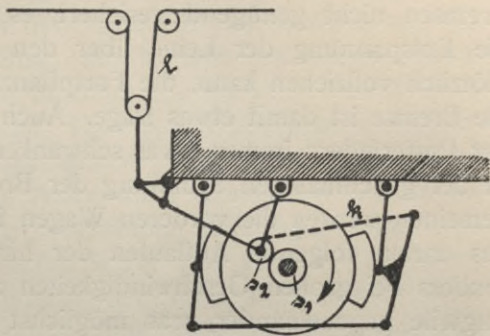


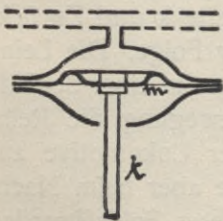
Fig. 120.

ist er durch eine Kette k mit der Reibscheibe s_2 verbunden, die sich beim Nachlassen der Leine l gegen die Reibscheibe s_1 auf der Radachse lehnt. Wird s_2 in dieser Stellung von s_1 mitgenommen, so wickelt sich die Kette auf, diese zieht den Bremshebel rechts an, die Spannung der Kette drückt s_2 noch fester gegen s_1 , die vermehrte Reibung verstärkt wieder den Zug der Kette, und diese Wechselwirkung der Organe bewirkt ersichtlich ein immer festeres Anlegen der Bremsklötze gegen den Radumfang, und zwar lediglich durch die Wucht des Wagens selbst, ohne Zutun einer anderen Kraft. Das Lösen der Bremse erfolgt durch Wiederanziehen der Leine l , das Lockern der Reibscheiben s_1 und s_2 hat ein sofortiges Nachlassen der Kette k und Zurückgehen der Bremsteile in ihre Ruhestellung zur Folge. Die Leine geht nun über den ganzen Zug, an jeder Bremse in einer Schleife über die lose Rolle, durch deren Aufwärtsbewegung die Reibscheibe s_2 gelüftet wird, so daß die von der Lokomotive aus gestraffte Leine alle Bremsen geöffnet hält, sie aber beim Nachlassen gleichzeitig in Tätigkeit treten läßt. Dieses Schlaffwerden der Leine kann nun sowohl durch absichtlichen Eingriff geschehen, wie auch selbsttätig bei ihrem Zerreißen durch Trennung des Zuges, oder bei anderen Betriebsstörungen. Dieses Brems-

system gehört deshalb zu den automatischen, die aus naheliegenden Gründen bevorzugt werden.

Die Heberlein-Bremse hat trotz ihrer Einfachheit sich nicht allgemeinen Eingang verschaffen können, da die Genauigkeit ihrer Wirkung doch zu wünschen übrig läßt. Auch bei vollständiger Ordnung aller Teile ist das gleichzeitige Einfallen aller Bremsen nicht genügend gesichert, es leuchtet auch ein, daß die Entspannung der Leine über den ganzen Zug sich nicht plötzlich vollziehen kann, die Fortpflanzung bedarf einiger Zeit, die Bremse ist damit etwas träge. Auch der unter der Wirkung der Pufferfedern immer etwas schwankende Abstand der Wagen ist der gleichmäßigen Spannung der Bremse abträglich. Im allgemeinen werden die vorderen Wagen früher gebremst werden, das daraus folgende Auflaufen der hinteren Wagen führt besonders bei großen Geschwindigkeiten zu Stößen der einzelnen Zugteile gegeneinander, was möglichst vermieden werden soll. Die Heberlein-Bremse ist deshalb auf Nebenbahnen mit geringerer Geschwindigkeit beschränkt geblieben, ihre Billigkeit und Derbheit machen sie für dieses Anwendungsgebiet besonders geeignet.

Von viel größerer Bedeutung sind die Luftbremsen geworden, bei denen eine Rohrleitung unter den Wagen entlang geht, zwischen den Wagen gebildet durch nachgiebige Schlauchstücke. Diese Rohrleitung steht bei jeder Bremse mit einem Gehäuse in Verbindung, dessen verschiebbarer Kolben das Bremsgestänge anzieht, wenn er auf einer Seite Ueberdruck erhält. Je nachdem dabei die Rohrleitung verdichtete oder verdünnte Luft führt, unterscheidet man Luftdruckbremsen und Vakuumbremsen. Zwei Beispiele werden das Grundsätzliche dieser beiden Systeme erläutern.

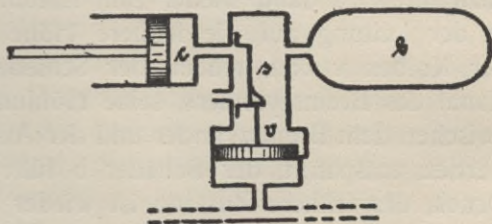


Figur 121.

Die einfachste Luftbremse ist die nach Smith-Hardy (Figur 121), die zum Anziehen des Bremsgestänges kapselartige, in der Mitte eine Membran (Lederscheibe) enthaltende Gehäuse benutzt. Die obere Hälfte steht mit der Rohrleitung in Verbindung, die am Ende des Zuges natürlich geschlossen ist und vorn auf der Lokomotive in einem Luftsauger endet. Dieser ist eine einfache Dampfstrahlpumpe, die durch Zulassen von Dampf in Tätigkeit

tritt, damit eine Luftverdünnung in der Rohrleitung und den oberen Gehäusehälften erzeugt, so daß der frei unterhalb der Membran wirkende Atmosphärendruck diese mit der Zugstange *t* hebt und die Bremsen anzieht. Durch mehr oder weniger starkes Dampfzulassen zu der Strahlpumpe kann man die Luftverdünnung und somit den Bremsdruck nach Bedarf regeln. Dieses Bremssystem ist ersichtlich sehr einfach, sowohl in den Bremsapparaten selbst, wie in dem wirksamen Motor auf der Lokomotive, da die Strahlpumpe nur aus Dampfventil, Düse und Rohrstück besteht. Das System ist aber mehr für den leichten Dienst von Lokalbahnen geeignet, wie es auch auf der Berliner Stadtbahn zur Anwendung gekommen ist. Es ist nicht automatisch, setzt den vollständig ordnungsmäßigen Zustand aller Teile voraus, und tritt für den ganzen Zug außer Wirkung bei etwaigem Undichtwerden der Luftleitung oder beim Versagen des Saugers. Man hat nun zwar auch automatische Vakuum-Bremsen konstruiert, sie sind aber zurückgedrängt durch die mit Preßluft arbeitenden Bremssysteme, die im größten Umfange zur Anwendung kommen, denen auch von vornherein unwillkürlich ein besonderes Vertrauen geschenkt werden kann, weil die Preßluft von mehreren Atmosphären-Druck eine größere Kraft auf die Stellorgane ausübt, andererseits erlaubt, die Abmessungen der die Bremsgestänge betätigenden Zylinder kleiner zu halten, ihre Anordnung an den Wagen also erleichtert.

Die bekannteste dieser Preßluftbremsen ist die von Westinghouse (Figur 122), die nach folgendem Schema eingerichtet ist. Die Wagen führen in gesonderten Behältern *b* eine größere



Figur 122.

Menge Preßluft mit sich, von der die Bremszylinder *c* zum jedesmaligen Anziehen der Bremsgestänge einen Teil entnehmen. Die Preßluft wird beschafft und ergänzt durch einen Kompressor auf der Lokomotive, die zur Sicherstellung der Bremsarbeit noch einen größeren Luftbehälter trägt. Die Luftleitung verbindet alle Luftbehälter an den Wagen mit diesem Behälter auf der Loko-

motive, so daß im Ruhezustande der Bremsen in der Leitung und allen Behältern derselbe Druck herrscht. Das Spiel der Bremsen wird nun beherrscht durch Druckänderungen in der verbindenden Leitung unter Vermittlung des sogenannten Funktionsventiles v. Die Skizze zeigt die Apparateile bei losen Bremsen. Der Kolben des Funktionsventiles ist durch die Preßluft gehoben und zwar soweit, daß er die untere Mündung der seitlichen Nut seines Zylinders etwas überschritten hat. Bei dieser Stellung konnte die Preßluft um den Kolben herum in den Behälter b treten, bis sie diesen vollständig gefüllt hatte. Der Kolben bleibt dann stehen, da auf seinen beiden Seiten nun derselbe Druck herrscht, er schwebt gewissermaßen an der Grenze, wo er eben die seitliche Nut etwas freigelegt hat, er sorgt selbsttätig durch geringes Anheben für Nachfüllen des Behälters, sobald dieser beim Bremsen Preßluft hergegeben oder durch Undichtheiten verloren hat. Wenn nun aber durch Umstellen eines Hahnes die Leitung von dem Kompressor bzw. dem Luftbehälter auf der Lokomotive abgetrennt und ganz oder teilweise geöffnet wird, wenn sich also in ihr ein geringerer Luftdruck einstellt, dann wird umgekehrt der Kolben des Funktionsventiles von der Preßluft im Behälter b nach unten gedrückt, und dabei ver- stellt er den Schieber s, der dem Steuerschieber einer Dampfmaschine gleicht, so, daß auch Luft aus dem Behälter hinter den Bremskolben c treten kann, dessen Stange die Wagenbremse anzieht. Wird dann wieder zum Lüften der Bremse der Druck in der Leitung auf die frühere Höhe gebracht, so hebt sich der Kolben v von neuem, der Schieber s legt sich über den Kanal des Bremszylinders, seine Höhlung stellt die Verbindung zwischen dem Bremszylinder und der Außenluft her, die Bremsen werden entspannt, der Behälter b füllt sich auf den normalen Druck, der frühere Zustand ist wieder hergestellt.

Auf die feineren Einzelheiten der Apparateile und ihrer Tätigkeit können wir hier nicht eingehen, aus der kurzen Darstellung wird aber wohl einleuchten, wie durch mehr oder weniger große Druckunterschiede in der Luftleitung das Spiel der Bremsen in den erforderlichen Grenzen geregelt werden kann, wie durch langsames Erniedrigen des Leitungdruckes die Bremsen sanft zum Anlegen kommen und durch Erhalten eines geringeren Druckunterschiedes auch eine kleinere Bremskraft ausüben, oder

im Gefahrfälle schnell und mit ganzer Kraft in Tätigkeit treten. Das Bremssystem ist automatisch, es wirkt bei jeder Störung des Zusammenhanges, ist zwar viel teurer und verwickelter, als die beiden früher behandelten, aber auch sehr zuverlässig und durch allmähliche mühsame Ausbildung so feinfühlig geworden, daß es einen beliebigen Bremsgrad durch einfaches Verstellen eines Hahnes erzielt. Die Westinghouse-Bremse ist der eigentliche Pionier für die Luftdruckbremssysteme überhaupt geworden, deren jetziger hoher Ausbildung die Möglichkeit weiterer Steigerung der Geschwindigkeit der Eisenbahnzüge zu danken ist.

Der bei der Heberlein-Bremse erwähnte Uebelstand der nicht genügend schnellen und gleichmäßigen Fortpflanzung der Kraftdifferenzen, die bei allen durchgehenden Bremssystemen das Bremsspiel einleiten, ist den Luftbremsen in viel geringerem Grade eigen, denn die Bewegung der Luft in Rohrleitungen begegnet nur geringen Widerständen. Trotzdem bedarf es natürlich einer gewissen Zeit, wenn auch einer sehr kurzen, bis eine an dem einen Leitungsende eintretende Druckerniedrigung sich bis zum andern Ende fortpflanzt, denn es muß sich ja dabei Luft von diesem Ende nach vorn schieben. So gering die zeitweiligen Druckunterschiede in der Leitung auch sind, so bewirken sie doch bei langen Zügen eben wegen der Feinfühligkeit der jetzigen Luftbremsen merkliche Störungen, wieder bestehend in dem früheren Bremsen der vorderen Wagen gegen die nachfolgenden, die auf die vorhergehenden auflaufen, Stöße und Schwingungen innerhalb des Zuges veranlassend. Neuerdings ist deshalb eine Verbesserung der Luftbremsen eingeführt, bestehend in elektrisch gesteuerten Ventilen an den Wagenbremsen, wodurch, ohne sonst eine wesentliche Aenderung des Bremssystemes und seiner Wirkung erforderlich zu machen, das gleichzeitige Einfallen der Bremsen gesichert wird. Zweifellos wird diese zusätzliche elektrische Ausrüstung der Luftbremsen mit zunehmender Fahr- geschwindigkeit an Bedeutung gewinnen, denn die Störungen der reinen Luftbremsen machen sich natürlich um so fühlbarer, in je kürzerer Zeit der ganze Bremsvorgang ablaufen muß. — An dieser Stelle mag übrigens erwähnt sein, daß eine eigentliche elektrische Bremse bisher nicht recht gelungen ist, wenigstens keine, die in jeder Hinsicht den Luftbremsen gleichwertig wäre. Selbst elektrische Straßenbahnwagen machen deshalb oft von

diesen Gebrauch, die auch von der Berliner Hochbahn angenommen sind. Die Elektrizität dient hier nur zum Antriebe der Kompressoren.

*

Wir müssen endlich noch einige Angaben über den Eisenbahnoberbau nachtragen, wenigstens so weit er von unmittelbarem Einflusse auf die Fahrzeuge oder umgekehrt durch diese bedingt ist.



Fig. 123.

Das Schienenprofil, wie schon früher erwähnt, ist jetzt fast ausschließlich das breitbasige (Figur 123) mit starkem Kopfe und schmalen Stege, das allen Bedingungen der Festigkeit und Dauer möglichst genügen soll. Die Dauer der Schiene ist begrenzt durch ihre Abnutzung, die sehr erheblich sein kann. Das Schienenprofil ist deshalb von vornherein so zu bestimmen, daß die Schiene auch nach der Abnutzung genügende Tragfähigkeit behält, denn jene darf vor-schriftmäßig im Mittel etwa ein Zehntel der ganzen Schienenhöhe betragen, nimmt der Schiene also einen erheblichen Teil ihres Biegungswiderstandes. Zur Unterstützung der Schiene nahm man ursprünglich Steinwürfel, doch stellte sich bald deren Unzweckmäßigkeit heraus, sie bilden ein zu hartes Lager und haben infolgedessen selbst zu wenig Widerstand. Als einfachste und beste Unterlage der Schienen haben sich bis heute die hölzernen Querschwellen erwiesen, da kein Baustoff geeigneter ist, die Stöße zu mildern, als Holz. Der Feind der hölzernen Schwelle ist ihr Preis und die unter dem Wechsel von Feuchtigkeit und Trockenheit eintretende Fäulnis, die so gut als möglich durch Imprägnieren hintangehalten wird. Der Ersatz der Holzschwellen durch eiserne verschiedensten Querschnittes, in Form von Querschwellen, Langschwellen oder schüsselartigen, umgekehrten Hohlkörpern hat wohl Fortschritte gemacht, die hölzernen Schwellen bilden aber immer noch die gebräuchlichste Unterlage der Geleise.

Die Schienen bilden also kontinuierliche Brückenträger auf den eng gelegten Schwellen, die Abmessungen der einzelnen Geleisteile bestimmen sich nach dem Raddrucke der Fuhrwerke und nach deren Geschwindigkeit, da von dieser die Heftigkeit

der Stöße abhängt. Maßgebend für die Bemessung der Geleisteile ist vornehmlich die Erfahrung. Raddruck und Geschwindigkeit einerseits, Querschnitte der Schienen und Schwellen andererseits müssen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten abgeglichen werden, und diese haben für Hauptbahnen jetzigen Zustandes folgende runde Werte festgelegt: Größter Raddruck 7 t; hölzerne Querschwellen etwa $2\frac{1}{2}$ m lang, 25 mal 15 cm Querschnitt, Abstand von Mitte zu Mitte $\frac{3}{4}$ bis 1 m; Schienenhöhe 13 bis 15 cm, Gewicht für den laufenden Meter 35 bis 50 kg. Die hohen Kosten der Schienen machen erklärlich, weshalb man bei der Erwägung, ob höhere Geschwindigkeiten oder größere Belastung des Geleises zulässig sei, allgemein von der Notwendigkeit „schwerer“ Schienen spricht, wiewohl für ihre Widerstandsfähigkeit ihr Querschnitt in Betracht kommt, dessen Vergrößerung sich aber unmittelbar als Erhöhung der nach dem Gewichte zu berechnenden Kosten ausdrückt.

Die Befestigung der Schienen auf den Schwellen durch Hakennägel oder Schrauben erfolgt unmittelbar oder, besonders an den Schienenstößen, mit Unterlegplatten. Die Länge der einzelnen Schienen beträgt im Mittel 10 m, Schienen über 15 m werden zu unhandlich. Die Verbindung der Schienen bewirken kräftige, zu beiden Seiten des Steges angeschraubte Flacheisen, die Laschen, und hinsichtlich der Lage der Schienenverbindung zu den Schwellen hat die Erfahrung gezeigt, daß der sogenannte schwebende Stoß, d. h. die Anordnung der Verbindung zwischen zwei Schwellen, dem ruhenden Stoße auf einer Schwelle vorzuziehen ist. Die größere Nachgiebigkeit der überstehenden Schienenenden macht den Uebergang des Rades von einer Schiene zur anderen sanfter.

Die Rücksicht auf möglichst stoßfreies Fahren hat auch zu der üblichen konischen Form der Radkränze geführt (Figur 123), wodurch die Wagen von selbst Neigung erhalten, in der Mitte des Geleises zu laufen, ohne Beihilfe der Flanschen oder Spurkränze der Räder, die also nur bei stärkeren Seitenkräften in Wirkung zu treten brauchen. Diese selbsttätige Erhaltung der Fahrmitte soll auch möglichst in Kurven eintreten, der Zentrifugalkraft entgegen, die das Entgleisen der Wagen herbeizuführen sucht. Der Forderung wird genügt durch angemessenes Höherlegen der Außenschiene, so daß die Wagen durch ihre schräge

Lage ebenso sehr nach der Innenschiene drängen, wie sie durch die Zentrifugalkraft nach der anderen Seite getrieben werden.

*

Das Hauptziel aller Verbesserungen im Eisenbahnwesen ist schließlich immer die Steigerung der Geschwindigkeit der ganzen Transporttätigkeit, im besonderen der Fahrgeschwindigkeit. In dieser Hinsicht sind nun neuere Versuche der preußischen Bahnverwaltung von Bedeutung gewesen, welche Geschwindigkeit bei dem jetzigen Zustande des Oberbaues noch ohne Gefahr angenommen werden könnte, vorausgesetzt, daß dem rollenden Material die dafür nötigen Eigenschaften gegeben werden. Die mit sehr schweren, besonders hergestellten Lokomotiven (55 bis 66 t) unternommenen Versuche haben als obere, noch wohl zu erreichende Grenze etwa 120 km in der Stunde festgesetzt. Diese Steigerung der bisherigen größten Geschwindigkeit um etwa ein Drittel mag manchem Geschwindigkeitfanatiker gering erscheinen, der nach den Versuchsfahrten mit elektrischen Schnellwagen bei Zossen schon die baldige Annahme von 200 km erwartete, und vielleicht noch einige mehr. Er braucht aber nur einige Beobachtungen, innerhalb und außerhalb des Zuges, an langsameren und schnellen Personenzügen anzustellen, um inne zu werden, was es mit der Steigerung der Fahrgeschwindigkeit um ein Drittel auf sich hat.

Unsere Erörterungen der wichtigsten Erscheinungen des Eisenbahnwesens haben sich fast ausschließlich auf Hauptbahnen bezogen. Sie gelten aber grundsätzlich natürlich auch für Nebenbahnen, Schmalspurbahnen, bis zu den einfachsten kurzen Industriebahnen. Nur die einzelnen Werte ändern sich mit dem Charakter der Bahn, die verschiedenen Punkte gewinnen an Wichtigkeit, die Grundlagen ihrer Beurteilung bleiben immer dieselben.

*

III.

Während der Betrieb der im engeren Sinne als Eisenbahnen bezeichneten Schienenwege recht dem Wesen der Dampfmaschine entsprochen hat, die eigentliche Dampflokomotive deshalb bis-

her auch ohne ernsthaften Mitbewerber geblieben war, mußte lange Zeit nach einem geeigneten Motor für die Straßenbahnen gesucht werden, die seit den 60er Jahren dem steigenden Lokalverkehr der Städte nutzbar gemacht wurden, zunächst immer als Pferdebahnen. Nach der Art des Entstehens und des Betriebes kann man die Pferdebahnen als Omnibuslinien auf Schienen kennzeichnen, denn in der Tat ist die ungleich größere Transportfähigkeit bei gleichen Zugmitteln der Anstoß zur Entwicklung der Straßenbahnen gewesen. Unter diesen Verhältnissen konnten nur von den Personenwagen selbst getragene Motoren in Frage kommen, nachdem der Wunsch nach Steigerung der Leistungsfähigkeit durch Ersatz der Zugpferde lebhaft genug geworden war. In geeigneten Fällen, im besonderen bei längeren Steigungen auf an sich nicht zu langen Strecken, die den Betrieb mit Pferden von vornherein zu sehr erschwerten, hat man in Amerika auf das bekannte System der Kabelbahnen mit feststehenden Motoren zurückgegriffen und es zweckmäßig ausgestaltet. Doch haben diese Anlagen den Charakter der Ausnahmen behalten und sind nicht von allgemeiner Bedeutung geworden. Die Dampfmaschine aber auf den Personenwagen zu verpflanzen, hat bei uns wenigstens auch nicht zu durchschlagendem Erfolge geführt, so wenig wie die Dampfmaschine für Automobilen aufgekommen ist. Der Raumbedarf der Dampfmaschine und ihre Wartung hat sich immer als zu umständlich erwiesen. Der Betrieb stark benutzter Straßenbahnen erfordert aber den denkbar geringsten Aufwand an Wartung und größtmögliche Zuverlässigkeit der Motoren, da die Störung eines einzelnen Wagens immer eine mehr oder minder umfangreiche Störung der Linie überhaupt nach sich zieht. Deshalb haben sich auch andere Wärmemotoren keinen allgemeineren Eingang bei Straßenbahnen verschafft. Bekannt sind besonders geworden die Versuche mit Gasmotoren, die den erforderlichen Vorrat an Gas in verdichtetem Zustande mit sich führen, wobei ebenfalls der stetig umlaufende Gasmotor durch stellbare Getriebe mit den Wagenachsen gekuppelt ist. Der Betrieb eines Gasmotors ist ja im ganzen etwas sicherer, als der eines Benzinmotors, infolge Wegfalles des empfindlichen Vergasers, und deshalb konnte wohl den Gasmotoren in der neuen Anwendung ein größeres Vertrauen entgegengebracht werden. Es ist auch nicht zu leugnen, daß der Gasmotorantrieb

für geringen Verkehr auf längeren Strecken gegenüber dem elektrischen infolge Fehlens der Zentrale wohl wirtschaftlich sein kann. Den vollen Anforderungen des dichten Verkehrs kann er aber nicht genügen, für diesen Zweck kommt heute nur der Elektromotor in Betracht.

*

Der Gedanke, Fuhrwerke elektrisch zu betreiben, ist fast so alt, wie der Elektromotor selbst. Die großen Hoffnungen, die man auf den von galvanischen Elementen gespeisten neuen Motor setzte, hatten ja schon Jacobi in Petersburg veranlaßt, auf der Newa ein Boot elektrisch anzutreiben, und der trotz aller Mißerfolge lange unerschütterte Glaube an die Wirtschaftlichkeit des Betriebes mit Primärelementen hat auch Vorschläge zu elektrischen Lokomotiven gezeitigt, von denen allerdings keiner auch nur zu einem Versuche geführt hat. Aeltere Lehrbücher der Physik geben Beispiele davon. Auch als die Hoffnungen, auf diesem Wege zu brauchbaren Ergebnissen zu kommen, geschwunden und die Gründe für den Mißerfolg erkannt waren, blieb immer noch ein Rest des anfangs bis zur Begeisterung gesteigerten Vertrauens erhalten, und führte zu bescheideneren, auch nicht uninteressanten, jetzt aber leicht als irrtümlich zu erkennenden Projekten. So wollte man elektrische Briefposten einrichten, bestehend in kleinen eisernen Wagen, die gleichzeitig auch die Primär-Elemente tragen, im ganzen aber als Magnetanker dienen sollten, und die absatzweise Antrieb durch Drahtspulen zu erhalten hatten, deren Erregung in den geeigneten Wagenstellungen durch die mitgeführten Elemente zu besorgen war. Trotzdem doch die Uebertragung der Energie durch die elektromagnetischen Telegraphen lange bekannt war, ebenso der Elektromotor an sich, wenn auch in unvollkommener Form, und trotzdem in Fällen wie dem angedeuteten mit einem größeren Aufwande an Leitungsmaterial gerechnet wurde, hat doch der Gedanke an Energieübertragung in einem den Telegraphen betreffenden Maßstabe fern gelegen, so leicht man sich auch jetzt vorstellen könnte, daß eigentlich auf einem Wege, wie er durch das obige Beispiel gewiesen wurde, die elektrische Energie-



Figur 124: Erste elektrische Bahn 1879.

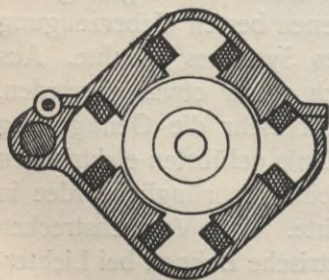
übertragung folgerichtig hätte entstehen müssen. Solche Betrachtungen sind recht lehrreich, denn sie zeigen, wie die Folgerichtigkeit, so wenig sie selbst zweifelhaft sein kann, sich nicht auf dem hinterher scheinbar kürzesten Wege vollzieht. Elektromotor, Leitung und die mechanisch betätigte Erzeugermaschine waren lange bekannt, ehe der jetzt scheinbar zum Greifen nahe liegende Gedanke zum Durchbruche gelangte, mit ihnen eine Energieübertragung zu bewerkstelligen. Erst die Empfindung von der großen Wirkung der im Grunde bekannten Mittel konnte den Gedanken reifen lassen, und es ist deshalb nicht zu verwundern, daß der Erfinder der selbsterregenden Dynamo-Maschine, der zuerst den Gedanken der Erzeugung der Elektrizität in größtem Maßstabe faßte, auch der Schöpfer der elektrischen Bahnen wurde.

Die erste wirkliche elektrische Eisenbahn führte Werner Siemens im Jahre 1879 auf der Berliner Gewerbeausstellung vor, eine Modellbahn von nur 300 m Länge, aber doch geeignet, kleine Personenwagen zu befördern und damit vollgültigen Beweis für die Möglichkeit des Systemes erbringend (Figur 124). (Siehe Tafel V.) Die kleine Lokomotive, die von der Firma Siemens & Halske noch jetzt pietätvoll bewahrt wird, erhielt den Strom von den Laufschiene und einer von diesen isolierten Mittelschiene. Sie enthielt einen Gleichstrom-Serienmotor und somit alle Elemente, die bei den heutigen elektrischen Straßenbahnen zur Verwendung kommen. Der sichtliche Erfolg dieses ersten Versuches hat in dem Erfinder schnell das System der elektrischen Bahn ausreifen lassen. Wer seinen Vortrag im Jahre 1880 in der Polytechnischen Gesellschaft zu Berlin gehört hat, wird nicht darüber im Zweifel gewesen sein, daß die zunächst entworfene Gerüstbahn von Nord nach Süd durch Berlin auf sorgfältig vorbereiteten Unterlagen und der gewonnenen besten Ueberzeugung von der praktischen Brauchbarkeit des Systemes beruhte. Aus diesem Projekte ist weder damals noch später etwas geworden, und leider hat auch der Erfinder nicht mehr die Genugtuung gehabt, die Entstehung der in anderer Linie geführten elektrischen Hochbahn in Berlin zu erleben, die seine ursprüngliche Idee in noch größerem Maßstabe verwirklichte. Als Versuchstrecken wurden aber schon 1881 und 1882 elektrische Bahnen bei Lichterfelde und zwischen Berlin und Spandau in Betrieb genommen,

denen 1884 die schon vollständig ausgebildete Bahn Offenbach—Frankfurt a. M. folgte.

Wie immer bei jungen Erfindungen zeigten sich auch bei den ersten elektrischen Bahnen Schwierigkeiten, an die vorher nicht gedacht war, und umgekehrt bereiteten Einzelheiten Sorge, die sich hinterher als die geringsten Schwierigkeiten erwiesen. So hat die Stromabnahme von der Mittelschiene, die zunächst noch bei der Lichterfelder Bahn zur Anwendung kam, und von dem Fahrdrahte, mit dem schon die zweite Versuchstrecke ausgerüstet war, umständliche Versuche veranlaßt, da die einfache Berührung des Leiters, die sich später als vollständig genügend erwies, durchaus nicht zuverlässig erschien. Vielfache Berührung der Stromleiter durch bürstenartige Schleifstücke wurde für notwendig gehalten, die auf dem freien Fahrdrahte von kleinen Kontaktwägelchen getragen wurden, oder wie Weberschiffchen in röhrenförmigen geschlitzten Leitern entlang glitten. Ein Glück für die elektrischen Bahnen, daß die einfache Berührung durch die Kontaktrolle oder den Kontaktbügel zum Stromabnehmen ausreicht, denn die Kreuzungen der Leiter müßten sonst viel verwickelter werden.

Trotz der vielversprechenden Anfänge geschah bis zur Mitte der 80er Jahre im ganzen doch nur wenig für die elektrischen Bahnen, die von da an hauptsächlich in Amerika sich ausbreiteten, so daß dort im Jahre 95 etwa 13 000 km mit über 20 000 Motorwagen befahren wurden. Zur selben Zeit hatte Deutschland erst etwa 350 km elektrischer Bahnstrecken mit 550 Motorwagen. Wie seitdem eine ungemein schnelle Entwicklung eingesetzt hat, ist bekannt, die elektrische Straßenbahn gehört nun schon zu den alltäglichen Erscheinungen.

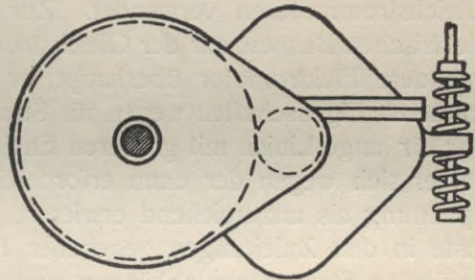


Figur 125.

Zum Einbau in den Wagen hat der jetzt meist 4 polige Elektromotor eine besondere Form erhalten, die sich durch ein allseitig geschlossenes, als Joch für die Feldmagnete dienendes Gehäuse kennzeichnet (Figur 125, 126). Des geringeren Gewichtes wegen wird das Gehäuse immer in Stahlguß hergestellt. Die Zugänglichkeit er-

fordert natürlich eine Teilung des Gehäuses, die meist in Form einer nahe der Mitte durchgehenden Teilfuge mit scharnierartiger Verbindung der Hälften ausgeführt wird. Eine unmittelbare Verbindung des Ankers mit der von ihm angetriebenen Achse, also die konzentrische Anordnung beider, würde der Einfachheit wegen wohl erwünscht sein, ist aber wenigstens bei den Straßenbahnwagen, nicht erreichbar, da die zur günstigen Ausnutzung des Elektromotors erforderliche Umdrehzahl zu groß ist. Zwischen Ankerwelle und Wagenachse ist deshalb ein Zahnradpaar zur Uebersetzung eingeschaltet, im

Verhältnisse von 1 : 3 bis 1 : 5, und durch eine flache, in der Seitenansicht annähernd eiförmige Kapsel (Figur 126) ist auch das Zahnradgetriebe vollständig gegen Staub und Schmutz geschützt. Um nun ferner die Stöße der Wagenachse auf den Motor möglichst zu mildern, wird dessen Gehäuse teil-



Figur 126.

weise federnd aufgehängt. Diese gebräuchlichste Anordnung wirkt gleichzeitig günstig auf das elastische Anfahren. Denn indem der Motor eine Drehkraft auf die Achse ausübt, will er sich selbst je nach der Drehrichtung heben oder senken, die Aufhängefedern werden deshalb etwas gedehnt oder zusammengedrückt und mildern den Stoß der Zahnräder aufeinander. Neuerdings sind übrigens auch Bestrebungen aufgetaucht, das größere Zahnrad oder die Laufräder selbst nicht starr, sondern federnd mit der Achse zu verbinden, um so eine vermehrte Sicherheit gegen zu hartes Anfahren zu erreichen.

Die einfachste Form des elektrischen Straßenbahnwagens zeigt der kleinere, zweiachsige mit nur einem Motor. Größere Wagen erhalten zwei Motoren, um die Zugkraft zu verteilen, bei der beschränkten Höhe des Wagengestelles mit kleineren Motoren auszukommen, und im Interesse wirtschaftlicher Regelung der Geschwindigkeit, wie nachher erläutert werden wird. Die großen langen Wagen für dichten Verkehr machen dabei Gebrauch von der besonderen Bauart mit Drehgestellen, ähnlich

dem Drehgestell mancher Lokomotiven (Figur 113). Der Wagenkasten ruht auf zwei selbständigen kleinen zweiachsigen Unterwagen mit je einem Motor und ist mit ihnen nur durch senkrechte Gelenkbolzen verbunden. Die ganze Last verteilt sich also auf vier Achsen, der Wagen läßt den ganzen Wagenkasten für die Fahrgäste frei. Nur auf der vorderen und hinteren Plattform trägt er die wenig Platz beanspruchenden Fahrschalter, während in den jetzt selteneren Fällen des Betriebes durch mitgeführte Akkumulatoren diese unter den Sitzen im Wagen untergebracht werden.

Für Straßenbahnen werden bis jetzt fast ausschließlich Gleichstrommotoren verwendet. Zur Zeit des Entstehens der elektrischen Bahnen war der Gleichstrommotor der einzige durchgebildete Elektromotor überhaupt, er hat sich aber seiner besonderen Eigenschaften wegen für Straßenbahnen behauptet und nur für lange Linien mit größeren Entfernungen von der Zentrale hat er sich wegen der dann erforderlichen höheren elektrischen Spannung als unzureichend erwiesen. Wir wissen, daß die Verluste in den Zuleitungen gegebener Form und Länge von der geführten Stromstärke abhängen und nur eingeschränkt werden können durch Erhöhung der Spannung, will man nicht durch übermäßige Vergrößerung der Leiterquerschnitte die Anlage unwirtschaftlich machen. Für Straßenbahnnetze, die enger um günstig gelegene Zentralen gruppiert sind, hat sich nun allgemein eine Spannung von 500 Volt als zweckmäßig erwiesen. Für diese Spannung sind die Gleichstrommotoren auch ohne Schwierigkeit herzustellen, sie ist einerseits hoch genug, um die Leitungsverluste bei geringem Querschnitte des Fahrdrabtes in mäßigen Grenzen zu halten, andererseits nicht zu hoch, um erhebliche Gefahren durch freie Leitungen herbeizuführen, oder deren Isolation unter den durch die Verhältnisse in verkehrreichen Straßen gegebenen Bedingungen zu sehr zu erschweren.

*

In Anlehnung an das früher über Gleichstrommotoren Mitgeteilte betrachten wir nun ihre Eigenschaften in der Verwendung für Bahnzwecke. Die Geschwindigkeit des Gleichstrommotors

ist immer begrenzt durch die Stärke des induzierenden Feldes. Denn er kann ja höchstens eine Geschwindigkeit annehmen, bei der die induzierte elektromotorische Gegenkraft gleich der Klemmenspannung wird. Beim Nebenschlußmotor ist nun das induzierende Feld konstant, wenn abgesehen wird von der mäßigen Schwächung des Feldes infolge der Ankerrückwirkung. Deshalb ist die Geschwindigkeit des Nebenschlußmotors nahezu konstant, vom Leerlaufe bis zur vollen Leistung nimmt sie nur um wenige Prozente ab, entsprechend dem mit der Stromstärke steigenden Spannungsverluste im Anker. Also, wenn der Nebenschlußmotor als Triebmotor eines elektrischen Wagens sich selbst überlassen wird, so sucht er die Geschwindigkeit des Wagens unter allen Belastungen und Widerständen gleich zu erhalten. Auf Strecken größeren Widerstandes, im besonderen auf Steigungen, sinkt die Wagengeschwindigkeit nur unbedeutend, der Motor nimmt aber nach Maßgabe des vermehrten Widerstandes mehr Strom von der Zentrale auf, denn einem bestimmten Widerstande des Wagens muß eine bestimmte Drehkraft des Motors entsprechen, diese aber ist, bei konstantem induzierendem Felde, einfach proportional der Stromstärke im Anker. Erfordert der Wagen auf einer sonst geneigten Strecke gar keinen Antrieb vom Motor, so ist dessen Stromstärke gleich Null, auf einer stärker geneigten Strecke aber, die ein Bremsen des abwärts laufenden Wagens nötig macht, dreht sich der Strom im Anker um, der Motor erhält keinen Strom mehr, sondern entsendet selbst solchen in das Netz, er ist zum Generator geworden, der angetrieben wird von dem vorher gehobenen Gewichte des Wagens. Diese Eigenschaft des Nebenschlußmotors, bei Erhöhung der Geschwindigkeit seinen Arbeitsinn umzukehren, haben wir früher eingehend betrachtet, auch die Analogie des unterschlächtigen Wasserrades herangezogen, das als Motor arbeitet, wenn seine Umfangsgeschwindigkeit kleiner ist als die Fließgeschwindigkeit des Wassers, im andern Falle aber, wenn er seinerseits angetrieben wird, das zufließende Wasser beschleunigt, also ein Wasserheber ist. Infolge dieser Eigenschaft des Nebenschlußmotors kann er das ihm auf Steigungen zuzuführende, zum Heben des Wagens verwendete Mehr an elektrischer Leistung auf Senkungen selbsttätig wieder zurückerstatten, oder die zurzeit auf der Strecke laufenden Wagen sind gewissermaßen insofern unter sich gekuppelt, als der ab-

wärts fahrende Wagen seine Generatorleistung den aufwärts fahrenden zusendet.

Solche Fälle indessen, in denen der Wiedergewinn von Leistung eine erhebliche Rolle spielt, sind auf Linien mit besonders starken und langen Steigungen beschränkt, im allgemeinen kommt die an sich bestechende Eigenschaft des Nebenschlußmotors, die selbsttätige Rückgabe von Leistung, wenig zur Geltung. Die selbsttätige Erhaltung nahezu gleicher Geschwindigkeit bei verschiedenem Widerstande der Bahn erscheint aber für den Betrieb keineswegs als Vorteil, denn sie kann zu zeitweise übermäßiger Belastung der Zentrale führen, während die Ueberwindung stärkerer Widerstände mit geringerer Geschwindigkeit meist zulässig sein wird und eine gleichmäßigere Beanspruchung der Zentrale im Gefolge hat. Der Nebenschlußmotor dient deshalb nur in besonderen Fällen als Bahnmotor, als dessen eigentlicher Repräsentant der Serienmotor zu betrachten ist. Bekanntlich ist auch die Feldwicklung des Serienmotors wegen des großen Querschnittes der Drähte leichter herzustellen.

Der Serienmotor hat kein konstantes induzierendes Feld und deshalb auch keine konstante Geschwindigkeit. Wenn sich bei einem großen Widerstande des Wagens eine entsprechende Geschwindigkeit eingestellt hat, so bewirkt zwar auch eine Vergrößerung des Widerstandes selbsttätig eine Erhöhung der Stromstärke, aber mit der Stromstärke wächst auch die induzierende Feldstärke, die dadurch erhöhte elektromotorische Gegenkraft schränkt die Zunahme der Stromstärke ein, während die Geschwindigkeit abnimmt. Die Strecke erhöhten Widerstandes wird also unter geringerer Erhöhung der Stromstärke als beim Nebenschlußmotor durchfahren. Es tritt hier aber die günstige Eigenschaft des Serienmotors hervor, die besonders für das Anfahren wichtig ist, nämlich die Zunahme der Drehkraft in höherem Verhältnisse als die Stromstärke. Denn diese bewirkt auch eine Steigerung der induzierenden Feldstärke, vergrößert also gleichzeitig die beiden Faktoren, die für die Drehkraft maßgebend sind, derart, daß beispielsweise die Drehkraft durch verdoppelte Stromstärke vervierfacht wird, solange das Feldeisen wenig gesättigt ist, also proportional der Stromstärke magnetisiert wird. Dieses Anpassen der Geschwindigkeit des Serienmotors an den zu überwindenden Widerstand ergibt ohne alle weiteren Zugaben

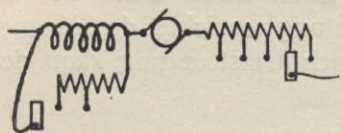
eine selbsttätige Regelung, die annähernd der idealen Regelung entspricht, die wir bei den Automobilen behandelten. Der Serienmotor wird dagegen nicht wie der Nebenschlußmotor von selbst zu einem Generator, wenn er unter Beibehalt seiner Drehrichtung mit höherer Geschwindigkeit angetrieben wird. Denn der induzierte Strom entgegengesetzter Richtung vernichtet den Magnetismus der Feldmagnete, und nur nach Umsteuerung kann der Serienmotor als Generator wirken.

*

Die vom Wagenführer vorzunehmende Regelung der Geschwindigkeit kann beim Bahnmotor, wie beim Gleichstrommotor überhaupt, immer durch Vorschaltwiderstände für den Ankerstrom erfolgen, wir wissen aber auch, daß diese Regelungweise in allen Fällen unwirtschaftlich ist, denn sie stellt eine Verschwendung elektrischer Leistung durch die in den Widerständen entwickelte Wärme dar. Von dieser einfachsten Regelung dürfen deshalb Bahnmotoren nur einen beschränkten Gebrauch machen. Der Gleichstrommotor bietet aber verschiedene andere Mittel zur wirtschaftlichen Regelung seiner Geschwindigkeit, deren wichtigste wir in Anwendung auf den Serienmotor besprechen wollen. Sie gelten übrigens sinngemäß auch für den Nebenschlußmotor.

Das Vorschalten von Widerstandsstufen vor den Anker bedeutet, wie wir früher gesehen haben, das Verringern der Klemmenspannung des Motors bei konstanter Netzspannung. Bei gewissem Widerstande des rollenden Wagens wird durch Anwendung von mehr oder weniger Vorschaltstufen die Geschwindigkeit des Wagens veränderlich, die Stromstärke bleibt aber konstant. Denn es muß sich immer die zur Ueberwindung des Wagenwiderstandes erforderliche Drehkraft einstellen, die eine bestimmte Stromstärke verlangt, während bei geringerer Klemmenspannung schon eine geringere Geschwindigkeit des Ankers genügt, um die der Klemmenspannung nahezu gleiche elektromotorische Gegenkraft zu erzeugen. Ihrer Unwirtschaftlichkeit wegen werden aber die Vorschaltwiderstände tunlichst nur zum Anfahren verwendet, während die Regelung der Geschwindigkeit in der Fahrt viel besser durch Widerstände parallel zur Feld-

wicklung bewirkt wird. Indem dadurch ein Teil des Ankerstromes an der Feldwicklung vorbei geleitet wird, ergibt sich infolge der Feldschwächung eine Erhöhung der Geschwindigkeit, und diese kann ebenfalls in mehreren Stufen erfolgen. Das ein-



Figur 127.

fachste Schaltungschema für den einzelnen Motor zeigt Figur 127, wo rechts die Vorschaltwiderstände angedeutet sind, links unter der Feldwicklung die parallel zu ihr liegenden Widerstände. Da der

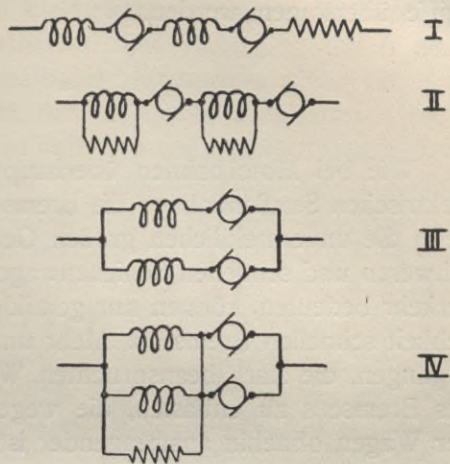
Ankerstrom sich bei Benutzung der Parallel-Widerstände auf diese und die Feldwicklung verteilt, so wird der Leitungswiderstand im ganzen kleiner, es wird also weniger elektrische Leistung verbraucht, als in der Feldwicklung allein, das Regelungsmittel ist mithin hervorragend wirtschaftlich. Seine Wirksamkeit ist leicht zu schätzen nach dem Grade der erzielten Feldschwächung. Wäre beispielweise der parallelgeschaltete Widerstand gleich dem der Feldwicklung selbst, so würde durch diese nur der halbe Erregerstrom fließen, je nach der Sättigung des Feldeisens also die Feldstärke bis zur Hälfte abnehmen, die Ankergeschwindigkeit unter sonst gleichen Umständen bis zur doppelten steigen können.

Bei den jetzt selteneren Akkumulatorwagen kann auch das Anlassen wirtschaftlicher gestaltet werden, als durch Vorschaltwiderstände. Man teilt nämlich die Batterie in eine Anzahl gleich großer Abschnitte, die man zunächst in Parallelschaltung auf den Motor wirken läßt, also mit niedriger Spannung. Mit steigender Geschwindigkeit schaltet man einzelne Abteilungen der Batterie hintereinander, bei voller Geschwindigkeit alle Abstufungen hintereinander. Die Klemmenspannung des Motors wird auf diese Weise stufenweise erhöht.

Die für einen einzelnen Motor anwendbaren Regelungsmittel werden bei zwei in einem Wagen zusammen arbeitenden Motoren vermehrt durch die Möglichkeit, die Motoren selbst hintereinander und parallel zu schalten. Im ersten Falle erhält jeder Motor nur die halbe verfügbare Spannung, entwickelt also nur die halbe Geschwindigkeit, wie unter sonst gleichen Umständen der mit voller Spannung betriebene Motor, während beim Parallelschalten der beiden Motoren der vorige Zustand hergestellt ist. Die Ver-

bindung der früher betrachteten Regelungsmittel mit dieser Umschaltung der Motoren selbst ergaben nun Geschwindigkeitsstufungen nach dem in

Figur 128 dargestellten Schema. In der Anlaßschaltung I sind die Motoren hintereinandergeschaltet, und außerdem mit einem gemeinschaftlichen Vorschaltwiderstand versehen. In II ist dieser abgeschaltet, und parallel zu den Feldwicklungen sind Widerstände gelegt, III zeigt die Motoren parallel geschaltet, IV endlich auch mit einem gemeinschaftlichen, den Feldwicklungen parallelen Widerstande.



Figur 128.

Diese Hauptschaltungen sind in Wirklichkeit noch in Unterstufen zerlegt, wie beispielweise sich II ergibt erst durch Wegnahme des Vorschaltwiderstandes, dann durch Anlegen der Parallelwiderstände, die wieder stufenweise in Wirkung treten können. So und durch angemessene Verwendung von Vorschaltwiderständen verschiedener Größe für die Zwischenstufen ist leicht eine große Reihe von Schaltungen für steigende Geschwindigkeit herzustellen, und die Schwierigkeit beruht nur darin, eine richtige Auswahl ohne zu starke Sprünge zu treffen, damit der Fahrschalter nicht zu verwickelt wird. Denn alle die Schaltungen werden durch die Schaltwalze im Fahrschalter ausgeführt, auf der Kontaktstücke von solcher Ausdehnung isoliert befestigt sind, daß durch Vermittlung einer entsprechenden Zahl feststehender federnder Kontaktfinger jeder Drehung der Schaltkurbel um einen gewissen Winkel eine der aufeinanderfolgenden Schaltungen entsteht, ohne daß Störungen durch die für andere Schaltungen dienenden Kontaktstücke eintreten. Der Entwurf der Schaltungen und der Fahrschalter erfordert deshalb ebensoviel Uebung wie Geduld. Alle Motorwagen müssen selbstverständlich auch rückwärts laufen können,

doch tritt im eigentlichen Betriebe diese Notwendigkeit nur selten ein. Diese Umsteuerung kann deshalb zugunsten Vereinfachung des Fahrschalters einem eigenen Schalter mit gesondertem Handgriffe übertragen werden.

*

Wie bei Motorbahnen überhaupt, so spielen auch bei den elektrischen Straßenbahnen die Bremsen eine sehr wichtige Rolle, denn die unvermeidlichen großen Gefahren, die naturgemäß die schweren und schnellen Schienenwagen für den übrigen Straßenverkehr bedeuten, können nur gemildert werden durch die Möglichkeit schnellen Bremsens. Mehr und mehr ist man dazu übergegangen, die stark beanspruchten Wagenführer von der Arbeit des Bremsens zu entlasten, die wegen des größeren Gewichtes der Wagen ohnehin anstrengender ist, als bei Pferdebahnwagen. Wenn deshalb auch die Handbremse beibehalten wird, als Reserve und auch durch polizeiliche Vorschriften veranlaßt, die der Sicherheit wegen mehrere Bremsen fordern, so kann jetzt doch schon die mechanische Bremse als normal angesehen werden, und ihre Einführung würde sich auch schneller und allgemeiner vollziehen, wäre die Herstellung einer geeigneten einfachen Bremse leichter gewesen. Dieser Teil der Wagenausrüstung bereitet aber bis jetzt immer noch besondere Schwierigkeiten, wenigstens hinsichtlich der erforderlichen Einfachheit und Zuverlässigkeit.

Wie die lokomotiven Wärmemotoren in ihrer Weise, so bietet auch der Elektromotor in sich selbst ein Bremsmittel dar, indem man ihn als Generator arbeiten läßt. Die früher betrachtete Verwendung dieser Eigenschaft zu dem Zwecke, von abwärtsfahrenden Wagen elektrische Leistung an das Netz zurückzugeben, kann noch nicht als Bremsung in dem jetzt gemeinten Sinne bezeichnet werden, weil sie nicht wirksam genug ist und von vornherein an eine höhere Geschwindigkeit gebunden. Wenn man dagegen den Motor über einen regelbaren Widerstand geringer Größe schließt, so arbeitet er als Generator — der Serienmotor muß dazu umgesteuert werden — mit beliebig einstellbarer Stromstärke und entsprechender Bremsleistung. Die sonst in den Brems-

klötzen entstehende Reibungswärme tritt also hier in den elektrischen Leitern als Stromwärme auf. Bedenklich ist bei dieser Bremsung nur die starke Anstrengung des Motors, denn unter Umständen muß er dabei ein Vielfaches seiner normalen Leistung im umgekehrten Sinne aushalten. Die Bremsung durch eine Generatorwirkung wird deshalb im allgemeinen mehr für den Notfall verwendet, nicht für den normalen Fahrdienst. Noch angreifender für den Motor ist natürlich das Bremsen durch Umsteuern und deshalb auch nur als Ausnahmemaßregel zulässig. Ueberhaupt wird immer bevorzugt werden, die Bremsarbeit durch grobe widerstandsfähige Teile ausüben zu lassen, statt durch den empfindlichen Motor, und deshalb würde ja bei einem elektrischen Wagen am nächsten liegen, die Bremsklötze durch kräftige Elektromagnete an die Räder drücken zu lassen, oder Reibscheiben zusammenzupressen. Die Lösung dieser Aufgabe hat aber besondere Schwierigkeiten gemacht. Die Feinfühligkeit der Luftbremse und ihre sanfte Wirkung läßt sich auf einfachem Wege mit Elektromagneten schwer erreichen, außerdem wirkt die elektromagnetische Bremse nicht bei Ausbleiben des Stromes, man müßte denn besondere Sammelzellen zum Betriebe der Bremsen mitführen, ähnlich wie die Westinghousebremsen und andere unter jedem Wagen einen Luftbehälter haben. Diese Schwierigkeiten haben deshalb teilweise zur Annahme von Luftbremsen bei elektrischen Wagen geführt, wiewohl diese den ganzen Fahrapparat auch nicht gerade vereinfachen, da ja jeder Motorwagen mit einem kleinen, von einer Wagenachse getriebenen Kompressor versehen sein muß, außer der eigentlichen Bremse. Die Luftbremsen, möchte man sagen, gehören aber auch nicht auf elektrisch betriebene Wagen, und ihre teilweise Benutzung hier war hauptsächlich eine Folge des Umstandes, daß sie schon in allen Variationen praktisch durchgebildet waren, während die elektrische Bremse sich noch als sprödes Element zeigte. Indessen ist an der späteren ausschließlichen Benutzung der elektrischen Bremsung kaum zu zweifeln. Es liegen auch schon Lösungen der Aufgabe vor, die sich glücklich der Eigenart des elektrischen Bahnbetriebes anschmiegen, und von denen noch als Beispiel eine erwähnt werden mag. Es wird bei dieser eine elektromagnetische Bremse bekannter Art benutzt, etwa in Form von Reibscheiben, die als Elektromagnete ausgebildet sind und durch den

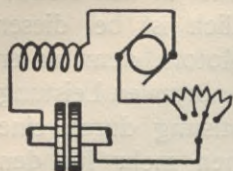


Fig. 129.

Strom gegeneinander gezogen werden (Fig. 129). Der Erregerstrom wird aber nicht dem Netze entnommen, sondern dem zum Generator umgeschalteten Motor. Das ergibt also eine mittelbare Motorbremsung, der größere Teil der Bremsarbeit wird von der besonderen Bremse geleistet, der Motor wird nicht überanstrengt, durch Widerstand-

regelung kann eine beliebige Bremsleistung eingestellt werden. In diesem Sinne ausgebildete Bremsen werden voraussichtlich bald allen Anforderungen genügen.

Wie jeder Elektromotor muß auch der Bahnmotor gegen zu hohe Stromstärke geschützt werden, und ein unentbehrliches Glied der ganzen Ausrüstung sind deshalb die Sicherungen, entweder bestehend in Schmelzstreifen oder in den umständlicheren, aber schneller wirkenden automatischen Ausschaltern. Die Sicherungen haben hier übrigens nicht nur den Motor, sondern auch den Fahrdraht zu schützen. Wenn der Wagen infolge eines über großen Widerstandes zum Stillstande kommt, ohne daß der Wagenführer frühzeitig genug den Strom unterbrechen kann, oder noch mehr, wenn beim Anfahren Kurzschluß entsteht, der Fahrkontakt also vom Fahrdrahte übermäßig starken Strom aufnimmt, so schmilzt zwar der Schmelzstreifen sicher durch, kann aber möglicherweise sekundenlang den Strom aushalten. Diese kurze Zeit kann aber schon genügen, um an der Berührungstelle des Fahrdrahtes eine intensive Hitze zu erzeugen und diesen selbst zu beschädigen. Denn so ausreichend sich auch die immer etwas unvollkommene Berührung des Fahrdrahtes an einer einzigen Stelle praktisch erwiesen hat, so ist doch ein schneller Wechsel der Berührungstelle erforderlich, um sie nicht auf eine unzuträgliche Temperatur kommen zu lassen. Diese Gefahr wird mit guten Automaten besser vermieden, als mit Schmelzsicherungen, die ohnehin nicht so schnell ersetzt werden können, als der Automat wieder eingeschaltet wird, bei dichtem Verkehre auf der Linie also gleich ein Anstauen einer ganzen Reihe von Wagen verursachen kann.

Um das Bild der bis jetzt wichtigsten Anwendung des elektrischen Wagens abzurunden, mögen nur noch kurz die Leitungsnetze und die Bahnzentralen berührt werden.

Der meist 8 mm dicke Fahrdraht von hartgezogenem Kupfer ist gut isoliert aufgehängt und mit dem einen Pole der Zentrale verbunden. Die zweite Stromleitung bilden die nicht isolierten Schienen. Ihr Querschnitt ist so groß, daß sie trotz des kleinen Leitvermögens des Eisens einen wesentlich geringeren Widerstand bilden, als der Fahrdraht selbst; sie müssen aber an den Stößen durch kurze Kupferleiter besonders verbunden werden, da die Schienenlaschen keinen sicheren Kontakt geben. Nur in besonderen Fällen sind für beide Pole Fahrdrähte vorhanden, etwa wenn es sich darum handelt, ein wissenschaftliches Institut, in dem feinere magnetische Messungen angestellt werden, vor den aus den Schienen abirrenden („vagabondierenden“) Strömen zu schützen. Diese unregelmäßigen Ströme, die für den Bahnbetrieb an sich keinen Nachteil vorstellen, denn sie bedeuten ja nur eine teilweise Mitwirkung des Erdbodens beim Stromleiten, geben manchmal auch durch ihre elektrolytische Wirkung auf die Gas- und Wasserleitungen zu Störungen Anlaß und müssen unter Umständen durch besondere Mittel bekämpft werden. In anderen Fällen wird die Oberleitung für kürzere Strecken als unzulässig beanstandet, und dann ersetzt durch in Kanälen geführte Leitungen, die aber immer sehr teuer sind und in sie eintauchende besondere Stromabnehmer an den Wagen nötig machen. Der Wunsch, längere Strecken im Stadtinnern von der Oberleitung frei zu halten, hat früher auch zu Versuchen mit dem sogenannten „gemischtem Systeme“ geführt, bei dem die Wagen teils von der Oberleitung gespeist werden, teils mit Hilfe von Akkumulatoren fahren, die ihrerseits auf den Oberleitungstrecken während der Fahrt aufgeladen werden. Das dadurch vergrößerte Gewicht der Wagen und die Unbequemlichkeit des zu wenig einfachen Betriebes haben aber zur baldigen Aufgabe dieses Systemes geführt.

So wenig aber, wie schon mehrfach erwähnt, die Akkumulatoren sich überhaupt als von dem Wagen mitzuführende Energiespeicher bewährt haben, so sehr erleichtern sie die Anlage und den Betrieb der Zentrale. Die Entnahme des Stromes

aus der Zentrale ist naturgemäß sehr schwankend. Je größer das Netz ist und je dichter der Wagenverkehr, um so mehr gleichen sich freilich die Unterschiede im Bedarfe der einzelnen Wagen gegenseitig aus und werden bedeutungsloser hinsichtlich des gesamten Stromverbrauches. Aber auch unter günstigen Verhältnissen sind plötzliche Steigerungen der Anforderungen an die Zentrale unvermeidlich. Ohne die Mithilfe von Sammlerbatterien müßten also die Maschinen immer für das selten auftretende Maximum der Leistung bestimmt werden. Und wenn sehr große Zentralen auch hinsichtlich des Ausgleiches von vornherein vorteilhafter arbeiten, so hätten sie dagegen in erhöhtem Maße den Nachteil unvollkommener Ausnutzung der Maschinen in den Stunden sehr geringen Verkehrs. Schaltet man aber in der Zentrale der

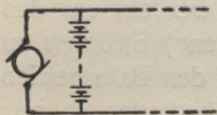


Fig. 130.

oder den Maschinen eine Sammlerbatterie parallel (Figur 130), so erhält man deren früher besprochene ausgleichende Wirkung ohne besondere Regelungsapparate, sobald man nur größere Spannungsschwankungen zuläßt, als bei Lichtzentralen statthaft sind. Denkt man

sich nämlich bei einem gewissen mittleren Bedarfe des Netzes Maschine und Batterie gleichzeitig gerade auf der normalen Spannung, so werden beide Generatoren, Maschine und Batterie, gemeinschaftlich Strom in die Leitung senden. Bei stärkerer Stromentnahme sinkt aber sofort die Spannung der Maschine, erst allmählich dagegen die Spannung der Batterie, folglich wird diese bei längerer Steigerung des Bedarfes einen größeren Teil der Stromlieferung übernehmen. Umgekehrt, sinkt der Strombedarf vorübergehend, so steigt die Maschinenspannung, und nunmehr speist die Maschine allein nicht nur das Netz, sondern ladet auch die Batterie auf. Wegen dieses selbsttätigen Wechsels von Leistungsabgabe und -Aufnahme hat man Batterien dieser Art als „Pufferbatterien“ bezeichnet. Ihre Wirkung wird um so geringere Spannungsschwankungen erfordern, je größer sie sind. Unter Umständen wird man sie groß genug wählen, um während längerer Zeit den Betrieb allein aufrecht erhalten zu können. Wie sehr die Sicherheit des Betriebes überhaupt durch die Sammlerbatterie gewinnt, braucht kaum angedeutet zu werden. — Uebrigens läßt sich die Wirksamkeit der Schaltung leicht durch mechanische Analogien versinnlichen. Als Beispiel dafür kann

schon eine Wasserpumpe mit verhältnismäßig großem Windkessel dienen.

*

Die viel verschlungenen Zweige eines Straßenbahnnetzes machen gelegentlich auf den Beschauer einen verwirrenden Eindruck, und er sucht wohl die Schwierigkeit der Linienführung in der richtigen Wahl der Anschluß- und Verknüpfungspunkte. Die Bedingung aber, die Fahrdrähte und Schienen mit dem richtigen Pole der Zentrale in Verbindung zu bringen, ist immer leicht zu erfüllen, schwierig ist nur, allen Punkten des Netzes annähernd gleiche Spannung zu erhalten. Denkt man sich das ganze Netz ersetzt durch zwei den ganzen Bezirk bedeckende Metallscheiben, deren eine die Oberleitung, deren andere die Schienenleitung darstellt, so würde an jeder Stelle zwischen den beiden Scheiben ein Wagen Anschluß finden können, und alle Wagen würden bei der vorausgesetzten großen Leitfähigkeit der Scheiben dieselbe Spannung erhalten. Nun besteht aber in Wirklichkeit nur ein Netz mit unregelmäßigen riesigen Maschen, und zu den verschiedenen Punkten führt entweder nur ein einzelner Leiter, oder eine Anzahl Leiterzweige, von verhältnismäßig geringem Querschnitte, also nicht zu vernachlässigendem Widerstande. Wenn sich ein einziger Wagen in diesem Netze bewegte, so würde der von ihm entnommene Strom einen verschiedenen Spannungsabfall erleiden, je nach dem wechselnden Widerstande von dem Wagen bis zur Zentrale. Dieser Spannungsabfall würde sich immer genau nach den Kirchhoffschen Gesetzen berechnen lassen, wenn auch oft nur mühsam. Sobald aber mehrere Wagen im Netze fahren, mit voneinander ganz unabhängigen Stellungen, so wird offenbar die Berechnung des Spannungsabfalles viel verwickelter und auch unbestimmt, da es sich ja nicht um eine einzelne Konfiguration der Wagenstellungen handelt, sondern um unendlich viele. Noch mehr hört natürlich die Rechnung auf genauer Grundlage auf, wenn alle gleichzeitig verkehrenden Wagen eines größeren Netzes in Betracht gezogen werden. Es lassen sich dann aber immer noch unter Annahme wahrscheinlicher Wagenstellungen und unter Benutzung besonderer Rechenmethoden die Leitungstrecken ermitteln, auf denen ein zu

großer mittlerer Spannungsabfall zu erwarten ist, und diesen Strecken wird der Strom noch durch besondere, sogenannte Speiseleitungen zugeführt. In dieser Weise ist es möglich, die Spannungsschwankungen im Netze in zulässigen Grenzen zu halten, wie zum gleichmäßigen Betriebe der für die normale Spannung gewickelten Motoren erforderlich ist. Daß trotzdem nicht unbedeutende Spannungsschwankungen im Netze vorkommen, kann man leicht an der wechselnden Helligkeit der Glühlampen im Wagen beobachten, die natürlich ebenfalls durch die Unterschiede der Spannung beeinflußt werden.

*

Die elektrischen Straßenbahnen haben sich in wenigen Jahren ihr Gebiet erobert und müssen jetzt als die Motorstraßenbahnen schlechthin bezeichnet werden. Die Hoffnungen und Bestrebungen der Elektrotechnik gehen aber bekanntlich weit darüber hinaus und zielen auf den elektrischen Betrieb auch der Vollbahnen ab. Als ein Mittelding können die Stadtbahnen angesehen werden, d. h. die Bahnstrecken von einigen Kilometern Länge mit eigenem Bahnkörper, wie sie Werner Siemens schon 1880 projektierte, und für die ein Beispiel durch die Berliner Hochbahn gegeben ist. Grundsätzliche technische Schwierigkeiten bieten diese Bahnen bei ihrer geringen Länge nicht mehr. Wo aber längere Strecken in Frage kommen, ist die Erhöhung der Fahrspannung eine unabwiesbare Notwendigkeit, um den Leiterquerschnitt klein genug halten zu können und die Leitungsverluste einzuschränken. Es rücken damit die Uebertragungssysteme in den Vordergrund, die hochgespannten Strom verwenden können, also allgemein die Wechselstromsysteme, da die Anwendung hochgespannten Gleichstromes vereinzelt geblieben, für Bahnzwecke auch wenig geeignet ist, weil es immer wünschenswert sein wird, für die Motoren Strom niedrigerer Spannung zu verwenden, die Umwandlung von Gleichstrom in Gleichstrom aber rotierende Umformer erfordert.

Der längst bewährte hochgespannte Drehstrom bot nun zunächst Mittel zum Betriebe längerer Strecken. Er kann an der Bahnlinie entlang geführt, in rotierenden Umformern, die in gewissen Abständen aufgestellt sind, in Gleichstrom mäßiger Span-

nung umgewandelt werden, oder in feststehenden Transformatoren in niedrig gespannten Drehstrom. Im erstern Falle bilden die rotierenden Umformer ein Hemmnis, denn sie stellen ebenso viele, der Wartung bedürftige kleinere Bahnzentralen vor, dagegen kommt zum Betriebe der Wagen selbst der Gleichstrommotor mit seiner großen und wirtschaftlichen Regelungsfähigkeit zur Anwendung. Beim zweiten Systeme mit der einfacheren Umwandlung in niedrigere Spannung wird dem Wagen wieder Drehstrom zugeführt, der an sich weniger für Bahnzwecke geeignet ist, auch wenigstens zweier Oberleitungen bedarf, während die dritte Leitung durch die Schienen übernommen werden kann. Eine andere Möglichkeit, hochgespannten Drehstrom zu benutzen, hat zuerst die Firma Siemens & Halske gezeigt, indem sie auf Versuchstrecken Drehstrom von 10 000 Volt Spannung unmittelbar dem Wagen zuführte, die Umwandlung in niedrigere Spannung zum Betriebe der Motoren in Transformatoren auf den Wagen selbst vornahm. Mit diesem Systeme wurden die in weitesten Kreisen bekannt gewordenen Versuchsfahrten der Studiengesellschaft auf der Strecke Marienfelde-Zossen ausgeführt, die nicht nur für das System selbst, sondern auch für die Steigerung der Geschwindigkeit Erfahrungen liefern sollten. Bekanntlich wurden sowohl von dem Versuchswagen von Siemens & Halske wie von dem der Allg. Elektr.-Ges. Geschwindigkeiten von mehr als 200 km in der Stunde erzielt, also mehr als die doppelte der bis dahin von Dampflokomotiven erhaltenen Geschwindigkeit, freilich unter sehr großem Aufwande von Leistung. Die wertvollen Erfahrungen, die bei den Versuchen gewonnen wurden, haben aber auch auf den Bau von Dampflokomotiven zurückgewirkt und Anlaß zu Versuchen gegeben, die jedenfalls die Möglichkeit dargetan haben, auch die Geschwindigkeit der Dampfbahnen beträchtlich zu steigern.

*

Jedenfalls hat der elektrische Betrieb, nachdem er zunächst nur eine Ergänzung des Dampfbetriebes gewesen war, angefangen, diesem ein Mitbewerber zu werden. Einmal aber wollten sich die beiden sonst nicht zusammen stimmenden Brüder zu gemeinsamem Tun vereinigen und zwar in der Lokomotive des

französischen Ingenieurs Heilmann. Der Grundgedanke Heilmanns war zuerst, die ziehende Lokomotive ganz aufzugeben und aus ihr eine fahrende Bahnzentrale zu machen, die den Zug sozusagen nur begleitet und den Strom erzeugt für die sämtlich als Motorwagen ausgebildeten Fahrzeuge. Die ganze vom Zuge geführte Last wäre damit als Adhäsionsgewicht nutzbar gemacht worden, und es liegt auf der Hand, wie auf diese Weise ganz andere Bedingungen für den Bahnbetrieb geschaffen worden wären, namentlich hinsichtlich der Steigungen. Das System ähnelt gewissermaßen dem Schleppzuge des Obersten Krebs, bei dem ebenfalls jeder Wagen durch seine eigenen Achsen Antrieb erhält. Leider stellte sich aber bald heraus, daß der Plan an den Kosten der Einrichtung scheitern mußte. Heilmann hat sich deshalb begnügt, nur die Lokomotive selbst als eine Verbindung der elektrischen Zentrale mit dem elektrischen Motorwagen auszubilden, also die Dampfmaschine zum Antriebe einer Dynamomaschine zu benutzen, die zum Speisen der Gleichstrommotoren an den Lokomotivachsen diene. Die Motoren erhalten bei dieser Zusammenstellung eine erhöhte Regelungsfähigkeit, denn es ist leicht, die primäre Dynamomaschine mit verschiedener Spannung arbeiten zu lassen, die Motorgeschwindigkeit also auch mit diesem Mittel zu beherrschen. Es sind auch einige Lokomotiven dieses Systems in ernsthaften Versuch genommen, mit dem Aufgeben des Grundgedankens war aber doch der wirksamste Anreiz gefallen, die Lokomotiven waren auch wesentlich teurer, als die gewöhnlichen Dampflokomotiven und ein nachhaltiger Erfolg des Systems kann kaum noch erwartet werden, trotz der großen Vorzüge in mechanischer Hinsicht, die sich aus dem Fehlen der hin- und hergehenden Massen in dem Antriebe der Achsen ergibt.

Welchen Einfluß der Elektromotor auf die Entwicklung der Vollbahnen ausüben wird, läßt sich bis jetzt nicht entfernt voraussehen. Als sicher kann man wohl annehmen, daß kürzere Strecken allmählich den elektrischen Betrieb annehmen werden. Ob die Erwartungen der Elektrotechnik darüber hinaus sich erfüllen werden, dürfte wesentlich davon abhängen, ob neue Mittel geschaffen werden, die dem Elektromotor einen entscheidenden Vorsprung geben. Augenblicklich hat sich das Interesse der Bahnelektriker besonders der Ausbildung des Einphasen-Motors zu-

gewendet, um den Vorzug des Gleichstrommotors — leichte Regelung und höchstens zwei Fahrdrähte — mit der Möglichkeit der einfachen Umwandlung von Hochspannung in Niederspannung zu vereinigen. Da der Einphasen-Kollektormotor in seinem Wesen eigentlich ein Gleichstrommotor ist, so dürfte dieser allgemein auch für später die meiste Aussicht als Bahnmotor behalten.

Vom Schiffswesen

Wie unwissenschaftlich es in den Anfängen jeder Technik zugeht, das kann man schauernd am Schiffswesen sehen. Lange ehe Archimedes erklärt hatte, warum eigentlich ein Körper schwimme, hatte der Mensch sich einem Baumstamme oder einem Flosse anvertraut, die Phönizier, Griechen und Römer fuhren mit ihren vielrudrigen Schiffen über See und lieferten sich Seeschlachten, ohne eine Ahnung vom Metazentrum zu haben. Die Wikinger bauten schon vor 1000 Jahren ihre großen Boote von so schöner Form, daß mancher heutige Bootbauer davon lernen kann, und ob Kolumbus eine richtige Vorstellung von den Stabilitätsverhältnissen seiner Karavellen gehabt hat, ist zu bezweifeln. Die großen Schiffe, mit denen de Ruyter und Nelson ihre Schlachten schlugen, waren mit sehr wenig Wissenschaft gebaut, wenn man nach Laienart mit technischer Wissenschaft etwas meint, was in mehr oder weniger schwierigen Verhältnissen zum Einmaleins steht und im Gegensatze zum rein Empfindungsgemäßen, was man Kunst nennen mag. Auch spricht der Seemann und der Sportsmann noch heute von einem „schönen“ Schiffe oder Boote und denkt dabei gar nicht an irgend welche Regeln oder Formeln oder wissenschaftlich — in der vulgären Auffassung — ergründbare Eigenschaften, sondern faßt damit sein durch viel Erfahrung gewonnenes, vielleicht auch durch etwas Wissenschaft geläutertes technisch-ästhetisches Empfinden zusammen, das ihm von dem betrachteten Wasserfahrzeuge alle die für seinen Bedarf zweckdienlichen Eigenschaften verspricht. Als dann mit dem Dampfe die Wissenschaft mehr und mehr in die Schiffbaukunst einzog, die trockene Wissenschaft, wie man so gern sagt, die alles berechnet, da war es für eine Weile mit der Kunst vorbei, denn die motorgetriebenen Fahrzeuge konnten einen gefälligen Eindruck, wie das Segelschiff, nicht machen, wollten und sollten es auch gar nicht. Ja oft, wie gelegentlich wohl noch heute,

mag in der Uebergangzeit der schiffbauende Techniker mit einer Art Trotz alle auftretenden ästhetischen Bedenken bekämpft und sich in eine Art Banausentum hineingearbeitet haben, vermeinend, daß nur Berechtigung habe, was sich von allem Empfinden fern hielte.

Heute weiß aber der Einsichtige, daß die Technik keine sogenannte Wissenschaft ist, d. h. nicht eine Menge von Rechnungen nach in Handbüchern gebrauchfertig zusammengestellten Formeln — so etwas ist überhaupt keine „Wissenschaft“ — auch keine freie Kunst, die regellos nur nach dem Empfinden schafft — solche Kunst gibt es gar nicht — sondern eine wissenschaftliche Kunst, ein Schaffen, das wirklich wissenschaftlich ergründete Gesetze kennen und beachten muß, im Verein mit einer Summe von Erfahrungen und in langer Arbeit und Beobachtung unbewußt aufgenommenen, vielleicht gar nicht, vielleicht erst später erklärbarer Gesetze und Beziehungen — mag auch, wie in unsrer differenzierenden Zeit nicht anders zu erwarten, wie aber in Wirklichkeit für jede Kunst und jede Wissenschaft selbstverständlich ist, der visus eruditus dazu gehören, das technische Kunstwerk nach seinem Werte zu würdigen. Verlangt man von jedem Kavalleristen, das Reiterstandbild des Colleone in Venedig schön zu finden, und kann jeder Maler die ästhetische Befriedigung des Physikers über einen aufgedeckten Zusammenhang scheinbar ganz heterogener Erscheinungen empfinden? Zur richtigen Würdigung gehört immer die Kennerschaft, das einseitige Betonen gewisser Elemente des Baues sind Zeichen noch wählender Unreife.

Wie Wissenschaft und Kunst, wenn man beide überhaupt scharf trennen will, und mag man unter Kunst dabei auch nur die niederen Grade der schönen, weil zweckmäßigen Gestaltung verstehen, in der heutigen reiferen Technik zusammengehen, zeigt der ganze Maschinenbau. Heinrich Seydel, früher selbst ein technischer Künstler, hat mal in scherzhafter Uebertreibung gesagt, heute sei nur noch schön etwa eine große Schiffsmaschine, oder so ähnlich. Aber nicht nur der visus eruditus des eigentlichen Fachmannes empfindet die technische Schönheit, sie ist auch in weiteren Kreisen unbewußt wirksam. Wer heute Maschinen nicht nur bauen, sondern auch verkaufen will, weiß recht gut, wie er das schöne Aussehen seiner Erzeugnisse zu berücksichtigen hat, das nicht etwa nur in blanken oder bemalten Flächen be-

stehen darf. Ja es scheint, als wenn der Amerikaner, an urwüchsigeres Schaffen gewöhnt und nicht durch falsche Vorstellungen von vermeintlicher Wissenschaftlichkeit befangen, in all seinem Amerikanismus früher ein Empfinden für die Schönheit der Maschine gehabt hat, trotz vieler Abwege, die an die Künste des Stubenmalers erinnern. Und es kann nicht Zufall sein, daß die schönsten und schnellsten Jachten bis vor wenigen Jahren amerikanischer Abkunft waren. Recht auffällig hat sich in den letzten Jahrzehnten das Zusammengehen von beobachtender und rechnender Wissenschaft mit künstlerischem Empfinden im Brückenbau gezeigt, auffällig deshalb, weil man hier schlechterdings alles der klaren Rechnung zuschieben möchte, und in gewisser Hinsicht auch mit Recht. Aber welcher Abstand in ästhetischer Hinsicht zwischen den meisten älteren Eisenbahnbrücken und den heutigen! Kann ein lebendigeres Beispiel für das tatsächliche Zusammenfallen von wissenschaftlicher Ergründung mit künstlerischer Zusammenfügung gefunden werden? Und was auf der einen Seite der „nur berechnende“ Brückenbau, das zeigt auf der anderen der nach heutigen Begriffen mit den dürftigsten Rechnungen schon früher zu verhältnismäßig hohen Leistungen gelangte Schiffbau. Dort die sichtlich steigende Berücksichtigung des ästhetischen Momentes, hier die umfassende Aufnahme der exakten Methoden, ohne die heutige Schiffbauten überhaupt nicht möglich wären, in beiden Fällen die Vereinigung der beiden scheinbar verschiedenen, im Grunde aber in späterer Zeit wohl zusammenfallenden Betrachtungsweisen zu einer höheren Einheit. Mag dann auch der nie aussterbende alte Seebär, dem die Schifffahrt mit Aufgabe der Leeseegel vor die Hunde gegangen ist, über den Verfall des alten Seemanngeistes jammern, die neue Zeit stellt neue Aufgaben, deren Bewältigung nicht weniger Gemütsfrische verlangt und erzeugt und, richtig verstanden, trotz aller trockenen Rechnungen ebenso den Schiffbauer wie den Seemann befriedigt.

Mit den Grundlagen dieser Rechnungen und vergleichenden Beobachtungen werden sich die folgenden Blätter beschäftigen.

I.

Die Bedingung, daß ein Körper schwimme, hat Archimedes von Syrakus vor mehr als 2000 Jahren in dem Gesetze ausge-

sprochen: Jeder eingetauchte Körper wird im Wasser, oder überhaupt in jeder Flüssigkeit, soviel leichter, als das Flüssigkeitsgewicht beträgt, das er von seiner Stelle verdrängt. Das Gesetz ist leicht zu begründen. Man denke sich in einer ruhenden Flüssigkeit ein gewisses, irgendwie gestaltetes Volumen abgegrenzt. Daß dieses Volumen an seiner Stelle in der Flüssigkeit beharrt und nicht der Schwere folgend sinkt, bedeutet nur, daß es von der übrigen Flüssigkeit getragen wird. Daran wird nichts geändert, wenn das begrenzte Volumen nicht mehr aus Flüssigkeit besteht, sondern etwa aus einer Holzart, die bei gleichem Volumen dasselbe Gewicht wie die umgebende tragende Flüssigkeit hat. Diese übt einen „Auftrieb“ auf den eingetauchten Körper aus, der seiner Schwere gleich ist. Ist der Körper leichter, als dasselbe Volumen Flüssigkeit, so steigt er zur Oberfläche auf, bis sein eingetauchter Teil nur noch soviel Flüssigkeit verdrängt, wie seinem Gewichte entspricht. Ist er schwerer, so sinkt er so weit er kann abwärts, aber sein Gewicht ist um das der verdrängten Flüssigkeit entsprechende verringert. Dabei ist auch gleichgültig, ob der Körper massiv und homogen ist, oder hohl, maßgebend ist immer nur sein Gewicht und sein Volumen. Deshalb kann eine hohle leere Schüssel, oder eine metallene Schale auf Wasser schwimmen, wiewohl sie bei hochkantigem Eintauchen infolge der größeren spezifischen Gewichte ihrer Stoffe sofort untertauchen werden. Daher bleibt ein aus den üblichen leichteren Hölzern gebautes, nicht durch spezifisch schwerere Körper belastetes Schiffsgefäß immer schwimmfähig, auch wenn es ganz voll Wasser geschlagen ist, während ein eisernes unter denselben Verhältnissen sinkt.

Die Frage, ob ein Körper schwimmt, ist also immer leicht zu beurteilen. Es kommt nur darauf an, ob er vor völligem Eintauchen soviel Flüssigkeit verdrängt, wie seinem Gewichte entspricht. Schwerer aber ist zu beurteilen, wie er schwimmt. Ein Brett schwimmt immer auf der flachen Seite, nie auf hoher Kante, so wenig wie sich ein Flaschenkork aufrecht im Wasser hält. Wenn er aber recht gleichmäßig dicht ist, so schwimmt er flach auf dem Wasser, welcher Punkt seines Mantels auch unten oder oben ist. Schneidet man ihn längs seiner Achse durch, so bevorzugt der Halbzylinder wieder bestimmte Stellungen, nämlich die ebene Seite nach unten, oder die gerundete,

und aus jeder anderen Lage, die man ihm gibt, geht er sofort wieder in eine dieser beiden Schwimmlagen über. Der zylindrische flach schwimmende Kork kippt sofort um, wenn man ihm in dem augenblicklichen Scheitel ein ganz kleines Uebergewicht gibt, etwa in Form einer Nadel oder einer Reißzwecke, aber zwei durch Nadeln nebeneinander verbundene gleiche Zylinder vermögen trotz beträchtlichen Uebergewichtes auf der oberen Seite ihre Lage zu erhalten. Es ist sehr nützlich, auch wenn man schon in das Geheimnis des Metazentrums eingedrungen ist, sich durch leichte Körper verschiedener Form Anschauung von ihren Stabilitätverhältnissen zu verschaffen. Auf die Theorie des Metazentrums kommt alles an, denn sie ersetzt, wie jede Wissenschaft, ökonomisch eine Summe von einzelnen Erfahrungen und läßt die besonderen Fälle ohne neue Versuche beurteilen, viele einzelne Erfahrungen und Beobachtungen lassen aber die Theorie erst recht lebendig werden.

Auf jeden schwimmenden Körper wirken zwei Kräfte, die Schwerkraft senkrecht nach unten, und der entgegengesetzte gleiche Auftrieb seitens des Wassers. Beide Kräfte sind aber eigentlich eine Summe von vielen Einzelkräften. Denn auf jeden kleinsten Teil des Körpers wirkt die ihm zukommende Schwerkraft, und ebenso läßt sich der Auftrieb in eine beliebig große Zahl einzelner Auftriebe zerlegt denken, jeder herrührend von der kleinen Wassermenge, die von dem betrachteten Punkte verdrängt wurde. Um nun nicht immer alle die in parallelen Richtungen wirksamen Schwerkraft der kleinsten Körperteile berücksichtigen zu müssen, hat man den Begriff des Schwerpunktes ausgebildet, des Punktes des Körpers nämlich, in dem man sich die ganze Masse des Körpers vereinigt denken kann, ohne an der Gesamtwirkung der Gewichte etwas zu ändern, und dieser Begriff läßt sich ohne weiteres auch auf den Auftrieb übertragen. Da deshalb der Schwerpunkt in den Stabilität-Untersuchungen eine große Rolle spielt, da mit seiner Hilfe die Aufgaben sich erst genügend vereinfachen lassen, so sollen zunächst einige Betrachtungen ihm gelten.

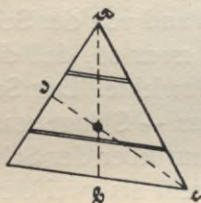
*

Eine gerade dünne gleichmäßige Stange kann auf einer Schneide unter ihrer Mitte balancieren, denn ihr Schwerpunkt

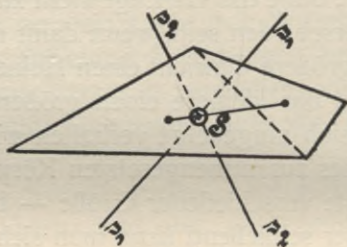
liegt in der Mitte, und die Wirkungen ihrer einzelnen Elemente zu beiden Seiten der Schneide heben sich gerade auf. Für die unterstützende Schneide ist auch gleichgültig, ob die Stange sehr lang und dünn ist, oder kürzer und entsprechend dicker, wenn nur das Gesamtgewicht dasselbe ist. Die Stange kann auch auf der einen Seite die erstere, auf der anderen Seite die zweite Form haben, das Gleichgewicht würde trotzdem gewahrt, wenn nur der Gesamtschwerpunkt über der Schneide bleibt. Auch gleiche Gewichte, an den Enden der gleich langen Stangenseiten angehängt, würden nur das Gesamtgewicht des Systems vergrößern, ohne das Gleichgewicht zu stören. Die Gewichte können auch verschieden sein, wenn dann nur — nach dem Hebelgesetze — das größere Gewicht einen kleineren Abstand von der Schneide hat, und das kleinere einen größeren, und zwar so, daß die Abstände sich umgekehrt verhalten wie die Gewichte. Der Schwerpunkt des zusammengesetzten Körpersystems — Stange und zwei Gewichte verschiedener Größe — bleibt dann über der Schneide. So weiter schließend kann man sich auch mehr als zwei Gewichte in angemessenen Abständen angehängt denken, und wenn man dazu noch die Stange selbst masselos voraussetzt, also nur durch die auf ihr markierten Abstände maßgebend, so gelangt man zu Grundsätzen, mit denen der Schwerpunkt beliebiger Körpersysteme zu berechnen ist. Bei manchen Körpern lehrt die bloße Anschauung die Lage des Schwerpunktes angeben, wie schon bei der dünnen geraden Stange, so auch bei der Kugel, dem Würfel und andere regelmäßigen Formen. Weniger einfache Fälle können mit beliebiger Annäherung immer durch Zerlegung und unter Benutzung des Hebelgesetzes behandelt werden, wenn auch oft viel mühsamer, als mit Hilfe besonderer mathematischer Methoden möglich ist.

Der Begriff des Schwerpunktes ist auch auf Flächen und Linien übertragen und ohne weiteres verständlich, wenn man von der abstrakten Definition dieser Gebilde absieht und sie sich auch körperlich und sehr dünn vorstellt, die Flächen also etwa aus Blech oder steifem Papier. Aus Gründen, die sich später von selbst ergeben, spielen die Schwerpunktbestimmungen von Flächen im Schiffswesen sogar die wichtigere Rolle, wobei ein wesentlicher Vorzug ist, daß der Schwerpunkt einer Fläche zugänglich ist, nicht wie meist bei den Körpern im Innern liegend,

deshalb auch durch Versuche leicht bestimmt werden kann. Wo die Schwerpunkte des Kreises, des Quadrates, Rechteckes, Parallelogrammes liegen, braucht nicht gesagt zu werden, für das Dreieck ist er sehr einfach zu bestimmen. Man kann sich das Dreieck (Figur 131) zusammengesetzt denken aus lauter schmalen parallelen Streifen. Jeder dieser elementaren Streifen kann als Linie betrachtet werden, der Schwerpunkt jeder Linie liegt in ihrer Mitte, folglich liegen die Schwerpunkte aller Streifen auf der seitenhalbierenden Transversale $a b$, und ein Punkt dieser



Figur 131.



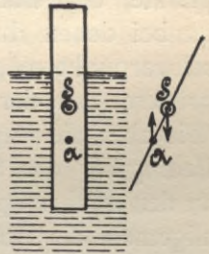
Figur 132.

Transversale muß der Gesamtschwerpunkt sein. Dasselbe gilt aber auch von der Transversale $c d$, mithin muß der Schwerpunkt des Dreiecks der gemeinschaftliche, der Schwerpunkt der beiden seitenhalbierenden Transversalen sein. Wie man die Kenntnis der Schwerpunkte der einzelnen Teile zur Berechnung des Gesamtschwerpunktes eines Gebildes benutzen kann, möge noch an dem Beispiele eines unregelmäßigen Vierecks (Figur 132) erläutert werden. Das Viereck kann zunächst durch eine Gerade in zwei Dreiecke zerlegt werden, und deren einzelne Schwerpunkte sind wie vorher zu finden. Der Gesamtschwerpunkt S muß nun auf der Verbindungslinie der beiden Dreieckschwerpunkte liegen, und zwar so, daß dem kleineren Dreieck der größere Abstand zukommt. Das Verhältniß der Gewichte der Dreiecke, hier gleichbedeutend mit dem Verhältnisse ihrer Flächen, wiederholt sich in dem Verhältnisse der Abstände ihrer Schwerpunkte von dem Gesamtschwerpunkte, nur in umgekehrter Zuordnung der Abstände. Wird das in steifem Papier ausgeschnittene Viereck in S an einem Faden aufgehängt, so hat es nach keiner Seite Uebergewicht. Daher balanciert es auch auf einer Schneide

$s_1 s_1$ oder $s_2 s_2$, die unter S durchgehen. Und wenn man die Lage von S nicht kennt, so kann man sie durch Versuch bestimmen, indem man für das ausgeschnittene Viereck auf einer Schneide eine Gleichgewichtstellung sucht und markiert, darauf dasselbe wiederholt nach Drehung um einen beliebigen Winkel. Der Durchschnitt der Schneidemarken bestimmt den Schwerpunkt S. — Diese Andeutungen der Schwerpunkt-Bestimmung genügen zur Einsicht in das Folgende. Sie führen in allen Fällen zum Ziele, wenn auch manchmal etwas umständlich, und für den praktischen Gebrauch ist deshalb die Kenntnis abkürzender Methoden erwünscht.

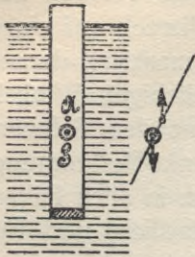
*

Ein Brett, wie die Erfahrung lehrt, schwimmt nicht hochkantig im Wasser und mit Hilfe der Schwerpunkte, des Brettes und des Auftriebes, ist nun der Grund leicht zu erkennen. Das schmale senkrechte Rechteck in Figur 133 stelle den Querschnitt des Brettes vor. Es möge, in dieser Lage gehalten, zu $\frac{2}{3}$ seiner Höhe eintauchen. Seine Länge kann beliebig sein, denn sein Schwerpunkt S liegt in seiner Mitte und in der durch den Schwerpunkt S des Querschnittes gehenden Horizontalen. Deshalb kann sich die Betrachtung auf den Querschnitt beschränken, ebenso auf den Querschnitt des verdrängten Wassers mit dem Auftrieb-Schwerpunkte A. Die Schwerpunkte liegen in derselben Vertikalen. Wenn aber das Brett eine seitliche Neigung nach rechts erhält, dann rückt A (siehe Nebenfigur) links seitlich von S, die beiden gleichen Kräfte bilden dann ein sogenanntes Kräftepaar, das dem schwimmenden Brette eine Drehung im Sinne der eingetretenen Neigung zu erteilen strebt und es, wenn es frei gelassen wird, vollständig umlegt. In der genau senkrechten Lage, wo S gerade über A steht, ist labiles Gleichgewicht, aber die kleinste, in Wirklichkeit immer eintretende Neigung zur Seite, läßt das die Neigung mehr und mehr verstärkende Kräftepaar entstehen. Der Grund für diese Instabilität ist also die höhere



Figur 133.

Lage von S über A. Wenn man aber durch eine metallene Leiste (Figur 134) die Unterkante des Brettes so beschwert, daß es bei nunmehr noch tieferem Eintauchen seinen Schwerpunkt S unter dem Auftrieb-Schwerpunkte A erhält, so wirkt jetzt bei einer seitlichen Neigung das Kräftepaar der Neigung entgegen, dreht also das freigegebene Brett in die senkrechte Lage zurück. Es schwimmt in dem jetzigen Zustande mit Stabilität, wie alle Körper unter allen Umständen, deren System-Schwerpunkt S unter



Figur 134.

dem Auftriebschwerpunkte A liegt. Das ist praktisch leicht zu ersehen an einem durch ein Metallstückchen beschwerten Flaschenkorke oder einem Stäbchen.

Die umgekehrte Lage der Schwerpunkte bedingt aber noch nicht Instabilität, wie in Figur 133 allerdings der Fall war. Es stände sonst schlimm um die Schifffahrt, denn meist liegt bei Schiffen der Systemschwerpunkt über dem Auftriebschwerpunkte, und nur manche Rennjachten bilden eine Ausnahme, da bei denen durch einen sehr schweren Bleikiel der Systemschwerpunkt möglichst tief gelegt ist, womit indessen auch der größere Teil der Tragfähigkeit in Anspruch genommen wird. Wie aber die fragliche Schwerpunktlage sich sehr wohl mit der Bedingung der Stabilität verträgt, läßt sich deutlich erkennen an den erfahrungsgemäß sehr stabilen Wasserfahrzeugen, die man allgemein als Doppelboote bezeichnen kann. Die Fidschi-Insulaner haben solche Fahrzeuge in ihren Doppel-Segelkanoes, die auch anderwärts unter dem Namen Catamaran vorkommen. Besondere Formen dieser Bootgattung, die auch gelegentlich bei uns als Sportfahrzeug versucht wird, meist in mißverständlicher Auffassung ihres Wesens, bilden die Segelkanoes mit Auslieger in der Südsee, bei denen das Hauptboot seitlich ein mit ihm durch Stangen verbundenes Nebenboot hat, oft nur in einem bootartigen Holzstücke bestehend. Näher liegende Beispiele bilden die sogenannten „Maschinen“ unserer Pioniere, deren einfachste Form in zwei mit gewissem Abstände parallel gestellten Pontons besteht, die durch auf die Borde geschnürte Balken, oder, bei geringerem Abstände, durch Belegbretter zusammengehalten werden. Nach dem Schema solcher Fahrzeuge stellen

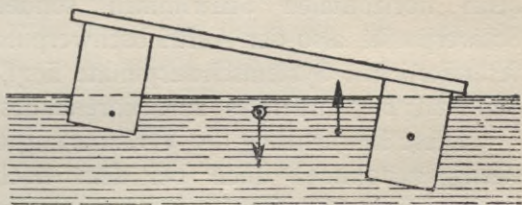
wir uns in Figur 135 ein schwimmendes System vor, nur nehmen wir der einfacheren Behandlung wegen die Schwimmkörper als regelmäßige massive Prismen von Holz



Figur 135.

an und vernachlässigen auch das Gewicht der verbindenden Balken. Wie vorher genügt dann die Betrachtung der Querschnitte. Die Systemschwerpunkte der beiden Schwimmkörper sind ohne weiteres zu finden, ebenso ihre Auftriebsschwerpunkte. Die Gesamtschwerpunkte liegen dann je in der Mitte der Verbindungslinien, und zwar liegt, wie bei den einzelnen Schwimmkörpern, der Systemschwerpunkt des Ganzen über dem Auftriebsschwerpunkte. Insofern also ist kein Unterschied gegen die Figur 133 und trotzdem ist das Fahrzeug stabil. Wir hatten aber gesehen, daß die Instabilität des hochkantig schwimmenden Bootes seinen Grund hatte in der Lage der Schwerpunkte gegeneinander nach eingetretener Neigung. Es bildete sich ein Kräftepaar aus, das die Neigung zu vergrößern strebte. Nun lehrt aber schon der Augenschein, wie bei dem jetzt betrachteten Systeme das Umgekehrte eintritt. Der linke, bei einer Neigung austauchende Schwimmkörper

(Figur 136) gibt einen entsprechenden Teil seines Auftriebes auf den rechten, tiefer eintauchenden Schwimm-

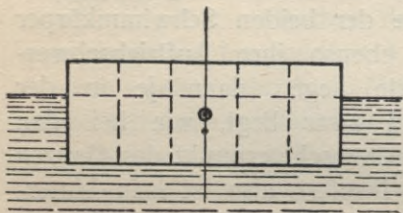


Figur 136.

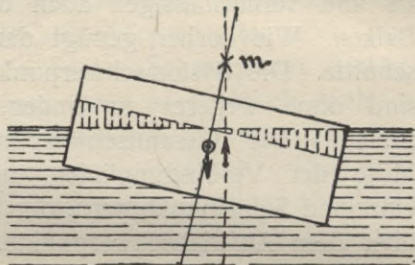
körper ab, der Auftriebsschwerpunkt verschiebt sich damit stark nach rechts, und es bildet sich ein Kräftepaar aus, das der Neigung entgegenwirkt. Von der horizontalen Lage des Systemes aus (Figur 135) wird offenbar die Wirkung des zurückdrehenden Kräftepaares mit zunehmender Neigung immer größer, bis der rechte Schwimmkörper ganz eingetaucht ist, der linke dagegen frei schwebt, sofern dieser Zustand überhaupt möglich wäre, und von diesem Augenblicke

an werden auch die Stabilitätsbedingungen ganz anders, indem dann nur noch der eine Schwimmkörper in Betracht käme.

Von diesem besonders anschaulichen Beispiele ist nun der Uebergang zu einem einzigen breiten Schwimmkörper sehr leicht (Figur 137). Denn man braucht sich nur vorzustellen, daß man diesen durch senkrechte Schnitte in mehrere verbundene Paare von Schwimmkörpern, ähnlich denen in Figur 135, zerlegt hätte, um auf die einzelnen Paare die vorstehenden Betrachtungen an-



Figur 137.



Figur 138.

zuwenden. Faßt man aber den Schwimmkörper gleich als Ganzes auf, so sieht man (Figur 138), wie bei einer Neigung ein Teil auf der linken Seite, das schraffierte Dreieck, auftaucht, ein ebensolches Dreieck auf der andern Seite aber eintaucht. Die Eintauchfläche hat nun nicht mehr die Rechteckform, wie beim horizontalen Schwimmen, sondern Trapezform, deren Schwerpunkt, also der Auftriebschwerpunkt, rechts von dem unveränderlichen Systemschwerpunkte liegt, mithin wieder ein die Stabilität begründendes zurückdrehendes Kräftepaar bildet.

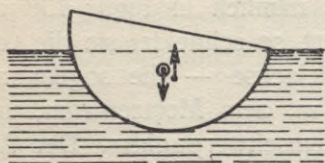
Diese Betrachtung der Veränderung der Eintauchfläche hätte streng genommen auch bei dem hochkantig schwimmenden Brette (Figur 133) durchgeführt werden müssen. Man sieht aber von vornherein, daß diese Aenderung hier nur unbedeutend ist, und deshalb konnte von vornherein davon abgesehen werden. Der Vergleich der Figur 133 mit den Figuren 137 und 138 lehrt nun aber allgemein: Bei einem schwimmenden Körper, dessen Systemschwerpunkt über dem Auftriebschwerpunkte liegt, wird der erstere bei eintretender Neigung relativ nach der Seite des tieferen Eintauchens verlegt, der Auftriebschwerpunkt nach der entgegengesetzten Richtung (Figur 133), oder nach derselben Richtung (Figur 138) je nach der Form des Körpers. Im ersteren Falle

schwimmt der Körper labil, im zweiten stabil, und es wird offenbar Körperformen geben, bei denen weder das eine noch das andere stattfindet, dann herrscht indifferentes Gleichgewicht, der Körper schwimmt in jeder Lage, aber der geringste Anlaß vermag die Lage zu ändern.

Das alles ist aber viel bequemer auszudrücken mit Hilfe des Metazentrums. Denkt man sich nämlich in Figur 138 die Auftriebrichtung nach oben verlängert, so schneidet sie die vorher senkrechte, jetzt geneigte Mittelachse — die sogenannte Schwimmachse — in einem Punkte m , dem Metazentrum, und dieser Punkt liegt oberhalb des Systemschwerpunktes. Der Abstand beider Punkte voneinander bildet ein Maß für die Stabilität bei der betreffenden Neigung. Denn je weiter der Auftriebschwerpunkt nach rechts rückt, um so höher liegt das Metazentrum, ein breiterer Schwimmkörper ist also unter sonst gleichen Umständen immer stabiler. Jeder Neigung entspricht nun zunächst auch eine andere metazentrische Höhe. Bestimmt man die aber für eine Folge von Neigungswinkeln, die zusammen innerhalb enger Grenzen bleiben, so bemerkt man, daß die metazentrische Höhe fast gleich bleibt, was sich auch durch eine einfache geometrische Betrachtung begründen läßt. Insofern kann man von einer bestimmten metazentrischen Höhe eines schwimmenden Körpers sprechen, und diese Angabe bildet nun die einfachste Unterlage zur Beurteilung der Stabilität.

Die vorstehende Bestimmung des Metazentrums auf den Fall der Figur 133 angewendet, würde nun seine Lage unterhalb des Systemschwerpunktes ergeben. Allgemein also gilt für die Schwimmlage eines Körpers, dessen Systemschwerpunkt über dem Auftriebschwerpunkte liegt, die Bedingung, daß die metazentrische Höhe von ersterem aus gerechnet positiv sein muß. Die hier vorausgesetzte Lage der beiden Schwerpunkte ergibt sich immer für massive homogene Körper, wie sie bisher betrachtet wurden. Denn solange der Körper schwimmt, taucht er nicht vollständig ein, sein Systemschwerpunkt muß also über dem Auftriebschwerpunkte liegen, und erst, wenn er gerade vollständig eintauchen würde, fielen beide Schwerpunkte zusammen. Die Stabilität unter allen Umständen durch tiefere Lage des Systemschwerpunktes (Figur 134) läßt sich bei massiven Körpern also nur durch Anwendung spezifisch schwererer Teile erzielen.

Der einfachen Darstellung wegen wurde der Begriff des Metazentrums an dem rechteckigen Querschnitte entwickelt, die Darlegungen lassen sich aber ohne weiteres auf beliebige Querschnitte anwenden, nur daß dann die Berechnung der Schwerpunkte etwas umständlicher wird. Davon geben die Figuren 139

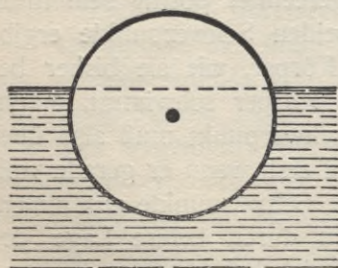


Figur 139.



Figur 140.

und 140 eine Andeutung, zugleich dafür, daß ein Körper mehrere stabile Schwimmlagen haben kann. Für den mit der konvexen Seite nach unten schwimmenden Halbzylinder (Figur 139) zeigt sich die Stabilität sofort an dem bei einer Neigung entstehenden zurückdrehenden Kräftepaare, die Verhältnisse im andern Falle (Figur 140) unterscheiden sich ersichtlich wenig von denen des Rechteckes. Zwischen diesen beiden stabilen Lagen desselben Körpers gibt es aber bei zu weitem Drehen nach rechts oder links je eine instabile. Zur allseitigen Klarlegung der Stabilitätsverhältnisse eines Schiffes genügt deshalb auch nicht die Kenntnis der metazentrischen Höhe im engeren Sinne, die nur eine Beurteilung des Verhaltens unter den gewöhnlichen sanfteren Schwankungen ermöglicht. Vielmehr müssen die metazentrischen Höhen auch für extreme Lagen bestimmt werden, so daß auch der Neigungswinkel bekannt ist, bei dem das Kentern des Fahrzeuges eintreten würde. Wir kommen später auf diesen Punkt zurück.



Figur 141.

Das indifferente Gleichgewicht eines schwimmenden Körpers wird endlich durch einen vollen Zylinder oder eine Kugel dargestellt (Figur 141). Bei diesem bleiben die Schwerpunktlagen immer ungeändert, welche Drehung den Körpern auch gegeben wird. Will man hier noch

von einem Metazentrum reden, so muß man es im System-
schwerpunkte selbst liegend annehmen, als Ausdruck dafür,
daß keine Lage bevorzugt ist.

Die eigentlichen Wasserfahrzeuge sind nun weder homogene
massive Körper, wie wir bisher vorausgesetzt haben, sondern
zugeschärfte, nach gewissen Kurven verlaufende Hohlkörper,
deren Systemschwerpunkt nicht unveränderlich ist, sondern mit
der Beladung wechselt. Trotzdem kann man alles über die
Stabilität Gesagte auch auf sie anwenden, das Grundsätzliche
bleibt immer dasselbe, nur die Rechnungen werden komplizierter.
Vor weiterem wird aber zweckmäßig sein, einiges über die zeich-
nerische Darstellung der Schiffskörper mitzuteilen, um das Fol-
gende leichter übersehen zu können.

*

Als Beispiel der Darstellung diene eine ältere breite Segel-
jacht (Figur 142), weil sich an ihrer Form die Zeichenmethode
recht deutlich zeigen läßt. Alles ist in einfachsten Linien ge-
geben, a bedeutet eine Ansicht des Bootkörpers von der Seite,

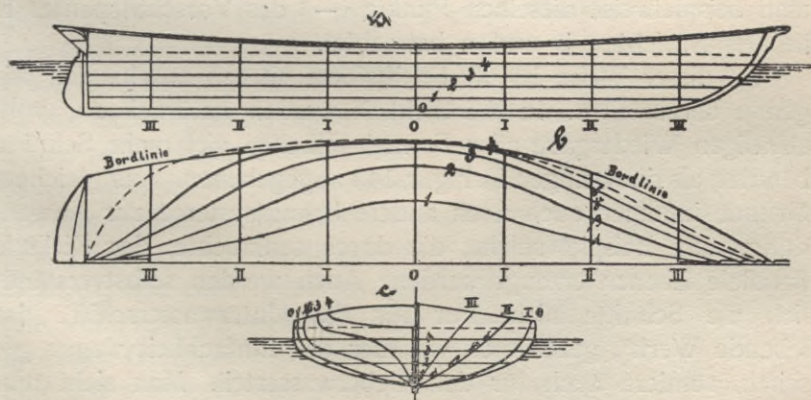


Fig. 142.

b die offen gedachte Schale, c rechts eine Hälfte des Vorschiffes
von vorn gesehen, c links sinngemäß das Hinterschiff. Die Dar-
stellung beruht nun einfach darauf, durch eine Anzahl wage-
rechter und senkrechter Ebenen den Schiffskörper zu schneiden
und die Schnitte sichtbar zu machen. Die wagerechten Schnitte

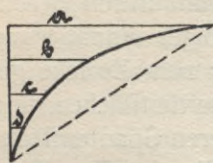
in den Ansichten a und c kann man sich am anschaulichsten erzeugt denken durch stufenweises Eintauchen des Körpers in die Wasseroberfläche, die Schnitte zeigen sich dann in der Seitenansicht a als gerade Linien 0—4. In der Ansicht b bilden sie aber mehr oder weniger schlanke, vorn und hinten an die Kiellinie anschließende Kurven, die Wasserlinien, also die Linien von oben gesehen, in denen die Wasseroberfläche den Körper bei dem stufenweisen Eintauchen berühren würde. Diese Linien geben schon vollständigen Aufschluß über die Form des Schiffskörpers. Denn wenn das wagerechte Eintauchen um immer gleiche Stufen erfolgt, so zeigt der kleinere oder größere Abstand der Wasserlinien voneinander in Ansicht b die mehr oder weniger starke Neigung der Schiffswand gegen die Wasserfläche. Beim Eintauchen um dieselben Stufen weichen die Wasserlinien um so schneller von der Kiellinie ab, je flacher die Neigung der Schiffswand ist, und umgekehrt. Noch deutlicher wird das durch den Spantenriß c. Die senkrecht zur Wasserfläche stehenden Schnitte, die Spantenschnitte, erscheinen in a und b als gerade Linien, in c aber als Kurven, nämlich als die Spanten in ihrer richtigen Form. Der Zusammenhang ergibt sich sofort, wenn man beispielweise dieselben Punkte α — δ des Vorschiffspantes II in den Ansichten b und c betrachtet.

In dieser Weise ist die Schiffsförm ebenso anschaulich wie genau darzustellen. In Wirklichkeit werden natürlich zur vollständigen Wiedergabe aller Formeinzelheiten viel mehr Schnitte benutzt, als die wenigen in Figur 142 angegebenen. Aus gleichem Grunde kommen auch noch andere Schnittsysteme zur Anwendung, zum Beispiel solche, die durch senkrechte, der Kiellinie parallele Ebenen erzeugt werden. Auch werden selbstverständlich die Schnitte nicht nur für das Unterwasserschiff, „das lebende Werk“, gezeichnet, wie hier der Einfachheit wegen geschah, sondern auch für den Ueberwasserteil. Man sieht nun aus den verschiedenen Ansichten mit ihren Schnitten sofort, in welcher Weise, schneller oder langsamer, die Querschnitte von Spant zu Spant sich ändern, wie im Vorschiffe die nach außen gewölbten Spanten vorherrschen, während die Spanten des Hinterschiffes hohler sind, weil sie in das breite, nach hinten ausladende Heck münden.

Die ersten Rechnungen, die beim Entwurfe des Schiffes an Hand der vielfach geänderten Risse vorzunehmen sind, beziehen sich auf die Wasserverdrängung des eingetauchten Teiles, d. h. auf dessen kubischen Inhalt. Bei dem stetigen Wechsel der Spanten ist diese Rechnung zwar grundsätzlich einfach, in der Durchführung aber etwas verwickelt und deshalb durch besondere Methoden tunlichst erleichtert. Mit beliebiger Annäherung kann man durch schrittweises Vorgehen immer zum Zwecke gelangen durch Berechnung genügend vieler Spantenflächen und Multiplikation der daraus sich ergebenden mittleren Spantenfläche mit der ganzen Länge des Schiffskörpers im Wasser. Der Wert des Produktes in Kubikmetern gibt das Displacement des Schiffes in Tonnen ($\hat{=}$ 1000 kg), also das ganze Gewicht des Schiffes einschließlich Ausrüstung und Ladung. Da nun die Spanten immer eine geringere Fläche haben, als das Rechteck aus ihrer größten eingetauchten Breite und der Eintauchtiefe, und da ferner die Wasserlinien ebenfalls viel kleinere wagerechte Flächen bilden, als den umschriebenen Rechtecken entsprechen, so ist das Displacement des ganzen Schiffes auch kleiner, als das dem Unterwasserteile umschriebene Parallelepiped. In dem durch dieses bestimmten Raume haben offenbar Schiffsförmungen von sehr verschiedenem Inhalte Platz, und je mehr sich die Spanten und Wasserlinien den umschriebenen Rechtecken nähern, um so voller ist das Schiff gebaut, einen um so größeren Teil des umschriebenen rechteckigen Raumes füllt es aus. Umgekehrt, je weniger es von diesem Raume in Anspruch nimmt, um so schärfer ist es. Das Verhältnis des wirklich eingenommenen Raumes zu dem umschriebenen, die Völligkeit oder der Völligkeitskoeffizient, erlaubt deshalb einen gewissen Schluß auf die Bauart des Schiffes. Die Völligkeit, die natürlich immer kleiner als eins ist, schwankt in weiten Grenzen. Für Flußkähne mit ihrem ganz glatten Boden, den fast senkrecht von diesen aufsteigenden Seitenwänden und den bis auf das kurze Vorder- und Hinterteil geradlinig verlaufenden Wasserlinien beträgt sie etwa 0,90 und darüber, für Flußdampfer bis 0,85, während die schärferen Seeschiffe wesentlich kleinere Völligkeit haben, Frachtschiffe zwischen 0,6 und 0,7, Jachten manchmal unter 0,30, große Dampfer im Mittel 0,60, kleine Schnelldampfer 0,45 etwa.

Da die Belastung der Schiffe keine konstante Größe hat,

die Ladung der Frachtschiffe wechselt, der Kohlenvorrat der Dampfer mit der Dauer der Reise abnimmt, so ist eine graphische Darstellung nützlich, aus der sofort zu ersehen ist, wie sich mit dem Gesamtgewichte der Tiefgang ändert. Diese Displacement-skala kann in folgender Weise entworfen werden. Bedeutet die

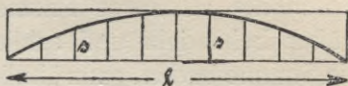


Figur 143.

senkrechte Linie (Figur 143) den größten Tiefgang des Schiffes, die Horizontale a am oberen Endpunkte in irgend einem Maßstabe das Displacement bei diesem Tiefgange, so kann man in den Horizontalen b, c, d dieselbe Größe bei geringeren Tiefgängen darstellen, und die Verbindungslinie der Endpunkte der Horizontalen gibt die Möglichkeit, für einen beliebigen Tiefgang das zugehörige Displacement abzugreifen. Auch diese Darstellung vermittelt einen gewissen Schluß auf die Schiffsform, denn bei überall senkrechten Seitenwänden, wie annähernd bei Flußkähnen, nimmt das Displacement im einfachen Verhältnisse mit dem Tiefgange zu, für solche gilt also die punktierte gerade Verbindungslinie, während die vorherige gekrümmte andeutet, daß die Zunahme des Displacements mit dem Eintauchen zunächst langsamer erfolgt, das Unterwasserschiff also schärfer war.

Von besonderem Nutzen beim Entwerfen eines Schiffes ist noch eine andere graphische Darstellung, die einen schnellen Ueberblick gewährt über die Aenderung der Spantenareale im Verhältnisse zu ihrer Lage im Schiffe. Die Zuschärfung des Vor- und Hinterschiffes hat, wie aus Figur 142 ersichtlich, eine Abnahme der Spantenareale von der Mitte nach vorn und hinten zur Folge, und es wird offenbar entscheidend sein für die ganze Form des Unterwasserschiffes, ob diese Aenderung sich recht sanft vollzieht, oder ob etwa, wie bei Flußkähnen, die Spantenareale auf längere Strecken von der Mitte aus ziemlich gleich bleiben, um dann in der Nähe der Enden schnell auf Null abzunehmen. Es wird sich später bei Betrachtung des Schiffswiderstandes zeigen, von welcher Wichtigkeit dieses Aenderungsgesetz der Spantenareale ist, man empfindet aber seinen Einfluß ohne weiteres, wenn man bedenkt, daß die vollständige Unveränderlichkeit der Spantenareale nur bei ganz prismatischen Schwimmkörpern vorhanden ist, also bei einfachen rechteckigen Kasten, die nach den ersten Erfahrungen mit Wasserfahrzeugen für ein

leichtes Ueberwinden des Widerstandes ganz ungeeignet sind. Da man nun sich nicht die wirklichen Spantenareale bei der vergleichenden Betrachtung ihrer Größen und Lagen übersichtlich vor Augen halten kann, so trägt man auf einer die Schiffslängs l (Figur 144) derselben Geraden die Senkrechten s so auf, daß ihre Längen den Spantenarealen an den betreffenden Stellen entsprechen. Dann gibt die Verbindungslinie der oberen Endpunkte



Figur 144.

der s die Spantenskala, und die Fläche zwischen ihr und der Horizontalen l stellt das Deplacement selbst dar, denn da die Senkrechten s Flächen bedeuten, so schließen zwei von ihnen den dazwischen liegenden Teil des Deplacements ein. Demnach stellt auch das Verhältnis der von der Spantenskala begrenzten Fläche zu dem unbeschriebenen Rechtecke die Völligkeit des Schiffes dar. — Der Wert dieser Darstellung beruht offenbar in dem übersichtlichen Verlaufe einer einzelnen Fläche gegenüber der schwierigen Vorstellung einer Anzahl im Raume verteilter Flächen, hier der Spantenareale. Betont muß dabei aber noch werden, daß die Spantenskala noch nichts über die Form der Spanten sagt. Dieselbe Kurve kann sowohl für ein schmales tiefes Schiff mit nahezu rechteckiger Spantenform gelten, wie für ein flaches breites mit mehr dreieckigen Spanten, ähnlich Figur 142, c, wenn nur die Spantenareale in beiden Fällen gleich sind, oder bei derselben Länge, demselben Deplacement und demselben Aenderungverhältnisse der Spantenareale kann ein Schiff sehr verschiedene Breiten erhalten, je nachdem die anderen Bedingungen es erfordern, die sich vornehmlich aus der notwendigen Stabilität und dem zulässigen Widerstande im Wasser ergeben. Als eine Ergänzung der Spantenskala kann man deshalb auch eine graphische Wasserlinienskala aufreißen, die, ähnlich wie die Deplacementskala angeordnet, die Wasserlinienareale angibt. Diese drei Skalen hängen ersichtlich eng zusammen und ermöglichen beim Entwurfe eines Schiffes oder bei seiner Beurteilung einen schnellen Ueberblick über die wichtigsten Verhältnisse.

Die Uebertragung der früher für die einfachsten Gebilde gefundenen Gesetze der Stabilität auf die komplizierten Schiffsförmungen macht nun gar keine Schwierigkeiten, sobald man den Schiffskörper abschnittsweise von Spant zu Spant betrachtet. Nimmt man deren Abstände voneinander klein genug, so kann man die Abschnitte als kurze Prismen betrachten, jeden einzelnen wie früher behandeln und schließlich aus den gefundenen Werten die Summe bilden, ganz ähnlich wie die Schwerpunkte zusammengesetzter Körper oder Flächen zu finden sind. Erleichternde Rechnungsmethoden, als deren wichtigste die Simpsonsche Regel und daraus abgeleitete erscheinen, dienen wie immer auch hier dem schnellen Fortschreiten der Untersuchung, ohne indessen zur Einsicht in das Wesen der Sache erforderlich zu sein. In dieser Weise ergibt sich der Systemschwerpunkt des leeren und des ausgerüsteten und beladenen Fahrzeuges. Von wesentlichem Einflusse auf die Schwerpunktlage sind bei Segelschiffen die Masten mit Takelage, die zwar im Verhältnisse zum Schiffe selbst kein großes Gewicht darstellen, dafür aber weit vom Schwerpunkte entfernt sind, also an großen Hebelarmen wirken. Durch die Art der Stauung der Ladung kann der Systemschwerpunkt innerhalb gewisser Grenzen beeinflußt werden. Das ist besonders wichtig für Segelschiffe, bei denen die großen Segelflächen starke Neigungen nach der Seite hervorrufen. — Die Summierung der für die einzelnen, gleich lang anzunehmenden Abschnitte zwischen je zwei Spanten gefundenen metazentrischen Höhen ist so zu verstehen, daß für das ganze Schiff die mittlere Höhe genommen wird, von der sich die einzelnen Höhen um ein gewisses Maß unter Berücksichtigung des positiven oder negativen Vorzeichens unterscheiden. Außer dem Metazentrum der Breite, das bei Neigungen des Schiffes um die Längsachse in Frage kommt und allerdings der wichtigste Wert zur Beurteilung der Stabilität ist, wird auch noch das Metazentrum der Länge bestimmt, das zwar weniger für die Sicherheit des Schiffes bedeutet, wohl aber für die schwingenden Bewegungen um die Querachse, wie sich nachher zeigen wird. Die Berechnung des Längenmetazentrums kann nach denselben Gesetzen wie früher ebenfalls abschnittsweise erfolgen, nur dürfen dabei nicht einfach nur die eingetauchten Flächen des Längsschnittes beachtet werden, wie bei Berechnung des Quermetazentrums für die einzelnen Abschnitte an Hand der Figur

138, wo prismatische Körper von übrigens beliebiger Länge vorausgesetzt wurden. Denn wesentlich ist doch das ein- und austauschende Volumen, und da die Volumina der Abschnitte nach vorn und hinten abnehmen, so muß nach Maßgabe dieser Abnahme auch ihr Einfluß auf die Stabilität, also auf die Lage des Metazentrums berücksichtigt werden. Das kann etwa so geschehen, daß man den Abstand der Abschnitte von der Querachse in dem Maße verkleinert, wie ihre Volumina abnehmen. Verwickelter wird die Rechnung noch durch die notwendige Berücksichtigung der Spantenform, da gleichen Tauchtiefen nicht gleiche Zunahmen der Volumina entsprechen. Ohne erleichternde Hilfsmittel sind solche Rechnungen deshalb sehr langwierig, indessen kommt es hier ja nur auf das Grundsätzliche, nicht auf die wirkliche Ausführung solcher Rechnungen an.

Die metazentrische Höhe, wie wir sahen, bildet ein Maß für die Stabilität des schwimmenden Körpers, sie ist abhängig von der Lage des Systemschwerpunktes und des Auftriebschwerpunktes und für kleinere Neigungswinkel, etwa bis 10° oder auch 15° annähernd konstant. Diese Winkel sind nun in Wirklichkeit für die Neigung von Schiffen schon recht beträchtlich, und deshalb genügt für durchschnittliche Verhältnisse die Beachtung der metazentrischen Höhe im engeren Sinne, wenn auch zur vollständigen Kenntnis der Eigenschaften des Schiffes wichtig ist zu wissen, wie seine Stabilität bei größerem Neigungswinkel ist. Das wieder aufrichtende Kräftepaar wächst bei zunehmenden Neigungen von der normalen Lage an stetig bis zu einem größten Werte, nimmt dann wieder ab und wird schließlich zu Null. Bei dieser Neigung würde also das Kentern eintreten, wie schon an Hand der Figuren 139 und 140 besprochen. Alle diese Werte können rechnerisch ermittelt und zur bequemeren Uebersicht in geeignetem Maßstabe graphisch dargestellt werden, wobei die Neigungswinkel als Abszissen, die aufrichtenden Kräftepaare als Ordinaten aufgetragen werden. Ein solches Diagramm kann z. B. bei Segelschiffen unmittelbar dazu dienen, den zulässigen Seitendruck des Windes auf die Segel zu bestimmen, oder anders gesagt, die zulässige Größe der Segelflächen. Bei einem ausgeführten Schiffe lassen sich bis zu einer gewissen Neigung die aufrichtenden Kräftepaare durch Krängungsversuche finden, indem Gewichte von der einen Seite des Schiffes

nach der anderen verschoben werden. Durch solche Versuche erhält man eine Kontrolle der Rechnung, mit dem durch Versuch gefundenen Werte kann aber auch umgekehrt der System-
schwerpunkt des Schiffes bestimmt werden, dessen Ermittlung bei veränderter Ladung rechnerisch zu umständlich wäre. Dieses Verfahren ist unschwer verständlich, wenn man an den Zusammenhang zwischen Systemschwerpunkt, Deplacementschwerpunkt und aufrichtendem Kräftepaare denkt. Aehnliche Versuche können auch für die Neigungen des Schiffes in der Längsrichtung angestellt werden, hier dienen sie aber besonders dazu, das Schiff zu trimmen, d. h. ihm dauernd eine bestimmte Längslage gegen die Wasserfläche zu geben, wagrecht oder etwas geneigt, wie aus Gründen der guten Wirkung, der Segel, des Propellers oder des Ruders erwünscht sein kann. — Anschauungen, wie sie für das Krängen und Trimmen maßgebend sind, greifen auch Platz bei den Leckrechnungen, die eine Unterlage für die Einteilung des Schiffsinneren in einzelne abgeschlossene oder wenigstens abzuschließende Räume vermittels der Schottwände bieten, um die Wirkung eines Leckes auf einen so kleinen Teil des Schiffes zu beschränken, daß die eingedrungene Wassermenge noch nicht das Sinken herbeizuführen vermag.

*

Da die Stabilität des Schiffes mit der metazentrischen Höhe wächst, so könnte man meinen, daß diese gar nicht groß genug gehalten werden könne, und wenn nur die Schwimmsicherheit überhaupt in Frage käme, würde das auch zutreffen. Die Insassen eines Schiffes werden aber oft gern recht viel von dieser Sicherheit daran geben, wenn sie wissen, daß sie damit sanftere Bewegungen des Schiffes erkaufen. Denn je größer einerseits die Stabilität, um so heftiger andererseits die schaukelnden Bewegungen um die Längsachse, das Schlingern, und um die Querachse das Stampfen. Wind und Wellen beeinflussen einen Schwimmkörper in sehr verschiedener Weise. Ein ganz stetiger Wind kann ihm eine dauernde Neigung nach der Seite geben, und sehr lange gleichmäßige Wellen würden ihn im ganzen rhythmisch heben und senken können. Der Wind wechselt aber

eigentlich fortwährend seine Stärke, wie überall leicht zu beobachten, und auch der stetigste ist mit gelegentlichen kräftigeren Stößen durchsetzt, während die Wellen bald das Vorschiff, bald das Hinterschiff, oder die eine Seite mehr als die andere zu heben suchen. Die Folge dieser abwechselnd in kurzen Zwischenräumen an verschiedenen Teilen des Schiffes einsetzenden Hubkräfte sind die genannten Schwingungen, die möglichst sanft, also möglichst langsam verlaufen zu lassen, nicht nur das Behagen der Insassen erwünscht macht, sondern auch die Rücksicht auf die Festigkeit des Schiffskörpers erfordert. Schwingungen entstehen immer, wenn ein Körper durch vorübergehende Kraftwirkung aus seiner Gleichgewichtslage gebracht wird und durch die diese Gleichgewichtslage bedingenden Kräfte wieder dahin zurückgeführt werden kann. Das Pendel einer Wanduhr, die Unruhe einer Taschenuhr, eine gespannte Seite, eine einseitig eingespannte schwanke Gerte sind einfache Beispiele für schwingende Systeme. Unmittelbare Anschauung für die vorliegenden Betrachtungen gewährt aber das Verhalten kleiner Schwimmkörper selbst, die durch einen Stoß aus der stabilen Lage gebracht werden, wenn man sie so wählt, daß ihre Schwingungen langsam genug sind. So kann man an einem, durch einseitige Beschwerung aufrecht schwimmenden Holzstabe leicht tanzende Bewegungen von ziemlich großer Schwingungsdauer beobachten. Wie groß diese Dauer im besonderen Falle ist, wird immer abhängen von den in die Ruhelage zurücktreibenden Kräften, hier also von dem Auftriebe, im Verhältnisse zu der von ihnen zu bewegenden Masse des Körpers. Davon kann man sich auch überzeugen vermittels einer Gummischnur, an der man Körper verschiedenen Gewichtes schwingen läßt. Ein Schwimmkörper, der aus seiner Gleichgewichtslage angehoben und dann wieder freigelassen wird, führt also Schwingungen von bestimmter Dauer aus, die allerdings unter der dämpfenden Wirkung des Wasserwiderstandes schnell abnehmen. Aehnliche Erscheinungen treten ein, wenn ein Schwimmkörper, etwa ein Halbzylinder nach Figur 139 nicht parallel sich selbst gehoben und gesenkt, sondern in eine schiefe Lage zum Wasserspiegel gebracht wird. Und da als Maß für die in die Gleichgewichtslage zurücktreibenden Kräfte die metazentrische Höhe des Schwimmkörpers erkannt war, so folgt, daß auch die Schwingungen von der einen Seite

zur andern von der metazentrischen Höhe abhängen, sich also um so schneller vollziehen, je größer diese ist. Das gilt aber natürlich für Körper jeden Querschnittes, immer vorausgesetzt, daß stabile Lagen vorhanden sind, also nicht für indifferente Körper, wie z. B. nach Figur 141, die ja eben diese Eigenschaft haben, weil in eine bestimmte Lage zurücktreibende Kräfte nicht vorhanden sind. Während aber für die statischen Gleichgewichtsbedingungen, die wir an den Figuren 136 bis 141 entwickelten, nur die Form des Körpers und die Lage seines Schwerpunktes wesentlich waren, spielt bei den Schwingungen die Verteilung der Masse eine wesentliche Rolle. Denkt man sich etwa ein Fahrzeug nach Art des Katamarans (Figur 136) in der Mitte der Verbindungsbalken belastet und in Querschwingungen versetzt, so wird die Last beim wechselnden Auf- und Niedertauchen der beiden Schwimmkörper nur wenig bewegt werden, da das ganze System um seine mittlere Längsachse schwingt. Teilt man dagegen die Last und bringt die Hälften unmittelbar über die Schwimmkörper, so wird an den statischen Verhältnissen nichts geändert, bei den Schwingungen dagegen nehmen nunmehr die Lathälften an den ausgiebigen Bewegungen teil, während die für die Schwingungen maßgebenden Kräfte dieselben bleiben. Bei dieser Verteilung der Massen werden also die Schwingungen langsamer werden als vorher. So wird ein Panzerschiff, bei dem ein erheblicher Teil der Gewichte auf den Schiffswänden liegt, langsamere Schwingungen ausführen, als ein Frachtdampfer mit gleichmäßiger verteilter Last, der sonst gleiche Form und Displacement hätte. Ebenso wirken bei einem Segelschiffe die weit vom Schwerpunkte hochragenden Masten verzögernd auf die Schwingungen, ganz abgesehen von der Dämpfung durch die Takelage und im besonderen die Segel, die ähnlich wie der Wasserwiderstand eine schnelle Abnahme der Schwingungweite zur Folge haben. Ruderboote haben bei ausgelegten Rudern eine größere Schwingungsdauer, als bei eingezogenen. Der Einfluß der Massenverteilung auf die Schwingungsdauer läßt sich in kleinerem Maßstabe sehr hübsch studieren an einem halbzylindrischen Korken mit größeren Nadeln, die man mal in der Längsrichtung, mal in der Breite oder aufrecht stehend einsteckt. — Daß dieselben Erwägungen endlich auch für die Schwingungen des Schiffes in der Längsrichtung, also um die Querachse, An-

wendung finden, braucht nach dem früher über das Längenmetazentrum Gesagten nur erwähnt zu werden.

Zwischen den Bedingungen der Stabilität und den Forderungen sanfter Bewegungen muß also der Schiffbau taktvoll vermitteln, eine um so schwierigere Aufgabe, als die Berechnung der Schwingungen, die für manche andere Verhältnisse mit größter Genauigkeit auszuführen ist, bei Schiffen sehr unsicher bleibt, weil der dämpfende Widerstand des Wassers, der im besonderen für die Weite der Schwingungen wesentlich ist, und andere wichtige Faktoren sich der genaueren Schätzung entziehen. Das Schiff darf weder zu steif sein, wie man sagt, nämlich zu schnell nach der Mittellage zurückkehren, noch zu rank, womit das Gegenteil bezeichnet wird, was aber zu geringe Stabilität bedeuten würde. Im ganzen haben sich auffallend geringe metazentrische Höhen als zweckmäßig ergeben. Große Fracht- und Personendampfer haben beispielsweise an metazentrischer Höhe nur zwischen 20 und 60 cm, Panzerschiffe dagegen, wie nach dem oben Gesagten erklärlich ist, erhalten ohne Beeinträchtigung der genügend sanften Bewegung Höhen von 250 bis 280 cm. Die Schwingungweite möglichst einzuschränken, werden oft noch besondere Mittel angewendet, die in der Wirkung den großen Leinwandflächen der Segelschiffe gleichkommen. Auf Dampfer werden oft Segel gesetzt, wenn auch von verhältnismäßig bescheidener Größe, oder an dem Schiffskörper selbst sogenannte Schlingerkiele vorgesehen, lange Flossen in der Längsrichtung an den Schiffseiten und genügend tief unter Wasser, um allen seitlichen Neigungen einen erheblichen Widerstand entgegen zu setzen. Die genannten Mittel vermehren freilich auch immer den Widerstand des Schiffes beim Vorwärtsgange.

II.

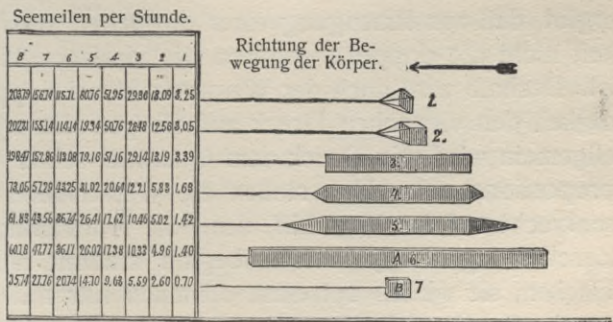
Der Zweck der Wasserfahrzeuge ist nicht das bloße Schwimmen, sondern die Vorwärtsbewegung, und schon bei dem ursprünglichen Flosse, das man in bestimmter Richtung vorwärts treiben will, macht man die Beobachtung eines erheblichen Widerstandes des Wassers. Am auffallendsten drängt sich dabei die Tatsache auf, daß eine glatte Vorderfläche des Fahrzeuges einen

Gegenstau des Wassers bewirkt, und da auch die Erkenntnis des größeren Widerstandes eines flach gegen das Wasser bewegten Brettes gegenüber dem viel geringeren Widerstande bei dazu senkrechter Richtung sehr nahe liegt, so ist der erste Schritt zur Herstellung eines brauchbaren Wasserfahrzeuges sicher die schlanke Schärfung des Vorderteiles gewesen. Schwieriger ist schon der Einfluß der Gestalt des Hinterschiffes zu beurteilen. Einerseits zeigen die Boote der Naturvölker schlanke scharfe Formen an beiden Enden, teilweise sogar einen sanften Verlauf der ganzen Wasserlinien, wie die Kajaks der Grönländer, wie auch die ausgegrabenen, in ihrer ganzen Form noch sicher erkennbaren Wickingerboote, andererseits hatten noch die Caravellen des Columbus ein plattes, tief in das Wasser tauchendes Heck, das zwar in den folgenden Jahrhunderten höher gelegt wurde, aber doch nur einem kurz gerundeten, sehr vollen Hinterschiffe Platz machte. Die Erfahrungen mit kleinen Fahrzeugen, im besonderen mit Ruderbooten, die schon frühzeitig zu noch jetzt sehr befriedigenden Baulinien geführt hatten, wurden jedenfalls bei den großen Seglern nicht vollkommen beachtet, wozu allerdings auch die Schwierigkeiten der Herstellung in Holz, die Rücksichten auf festen Verband der Teile beigetragen haben mögen. Augenscheinlich haben sich lange die anderen schwierigen Bedingungen, die bei Segelschiffen zu berücksichtigen sind, in den Vordergrund gedrängt, und es darf vor allem nicht vergessen werden, daß die Mechanik der Flüssigkeiten erst mit Galilei eingesetzt hat, daß klare Anschauungen über das Verhalten der Flüssigkeiten gegen bewegte Körper erst in der Neuzeit entstanden sind, und daß die Einzelerfahrungen noch nicht an Hand einer übersichtlichen Theorie verwertet werden konnten. Wir sind auch heute noch weit davon entfernt, auf Grund der Schiffsform und ohne besondere Erfahrungen an ähnlichen Formen eine genaue Berechnung des Widerstandes anzustellen, und Galileis Wort, daß es leichter sei, die Bewegungen der Gestirne zu erklären, als die Bewegungen des Wassers, trifft hier mit besonderer Hochgradigkeit zu.

Immerhin hat schon Newton das Bedürfnis erkannt, den Bewegungswiderstand eines schwimmenden Körpers zu berechnen, und später hat sich Euler mit dem Probleme beschäftigt. Beide gingen aus von der Vorstellung des Stoßes freier Wasserstrahlen

gegen das Schiff, denn es kommt natürlich nur auf die Relativ-Geschwindigkeit beider an, und es ist für die Wirkung gleichgültig, ob sich das Wasser gegen das ruhende Schiff bewegt, oder umgekehrt. Die Bemühungen dieser und anderer Gelehrten, durch rein theoretische Untersuchungen die Aufgabe zu lösen, hatten keinen Erfolg, und man ging deshalb seit Ende des 18. Jahrhunderts zu praktischen Versuchen im großen über, unter denen besonders die von Beaufoy bei London wichtige Ergebnisse brachten, namentlich deshalb, weil bei ihnen zum ersten Male unterschieden wurde zwischen dem Widerstande, den die Form des Schiffes verursacht, und dem von der Reibung des Wassers herrührenden. Seitdem blieben die Schlepversuche mit kleineren und größeren wirklichen Fahrzeugen oder geeigneten Schwimmkörpern überhaupt das wichtigste Mittel, um auf den voraussichtlichen Widerstand eines neu zu erbauenden Schiffes zu schließen, wenn auch bei dem Mangel hinreichend begründeter allgemeiner Gesichtspunkte Fehlgriffe nicht ausbleiben konnten, namentlich, weil auch die Propeller auf den Widerstand des Schiffes Einfluß haben. Die Ergebnisse der Versuche Beaufoy's wurden übrigens erst später bekannt, und als um 1800 Robert Fulton begann, mit Sorgfalt und Umsicht Unterlagen für seine Entwürfe von Dampfschiffen zu sammeln, war er noch im wesentlichen bei Schätzung des Widerstandes auf eigene Versuche ange-

wiesen. Figur 145 zeigt eine noch jetzt vorhandene Tabelle Fultons über den Widerstand von Körpern verschiedener Form bei verschiedenen Geschwindigkeiten.



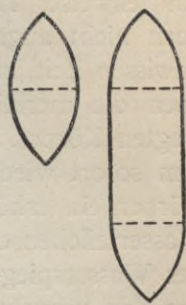
Figur 145.

(Diese sind in Seemeilen für die Stunde angegeben. Eine Seemeile ist gleich 1852 m. Die noch jetzt gebräuchliche Angabe der Schiffsgeschwindigkeit nach Knoten, herührend von den Knoten in der Leine des zum praktischen

Messen der Geschwindigkeit dienenden Loggs, bedeutet ebenso viele Seemeilen in der Stunde. „Ein Schiff macht zehn Knoten,“ heißt also, es legt in der Stunde zehn Seemeilen $= 10 \times 1852$ m zurück, oder in der Sekunde annähernd 5 m.) So zahlreich nun aber auch die praktischen Versuche zur Bestimmung des Schiffswiderstandes waren, zu denen die mächtig sich entwickelnde Dampfschiffahrt immer erneuten Anlaß gab, und so viele Mechaniker sich auch mit dem Gegenstande beschäftigten, so wurde doch bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts eine neue grundlegende Anschauung nicht gewonnen, und man stand bis dahin im wesentlichen immer noch in der Vorstellung des Stoßes der Wasserfäden gegen das Vorschiff, von dem schon Newton und Euler ausgegangen waren, nur daß der Reibung des Wassers an den Schiffswänden und der Form des Hinterschiffes ein größerer Einfluß eingeräumt wurde.

Der Druck, den ein freier gleichmäßiger Wasserstrahl bei senkrechtem Auffallen auf eine ebene Fläche erzeugt, ist leicht zu berechnen. Er muß offenbar so groß sein, wie der Druck, den die Fläche ihrerseits auf die Wasserteilchen ausüben müßte, um dieselbe Strahlgeschwindigkeit zu erzeugen. Dieser Druck ist ferner zu vergleichen mit dem einer Wassersäule, die eine Ausflußgeschwindigkeit ergibt gleich der des aufprallenden Wasserstrahles. Die Höhe dieser Wassersäule ist aus der Falltabelle zu entnehmen, wie wir wissen, aus der sich aber auch ergibt, daß zur Erzeugung einer doppelten Ausflußgeschwindigkeit nicht die doppelte, sondern die vierfache Höhe erforderlich ist. Deshalb wird auch der Wasserstrahl bei doppelter Geschwindigkeit den vierfachen Druck auf die getroffene Fläche ausüben, allgemein wird sein Druck dem Quadrate seiner Geschwindigkeit proportional sein. Nun stoßen die Wasserfäden allerdings nicht senkrecht auf das Vorschiff, denn die Notwendigkeit von dessen Zuschärfung war ja von Anbeginn erkannt, also auf geneigte Flächen, sie wirken auf diese demnach nur mit einem Teile der Stoßkraft, die sich ebenfalls berechnen läßt. Aber das Gesetz der Druckzunahme mit der Geschwindigkeit bleibt dasselbe, oder, was hier das Wesentlichste ist, der Schiffswiderstand wächst bei der zugrunde gelegten Anschauung quadratisch mit der Geschwindigkeit. Dieses Gesetz hatte schon Newton abgeleitet, und Euler hatte sich in seinem 1776 erschienenen Buche über den

Widerstand und die Form von Schiffen bemüht, durch Zerlegung des ganzen dem Schiffe entgegen wirkenden relativen Wasserstromes in einzelne Wasserfäden und Berechnung und Summierung ihrer Wirkung praktisch brauchbare Angaben zu erzielen, die sich aber als unzutreffend erwiesen. Denn wäre diese Berechnungsweise richtig, so würden Schiffe der beiden in Figur 146 angedeuteten Formen gleichen Widerstand haben, dieselbe Maschinenleistung würde also bei sehr verschiedener Größe der Schiffskörper dieselbe Geschwindigkeit ergeben, oder es würde nur der Verlängerung des Mittelschiffes bedürfen, um bei gleichbleibendem Widerstande die Tragfähigkeit des Schiffes beliebig zu erhöhen, was alles der Erfahrung widerspricht. In Ermangelung besserer Anhaltspunkte ist aber lange eine Formel zur Berechnung des



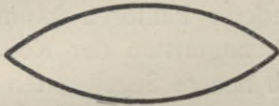
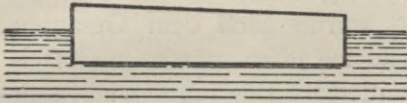
Figur 146.

Schiffswiderstandes in Gebrauch geblieben, die als eine vereinfachte Newton-Eulersche Formel mit Erfahrungskoeffizienten bezeichnet werden kann. Man nahm nämlich als gestoßene Fläche das Areal des größten (Haupt-) Spantes, das Quadrat der Geschwindigkeit, das Gewicht der Kubikeinheit Wasser und multiplizierte das aus den drei Größen gebildete Produkt mit einem Zahlenfaktor, der die Formelwerte in Uebereinstimmung mit der Wirklichkeit brachte. Bei metrischen Maßsystemen schwankte der Koeffizient zwischen den weiten Grenzen von etwa $\frac{1}{13}$ bis $\frac{1}{2}$, je nach Art, Form und Größe des Schiffes, und alles nicht in der Formel unmittelbar Ausgedrückte, namentlich der Reibungswiderstand, mußte durch richtige Wahl des Koeffizienten nach Takt und Empfinden des Schiffbauers berücksichtigt werden. Eigentlich besagte die Formel also nichts weiter, als die starke Zunahme des Widerstandes mit der Geschwindigkeit, und insofern hatte sie die Erfahrung für sich. Im übrigen aber war das Wesentlichste der Vergleich mit möglichst gleichzeitig ausgeführten Schiffen, der denn auch den einzig verlässlichen Anhalt bei Neubauten bildete.

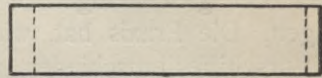
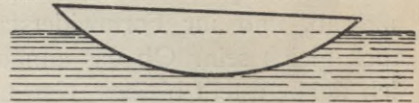
Zu den neueren Anschauungen über den Widerstand führten sorgfältige Beobachtungen über das tatsächliche Verhalten des Wassers in der Umgebung von bewegten Schiffen. Wenn man ein Brett senkrecht gegen das Wasser bewegt, so entsteht sichtlich ein Aufstau des Wassers an der Vorderseite und umgekehrt ein teilweiser Hohlraum an der Rückseite. Das Wasser kann vorn nicht augenblicklich Platz machen, sondern bedarf einer gewissen Zeit, zur Seite zu fließen, und den Anstoß dazu bildet eben die merkliche Hebung des Wasserstandes vor dem bewegten Körper. Die Wasserfäden können sich auch nicht hinter ihm sofort wieder zusammenschließen. Während also vor dem Körper ein erhöhter Druck entsteht, einerseits infolge des den Wasserteilchen erteilten Antriebes, andernteils durch die Hebung des Wasserspiegels, wird auf der Rückseite der Druck erniedrigt aus den umgekehrten Ursachen, das Wasser kann dem Körper nicht schnell genug folgen, der Wasserspiegel ist zudem erniedrigt. Das bei ruhendem Körper bestehende Gleichgewicht des Druckes auf die Vorderfläche und Hinterfläche ist also gestört. Je schneller sich diese Störung in jedem Augenblicke vollziehen muß, desto größer ist der Widerstand, den der bewegte Körper findet. Die Größe der Störung hängt naturgemäß ab von der Geschwindigkeit und von der Ausdehnung der ebenen Vorderfläche, die wir zunächst annehmen. Wenn nun vor die ganze ebene Fläche etwa ein schlankes Dreieck mit der Spitze nach vorn gesetzt wird, so haben bei derselben Geschwindigkeit die Wasserteile mehr Zeit, zur Seite zu weichen, und während die ganze an die ebene Fläche prallende Wassermasse plötzlich ausweichen sollte, bleibt ihr jetzt dazu die Zeit, während der das vorgesezte Dreieck einen Weg zurücklegt gleich dem Abstände seiner Spitze von der Basis. Die Zuschärfung hat also ein allmählicheres Verdrängen des Wassers zur Folge, und umgekehrt, wenn eine ähnliche Zuschärfung der Rückseite vorgesehen wird, hat es mehr Zeit, den bei der Bewegung entstehenden Hohlraum auszufüllen und sich hinter dem Schwimmkörper wieder zusammenzuschließen. Die Zuschärfung auf beiden Seiten verringert also bei derselben Geschwindigkeit den Widerstand, wie schon die frühesten Erfahrungen bewiesen. Je schlanker die Vorder- und Hinterform ist, um so geringer müßte demnach auch der Widerstand werden, wenn die bisher betrachtete Ur-

sache — der Formwiderstand — die allein wirkende wäre. Die Erscheinungen des Anstauens des Wassers an der Vorderseite, des Hohlraumes auf der Rückseite, und der Einfluß der Zuschärfung lassen sich übrigens im kleinen mit zähen Flüssigkeiten, etwa recht dickem Oele, sehr anschaulich machen.

Die Zuschärfung der Schiffsenden kann nun auf zwei verschiedene Arten angenommen werden, keilförmig (Figur 147) und muldenförmig (Figur 148) und alle Schiffsförmungen lassen sich auf

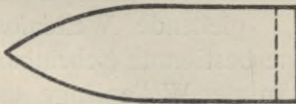
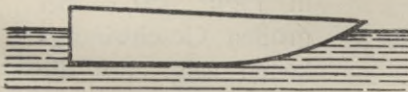


Figur 147.

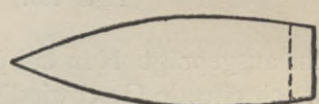
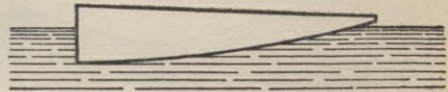


Figur 148.

diese beiden Grundformen zurückführen, mehr oder weniger deutlich auf den ersten Blick, aber bei stufenweiser Zerlegung immer erkennbar. Im allgemeinen kann man sagen, daß bei den heutigen Schiffen das Vorschiff sich als Keilform kennzeichnet, das Hinterschiff mehr als Muldenform, wenn man den schmalen Auslauf nach dem Kiele weggeschnitten denkt, welche Verbin-



Figur 149.



Figur 150.

dung in Figur 149 schematisch angedeutet ist. Diese im Grunde alte zusammengesetzte Form wird neuerdings mit mehr ausgeprägtem Charakter besonders für kleinere Fahrzeuge, beispielsweise für Schnellboote, vielfach ausgeführt und wird als Tetraederform bezeichnet, wobei die Schärfe des Vorderkieses senkrecht steht, des Hinterkieses wagrecht liegt (Figur 150). Ersichtlich ist

damit aber nur eine ausgeprägtere Verschmelzung der oben keilförmig und muldenförmig genannten Arten eingetreten. Die vorstehenden Formen sind natürlich nur schematisch aufzufassen, in Wirklichkeit werden durch Abrundungen allmähliche Uebergänge geschaffen, auch andere Verhältnisse von Länge, Breite und Tiefe eingehalten.

Nach ihrer Displacementkurve würden die beiden in den Figuren 147 und 148 gezeichneten Grundformen gleichwertig sein, d. h. ihre Spantenareale nehmen in gleichem Verhältnisse zu und ab, und ihr Formwiderstand würde nach dem Gesagten auch gleich sein. Ob das annähernd zutreffen würde, muß freilich dahingestellt bleiben, eine unmittelbare Bestätigung läßt sich wegen der gleichzeitigen Wirkung anderer Faktoren kaum erbringen. Die Praxis hat, wie erwähnt, zugunsten der Keilform des Vorschiffes entschieden, wenn auch neuere Segeljachten eine sichtliche Annäherung an die Muldenform im Vorschiffe zeigen. Wie aber auch die Formen sein mögen, immer entsteht am Bug ein gewisser Stau des Wassers, der das Schiff in seiner Bewegung begleitet, und Anlaß gibt zur Bildung von regelmäßigen langen Wellen, wie jede Wassermasse, die über den Wasserspiegel erhoben und dann wieder freigelassen wird. Das Wasser zeigt deshalb um das Schiff herum nicht mehr einen ebenen Spiegel, sondern einen Wechsel von Wellenberg



Figur 151.

und Wellental, wie in übertriebener Form in in Figur 151. Bei großen Geschwindigkeiten zeigt sich die den Schiffkörper begleitende Wellenform

sehr ausgeprägt. Nun hat jede Welle eine bestimmte (scheinbare) fortschreitende Geschwindigkeit bei bestimmter Wellenlänge, und ferner weiß man von jeder schwingenden Bewegung überhaupt (man braucht nur an Pendel zu denken), daß ihre Erhaltung nur geringe Arbeit beansprucht gegenüber der Arbeit, die zu ihrer ersten Erzeugung aufzuwenden ist. Theoretische Untersuchungen von Rankine, Russel, Froude u. a. haben dann ergeben, daß der Formwiderstand des Schiffes relativ am kleinsten wird, wenn dessen Geschwindigkeit übereinstimmt mit der fortschreitenden Geschwindigkeit der erzeugten Wellen, während

andere Geschwindigkeiten immer zur Bildung von neuen Wellen Anlaß geben, die vermehrten Aufwand von Leistung erfordern. Diese theoretischen Ergebnisse sind durch die Praxis genügend bestätigt und werden bei Beobachtung eines Schiffes, das seine Fahrt allmählich steigert, auch recht wahrscheinlich. Es gibt deshalb für einen Schiffskörper bestimmter Form eine gewisse Geschwindigkeit, über die hinaus sein Formwiderstand unverhältnismäßig stark zunimmt. In dieser Hinsicht stehen also lange Schiffskörper immer günstiger als kurze, und wenn, wie bei Schnellbooten, die ihnen eigentümliche kritische Geschwindigkeit überschritten werden muß, so kann das nur auf Kosten einer besonders großen Maschinenleistung geschehen. — Diese kurzen Andeutungen über eine besonders schwierige und viel umstrittene Frage müssen hier genügen, zu einem lebhaften Empfinden ihres Wesens kann aber vielleicht ein einfaches Analogon nützlich sein. Ein langes schweres Pendel in seiner natürlichen Schwingung zu erhalten, entgegen den durch die Bewegung geweckten Widerständen, bedarf es nur geringer wiederholter Anstöße, wenn diese im Takte mit der natürlichen Schwingungsdauer erfolgen. Soll aber eine andere Schwingungsdauer erzwungen werden, so müssen die hemmenden und fördernden Anstöße viel stärker sein, und um so mehr, je größer die Unterschiede zwischen der natürlichen und der erzwungenen Schwingung werden sollen.

*

Der zweite wesentliche Widerstand der Schiffe bildet die Reibung der benetzten Außenfläche im Wasser. Man ist geneigt, diesen Widerstand für unerheblich zu halten, kann aber schon an flatternden Fahnen beobachten, wie erheblich die Reibung selbst bei einem so viel leichteren Medium wie Luft sein kann. Eine Vorstellung der Reibung im Wasser erhält man auch leicht durch ein von einem Boote frei nachgeschlepptes Tuch und schon durch ein längeres Tau. Tatsächlich haben auch zahllose Versuche den großen Einfluß der Wasserreibung erwiesen, der natürlich auch vom Zustande der benetzten Flächen abhängt, und man schätzt sogar bei den geringen Geschwindigkeiten von 6 bis 8 Knoten sonst gut gebauter Schiffe den Reibungswiderstand

zu 80 bis 90 % des gesamten Widerstandes, der bei den größten Geschwindigkeiten, sofern sie unterhalb der kritischen Formgrenze bleiben, mehr als zur Hälfte von der Reibung herühren mag.

Auf Grund der vorstehend entwickelten Anschauungen und an Hand vieler, nach theoretischen Gesichtspunkten angestellter Versuche entstanden eine Anzahl Formeln zur Berechnung des Schiffswiderstandes, so die bekanntesten von Rankine, Mittendorf und anderen, die für bestimmte Schiffsklassen, für die sie galten, auch befriedigende Ergebnisse brachten, aber weit übertroffen wurden durch die Arbeiten von Froude, die vor etwa 50 Jahren begannen, und durch viele Jahre fortgesetzt wurden. Froude unterschied zunächst schärfer als vorher zwischen den verschiedenen, den Widerstand bedingenden Faktoren, und stellte für den wellenbildenden und den wirbelbildenden Teil, zusammen den eigentlichen Formwiderstand, die Vermehrung des Formwiderstandes durch den Propeller (wir werden diesen später noch erwähnen) und den Reibungswiderstand besondere Versuche an. Er fand den letzteren nicht nur unabhängig von dem Zustande der benetzten Fläche, beispielweise doppelt so groß bei einer Belegung mit Baumwollstoff, als bei Firnißanstrich, sondern auch von der Länge der Fläche und zwar in wenig einfachem Verhältnisse zu dieser stehend, so daß der Widerstand für die Flächeneinheit bei einer gewissen Verlängerung der Fläche sinken kann, vor allem aber proportional dem Quadrate der Geschwindigkeit. Die Reibung des Wassers, was übrigens auch rein physikalische Untersuchungen gelehrt haben, ist deshalb nicht unmittelbar mit der Reibung fester Körper zu vergleichen. So verwickelt nun aber auch die Berücksichtigung der Reibung bei Schiffen sich gestaltet, so liegen doch jetzt so viel Beobachtungswerte dafür vor, daß ihre Berechnung ziemlich sicher geworden ist.

Als die wichtigste Leistung Froudes, die ganz neue Gesichtspunkte geschaffen hat, muß seine Begründung der Modellschleppversuche angesehen werden, die wichtige Aufschlüsse über den Formwiderstand gebracht haben und jetzt allgemein angewendet werden, um aus einem etwa 4—5 Meter langen Modelle das Verhalten des zu erbauenden Schiffes beurteilen zu können. Es ist klar, wenn man mit einer ganzen Reihe geometrisch

ähnlicher Modelle desselben Schiffskörpers in abgestufter Größenfolge Schleppversuche anstellt und dabei den Widerstand bei verschiedenen Geschwindigkeiten mißt, so wird sich eine gesetzmäßige Reihe von Werten ergeben, und man wird für Modellgrößen, die zwischen den wirklich benutzten oder darüber liegen, mit Sicherheit ihren Widerstand im voraus angeben können. Eine unmittelbare Verwendung für Schiffe würde dieses Verfahren aber nur finden können, wenn man mit den Modellgrößen in nicht zu starken Abstufungen so nahe an die wirkliche Schiffsgröße kommen könnte, daß noch ein zweifelfreier Schluß auf deren Verhalten zulässig wäre. Das ist natürlich nicht durchführbar. Nun hat aber Froude aus langen Versuchen ein wohlbegründetes Gesetz geschaffen, das ein Verhältnis angibt zwischen dem Widerstande eines einzelnen kleinen Modelles und dem des geometrisch ähnlich gebauten großen Schiffskörpers, und mit diesem Gesetze ist nun möglich, jenen Widerstand vorher anzugeben, nachdem man durch Schleppversuche mit dem Modelle die diesem zukommenden Werte ermittelt hat. Auf diesem Wege sind also praktische Vergleiche im kleinen zwischen verschiedenen Schiffsformen anzustellen, und in steter Wechselwirkung mit der Rechnung für das zu erbauende Schiff nutzbar zu machen. — Die große Fruchtbarkeit des Verfahrens nach Froude hat bei den Marinen und bei größeren Werften zur Anlage besonderer Schleppversuch-Anstalten geführt, die im wesentlichen in einem langen Bassin bestehen, über das ein Schienenwagen hin und her fahren kann. Von der Plattform dieses durch Maschinen bewegten Wagens aus werden die Modelle in richtiger Tauchtiefe durch das Wasser geschleppt. Die Modelle selbst bestehen meist aus einer dicken Schale von Paraffin auf einem Holzgerippe, sowohl der leichten Bearbeitung, wie der fettig glatten Oberfläche wegen, ihre Herstellung wird durch besondere Kopiermaschinen erleichtert. — Eine solche Anstalt besitzt jetzt auch die Technische Hochschule in Berlin.

Die so wichtige Bestimmungweise des Schiffswiderstandes ist ein Beispiel dafür, wie mühsam oft die Technik die Grundlagen für ihre Arbeiten schaffen muß, und wie wenig ihr rein spekulative Betrachtungen manchmal helfen. Es ist nützlich, das gelegentlich hervorzuheben, um falschen Vorstellungen entgegen zu arbeiten, die in der Technik, wie auch in der Physik und

verwandten Zweigen, alles Wesentliche und Schwierige von einigen mathematischen Formeln beherrscht wännen. Das Schwierige liegt vielmehr immer im richtigen Ansatz der Rechnungen, nicht in ihrer Ausführung. — Es mag hier schließlich noch angeführt werden, daß man neuerdings eine Vervollständigung der Anschauungen über das Verhalten des Wassers zum Schiffe zu erlangen gesucht hat durch Bewegen kleiner Modelle in gefärbtem Wasser, unter Anwendung der Photographie zum Abbilden der Stromfädenform. Auch von dieser Methode können wohl weitere Aufschlüsse in den schwierigen Fragen erwartet werden.

*

Die vorstehenden Betrachtungen über den Widerstand liefern genügenden Anhalt zur Erklärung der Tatsache, daß zur Herstellung derselben Geschwindigkeit größere Schiffe eine verhältnismäßig kleinere Maschinenleistung erfordern. Geht man von der einfachsten Anschauung über den Formwiderstand aus, wie sie sich ergab durch Zuschärfung der zunächst platt angenommenen Enden, und denkt man sich zwei Schiffe geometrisch ähnlicher Form, von denen das eine aber die doppelten linearen Abmessungen, wie das andere hat, damit also das achtfache Displacement, so muß das größere Schiff zwar beim Fortschreiten um dieselbe Strecke die achtfache Wassermenge verdrängen, hat dafür aber die doppelte Zeit zur Verfügung. Der Formwiderstand wird deshalb jedenfalls viel weniger betragen, als der achtfache Formwiderstand des kleineren Schiffes, und, da gleiche Geschwindigkeit für beide Schiffe vorausgesetzt war, wird die erforderliche Maschinenleistung des größeren auch relativ kleiner sein. Oder, wenn man unter spezifischer Maschinenleistung den auf jede Tonne Displacement entfallenden Anteil davon versteht, bei derselben spezifischen Maschinenleistung für beide Schiffe nimmt das größere eine erheblich größere Geschwindigkeit an, gleiche Güte der Propeller natürlich vorausgesetzt. Aehnlich verhält es sich mit dem Einflusse des Reibungswiderstandes. Das linear doppelt so große Schiff mit dem achtfachen Displacement hat nur die vierfache Oberfläche des kleineren, bei gleicher Geschwindigkeit erfordert es also annähernd nur die vierfache Maschinenleistung; im ganzen also, wie auch die Widerstand-

verhältnisse sich genauer gestalten mögen, ist hinsichtlich der Geschwindigkeit oder der spezifischen Maschinenleistung das größere Schiff immer im Vorteile gegen das kleinere. Deswegen haben größere Schiffe im allgemeinen nicht nur größere Geschwindigkeit, sondern der von ihren Maschinen in Anspruch genommene Raum ist noch verhältnismäßig kleiner, ihr nützliches Tragvermögen um soviel größer. Ganz ähnliche Betrachtungen lassen sich auch für Segelschiffe anstellen. Kleinere Schiffe müßten unter sonst gleichen Umständen verhältnismäßig viel größere Segelflächen führen, um die Geschwindigkeit der größeren zu erreichen, und wenn, wie bei Rennjachten, die erlangte Geschwindigkeit der Endzweck des Fahrzeuges ist, so verlangen die hier besonders großen Segelflächen so schweren und tiefliegenden Ballast, Bleikiele und dergl., zum Herabziehen des Systemschwerpunktes, daß von einer Nutzlast des Fahrzeuges überhaupt nicht mehr gesprochen werden kann.

In Uebereinstimmung mit diesen allgemeinen Angaben zeigen denn auch die spezifischen Maschinenleistungen für die verschiedenen Schiffsarten sehr große Abweichungen. Schiffe von 10 000 t Displacement und darüber, die großen Schlachtschiffe, erfordern für 1 t bei 14—15 Knoten Geschwindigkeit nur 1 indiziertes Pferd, bei 18—20 Knoten schon etwa 1,30 Pferde, Schiffe des halben Displacements aber fast 2 Pferde, kleine Kreuzer von 2500 t etwa 2,5 Pferde, kleine Avisos aber von 1000 t bei 20—21 Knoten 5 Pferde. Größere Kanonenboote alter Art von 700 t geben mit 1 Pferd spezifischer Leistung nur ungefähr 10 Knoten. Die noch wesentlich kleineren Torpedo-Divisionboote von 400 t müssen bis 15 Pferde aufwenden, um die freilich besonders große Geschwindigkeit bis 30 Knoten und darüber zu erreichen, während die größeren Torpedoboote von 150 t für einige 20 Knoten etwa 7 Pferde aufwenden. Neuerdings sind wieder von der berühmten Werft von Thornycroft in England ganz kleine Torpedoboote gebaut, nur etwa 12 m lang und von 4—5 t Displacement, die mit einer verhältnismäßig sehr starken Maschine (Petroleummotor) von 120 Pferd bis 20 Knoten erreichen, also 25—30 Pferde spezifische Leistung verbrauchen. Die kleinsten Schiffe, wenn man so will, die Torpedos, haben ganz eingetaucht ein Displacement von $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ t, ihre spezifische Maschinenleistung muß aber wohl zu etwa 100 angesetzt werden,

wenn sie über 20 Knoten erreichen sollen. Diese wenigen Angaben sollten hier nur zur Erläuterung dienen, in welchem Maße die Größe des Schiffes und die geforderte Geschwindigkeit von Einfluß auf die spezifische Maschinenleistung ist. Es muß dabei aber noch bemerkt werden, daß die Maschinenleistung immer viel größer ist, als die aus dem Schleppwiderstande und der Geschwindigkeit sich ergebende. Einmal geht von der indizierten Leistung infolge der Widerstände in der Maschine selbst ein Teil verloren, sodann ist der Wirkungsgrad des Propellers zu berücksichtigen, und endlich vermehrt dieser immer den reinen Widerstand des Schiffkörpers. In roher Annäherung kann man vielleicht sagen, daß die indizierte Leistung doppelt so groß sein muß, wie die Schleppleistung.

Auch bei Schiffen kann man übrigens, wie bei den Landfuhrwerken, den Widerstand im Verhältnisse zu ihrem Gewichte angeben. Als Beispiel dafür, und wie sehr der Widerstand von den besonderen Umständen abhängt, mögen noch folgende, von Froude aus Schleppversuchen mit drei einigermaßen vergleichbaren Schiffen gefundene Widerstände dienen. Das eine hatte bei 10 Knoten $\frac{1}{250}$ seines Gewichtes an Widerstand, das zweite bei 13 Knoten nur $\frac{1}{350}$, das dritte trotz der hohen Geschwindigkeit von 16 Knoten auch nur $\frac{1}{200}$. — Diese anschaulichen Zahlen zeigen zur Genüge, wie sehr alle einflußreichen Faktoren zu berücksichtigen sind.

III.

Die ältesten Mittel zur Fortbewegung der Schiffe, die Ruder und Segel, haben sich bekanntlich bis heute erhalten und werden auch immer bleiben, wenn auch die Ruder nur noch für kleine und kleinste Fahrzeuge in Betracht kommen. Dagegen haben die Segel ihre wahre Bedeutung erst seit etwa 1300 erhalten, wiewohl Segel überhaupt schon auf bildlichen Darstellungen aus der Zeit 3000 v. Chr. enthalten sein sollen.

Die Ruder, oder Riemen (Remen) wie der Seemann sagt, bildeten im Altertume und Mittelalter das eigentliche Treibmittel für Schiffe und zwar in der noch heute wichtigsten Form der zweiarmigen Hebel, die auf dem Bord des Fahrzeuges einen festen Stützpunkt erhalten. Außer diesen Rudern im engeren

Sinne werden bekanntlich in den schmalen Booten der Südsee-Insulaner, der Indianer und anderer Naturvölker die frei in den Händen gehaltenen Paddelruder benutzt, als Doppelpaddel beispielweise in den Kajaks der Eskimos, und gelegentlich machen auch bei uns einzelne Insassen kleiner Fahrzeuge davon Gebrauch. Die Paddel werden ihre Berechtigung haben bei schmalen leichten Booten und in teilweise beschränktem Fahrwasser, sie befördern auch die Manövrierfähigkeit des Bootes, da der Handhabende mit dem Gesicht nach vorn sitzt oder steht und nach Belieben mit ihnen Vorwärtsgang oder Wendungen auf der Stelle eintreten lassen kann, sie sind aber weniger günstig für die zweckmäßige Entfaltung der vollen menschlichen Leistung, da sie nicht so gleichmäßige Betätigung des ganzen Körpers zulassen. Sie standen deshalb im allgemeinen Gebrauche von jeher weit hinter den aufgelegten Rudern zurück.

Das größte Ruderschiff, von dem berichtet wird, dürfte die Alexandra des Hiero von Syrakus (269—215 v. Chr.) gewesen sein, das angeblich nicht weniger als 4000 Ruderer gehabt haben soll, und in seinen Abmessungen unseren großen Dampfern gleich gewesen sein muß, aber nur als Kuriosum gelten kann, da es beim damaligen Stande der Schiffbautechnik nicht seetüchtig herzustellen war. Der ganze Bau mit seinen vielen Türmchen und andern Aufbauten macht auch kaum noch den Eindruck eines Schiffes im heutigen Sinne. Interessant ist aber der Vergleich der Ruderer-Leistung mit der einer Dampfmaschine. Die 4000 Ruderer haben auch selbstverständlich nicht an ebenso vielen einzelnen Rudern arbeiten können, denn wenn selbst fünf Ruderreihen übereinander auf jeder Seite eingerichtet gewesen wären, so hätten doch allerhöchstens vielleicht 1000 Ruderer Platz gehabt, und man muß deshalb von vornherein annehmen, daß jedes Ruder von einer Anzahl Leute bedient wurde, was bei der Wichtigkeit der langen oberen Ruder ohnehin nötig gewesen wäre.

Von viel bescheideneren Abmessungen wie der erwähnte Koloß sind wirklich gebrauchte Ruderschiffe des Altertums gewesen, so die Trieren von 40—45 m Länge, 4—5,5 m Breite, 2—3 m Tiefgang. Sie hatten flachen Boden und ungefähr 50 Mann eigentliche Besatzung, aber 150—170 Ruderer, die dem Fahrzeuge eine Geschwindigkeit von 5—6 Knoten gegeben haben

sollen, also in der Stunde bis 11 km. Auch diese Rudererzahl konnte nicht in zwei einfachen Reihen an den Schiffseiten Platz finden, selbst wenn man einen Teil als Reserve ausscheiden wollte, sie müssen also zu mehreren je ein Ruder gehandhabt haben, oder in mehreren Reihen übereinander gesessen haben.

Die Bezeichnung der alten Ruderschiffe als Biremen, Trieren, Penteren usw. hat zu vielen Erörterungen Anlaß gegeben. Gegen die Annahme von zwei, drei, fünf Ruderreihen übereinander ist eingewendet worden, daß damit notwendigerweise sich eine verschiedene Länge der Ruder für die einzelnen Reihen ergäbe, und zwar für die oberen eine ganz unhandliche Länge, so daß ein richtiges Takthalten der Ruderer ausgeschlossen gewesen wäre, die Schiffe außerdem aber eine viel zu große Höhe über dem Wasser erreicht hätten. Man hat deshalb die Bezeichnung der Mehruderer auch in dem Sinne deuten wollen, daß bei einfachen Ruderreihen an jedem Ruder eine entsprechende Zahl Leute tätig war. Dem Vorwurfe zu großer Schiffshöhe kann nun teilweise wenigstens mit der naheliegenden Anordnung begegnet werden, bei der die Ruderer nicht unmittelbar übereinander, sondern etwas versetzt saßen, derart, daß die obere Reihe wohl über der unteren aber gleichzeitig in den Zwischenräumen der einzelnen Leute Platz fand. Bei dem in den Einzelheiten noch nicht ganz erledigten Streite der beiden Auffassungen, an dem sich auch Napoleon III. beteiligte, hat sich aber wohl als sicher ergeben, daß zwei- und dreireihige Schiffe tatsächlich in Gebrauch gewesen sind, daß aber gleichzeitig auch die Arbeit mehrerer Leute an einem Ruder üblich war, und zwar in steigender Zahl mit der Länge der oberen, über die unteren fortragenden Ruder. Nur so läßt sich erklären, wie alle Ruder, die leichteren und die schwereren, in gleichem Takte schlagen konnten, und nur in dieser Weise kann man die Angabe von sogar 20 rudrigen Schiffen verstehen. Auch bei den Malayen hat es früher mehrreihige Schiffe gegeben. Uebrigens ist sehr interessant, daß schon im Altertum der immer wieder auftauchende Streit über den Vorzug weniger schwerer Schiffe gegenüber vielen leichten sich bemerkbar gemacht hat. Bei Actium siegten die Römer vornehmlich durch die leichten schnellen zweireihigen Schiffe der Liburner, welcher Schiffsklasse die Römer später immer Vorliebe bewahrten. Bei einem dreireihigen Schiffe hätten also etwa in der untersten

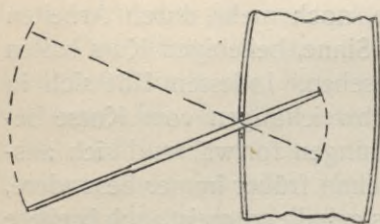
Reihe vier Mann ein Ruder gehandhabt, in der folgenden sechs, in der obersten zehn, eine Annahme, die wenigstens eine Möglichkeit andeutet. Daß bei solcher Rudererzahl das Takthalten große Uebung erforderte, ist selbstverständlich. Es wird auch berichtet, daß oft ein Flötenbläser das Rudertempo anzugeben hätte, was eine Nebenbeschäftigung des Schiffskoches gewesen sei. Auf die Einzelheiten der Streitfrage können wir hier nicht eingehen, es sei nur noch bemerkt, daß die spätere Zeit nur einreihige Ruderschiffe gebaut hat, diese aber noch sehr lange, als schon die Segelschiffahrt zu hoher Blüte gediehen war. Für Kriegsfahrzeuge hielt man jedenfalls der besseren Manövrierfähigkeit im Nahkampfe wegen am Ruder fest, die genuesischen und venetianischen Ruder-Galeeren waren auch weitaus elegantere Fahrzeuge, als die noch ziemlich plumpen Segler und standen an Ansehen und im Range den letzteren voran. Ruder-Kanonenboote wurden auch noch in den Jahren 49—51 von den Schleswig-Holsteinern gebaut und sogar noch bis in die 60er Jahre von der preußischen Marine etatmäßig geführt.

Daß man mit den Rudern nicht nur vorwärts und rückwärts fahren, sondern auch durch langsames Arbeiten oder vollständiges Aussetzen auf einer Seite, noch mehr durch Arbeiten auf beiden Seiten in verschiedenem Sinne, beliebigen Kurs halten und wenden kann, ist leicht einzusehen. Indessen läßt sich in dieser Weise schwer den kleinen Abweichungen vom Kurse begegnen, die durch zufällige Einwirkungen fortwährend sich ausbilden wollen, und man hat daher schon früher immer besondere, mehr in der Kielrichtung des Schiffes gehaltene, meist auch breitere Ruder am Hinterschiffe benutzt, die durch einzelne Schläge oder durch mehr oder weniger tiefes Eintauchen und Schräghalten den Abweichungen vorbeugten. Daher der Name Steuerruder, wofür der Seemann nur schlechthin Ruder sagt. Das jetzt allein übliche Steuer in Form eines senkrecht am Hintersteven drehbaren Blattes ist aber verhältnismäßig jungen Datums

Der Unkundige hält das Rudern oft für eine kleine Sache und wird erst durch eigenen Versuch vom Gegenteil überzeugt. Welch eine profunde Wissenschaft das Rudern aber ist, ahnt er meist nicht. Darüber könnte er sich durch Lesen einer längeren Artikelserie in einem Sportblatte überzeugen, wie etwa „Ueber

das Geheimnis des englischen Schlages“ oder ähnlicher. Wer aber auch kein Interesse für die raffinierten Anforderungen des Sportes aufzubringen vermag, wird doch leicht begreifen, daß in den Formen des Ruders bestimmte Verhältnisse herrschen, und seine Handhabung gut geübt werden muß, wenn der Ruderer mit ihnen seine volle Körperleistung zweckdienlich zur Geltung bringen will. Die Länge des Griffendes vom Auflagepunkte aus, die Länge des äußersten Teiles, die Form des Blattes, der Sitz des Ruderers zum Auflagepunkte, das Schlagtempo und viele andere Punkte sind für die Ruderarbeit von Bedeutung, wie sich beispielweise auch für Fahrräder bestimmte Verhältnisse als zweckmäßig ergeben haben, die bei dem Ineinandergreifen von mechanischen und physiologischen Gesichtspunkten im wesentlichen nur durch lange Erfahrung festgelegt werden konnten. Tiefer auf die Geheimnisse der Ruderei einzugehen, verbietet hier schon der verfügbare Raum, was im folgenden über das Rudern gesagt wird, soll hauptsächlich als Unterlage bei der Beurteilung der Propeller überhaupt dienen.

Die Mechanik des Ruderns ist bekannt. Der Ruderer bewegt das Griffende durch Vorstoßen und Anziehen hin und her



Figur 152.

(Figur 152), dabei das Ruderblatt aus dem Wasser hebend und eintauchend. Das Blatt findet beim Durchziehen durchs Wasser einen Widerstand, der von der eingetauchten Fläche des Blattes und seiner Geschwindigkeit abhängig ist und eine Rückwirkung

auf das Boot ausübt. Der Widerstand des Ruders ist aber unabhängig von der Geschwindigkeit des Bootes, was ein Widerspruch zu sein scheint gegen die einfache Beobachtung, daß bei noch nicht in voller Fahrt befindlichem Boote der Versuch, das normale Tempo einzuhalten, übergroße Anstrengungen erfordert. Der Widerspruch fällt aber fort, wenn man die Geschwindigkeit des Ruderblattes auf das hier ruhend vorausgesetzte Fahrwasser bezieht. Der einfacheren Betrachtung wegen wollen wir nun annehmen, daß die Blattfläche nahezu auf einen Punkt, am besten den Endpunkt konzentriert wäre. Es müßten sonst die einzelnen Teile des Blattes berücksichtigt werden, da sie verschiedene Ge-

schwindigkeit haben. Auch soll der bogenförmige Weg des Blattendes gerade gedacht werden.

Tauchte das Ruder nicht in das nachgiebige Wasser, sondern fände das Blattende feste Stützpunkte etwa an einem ruhenden gezahnten Balken parallel der Fahrtrichtung, so würde sich der Vortrieb des Bootes bei jedem Ruderschlage einfach aus dem Uebersetzungsverhältnisse des einen doppelarmigen Hebel darstellenden Ruders ergeben, wie aus Figur 152 sofort zu ersehen. Ein fauler Ruderer, der die Arbeit seinen Kameraden überließe, würde dann ohne jede Anstrengung die Ruderbewegung mitmachen können, denn der Fortschritt des Bootes würde dafür sorgen, daß er immer in richtigen Abständen das Blattende in den gezahnten Balken einsetzte, die Bewegung der andern Ruder würde sich nicht von der des trägen unterscheiden, nur ihre geringe Krümmung beim Durchholen würde bei aufmerksamerem Hinsehen verraten, daß sie die Arbeit des Vortriebes ausführen. Wenig anders sind die Verhältnisse, wenn als Widerhalt der Ruder nicht der feste Balken, sondern das nachgiebige Wasser eintritt. Das träge Ruder könnte auch hier die Arbeit nur markieren, die anderen Ruder würden sich aber leichter als tätig erweisen, denn in dem nachgiebigen Wasser finden sie nur durch ihre größere Geschwindigkeit einen Widerhalt, sie würden also dem trägen bei jedem Schlage etwas voreilen. Dieses Voreilen vor dem trägen Ruder, dessen Blatt, wie vorher auf dem festen Balken, relativ im Wasser ruht, ist aber nicht sehr erheblich, wie man leicht an nahen festen Punkten oder an schwimmenden Holzstückchen bemerken kann, es ist aber doch ein Ausdruck für die von den tätigen Rudern aufgewendete Arbeit. Mit andern Worten, die träge Masse des von den Ruderblättern gefaßten Wassers bildet den Widerhalt und weicht, bei richtigen Verhältnissen der Ruder und richtiger Handhabung, nur wenig aus, die Ruderblätter haben relativ zum Wasser beim Arbeitshube nur geringe Geschwindigkeit, und diese relative Geschwindigkeit bleibt dieselbe, wenn derselbe Ruderdruck erhalten werden soll, gleichgültig, wie groß die Geschwindigkeit des Bootes ist, wenn auch bei größerer Geschwindigkeit des Bootes die Geschwindigkeit des Ruders relativ zum Boote entsprechend größer sein muß.

Das Weitere wird einleuchtender werden, wenn man sich vorstellt, daß die Ruder nicht im Wasser ihren Widerhalt finden,

sondern an beweglichen festen Körpern, etwa an großen Gewichten, die in richtigen Abständen reihenweise dicht über dem Wasser pendelnd aufgehängt sind. Wenn dann das Ruder beim Ausholen immer hinter ein solches Gewicht faßt, so wird dieses zwar durch den Druck des Blattes in Bewegung gesetzt, bietet aber umgekehrt durch seine träge Masse dem Blatte einen Widerhalt, wie vorher die von ihm gefaßte Wassermasse. Nach dem Vorbeifahren des Bootes an einer Reihe der Gewichte würde man nun diese hin und her pendeln sehen, sie haben eine gewisse Bewegungsenergie erhalten, die allmählich durch die Reibung der Luft und der Aufhänge-Organen wieder verzehrt würde, die aber nur herkommen kann von der Tätigkeit der Ruderer. Diese haben also ihre Leistung nicht nur zur Ueberwindung des Bootwiderstandes bei gewisser Geschwindigkeit aufgewendet, sondern einen Teil auf die Bewegung der Pendelmassen verschwendet. Dieser verlorene Teil der Leistung tritt aber offenbar immer notwendig ein, wenn statt eines festen Widerhaltes nur ein solcher an beweglichen Massen erhalten werden kann, und es macht in dieser Hinsicht keinen Unterschied, ob die bewegliche Masse durch das vom Ruderboote gefaßte Wasser oder durch das pendelnde Gewicht gebildet wird. Immer wird an die den Widerhalt bildende Masse ein Teil der Leistung nutzlos übertragen werden müssen.

Wenn somit ein Verlust an Leistung unvermeidlich ist, so muß doch gesucht werden, ihn möglichst klein zu halten, und es wird zu untersuchen sein, welchen Einfluß darauf die Größe der den Widerhalt bildenden Masse hat. Wenn es nur darauf ankäme, einen bestimmten Gegendruck der beweglichen Masse zu erhalten, so könnte diese offenbar sehr verschiedene Größe haben, nur müßte bei geringerer Größe das Ruderblatt sich schneller gegen sie bewegen, ihr eine größere Geschwindigkeit erteilen und umgekehrt. Um in dem Beispiele der Pendelmassen zu bleiben, würde also, um denselben Gegendruck zu erreichen, einer größeren Masse geringere Geschwindigkeit zu erteilen sein, oder einer kleineren Masse größere Geschwindigkeit. Nun ist aber der Falltabelle zu entnehmen, daß die zur Erzeugung einer Geschwindigkeit erforderliche Fallhöhe quadratisch mit jener wächst, die doppelte Geschwindigkeit verlangt die vierfache Fallhöhe, oder mit andern Worten, die Bewegungsenergie einer

Masse ist proportional dem Quadrate ihrer Geschwindigkeit. Sie ist andererseits nur einfach proportional der Masse, denn diese kann man sich immer in beliebig viele Teile mit je derselben Geschwindigkeit zerlegt denken, und ein Teil zu dem andern hinzugefügt, vermehrt die Bewegungsenergie des Ganzen nur einfach um seinen Betrag. Will man also den Leistungsverlust beim Rudern tunlichst klein halten, so ist vorteilhafter, einer großen Wassermasse eine geringe Geschwindigkeit zu erteilen, als umgekehrt. Das bedeutet, je größer die Fläche des Ruderblattes ist, mit um so größerer Annäherung wird das Blatt beim Durchholen des Ruders im Wasser stillstehen, um so mehr wird es sich so verhalten, als wenn es hinter einen festen Widerhalt griffe. Das klingt fast selbstverständlich und kaum einer umständlichen Begründung bedürftig, es gilt aber für alle Schiffspropeller überhaupt, und zusammenfassend kann man allgemein sagen: Soll ein Schiff durch einen in das Wasser greifenden Propeller in Bewegung gesetzt werden, so muß dieser einer Wassermasse in entgegengesetzter Richtung eine gewisse Geschwindigkeit erteilen. Der damit unter allen Umständen verbundene Verlust an Maschinenleistung wird um so kleiner, je größer die bewegte Wassermasse, und je geringer die ihr zu erteilende Geschwindigkeit ist. Wir werden später sehen, wie nach diesem Grundsatz sich die verschiedenen Propeller beurteilen lassen.

Der gefundene Grundsatz, auf das Ruder selbst nun wieder angewendet, stellt die Forderung, beim Durchholen das Blatt recht gleichmäßig zu bewegen, es zunächst stoßfrei einzutauchen, ohne Ruck, aber schnell in die normale Geschwindigkeit überzugehen, am Ende des Hubes es wieder glatt aus dem Wasser zu heben. Man begreift nach dieser Zerlegung wohl, wieviel Uebung dazu gehört, die Folge der Bewegungen zweckmäßig vor sich gehen zu lassen, um die menschliche Leistung so gut als möglich nutzbar zu machen. Einem besonders regen Interesse mag übrigens die genaue Beobachtung der venetianischen Gondeliere empfohlen sein, die mit einem einzigen Ruder ihre Gondeln in jeder Richtung bewegen.

Eine eigentümliche Beobachtung, die auch auf die Propeller im engeren Sinne anwendbar ist, läßt sich hier noch anschließen. Zur Zeit der langen Ruderreihen galt als Erfahrungstatsache, daß die Vermehrung der Ruderer in einer Reihe über eine ge-

wisse Zahl hinaus keinen Nutzen mehr bringe. Wenn nun auch eine scharfe Grenze für diese Zahl nicht wohl denkbar ist, so hat die Ansicht doch einige Wahrscheinlichkeit für sich. Die von dem einzelnen Ruder bewegte Wassermasse erstreckt sich naturgemäß auf einen größeren Bezirk in der Nähe des eingetauchten Blattes, und bei dem geringen Abstände der Ruder voneinander, werden die vom hinteren Bootende nach vorn folgenden zum Teil in schon von dem vorhergehenden bewegten Wasser arbeiten. Wenn alle Ruderer sich gleichmäßig anstrengen, so können sie also eigentlich nicht genau Takt halten, vielmehr müssen die mehr nach vorn sitzenden ihr Ruder schneller durchholen. Bei einer sehr langen Ruderreihe, die schon eine Art zusammenhängenden Stromes an der Schiffsseite erzeugt, müßten die Unterschiede im Tempo schon recht merkbar werden, und da doch noch hinreichende Gleichmäßigkeit herrschen muß, wenn die Ruder sich nicht gegenseitig stören sollen, so sind die anderen Ruderer an der Entwicklung ihrer vollen Leistung behindert und müssen diese zugunsten der gleichmäßigen Bewegungen unwillkürlich verringern. — Für den Propeller überhaupt bedeutet diese Ueberlegung, daß es zwecklos ist, eine Anzahl treibender Organe dicht hintereinander arbeiten lassen zu wollen, denn die folgenden würden doch keinen genügenden Nutzwiderstand finden und nur durch ihre Reibung Maschinenleistung verzehren.

*

Wie schon früher bemerkt, hat das Segel im Altertum und Mittelalter neben dem Ruder eine verhältnismäßig geringe Rolle gespielt. Daß es an sich sehr alt ist, kann nicht verwundern, denn es ist sozusagen kaum möglich, sich seiner Erfindung zu entziehen, wenn man in einem Boote beobachtet, wie sehr die treibende Kraft des Windes mit der ihm dargebotenen Fläche zunimmt. Das Segel wird auch unter günstigen Umständen gern benutzt sein, häufiger schon bei den Römern, als bei den Griechen, aber nur wenn die Windrichtung annähernd mit dem Kurse übereinstimmte. Denn man verstand nur vor dem Winde zu segeln, die Benutzung des Seitenwindes war so gut wie unbekannt. Zum richtigen Segeln gehört, wie sich zeigen wird, die gleichmäßige Wirkung des Steuers und erst als dieses gegen 1300 in der noch

gültigen Form geschaffen war, konnte das Segel sich aus dem bloßen gelegentlichen Aushilfsmittel selbständig entwickeln. Es dauerte aber noch mehrere Jahrhunderte, bis die Segelkunst bis zum Aufkreuzen gegen den Wind ausgebildet war. Bis dahin waren die Ruder immer noch, nunmehr ihrerseits als Aushilfe beibehalten, die volle Selbständigkeit erlangte das Segelschiff erst seit etwa 1600, trotzdem schon seit 1400 in England größere Schiffe bis 600 t entstanden. Die Caravellen des Kolumbus hatten nur etwa 150 t, spätere Hansaschiffe gingen aber teilweise bis zum Zehnfachen dieses Gehaltes. Unter den großen Seehelden des 17. und 18. Jahrhunderts, de Ruyter und Nelson, erlebte das Segelschiff seine höchste Blüte als Kriegswerkzeug, und als der Dampf allmählich in die Marinen einzog, verlor es zwar seine Bedeutung für den Kampf selbst, wurde aber als vereinigt Segel- und Dampfschiff noch sehr lange beibehalten. Erst im Laufe der letzten Jahrzehnte sind überseeische Kriegsschiffe ausschließlich als Dampfer gebaut, nachdem durch die Einführung mehrerer Schrauben mit getrennten Maschinen in einem Schiffe eine genügende Sicherheit gegen Hilfloswerden bei einer Maschinenhavarie gewonnen war. Seitdem ist das Segel in den Kriegsmarinen nur noch spärlich vertreten, während es, sonderbar genug, in den Handelsmarinen einen neuen Aufschwung erlebt hat. Die Segelschiffahrt ist ja auch hier zugunsten der Dampfer stark zurückgegangen, und die Segelschiffe des Handels in der üblichen Größe von 250—600 t sind nicht mehr die Herrscher auf den Meeren, der überseeische Handel hat sich aber in der letzten Zeit mit Vorliebe große Viermaster geschaffen, selbst Fünfmaster wie die „Marie Rickmers“ und „Potosi“, von etwa 9000 t Displacement, also den großen Panzern gleichkommend. Auf der andern Seite hat der Segelsport einen ungemein starken Aufschwung genommen, wie um einen Ersatz für den Niedergang der Segelkunst in der Kriegsmarine zu bilden, und auch für diese werden noch manche ältere Seeoffiziere eine teilweise Wiederaufnahme der großen Leinwandflächen erhoffen.

Das kunstlose Segeln platt vor dem Winde, wie es die Alten verstanden, kann nach den einfachen Erfahrungen beurteilt werden, die man für die Geschwindigkeit des Ruders und seinen Druck auf senkrecht ihm entgegenstehende Flächen gesammelt hat. Wind, der noch nicht als Sturm zu bezeichnen ist, hat

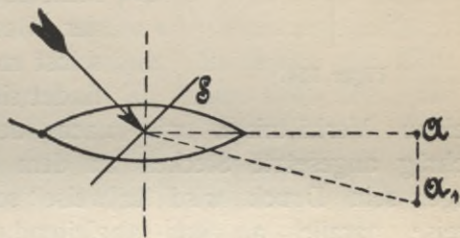
etwa eine Geschwindigkeit von 20 m in der Sekunde, ein leiser Hauch immer noch 3—4 m. Auf das Segel wirksam ist natürlich nur die Windgeschwindigkeit relativ zum Schiffe, von der absoluten Geschwindigkeit muß also die Schiffsgeschwindigkeit abgezogen werden. Ein zehn Knoten (5 m in der Sekunde) laufendes Schiff erhält demnach von einem 20 m-Winde, der genau im Schiffskurse bläst, nur 15 m zum Antriebe. Aehnlich wie bei fließendem Wasser läßt sich auch für die fließende Luft theoretisch das Gesetz begründen, wonach der Druck auf eine senkrechte Fläche quadratisch mit der Geschwindigkeit zunimmt. Die aus Messungen erhaltenen Werte stimmen auch hinreichend damit überein. So kann der Druck eines Windes von 20 m auf 1 qm zu 40 kg gesetzt werden, bei der halben Geschwindigkeit beträgt er demnach nur 10 kg. (Die Windstärken werden nach einer Skala von 12 Nummern angegeben, als stärkster Orkan die Windstärke 12 von etwa 50 m Geschwindigkeit angenommen, der ein Druck von rund 250 kg entspricht.) Mit Zahlen dieser Art läßt sich nun der gesamte Druck auf eine Segelfläche schätzen.

Bei ausschließlichem Segeln vor dem Winde bietet das Raasegel die nächstliegende Form der Segelfläche, die an der quer zum Maste aufgehängten Raa ausgespannt und an den unteren freien Ecken durch Taue gestrafft wird. Diese symmetrisch zum Maste stehende Form ist denn auch auf den ältesten Abbildungen von Seglern zu sehen. Mehrere hintereinander stehende Masten mit Raasegeln haben beim Segeln vor dem Winde wenig Wert, da die hinteren Segel den vorderen größtenteils den Wind fortnehmen. Da andererseits bei größeren Schiffen eine einzige Segelfläche zu unhandlich würde, und je nach der Windstärke eine größere oder kleinere Fläche angemessen ist, so erwies sich bald eine Teilung in einzelne Segel als angezeigt, und es entstand das bekannte Bild mehrerer, meist vier, von einem Maste getragener Raasegel, in von unten nach oben abnehmender Größe, denen zum ausgiebigeren Fassen des Windes an Verlängerungen der Raa noch Leesegel (eigentlich Leihsegel) angefügt werden konnten. In unserer Marine sind indessen die Leesegel zur Vereinfachung der Takelage seit langem abgeschafft. — Das Segeln platt vor dem Winde ist nicht das angenehmste für den Seemann, denn das Schiff findet dabei keine sein Schlingern dämpfende Seitenkraft, und die schwere Takelage gibt Anlaß zu weit aus-

holenden Schwingungen. Da ferner als mittlerer Angriffspunkt des Winddruckes der gemeinschaftliche Schwerpunkt aller gesetzten Segel anzusehen ist, dieser aber ziemlich weit oberhalb des Schiffes liegt, so strebt der Wind, das Schiff vornüber zu neigen, was bei dem periodisch in der Stärke wechselnden Winde die Neigung zum Stampfen unangenehm fördert. Das Schiff ist also beim Segeln vor dem Winde sehr unruhig.

Das Segeln mit seitlichem Winde, das dem Schiffe erst die Möglichkeit gibt, in weiten Grenzen unabhängig von der Windrichtung sich zu bewegen, läßt sich am einfachsten verstehen, wenn man zunächst bei schräg zum Schiffe gestellten Segeln den Wind noch senkrecht

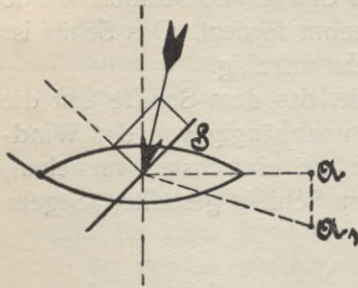
in diese einfallend annimmt (Figur 153). Kommt der Wind halb von hinten, so will er das Segel *s* und das ganze Schiff in seiner eigenen Richtung verschieben. Das Schiff erhält also einen gleichzeitigen Antrieb nach vorn und nach



Figur 153.

der Seite, da aber sein Widerstand gegen das Wasser in der Längsrichtung viel kleiner ist, als in der Quere, so folgt es vornehmlich dem Antriebe nach vorn, und wenn der Widerstand in der Quere unbeschränkt groß wäre, so würde es in einer gewissen Zeit den Punkt A in seiner Kielrichtung erreichen. Es würde sich also dabei etwa wie ein Brett verhalten, daß auf einer glatten Unterlage ruhend von einem schräg angesetzten Stecken gegen diese Unterlage gedrückt wird und unter dem in seiner Richtung wirkenden Teile des Druckes vorwärts gleitet. Nun ist aber der Querwiderstand des Schiffes zwar gegen den Längswiderstand sehr groß, aber doch nicht so groß, um ein geringeres Seitwärtstreiben zu verhindern. Bei jedem Schritte vorwärts wird das Schiff deshalb gleichzeitig etwas quer zur Kiellinie abweichen, so daß es in Wirklichkeit nach der Zeit, die seinem Ankommen im Punkte A entspräche, nach dem Punkte A¹ gelangt ist. In dieser Zeit hat es also den Seitenweg AA¹, die Abdrift, zurückgelegt, sein wirklicher Kurs war nach A¹ gerichtet, während seine Kiellinie nach A wies. Daß es aber diese Richtungen ein-

halten konnte, verdankte es seinem Steuer, und es leuchtet schon jetzt ein, wie dessen gleichmäßige Wirkung erforderlich war, um ein stetiges Zusammenspiel aller auftretenden Kräfte zu sichern. — Fällt nun aber der Wind nicht senkrecht in das



Figur 154.

Segel (Figur 154), sogar etwas von vorn, so verbleibt gleichwohl eine Komponente seines Druckes in dieser Richtung, deren Größe aus dem angedeuteten Parallelogramme gefunden werden kann, wenn man dessen Diagonale in passendem Maßstabe gleich dem Drucke oder der Geschwindigkeit des Windes selbst macht. Denn der Wind befindet sich jetzt zum Segel in dem-

selben Verhältnisse, wie nach dem vorigen Beispiele der schräg angesetzte Stecken zu dem Brette auf glatter Unterlage, sein Druck wird teilweise senkrecht zum Segel, teilweise parallel an ihm abgleitend. Hat man aber so die senkrechte Komponente gefunden, so ist der Fall ganz auf den vorigen zurückgeführt. In beiden Fällen ist dann noch zu beachten, daß die angenommene Windrichtung auf das vorwärts gehende Schiff bezogen ist, wie sie ein Beobachter auf dem Schiffe feststellen, oder wie sie ein Wimpel am Maste zeigen würde. Diese Richtung unterscheidet sich von der wirklichen Windrichtung durch eine Komponente, die der Schiffsgeschwindigkeit zuzuschreiben ist. Wenn nämlich diese



Figur 155.

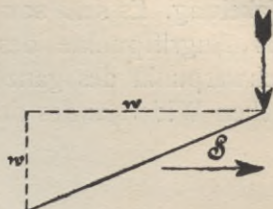
durch v (Figur 155) nach Größe und Richtung dargestellt wäre, durch w die wirkliche Windgeschwindigkeit, so muß die relative Geschwindigkeit des Windes, die auf das Schiff bezogene, durch die gleichzeitige Wirkung der beiden ersteren zustande kommen. Umgekehrt, wenn die Schiffsgeschwindigkeit und die relative Windgeschwindigkeit gegeben sind, so ist dessen wirkliche Geschwindigkeit in der Art zu finden,

wie das Parallelogramm andeutet.

Diese kurzen Betrachtungen genügen jedenfalls zur Vermittlung zutreffender Vorstellungen, wie das Schiff durch Seitenwind einen fördernden Druck in seiner Längsrichtung erhält.

Man kann mit ihrer Hilfe auch ein Urteil gewinnen über das Verhältnis der Geschwindigkeiten des Schiffes und des Windes zueinander, das sich für einen bestimmten Grenzfall auch unmittelbar aus Figur 156 ersehen läßt.

Wenn nämlich das Schiff gar keinen Widerstand nach vorn hätte, einen sehr großen aber in der Quere, so würde das schräg gestellte Segel S sich einfach in der gezeichneten Stellung nach rechts verschieben, und wenn es die Strecke v zurückgelegt hätte, so wäre ein dazu senk-

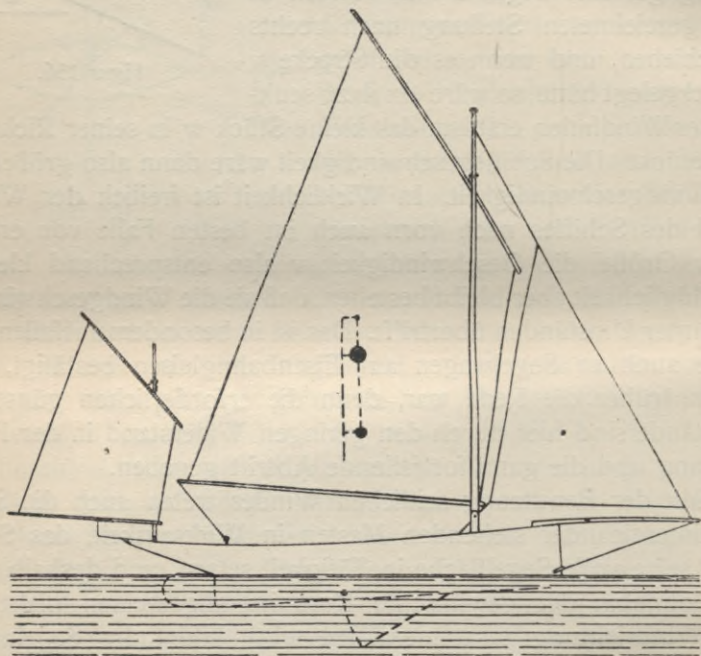


Figur 156.

rechter Windfaden erst um das kleine Stück w in seiner Richtung vorgerückt. Die Schiffsgeschwindigkeit wäre dann also größer, als die Windgeschwindigkeit. In Wirklichkeit ist freilich der Widerstand des Schiffes nach vorn auch im besten Falle von erheblicher Größe, die Geschwindigkeit v also entsprechend kleiner, die Möglichkeit aber bleibt bestehen, daß sie die Windgeschwindigkeit unter Umständen übertrifft. Das ist in besonders auffallendem Maße auch an Segelwagen auf Eisenbahngleisen bestätigt, von denen früher die Rede war, denn die erforderlichen günstigen Umstände sind hier durch den geringen Widerstand in der Fahr- richtung und die ganz fortfallende Abtrift gegeben.

Mit der Benutzung seitlichen Windes treten auch die Segel an hintereinander stehenden Masten in Wirksamkeit, das Schiff kann seine volle Segelfläche in Tätigkeit setzen, und deshalb, und weil ohnehin der gewünschte Kurs im allgemeinen nicht mit der Windrichtung zusammenfallen wird, bildet das Segeln mit Seitenwind die Regel und erzielt auch je nach den Umständen größere Geschwindigkeit als platt vor dem Winde. Der günstigste Wind wird im allgemeinen der halb von hinten kommende sein, der Backstagwind, wenig ungünstiger der raume Wind senkrecht zur Fahr- richtung, und noch zu benutzen, wie wir schon sahen, ist auch teilweise von vorn kommender Wind. Wie scharf das Schiff beim Winde fahren kann, ist besonders kennzeichnend für seine guten Segeleigenschaften, die bei den verschiedenen Schiffen große Abweichungen zeigen.

Da die Segel oft in nur kleinem Winkel zur Kiellinie stehen, so wird ein Segelplan in der Längsebene des Schiffes entworfen. Figur 157 zeigt als einfaches Beispiel ein Segelboot mit Yawl-Takelung. Es sind sowohl die Schwerpunkte der einzelnen Segel als Angriffspunkte des Windes angedeutet, wie der Gesamtschwerpunkt des ganzen Segelsystems. Zur Erhöhung des seitlichen Widerstandes des eingetauchten Schiffskörpers ist hier ein



Figur 157

sogenanntes Schwert angeordnet, das bei flachem Wasser in das Boot eingezogen werden kann. Man bemerkt nun, daß der Segelschwerpunkt in der Senkrechten etwas vor dem Schwerpunkte der Längsebene des Unterwasserschiffes (einschl. Schwert) liegt, der als Mittelpunkt des seitlichen Widerstandes aufgefaßt werden kann. Bei wenig von der Kiellinie abweichender Segelstellung wird demnach Seitenwind den Kopf des Bootes vom Winde abzdrehen suchen. Die Lage der erwähnten Schwerpunkte ist mithin für das Manövrieren des Schiffes von Bedeutung. Auf diesen Punkt hatten wir früher noch keine Rücksicht genommen,

sondern stillschweigend die Schwerpunkte in derselben Senkrechten vorausgesetzt. Diese Lage würde aber offenbar eine Art labiles Gleichgewicht beim Segeln ergeben, eine gewisse Unruhe des Schiffes und schwieriges Kurshalten zur Folge haben. Wie durch Setzen und Bewegen einzelner Segel der Segelschwerpunkt verlegt werden kann, und wie dadurch Wendungen oder dauernde Abweichungen in bestimmter Richtung zur Unterstützung des Steuerruders erzielt werden, leuchtet unmittelbar ein.

Was hier über Segelschiffe und Segeln gesagt werden konnte, mußte sich auf die elementarsten Dinge beschränken, gerade hinreichend, um den Zweck der wichtigsten Teile anzudeuten. Der Bau eines feinen Seglers und sein richtiger Gebrauch, ist eine Kunst, die durch wissenschaftliche Einsicht in hohem Grade, durch eigentliche Rechnungen wenig gefördert wird, im übrigen durch viele Uebung erworben werden muß. Jedes Schiff ist bei der fast zahllosen Menge der bestimmenden Einzelheiten ein Individuum für sich, das studiert sein will, Segeln und Reiten stehen ungefähr auf derselben Höhe.

An dieser Stelle wird am besten des wesentlichen Hilfsmittels beim Segeln gedacht, des (Steuer-) Ruders. Es ist eine verhältnismäßig kleine, um eine senkrechte Achse drehbare Fläche ($\frac{1}{70}$ — $\frac{1}{30}$ des Longitudinalplanes, je nach Größe des Schiffes), die mehr oder weniger gegen die Kiellinie schräg gestellt wird (Figur 158) und bei fahrendem Schiffe einen Druck durch dagegentreffende Wasserfäden erhält. Dieser Druck ist natürlich am größten, wenn das Ruder senkrecht zur Fahrriichtung steht, nicht aber die Steuerkraft. Der Druck auf das



Figur 158.

Ruderblatt kann wieder in dessen Schwerpunkte angreifend angenommen werden, und wenn man eine Senkrechte in diesem zum Blatte zieht, so geht sie in einem gewissen Abstände vom Deplacementschwerpunkte vorbei. Dieser Abstand ist für die dem Ruder vom Schiffe erteilte Drehkraft maßgebend. Steht dagegen das Ruder schräg, so treffen die Wasserfäden zwar im Winkel darauf, und nur ein Teil ihres Druckes wirkt senkrecht zum Blatte. Zugleich aber sieht man, wie der Abstand der mittleren Senkrechten vom Deplacementsschwerpunkte viel größer ist als vorher, größer auch,

als der Abnahme des Wasserdruckes gegen das Blatt entsprechen wird. Die Steuerkraft ist also vermehrt, und es gibt bei den üblichen Verhältnissen immer einen bestimmten, annähernd etwa 45° betragenden Winkel, bei dem die Ruderkraft am größten ist.



Figur 159.

Für ein sogenanntes Balance-
ruder (Figur 159), das seine Achse nicht an der Seite, sondern gerade in der Mitte hätte, würde bei senkrechter Lage zur Kiellinie überhaupt keine Steuerkraft verbleiben.

IV.

Das Segel kann seinen Nutzen nur im freien Fahrwasser voll entfalten, schon auf breiteren Flüssen ist sein Wert wesentlich herabgesetzt. Es ist deshalb nicht zu verwundern, daß bei den Bestrebungen, einen brauchbaren Wärmemotor zu schaffen, auch gleich an seine Benutzung zum Treiben von Wasserfahrzeugen gedacht wurde, um ihm die mühselige Arbeit des Ruderns, Stakens oder Treideln zu übertragen. So hatte schon Papin (Motoren S. 128) 1707 versucht, die von ihm verbesserte Savary-Maschine als Schiffsmotor zu verwenden, und soll auch mit seinem Fahrzeuge die Weser bei Minden hinabgefahren sein. Papin wird deshalb das Verdienst gebühren, überhaupt das erste Dampfboot gebaut zu haben, die Berichte darüber sind genügend begründet, während die Ueberlieferungen von früheren Versuchen mehr als zweifelhaft erscheinen. Das erste zu dauerndem Dienste brauchbare Dampfboot wurde aber erst gerade 100 Jahre später von Fulton gebaut. Denn alle Bemühungen in dieser Richtung konnten erst Erfolg haben, nachdem eine zuverlässige Dampfmaschine geschaffen war, und von den vielen Vorschlägen und Versuchen während des 18. Jahrhunderts können deshalb nur einige aus seinem letzten Drittel als vorbereitende Arbeiten gelten.

Auffallend gründlich ist in dem genannten Jahrhundert schon die Frage des Schiffspropellers behandelt, d. h. des unmittelbar auf das Wasser wirkenden Treiborganes, und wohl alle bis jetzt überhaupt bekannt gewordenen Propellerarten sind damals erörtert. Papin hatte das Schaufelrad gewählt, eine Form, die von den Wasserrädern her bekannt und für die damalige Zeit überhaupt wohl die verständlichste war, weil sich ihre Wirkung am

einfachsten übersehen läßt und weil sie die mechanisch vollkommenste Nachbildung des Ruders für kontinuierliche Drehung darstellt. Die viel später von dem Amerikaner Fitch versuchten dampfgetriebenen Ruder, die ganz den üblichen Handrudern entsprachen, bedeuteten dagegen einen Rückschritt, mehr noch das von demselben Mechaniker vorgeschlagenen Schaufelsystem, bei dem an einer endlosen Kette die Schaufeln, wie bei einem Bagger die Schöpfeimer, angebracht waren. Dieser Idee lag offenbar die irrige Vorstellung zugrunde, durch mehrere aufeinanderfolgende Schaufeln den Widerstand gegen das Wasser vermehren, oder nicht mal so klar, „die Kraft“ des ganzen Apparates steigern zu können. Auch jalousieartig bewegliche Klappen wurden in Vorschlag gebracht, oder, damit verwandt, Propeller nach Art der Schwimmfüße der Wasservögel. Von solchen unklaren und unzweckmäßigen Ideen frei waren, wie nicht anders zu erwarten, die Studien von Daniel Bernoulli, der in seiner *Hydrodynamica* (1738), und noch eingehender in seiner Preisschrift für die Pariser Akademie (1753) „Ueber den besten Propeller für Schiffe ohne Anwendung von Wind“, die drei Propeller behandelte, die allein in ernsthafte Bewerbung getreten sind, Rad, Schraube und Reaktion. Die beiden ersten sind bekanntlich in umfangreichster Anwendung gekommen, während die Reaktion, die nach der Vorstellung von Bernoulli und Späterer gewissermaßen raketentartig wirken sollte, ein eigentümliches Schicksal gehabt hat. Alle Propeller, auch das einfache Ruder, sind nämlich Reaktionspropeller, und was man im besonderen so genannt hat, verdiente diesen Namen nicht mehr, als die anderen. Wir kommen nachher darauf zurück. Ähnlich wie Bernoulli beschäftigte sich auch Albert Euler (Sohn von Leonard Euler) mit der Propellerfrage und machte 1764 dieselben Vorschläge.

Unter den sonst noch schon frühzeitig aufgetauchten Propellerformen war auch der Fischeschwanz-Propeller. Wie man vor noch nicht langer Zeit meinte, in der Form der Fische das beste Vorbild für Schiffsformen sehen zu müssen, weil die Natur doch jedenfalls in ihr die Form des geringsten Widerstandes geschaffen oder entwickelt habe, so schien auch der Fischeschwanz in seiner doppelten Bestimmung als Propeller und Steuer das Ideal eines Treiborganes für schwimmende Körper überhaupt zu sein. Man kann solchen teleologischen Auffassungen bedin-

gungsweise auch zustimmen, wenn man nur andererseits bedenkt, daß die Natur bei ihrer Formgebung auch den besonderen Anforderungen der schwimmenden Lebewesen genügen mußte, die doch wesentlich verschieden sind von denen der leblosen Schwimmkörper. Und so wenig man noch die Schwimmfüße der Wasservögel zum Vorbilde der Schiffspropeller nehmen wird, so wird sich auch der Fischschwanz von dem Ideal eines Propellers überhaupt entfernen. Eine Schiffschraube mit gleichmäßig sich drehender Welle konnte die Natur den Fischen nicht geben, weil ein solches Organ bei Lebewesen wegen der notwendigen Verbindung mit dem Körper unter Benutzung der gegebenen anatomischen Mittel nicht möglich ist. Ein drehbares Organ nach Art des Augapfels wäre freilich, wenn die Natur so gewollt hätte, bildsam für einen schraubenähnlichen Propeller gewesen. Die Natur hat sich aber anders und einfacher, im ganzen auch jedenfalls besser geholfen, indem sie den Fischschwanz zu eigentümlich zweckmäßigen Bewegungen befähigte, die in ihrer Vollkommenheit nachzubilden mit leblosen Körpern schwerlich gelingen würde, und wenn schon, so wäre die Schraube hier nun wieder das einfachere und vollkommene Werkzeug. — Versucht sollen übrigens Fischschwanz-Propeller wirklich sein, ohne Erfolg natürlich, weil ohne innere Berechtigung und auch nur eine ganz grobe Nachbildung darstellend, schon weil dessen Feinheiten noch gar nicht recht bekannt sind. Erfolg hat der Fischschwanzpropeller aber doch mal gehabt, als nämlich vor einigen zwanzig Jahren aus Paris als Neuestes unter den Spielwaren bewegliche Fische aus Blech erschienen, deren Schwänze man wie ein Steuerruder gelenkig gelagert hatt, und die durch eine Feder oder Gummischnur und durch ein grobes Getriebe nach Art der Unruhe an Spindeluhren den Schwänzen eine pendelnde Bewegung erteilte. Tatsächlich rückten die Fischchen mit der Wackelbewegung im Wasser langsam vor, und der Ehre der Erwähnung hier sind sie deshalb teilhaftig geworden, weil gar nicht leicht zu erklären ist, woher ihr Antrieb eigentlich kam, da doch die Schwanzbewegung nach beiden Seiten ganz gleich war. Dem glücklichen Fabrikanten der damaligen Sensationfische wird das auch gleichgültig gewesen sein, der Leser mag aber hiermit zum Studieren ihrer Mechanik angeregt sein.

Das Schaufelrad, wie es die damals verständlichste unmittelbare Nachbildung des gewohnten Ruders war, bot sich auch deshalb als zunächst brauchbarster Propeller an, weil es eine geringe Umdrehungszahl erfordert. Die Geschwindigkeit der Schaufeln ist, wie wir sehen werden, durch die verlangte Schiffsgeschwindigkeit vorgeschrieben, und da von selbst der Durchmesser des Rades, um ein möglichst senkrechtes Eingreifen der Schaufeln in das Wasser zu ermöglichen, erheblich genug ausfällt, so wird die Umdrehzahl immer einen niedrigen Wert erhalten, und dazu paßte die geringe Geschwindigkeit der früheren Dampfmaschinen. Jetzt würde in diesem Umstande gerade ein Hindernis gesehen werden. Die Wirksamkeit der Propeller lag vor hundert Jahren und mehr zwar wenig klar, aber die bestimmenden Verhältnisse wurden doch von den Technikern teilweise empfunden und die Erfahrungen aus den vielen Versuchen taten ein Weiteres. Das Schaufelrad, ohnehin aus seiner umgekehrten Rolle als Wassermotor bekannt, war auch als Schiffspropeller für Handbetrieb schon lange versucht, denn man hatte die dunkle Vorstellung, wie noch heute mancher Unkundige, mit einem komplizierten Mechanismus mehr erreichen zu können, wie mit dem einfachen Handruder. Das war allerdings ein Irrtum, denn das richtig geformte und richtig gehandhabte Ruder hat einen besseren Wirkungsgrad, als ein anderer Propeller. Bei der Unkenntnis des Energiegesetzes waren aber die verfehlten Hoffnungen begreiflich. Ganz frei davon scheint auch Bernoulli, trotz seiner tieferen Einsicht, nicht gewesen zu sein, da er u. a. den Betrieb des Schiffspropellers durch Pferdegöpel vorschlug, während doch die nähere Ueberlegung leicht erweist, daß mit Rücksicht auf den verfügbaren Platz im Fahrzeuge ein stark bemanntes Ruderboot den Vorzug verdienen würde. — Immerhin aber war das Schaufelrad ein einigermaßen bekanntes Werkzeug, und die Entwicklung der Dampfschiffahrt ist wesentlich ihm mit zu verdanken.

*

Die planmäßigen Versuche zum Bau von Dampfbooten mit Schaufelrad setzten ziemlich gleichzeitig in Frankreich, England und Amerika während des letzten Drittels des 18. Jahrhunderts ein. Im allgemeinen waren die Ergebnisse wenig befriedigend,

weil die Boote sich als zu langsam erwiesen, und bessere Erfolge hatte, um 1800, wohl nur Symmington in England, der in seinem Kanalboote „Charlotte Dundas“ schon ein aussichtvolles Gebilde herstellte. Ausschlaggebend wurden aber die Arbeiten des Amerikaners Fulton, die zum Bau des „Clermont“ führten, des ersten dauernd brauchbaren Dampfbootes, das 1807 auf dem Hudson seine erste Fahrt machte.

Robert Fulton (1765—1815) war zuerst Goldschmied, dann Maler, wandte sich aber bald der Technik zu. Er besaß eine glückliche Mischung von Erfindungsgabe, Beharrlichkeit und Ge-

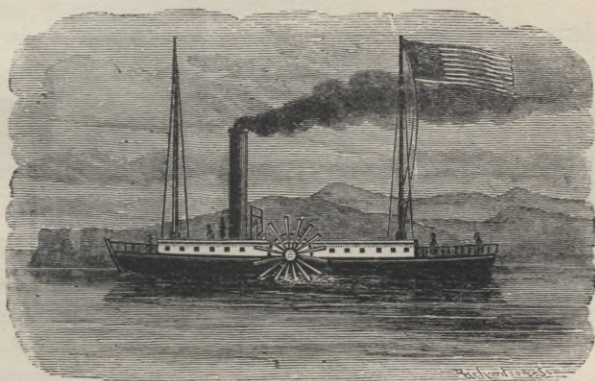


Robert Fulton.

schaftsinn, kam als junger Mann nach England, eifrig auf seine technische Ausbildung bedacht, und ging später nach Frankreich, wo er in den 90er Jahren Napoleon für seine Ideen zu gewinnen suchte, die sich auf Seeminen, Unterseeboote und andre Kriegsmaschinen bezogen. Napoleon soll für die Pläne großes Interesse gezeigt haben, was im Hinblick auf Frankreichs damaliges Verhältnis zu dem seegebietenden England begreiflich genug wäre, nach anderen soll er Fulton für einen Schwindler erklärt haben. Beide Berichte lassen sich auch ganz gut vereinen. Jedenfalls hatte Fulton in seinen nächsten Absichten keinen Erfolg und

wandte sich nun mit ganzer Kraft der Dampfschiffahrt zu, die schon lange sein Interesse erweckt hatte. Fulton ist in seinem Wirken am besten mit George Stephenson zu vergleichen. Gleich diesem gehörte er nicht zu den großen Erfindern, er zielte nicht auf die Bewältigung eines bestimmten Problem es ab, sondern er setzte seine Willenskraft, klare Einsicht und Beharrlichkeit an das Zusammenfassen, Ausgestalten und Durchführen des im einzelnen Bekannten und Versuchten, in solcher Form, wie seinem wirtschaftlichen Blicke zweckmäßig erschien. Wie sorgfältig er dabei zu Werke ging, lassen schon seine früher erwähnten Versuche zum Bestimmen des Widerstandes schwimmender Körper schließen. Dem Sammeln und Sichten alles Notwendigen galt auch sein neuer Aufenthalt in England in den Jahren 1804—1806, während welcher Zeit er bei Boulton & Watt in Soho die Dampfmaschinen für sein in Amerika zu erbauendes Dampfboot ausführen ließ. Nach dorthin zurückgekehrt, hatte er 1807 die „Clermont“ fertiggestellt, die im August dieses Jahres ihre Fahrten auf dem Hudson begann. Ihr vollständiger Erfolg bildete den Anfang des nunmehr schnellen Aufschwunges der Dampfschiffahrt, denn schon im Jahre 1812 zählte man in Amerika über 50 Flußdampfer.

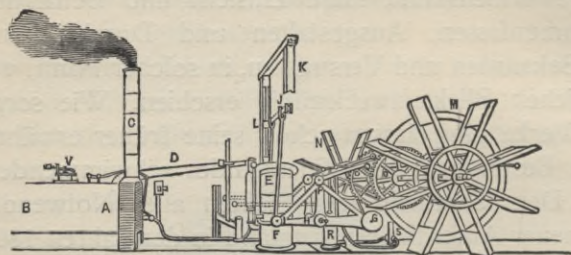
Die „Clermont“ war ein schlankes Boot von über 40 m Länge und etwa 5 m Breite (Figur 160), seine Maschine (Figur 161)



Figur 160. Das Dampfboot „Clermont“, 1807.

zeigte den Wattschen Typus mit aufrechtstehenden Zylindern und Balancier, der hier tief neben den Zylindern angeordnet war. Die Schaufelräder unterschieden sich nur äußerlich durch den noch

fehlenden Radkasten von späteren Ausführungen. Die Maschine wird zu 20 Pferd angegeben, die aber sicherlich als sogenannte nominelle Pferde zu verstehen sind, welche im Schiffswesen lange übliche Bezeichnung nicht unmittelbar auf die Leistung schließen läßt, sondern sich mehr auf die Abmessungen der Zylinder bezog.



Figur 161. Dampfmaschine des „Clermont“, 1808.

Man wird die wirkliche Leistung wohl zu 50 Pferd etwa annehmen können. Die Geschwindigkeit des Bootes war nach den Berichten 5—6 Knoten, also wohl noch bescheiden, aber bei der Zuverlässigkeit und Gleichmässigkeit der Fahrt ein handgreiflicher Beweis für die Vorzüge des Dampfbetriebes auf Flüssen, für den er in erster Linie in Frage kam.

*

An dem Schaufelrade sei nun zunächst die allgemeine Theorie der Propeller weiter entwickelt. Als Grundlagen zur richtigen Bestimmung des Propellers und der Maschinenleistung müssen gegeben sein die verlangte Geschwindigkeit des Schiffes und sein Widerstand dabei, so genau er sich durch Vergleiche, Rechnungen und Modellversuche ermitteln läßt. Der Widerstand, der in Kilogrammen oder Tonnen auszudrücken ist, multipliziert mit der Geschwindigkeit in Metern für die Sekunde gibt die Nutzleistung der Maschine in Sekunden-Meter-Kilogrammen, das Produkt durch 75 dividiert die Nutzleistung in Pferden.

Wäre die Umfangsgeschwindigkeit des Rades gerade gleich der Schiffsgeschwindigkeit, so hätte die Maschine überhaupt keine nützliche Leistung herzugeben, denn die Räder drehten sich dann gerade so schnell, daß sie ihrerseits keinen Widerstand böten, sie verhielten sich wie die auf dem Boden abrollenden Räder der

Landfuhrwerke. Die Schaufeln geben also erst einen fördernden Druck, wenn sie sich im Wasser, entgegengesetzt zur Fahrtrichtung, mit größerer Geschwindigkeit als das Schiff bewegen. Von der Vorstellung aus, daß die Geschwindigkeit des Schiffes immer kleiner sein muß, als die der Schaufeln, deren Widerhalt im Wasser mehr oder minder nachgiebig ist, spricht man von dem Slip (oder Schlipf, Schlüpfung) der Schaufeln, der also den Unterschied ihrer Geschwindigkeit und der Schiffsgeschwindigkeit darstellt. Wie man sieht, herrscht dabei vollkommene Analogie zwischen der Schaufel und dem Blatte des Handruders, und wie bei diesem ist die Größe des Slips abhängig von der Fläche der Schaufel. Nimmt man diese klein an, wie aus baulichen Gründen wünschenswert ist, so wird der Slip groß, und umgekehrt. Mit der Größe des Slips wächst aber die verlorene Leistung der Maschine, denn der Slip ist nichts weiter, als die absolute Geschwindigkeit des von der Schaufel nach hinten bewegten Wasserstromes, und wir haben gesehen, daß der durch diesen Strom dargestellte Verlust um so kleiner wird, je größer man den Querschnitt des Wasserstromes, also die Schaufelfläche wählt und je kleiner seine Geschwindigkeit. Der erforderliche Druck der Schaufel gegen das Wasser, der immer gleich dem Schiffswiderstande sein muß, kann im übrigen, wie beim Ruder, durch einen großen oder kleinen Slip erreicht werden, im ersten Falle bei geringerem, im zweiten bei größerem Querschnitte des von den Schaufeln erzeugten Wasserstromes.

Zwischen der aus baulichen Gründen sich ergebenden Forderung einer tunlichst kleinen Schaufel und dem von ihrer Größe abhängigen Verluste an Leistung gilt es also zu ermitteln. Zweckmäßige Verhältnisse entstehen im allgemeinen, wie die Erfahrung lehrt, wenn man den Slip zu 10—30 % annimmt, je nach Größe und Art des Schiffes, wenn also die Geschwindigkeit des Schiffes $\frac{9}{10}$ — $\frac{4}{5}$ der Umfanggeschwindigkeit der Schaufeln beträgt. Aus dieser, wie man sieht, in gewissem Sinne willkürlichen Annahme des Slips ergibt sich aber sowohl die verlorene Maschinenleistung, wie die Größe der Schaufelfläche.

Auf wenigen technischen Gebieten haben unklare Vorstellungen mehr Anlaß zu unfruchtbaren Versuchen gegeben, wie bei den Schiffspropellern. Um sich vor Irrtümern zu bewahren, muß man vor allem die Wassermasse sicher bestimmen,

deren Reaktion den Antrieb des Schiffes darstellt, und beachten, welchen Geschwindigkeitänderungen sie beim Passieren des Propellers unterliegt. Das Schaufelrad, das hier als Darsteller der Propeller überhaupt dient, fördert oder erfaßt eine Wassermenge in der Sekunde, die sich aus der Geschwindigkeit seiner Schaufeln und deren Fläche ergibt. Die Schaufelgeschwindigkeit ist aber gleich der um den Slip vermehrten Schiffsgeschwindigkeit. Das Wasser kommt dem Rade schon mit der Schiffsgeschwindigkeit entgegen, wird also beim Durchgehen durch das Rad um den Slip beschleunigt. Wie groß dabei die Reaktion auf das Rad ist, läßt sich leicht finden durch Vergleich mit der Wirkung der Schwere hinsichtlich der erzielten Beschleunigung. Diese beträgt beim freien Falle fast 10 m in der Sekunde, infolge der Anziehungskraft der Erde, deren Größe für 1 l reinen Wassers bei 4° C*) wir als Krafteinheit nehmen und 1 kg nennen. Kräfte unter sich stehen im Verhältnis zu den durch sie in derselben Zeit an demselben Körper bewirkten Geschwindigkeitszunahmen, die für die Zeiteinheit gerechnet Beschleunigungen heißen. Denn wenn eine Kraft einem Körper eine gewisse Beschleunigung erteilt, so muß die doppelte Kraft die doppelte Beschleunigung geben, weil man sich die doppelte Kraft immer als zweimal wirkende einfache Kraft vorstellen kann, die zu der in der ersten Periode erzeugten Beschleunigung eine ebenso große in der zweiten Periode hinzufügt. Also, da die Erdbeschleunigung 10 m ist, so reagiert 1 l Wasser gegen die Schaufel, die ihm beispielweise einen Slip von 2 m erteilt nur mit der Kraft von $\frac{2}{10}$ kg. Sind demnach Schiffsgeschwindigkeit, Slip und Schiffswiderstand gegeben, so erhält man unmittelbar die Schaufelfläche, wie aus folgendem Beispiele erhellt.

Ein kleiner Dampfer möge bei 10 Knoten (5 m in der Sekunde) einen Widerstand von 1000 kg haben. So groß muß also auch die Reaktion sein, zu deren Erzeugung ein Slip von 1,5 m (23 %) angenommen sei. Die Reaktion von 1 l passierender Wassermenge ist also 0,15 kg. Um die erforderliche Reaktion von 1000 kg zu erzeugen, müssen 670 l (6,70 cbm) in der Sekunde passieren, und da ihre Durchgang-Geschwindigkeit $5+1,5=6,5$ m

*) Die kleineren Unterschiede, die sich für das etwas schwerere Seewasser und für andere Temperaturen ergeben, sind hier belanglos.

ist, so wird die Schaufelfläche etwas über 1 qm betragen (1,03 m), für jedes Rad rund 0,50 qm.

Daß diese Reaktion von 1000 kg entstand, vermöge deren die Maschine eine Leistung von 1000×5 Sekunden-Meter-Kilogramm auf das Schiff als nützliche Arbeit übertragen kann, muß erkauft werden mit der verlorenen Leistung, die sich aus der beschleunigten Wassermasse ergibt. Die 6,7 cbm Wasser in der Sekunde erhielten die Beschleunigung von 1,5 m, die nach der Falltabelle einer Höhe von etwas über $\frac{1}{10}$ m entspricht (0,113 m). Die Fallarbeit in der Sekunde, gleich der dem Wasser in der Sekunde erteilten Bewegungsenergie, berechnet sich damit zu 750 mkg.

Bei dieser Berechnung der verlorenen Leistung wurde aber stillschweigend vorausgesetzt, daß die Beschleunigung des Durchgang-Wassers allmählich und stoßfrei erfolgte. Schon beim Handruder war darauf hingewiesen und als Aufgabe des geübten Ruderers bezeichnet, feinfühlig seine Kraft so auf das Ruderblatt wirken zu lassen, daß nicht ein klatschender Aufschlag, sondern ein ganz sanftes Eintauchen bei allmählicher Zunahme der Blattgeschwindigkeit erfolgte. Das gewöhnliche Schaufelrad setzt seine Schaufeln aber immer gleich mit der vollen Geschwindigkeit relativ zum Wasser ein. Statt also nach stoßfreiem Eintauchen seine relative Geschwindigkeit gegen das Wasser gleichmäßig zu steigern, oder was dasselbe bedeutet, seinen fördernden Druck gegen das Wasser mit Null beginnen zu lassen und während des Durchgehens gleichmäßig zu erhöhen, wirkt es von vornherein gleich mit dem größten Drucke. Die Folgen davon sind, ganz wie bei den Wassermotoren, örtliche Arbeitsverluste in Form von Spritzern und Wirbeln. Die obige Verlustrechnung galt für den günstigsten Fall der gleichmäßigen Druckzunahme der Schaufel, wo also auf dem ganzen Schaufelwege im Mittel der halbe Enddruck wirkt. Wenn aber auf dem Schaufelwege immer der ganze Druck wirkt, der doch andererseits keine größere Beschleunigung des Wassers, also keine Steigerung der Reaktion ergibt, so muß die verlorene Leistung doppelt so groß angenommen werden, wie oben aus der dem Wasser erteilten Bewegungsenergie berechnet wurde. Diese Bewegungsenergie stellt freilich einen Verlust dar, aber einen unvermeidlichen, wie wir wissen, gewissermaßen — *sit venia verbo* — den nützlichen Verlust, ohne den die Reaktion nicht entstehen könnte, während die örtlichen Verluste durch Spritzer und Wirbel

wie bei dem gut geführten Ruder vermieden werden können. Die ganze verlorene Leistung, was hier darunter verstanden wurde, ist also mindestens, nämlich bei idealem Propeller, gleich der aus der beschleunigten Wassermasse berechneten und höchstens gleich dem Doppelten dieses Wertes.

Im vorliegenden Beispiele wird also die größte verlorene Leistung 1500 Sekunden-Meter-Kilogramm betragen, im ganzen, ohne später noch zu erwähnende Nebenverluste, hätte die Maschine $5000 + 1500 = 6500$ Sekunden-Meter-Kilogramm zu leisten. Die nützliche Leistung und die gesamte Leistung stehen also im selben Verhältnisse, wie die Schiffsgeschwindigkeit und die Schaufelgeschwindigkeit. Das ist auch leicht erklärlich, denn die Schaufeln arbeiten ja unter der Voraussetzung größter verlorener Leistung mit ihrer Geschwindigkeit bei vollem Drucke gegen den Schiffswiderstand. Der Wirkungsgrad des Rades ist in unserem Beispiele mithin $= 0,77 = 77\%$.

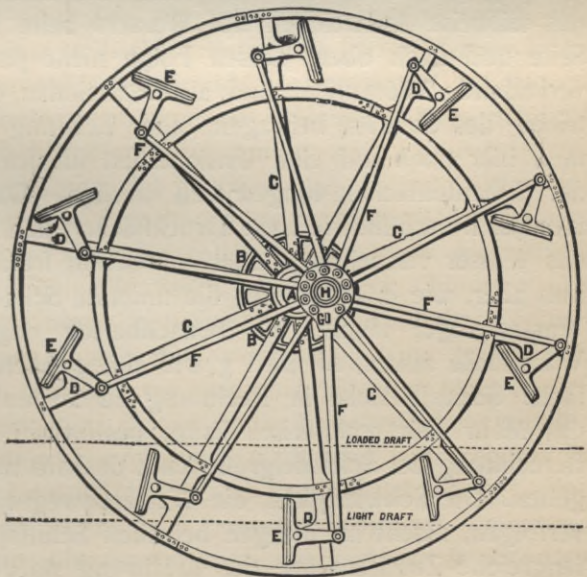
*

Die bisherigen Erörterungen gelten im Wesen für alle Schiffspropeller, deren besondere Art ist aber maßgebend für die weiteren Verluste, die von der Maschine gedeckt werden müssen. Wir betrachten zunächst noch das Rad mit Rücksicht auf seine Ausführungformen.

Bisher war immer nur von den Schaufeln in solcher Weise gesprochen, als wenn sie sich geradlinig fortbewegten, d. h. es wurde keine Rücksicht darauf genommen, daß sie, da bei gegebener Fläche aus baulichen Gründen bei beschränkter Länge doch eine erhebliche radiale Tiefe vorhanden sein muß, auch an den Stellen verschiedenen Abstandes vom Mittelpunkte verschiedene Umfangsgeschwindigkeit haben, so daß die rechnerisch verwendete Umfangsgeschwindigkeit auf einen zwischen dem kleinsten und größten liegenden Radius bezogen werden muß. Die verschiedene Geschwindigkeit der einzelnen Flächenteile beeinflußt natürlich auch die genauere Berechnung der verlorenen Leistung. Die Schaufeln tauchen auch auf ihrem Wege durch das Wasser nicht vollständig ein, sondern nur während eines gewissen Teiles ihres Weges. Damit nun aber im ganzen immer ein einigermaßen gleichmäßiger Druck am Rade herrscht, gilt als Regel, daß immer

gleichzeitig wenigstens drei Schaufeln eintauchen sollen. Die Schaufeln stehen auch nur im Punkte ihres tiefsten Eintauchens günstig zum Wasser, während sie bei Beginn des Eintauchens und beim Austauchen in erheblichem Grade schräg stehen, vorn also das Wasser teilweise niederdrücken, hinten das Wasser unnütz aufwerfen. Diese Uebelstände verringern sich offenbar mit zunehmendem Durchmesser. Um diesen aber andererseits nicht zu groß wählen zu müssen, lag der Gedanke nahe, bewegliche Schaufeln anzuwenden, die, in Zapfen an dem kreisförmigen Radrahmen drehbar, durch Lenkstangen immer die zum Wasser senkrechte Stellung erhielten. Solche Schaufeln haben aber immer noch den oben erörterten Nachteil, gleich mit voller Geschwindigkeit das Wasser zu treffen. Um auch in dieser Hinsicht das Rad zu verbessern, konnte der Stellmechanismus der Schaufeln leicht so abgeändert werden, daß die Schaufeln noch mit einer gewissen Neigung ein-

ttauchen und austauchen (Fig. 162). Die Radwelle A trägt mit den festen Speichen C den kreisförmigen Rahmen mit den Zapfen der Schaufeln, während der neben der Radwelle am Radkasten bzw. am Schiffskörper feste Zapfen H die Scheibe G trägt, von der Lenkstangen F nach den kurzen rückwärtigen



Figur 162.

Armen D der Schaufeln gehen. Nur die in der Figur senkrechte Lenkstange ist steif mit der Scheibe G verbunden. Zu beachten sind natürlich nur die eingetauchten Schaufeln. Wie man sieht, sind die Schaufeln wesentlich weniger gegen das Wasser geneigt,

als feste, radial stehende Schaufeln sein würden. Ständen die eingetauchten Schaufeln immer senkrecht zum Wasser, so könnten sie stoßfrei nur dann ein- und austauschen, wenn das Rad keinen Slip hätte, also keine Leistung abgäbe. Da aber das Wasser vom Rade um den Slip beschleunigt wird, so muß die austauschende Schaufel sich dem Wasser schneller entziehen, als eine genau senkrecht stehende tun würde. Sobald man nur gleichzeitig die aufsteigende Bewegung der Schaufel beachtet, wird einleuchtend, daß bei einer gewissen Schaufelneigung der Bedingung glatten Austrittes genügt werden kann. Das Umgekehrte gilt von der eintauchenden Schaufel, und offenbar wird die Größe des Slip für den Grad der Schaufelneigung bestimmend sein. — Diese Andeutung über den Zweck der beweglichen Schaufeln wird hier genügen.

Die Nebenverluste des Schaufelrades entstehen durch die Reibung des Wassers an den Schaufeln, namentlich aber durch das teilweise Ausweichen des Wassers beim Beschleunigen zur Seite und nach oben, dessen Folge nicht parallel zum Schiffe verlaufende Strömungen sind, also Reaktionen, die nicht zum Vortriebe des Schiffes beitragen, aber Leistung verzehren. Auch muß hier noch auf eine Unsicherheit hinsichtlich der Leistung der Schaufelflächen hingewiesen werden. Daß nicht mehrere unter sich verbundene nahe Druckflächen den Widerstand gegen das Wasser vermehren, hatten wir schon früher erkannt. Wenn nun aber, wie in Figur 162, die unterste Schaufel tief unter den Wasserspiegel taucht, die benachbarten dagegen die oberen Wasserteile fassen, so wird gewiß eine größere, als nur die einfache Schaufelfläche in Rechnung zu stellen sein, wenn auch das Mehr sich rechnerisch kaum bestimmen läßt. Die frühere Berechnung der Schaufelgröße kann deshalb nur als Annäherung gelten. Die Schwierigkeit, die Wasserbewegung im einzelnen zu verfolgen, macht im übrigen bei allen Schiffspropellern die umfangreiche Zuhilfenahme der Erfahrung notwendig, mehr noch als bei andern hydraulischen Maschinen. Um so notwendiger wird aber die klare Einsicht in die sicheren Grundsätze, damit nicht Verbesserungen in Richtungen gesucht werden, die von vornherein aussichtslos sind.

V.

Das Rad war, wie wir gesehen, als Propeller für Flußschiffe entstanden und hat sich auch für diese noch erhalten wegen seiner besten Eigenschaft, der geringen Tauchung. Es war in seiner Wirkung am leichtesten zu verstehen und gegenüber manchen andern Vorschlägen einfach genug, außerdem bei seiner geringen Drehgeschwindigkeit (15—30 Umdrehungen in der Minute) besonders geeignet für die damaligen langsamer laufenden Dampfmaschinen, die aus diesem Grunde aber auch verhältnismäßig schwer waren. Die handgreiflichen Nachteile des Rades, seine Sperrigkeit, das ungleiche wechselnde Eintauchen der beiden Räder bei schwankendem Schiffe und die dadurch herbeigeführte Unruhe, die Abhängigkeit der Schaufeltauchung vom Tiefgange des Schiffes, die bei Gegenwind viel Widerstand bietenden großen Radkasten, endlich die leichte Verletzbarkeit, traten naturgemäß besonders bei See- und Kriegsdampfern besonders hervor. Zur teilweisen Behebung dieser Uebelstände hatte schon Fulton Mittelraddampfer vorgeschlagen, im besonderen als Kriegschiffe, bei denen ein einzelnes Rad annähernd in der Mitte des Schiffskörpers eingebaut war. Die erhebliche, dazu nötige Umgestaltung des letzteren aber hat die Aufnahme dieser Bauart verhindert. Einzelräder am Heck des Schiffskörpers kommen dagegen bei schmalen seichten Gewässern auch heute noch gelegentlich vor. Für Seedampfer erwies sich aber das Rad überhaupt als wenig geeignet, um so weniger, als man zunächst für diese immer eine Verbindung von Segler und Dampfer anstrebte. So hatte der, im Jahre 1819 den Ozean kreuzende erste Dampfer, die „Savannah“ Vollschiff-takelung und lief von New York nach Liverpool teils dampfend, teils segelnd in 26 Tagen. In der Handelsflotte hat sich aber bald eine vollständige Scheidung zwischen Segler und Dampfer vollzogen. Es wurde bei diesen nur eine sehr vereinfachte und verkleinerte Takelage beibehalten, meist zwei große Gaffelsegel, für den Notfall, auch zum Dämpfen der Schlingerbewegungen. Umgekehrt ist bei Kriegsschiffen die Takelage möglichst lange beibehalten, die Schulschiffe sind noch vereinigte Segler und Dampfer. Denn Ersparnisgründe geboten, so weit es möglich, den Wind als Motor zu benutzen, während andererseits die immer starke Besatzung

vollauf Kräfte zur Bedienung der Segel lieferte. Bestimmend war naturgemäß auch die größere Sicherheit durch die vorhandenen beiden Antriebsysteme. Erst die Mehrschraubenschiffe der Jetztzeit bieten als Kriegsschiffe genügende Sicherheit, während die moderne Artillerie größere Takelagen bei für den Kampf bestimmten Schiffen verbietet.

Für Kriegsschiffe hat das Rad nur eine geringe Rolle gespielt. Das Dampfkriegsschiff hat sich über die Zwischenstufe „Segler mit Hilfmaschine“ entwickelt, als bloßer Hilfpropeller war aber das Rad doch zu anspruchsvoll, erst die bescheidene Schraube konnte diesen Dienst leisten. Die jetzt weit überwiegende Schraube verdankt ihre Entwicklung wesentlich dem Kriegsschiffe. Das größte Schiff, das jemals durch ein Rad getrieben wurde (übrigens gleichzeitig auch durch Schraube), war der „Great Eastern“, eine Schöpfung des englischen Ingenieurs französischer Abkunft Brünell, der, feurig und unternehmungslustig, aber weniger erfinderisch wie sein Vater, der Erbauer des ersten Themsetunnels, seinen Schaffensdrang oft durch Steigerungen ins Ungemessene betätigte. Das Schiff ist erst in den letzten Jahren durch ein englisches (Oceanic) um ein Weniges an Größe übertroffen und wurde von unserem größten Passagierdampfer „Kaiser Wilhelm der Große“ noch nicht ganz erreicht. Es war über 200 m lang und hatte etwa 24 000 t Displacement, mehr als doppelt soviel, wie bis vor kurzem unsere größten Dampfer. Für seine Zeit (1854—59) stellte es gewiß eine erstaunliche technische Leistung dar, war aber wirtschaftlich verfehlt, einfach weil es nicht so viel zu tun fand, als zur Deckung seiner Kosten nötig gewesen wäre. So große Schiffe haben sich erst in der Jetztzeit als vorteilhaft erwiesen.

*

Die Schiffschraube ist so wenig wie das Rad auf einen bestimmten Erfinder zurückzuführen. Daniel Bernoulli, der sie, wie schon berichtet, in seiner allgemeinen Schrift (1753) über Schiffspeller auch in Vorschlag brachte, soll nicht überhaupt der erste gewesen sein, der den Vortrieb durch schräg zum Wasser bewegte Stützflächen ins Auge gefaßt hatte. Wohl aber hat er sich wahrscheinlich die Schraube in ihrer jetzigen Grund-

form, nämlich als vollständig eingetauchtes Flügelrad gedacht. Für die Wirkung schräg zu einer Drehachse gestellter Flächen boten die allbekannten Windräder Beispiele, die einem in den exakten Wissenschaften schöpferischen Geiste wohl Anregungen bieten konnten zu der Umkehrung des Windmotors in eine Arbeitsmaschine. Wie das unterschlächtige Wasserrad als ein unmittelbares Vorbild für das Schiffstreibrad gewirkt haben wird, so lag auch die Beobachtung nahe, daß die vom Winde gedrehten schrägen Flügel, wenn sie selbst angetrieben werden, einen Luftstrom erzeugen. Zudem waren damals schon, als Vorgänger der Turbinen, wenigstens versuchsweise ausgeführte Wasserräder bekannt, deren Achse, parallel zur Stromrichtung, aber oberhalb des Wasserspiegels liegend, schräge Flügel unten in das Wasser eintauchen ließ. Bernoullis Verdienst um die Schiffspropeller wird man aber nicht in den Einzelheiten seiner Vorschläge zu sehen haben, sondern in der sachgemäßen Auswahl des Zweckmäßigen und dem Ausscheiden der unklaren Ideen. Beweis genug dafür ist, daß er die tatsächlich später allein zu ernsthafter Verwendung gelangten Propeller — Rad, Schraube und die sogenannten Reaktionapparate⁶ — als tauglich empfohlen hat. Zu Ausführungen ist er aber selbst nicht geschritten, und der bloße Vorschlag des ganz eingetauchten Flügelrades kann nicht als die Erfindung der Schraube angesehen werden. In dieser Hinsicht muß man, um den Verdiensten Späterer gerecht zu werden, überhaupt absehen von der allgemeinen Idee und die Formen der Schraube ins Auge fassen, die ihre Anwendung erst ermöglicht haben.

Einer der ersten Versuche, die Schraube als Propeller zu verwenden, wurde vor etwas mehr als 100 Jahren von dem Amerikaner Fitch angestellt. Von seinem kleinen Versuchboote gibt Figur 163 eine — nicht gerade sehr glückliche — zeitgenössische Darstellung, in der aber der hier hauptsächlich interessierende Teil, die Schraube, deutlich genug zu sehen ist, um das Tatsächliche der früheren Vorstellungen erkennen zu können. Die Schraube ist mehrgängig, offenbar in der Annahme entstanden, daß zum sicheren Fassen des Wassers eine Anzahl Schraubengänge nur nützlich sein können, ein Vorstellung, der einiger Vorschub geleistet wird durch Vergleich der Propellerschraube mit einem in fester Mutter beweglichen Schrauben-

bolzen. Diese Auffassung ist auch ganz nützlich, da man durch sie, ähnlich wie beim Rade, zu dem Begriffe des Slip gelangt, herrührend von der Nachgiebigkeit des Wassers. Geht man aber gleich von der dynamischen Auffassung aus, nach der jeder Propeller einen Wasserstrom zu erzeugen hat, dessen Reaktion dem Schiffswiderstande gleich sein muß, so wird sofort die Erfahrungstatsache verständlich, daß mehrere Gänge einer Schraube nicht nur zwecklos sind, da der von einem Gange einmal beschleunigte Wasserstrom von den folgenden keinen nützlichen Druck mehr erhalten kann, sondern daß die Reibung der für

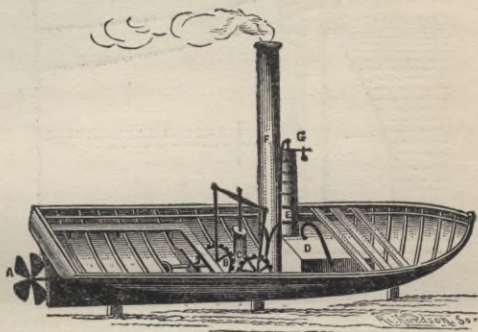


Figur 163.

den Vortrieb überflüssigen Gänge im Wasser nur unnütz Maschinenleistung verzehrt. Diese Erfahrung soll später, als besonders in England trotz aller früheren Mißerfolge immer neue Anstrengungen zur Herstellung befriedigender Schraubenpropeller gemacht wurden, der Zufall geliefert haben, indem sich zeigte, daß eine Schraube günstiger arbeitete, nachdem ein Teil der Fläche abgebrochen war. Daß nur praktische Beobachtung, gewollt oder nicht gewollt, dieses Ergebnis bringen konnte, wird begreiflich, wenn man bedenkt, wie auch heute noch eine wirkliche Berechnung der schädlichen Widerstände des Schraubenpropellers nicht möglich ist, und seine zweckmäßige Formgebung in dieser Hinsicht immer noch im wesentlichen auf der unmittelbaren Erfahrung beruht. War aber nun erkannt, daß nur ein einziger Schraubengang, oder sogar nur ein Teil davon erforderlich und nützlich war, so lag auch der Gedanke nahe, schon

wegen der Verkürzung der Schraube in der Achsenrichtung, nicht eine zusammenhängende Schraubenfläche anzuordnen, sondern einzelne Sektoren oder Flügel, die, ganz ähnlich wie beim Windrade, nebeneinander auf gemeinschaftlicher Nabe befestigt waren. Diese Form zeigten schon mehrere Modelle des Amerikaners Stevens aus dem Anfange des 19. Jahrhunderts, deren eines (Figur 164) die jetzige Schraubenform deutlich erkennen läßt.

Wenn trotz dieser schon damals gegebenen richtigen Grundform die Schraube sich verhältnismäßig langsam entwickelte, so muß der Grund dafür in der noch mangelhaften Einsicht in

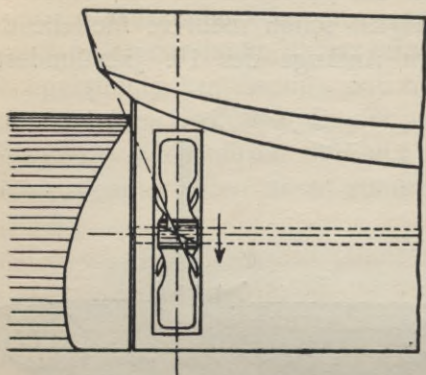


Figur 164.

das Wesen der Schiffspropeller überhaupt gesucht werden, außerdem aber in der geringen Umdrehungszahl der Dampfmaschine, die man damals erst zu erzielen verstand, die wieder für das Rad geeignet war. Wollte man das Bild des Schraubenbootes von Fitch (Figur 163) als einigermaßen getreue Darstellung gelten lassen, so müßte man annehmen, daß nur eine so große Geschwindigkeit der Welle einen allenfalls befriedigenden Antrieb vermittelt der enggängigen Schraube geben konnte, wie sie damals nur durch Einschalten einer Zahnradübersetzung von der Dampfmaschine zu erhalten gewesen wäre.

Die Erfindung der Schrauben, was hier heißen muß die Herstellung einer brauchbaren Schraube, auf Grund zutreffender Erkenntnis ihrer Wirkungsweise, wird Verschiedenen zugeschrieben. Die Engländer weisen die Ehre einem Landsmann zu mit dem nicht ungewöhnlichen Namen Smith, die Deutschen dem Oesterreicher Joseph Ressel (1793—1857). Unter denen, die sich sonst für die Einführung und Ausbildung der Schraube verdient gemacht haben, ist besonders der schwedische Ingenieur Ericsson (1803—1889) zu nennen. Auf dessen eigenartige Schrauben kommen wir später zurück. Joseph Ressel, einem als Forstmann wie als Techniker gleich tüchtigen, nur etwas zu be-

scheidenen Manne, darf wohl deshalb die wichtigste Rolle in der Entwicklung zugeschrieben werden, weil er zuerst die später maßgebende Anordnung der Schraube zwischen Hinterstegen



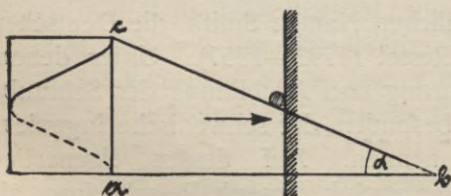
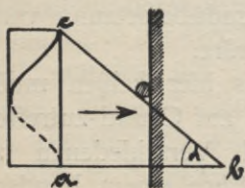
Figur 165.

und Steuer durchgeführt hat (Figur 165), was vor allem davon zeugt, daß er den Zusammenhang der Hinterschiffform mit der Schraubenwirkung richtig erkannt hatte. Ressel ließ 1829 bei Triest den kleinen Schraubendampfer Civetta mit Erfolg laufen, fand aber in seinem Vaterlande so wenig Verständnis (man erzählt, die Hafenspolizei habe weitere Versuche verhindert, weil

zu gefährlich!), wie einige Jahre später Ericsson in England, dem sich dafür in Amerika ein besseres Feld für seine Tätigkeit bot.

*

Um nun Form und Wesen der Schiffschraube richtig aufzufassen, muß man auf die Schraubenlinie überhaupt eingehen. Am anschaulichsten, in geometrischer wie mechanischer Hinsicht, kann man sich die Schraubenlinie entstanden denken, durch Umlegen eines Blattes in rechteckiger Dreieckform um einen Zylinder



Figur 166.

(Figur 166). Dabei muß die wagrechte Kathete des Dreiecks gleich dem Umfange des Zylinders sein, so daß nach vollendetem Umlegen des Blattes die Spitze b mit a zusammenfällt und in derselben Flucht auf dem Zylinder liegt wie c, nur um die Länge a axial dazu verschoben. Diese Entstehungsweise zeigt die Schraubenlinie einfach als

im Kreise gebogene schiefe Ebene, deren mechanische Eigenschaften im übrigen erhalten bleiben. Ein schwerer Punkt, der auf der schiefen Ebene ruhend an seitlichem Ausweichen durch einen Widerhalt verhindert ist, wird bei einer Verschiebung der Ebene im Pfeilsinne entgegen der Schwere gehoben, wobei er auf der Neigung gleitet oder rollt, und wobei der Widerhalt um so größeren Gegendruck ausüben muß, je steiler die Steigung ist. Das leuchtet bei Betrachtung von zwei schiefen Ebenen mit verschiedenen Steigungswinkeln a von selbst ein. Ebenso wächst mit dem Steigungswinkel die zum Verschieben der schiefen Ebene beim Heben des schweren Punktes erforderliche Kraft. Das ergibt sich unmittelbar aus dem Arbeitbegriffe. Denn wenn zwei schiefe Ebenen von verschiedener Steigung den schweren Punkt um dieselbe Höhe heben, wie in Figur 166 angedeutet, so ist die Arbeit in beiden Fällen gleich. Da aber der erforderliche Verschiebungsweg der schiefen Ebene bei stärkerer Steigung kürzer ist, so muß die Kraft in demselben Verhältnisse größer sein, und umgekehrt. Ganz dieselben Betrachtungen gelten für die Schraubenlinie, die sich nur als eine gedrängte Anordnung der schiefen Ebene darstellt, vermöge derer die Verschiebung der Fläche als eine Drehung des Zylinders erscheint. In welchem Verhältnisse die Steigung der Schrauben bei einem Umgange, die Ganghöhe, zum Steigungswinkel und zum Durchmesser oder Umfange des Zylinders steht, lehrt die Betrachtung der Figur.

Die Schrauben als Maschinenelemente haben immer notwendig eine gewisse Gangtiefe, bilden also nicht eine einzelne Schraubenlinie, sondern eine, gewöhnlich nur ganz schmale Fläche, deren Breite eben die Gangtiefe ist, und die sich um die Zylinderachse windet. Man kann dabei die äußere Schraubenlinie unterscheiden, die äußere Begrenzung der Schraubenfläche, und deren innere Begrenzung. Der Umschlußkörper des Schraubenbolzens, die Schraubenmutter, innen mit denselben Windungen versehen, wie der Schraubenbolzen auf seiner Außenseite, verschiebt sich beim Drehen achsial auf dem Bolzen, oder wird, wenn an der Drehung verhindert, durch den sich drehenden Bolzen achsial verschoben, entgegen der Schwere oder überhaupt einer hindernden Kraft, deren Verhältniß zu der anzuwendenden Drehkraft sich aus dem Gesetze der schiefen Ebene

bestimmt. In den meisten Fällen muß aber dabei auf die Reibung der Schraubengänge besondere Rücksicht genommen werden.

Die gewöhnlichen Schrauben haben so geringe Gangtiefe, oder die Schraubenfläche ist so schmal, daß an ihnen nicht auffällt, wie diese eine sogenannte windschiefe Fläche bildet. Die äußere und die innere begrenzende Schraubenlinie, und andere parallel und zwischen ihnen verlaufend zu denkende, haben bei derselben Steigung verschiedene Steigungswinkel. Das wird aber ganz deutlich, wenn man nun wieder zur Schiffschraube übergeht, die sich von der gewöhnlichen durch eine sehr große



Figur 167.

Gangtiefe unterscheidet. Stellt in Figur 167 der punktierte Sektor einen Schraubenflügel in der Projektion auf eine zur Nebenachse senkrechte Ebene dar, so kann man (oben) einzelne, zur Achse konzentrische, schmale Flächenelemente betrachten, die in einer dazu senkrechten Ansicht (unten) als Linien unter verschiedenen Winkeln zur Achse erscheinen (genau genommen dürften diese Linien nicht gerade, sondern müßten schwach gewunden sein, wie aus der Figur 166 sich ergibt). Wenn also das äußerste der Flügelemente (die zusammengehörenden Elemente sind in den beiden Ansichten numeriert) in einem gewissen Winkel zur Achse steht, so wird der Winkel der nach innen folgenden

Elemente immer kleiner, das auf dem Umfange der Nabe selbst liegende Element bildet mit der Achse nur noch einen recht kleinen Winkel, aber es hat einen sehr großen Steigungswinkel. Das nur noch in der geometrischen Abstraktion vorhandene, die Achse selbst berührende Element fällt ganz mit dieser zusammen (in der Figur punktiert). Die Anschauung über die Form einer solchen tiefgängigen Schraube wird unterstützt durch einen biegsamen Blechstreifen, der oben und unten mit Zangen gefaßt und in sich gewunden wird.

Die Darstellung der Schiffschraube in Figur 165 wird nunmehr verständlich sein. Es leuchtet auch ein, daß die Steigungen der Schraubenelemente zur Achse, wie sie oben verstanden wurden, gesetzmäßig nach dem Prinzip der schiefen Ebene aufeinander folgen, sobald nur die Neigung eines Elementes ge-

geben ist, beispielweise des äußersten. Für die weiteren Betrachtungen können wir uns deshalb meist auf dieses beschränken.

*

Bildete das Wasser eine feste Stütze für die Schraube, eine feste Schraubenmutter, so wäre bei gegebener Schraube und verlangten Geschwindigkeit des Schiffes die Drehzahl der Schraubenwelle bestimmt. Denn eine Umdrehung ergäbe eine bestimmte achsiale Verschiebung. Nähme man den Neigungswinkel der Schraube (diesen also bezogen auf das äußerste Element) größer, so würde derselbe achsiale Vorschub in der Sekunde mit einer geringeren Drehzahl der Welle zu erreichen sein, und umgekehrt. Das Wasser ist aber nachgiebig, und es entsteht deshalb die Erscheinung des Slip, wie beim Handruder oder beim Schaufelrade, d. h. Neigungswinkel und Drehzahl müssen so bestimmt werden, als wenn dem Schiffe nicht nur seine wirkliche Geschwindigkeit erteilt werden sollte, sondern die um den Slip vermehrte.

Nach der für alle Propeller gültigen dynamischen Auffassung, kommt es auch bei der Schraube darauf an, einen nach hinten gerichteten Wasserstrom zu erzeugen, dessen Geschwindigkeit relativ zum Schiffe größer ist, als die entgegengesetzt gerichtete Schiffsgeschwindigkeit. Der Unterschied dieser Geschwindigkeiten, der Slip, bildet das Maß für die dem vorher ruhenden, von dem Propeller gefaßten Wasser erteilten Beschleunigung und zusammen mit der in der Sekunde den Propeller passierenden Wassermasse das Maß für den Reaktionsdruck, ganz den beim Rade erörterten Verhältnissen entsprechend. Wenn also in dem früheren Beispiele die Schaufelräder durch eine Schraube ersetzt werden sollten, so würde sich zunächst für den von der Schraube zu bewegenden Wasserstrom derselbe Querschnitt wie früher ergeben. Man müßte also den der Schaufel umschriebenen Kreis wieder annähernd 1 qm groß nehmen (über 1 m Durchmesser). Man sieht an dieser Gegenüberstellung, daß die Schraube, die ganz eintauchen soll, von vornherein tieferes Fahrwasser verlangt. Im übrigen aber könnte man, anders wie beim Rade, dessen Schaufeln unter den gegebenen bzw. angenommenen

Verhältnissen eine bestimmte Geschwindigkeit erhalten, die Neigungswinkel und die Drehzahl, also die Geschwindigkeit der Schraubenflügel beliebig wählen. In dieser Wahl liegt die hauptsächlichste Schwierigkeit bei Herstellung einer zweckmäßigen Schiffschraube.

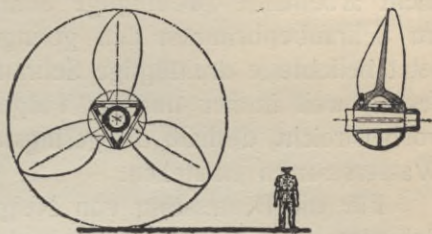
Das Wasser ist allseitig beweglich, es erfährt also durch die schräg zur Achse stehenden Schraubenelemente nicht nur eine Beschleunigung längs dieser Achse, sondern auch quer zu ihr. Anders gesagt, die Schraube erzeugt nicht nur immer einen gerade nach hinten gerichteten Wasserstrom, sondern dessen einzelne Wasserfäden bilden sich selbst infolge der Drehung der Schraube zur Schraubenlinie aus, wie die Fäden eines Tauendes. Diese Querbeschleunigung ist aber für den Antrieb des Schiffes verloren. Sie wird kleiner, wenn der Neigungswinkel der Schraube klein gewählt wird. Damit wächst aber die Reibung der Schraube im Wasser, denn die Schraubenelemente müssen sich nun schneller drehen, gleiten also in der Zeiteinheit an mehr Wasserteilchen vorbei. Die Reibung wird umgekehrt vermindert, wenn infolge größeren Neigungswinkels die Schraube geringere Geschwindigkeit erhält, dafür wächst aber die schädliche Querbewegung der Wasserteilchen. Es muß weiter beachtet werden, daß durch das teilweise Mitnehmen des Wassers im Drehsinne Zentrifugalkräfte geweckt werden, die ein radiales Auseinandergehen des getroffenen Wassers anstreben, also Anlaß zu schädlichen Wirbeln werden, die wieder einen Teil der schädlichen Maschinenleistung verzehren. Endlich entsteht der von der Schraube erzeugte Wasserstrom am Hinterschiffe und verringert damit noch weiter, durch das Absaugen gewissermaßen, den Wasserdruck auf das Hinterschiff, der schon durch die Bewegung des Schiffes kleiner ist, als der statische Druck bei feststehendem Schiffe, und einen Ausdruck für den Formwiderstand des Schiffes bildet. In dieser Hinsicht, durch die mittelbare Vergrößerung des Schiffswiderstandes, wirkt die Schraube ungünstiger, als das Rad.

Alle diese Nebenerscheinungen entziehen sich bei ihrer Kompliziertheit der Rechnung, selbst die bloße Schätzung ihres Einflusses im einzelnen ist unsicher, zweckmäßige Schraubenformen liefert deshalb fast nur die Erfahrung, oder richtiger gesagt, planmäßige, auf klarer allgemeiner Einsicht beruhende Versuche.

Als das auffallendste Ergebnis der Erfahrungen mit Schiffschrauben muß gewiß die allmählich eingetretene Verkleinerung der Schraubenfläche erscheinen. Moderne Schrauben, wie bei-

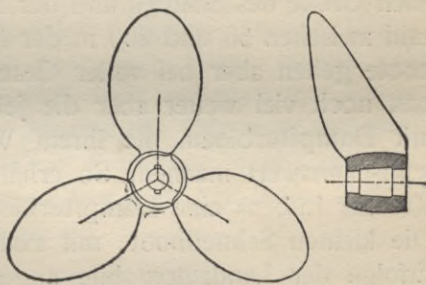
spielweise die eines großen Dampfers (Fig. 168) von etwa 6 m Durchmesser, haben in der Projektion auf eine zur Achse senkrechte Ebene oft weniger als ein Drittel der Fläche des umschriebenen Kreises. Aehnlich eine (in Figur 169 in größerem Maßstabe gezeichnete) Torpedoboot-Schraube von etwas über 2 m Durchmesser. (Bei dieser sind die Schraubenflügel stark nach hinten geneigt, vornehmlich um der Zentrifugalkraft der Wasserteilchen etwas entgegen zu wirken.) Diese Verkleinerung der Schraubenfläche, die ersichtlich die Reibung der Schraube vermindert, steht jedenfalls im Widerspruche zu der nächstliegenden

Annahme, daß zum sicheren Fassen des Wassers möglichst der ganze umschriebene Kreis von den Flügelprojektionen ausgefüllt sein sollte. Wenn die Erfahrung die Verringerung der Fläche als zulässig und zweckmäßig gelehrt hat, so ist das nur durch den Umstand zu erklären, daß die Wirkung der Schraubenflügel sich über ihre geometrische Begrenzung hinaus erstreckt, oder daß die nicht unmittelbar gefaßten Wasserteile von den durch die Flügel wirklich getroffenen zweckdienlich in Mitleidenschaft gezogen werden. Dann muß aber auch angenommen werden, daß ein Teil des außerhalb des Drehkreises der Schraube befindlichen Wassers ebenfalls noch im Sinne des Wasserstromes mitgerissen wird. Es tritt deshalb bei Ermittlung des Schraubendurchmessers eine ähnliche Unsicherheit ein, wie bei Bestimmung der Schaufelfläche des Rades.



Figur 168.

Dreiflüglige Schraube (Maßstab 1 : 200).
(Aus „Neudeck-Schröder, Das kleine Buch von der Marine“, Kiel 1899.)



Figur 169.

Torpedobootsschraube (Maßstab 1 : 50).
(Aus „Neudeck-Schröder, Das kleine Buch von der Marine“, Kiel 1899.)

Die Zahl der Schraubenflügel schwankt zwischen 2, 3 und 4. Zwei Flügel wurden gern angewendet bei Vereinigung von Segler und Dampfer, wie bei unseren Schulschiffen, weil die nicht arbeitende zweiflüglige Schraube in senkrechter Stellung im Schraubenbrunnen den geringsten Widerstand bietet. Die jetzt beliebteste dreiflüglige Schraube arbeitet dagegen am sanftesten, weil immer nur ein Flügel an den festen Schiffsteilen vorbeistreicht, deshalb die geringsten Störungen im Verlaufe des Wasserstromes entstehen.

Für die Bemessung von Neigungswinkel und Drehzahl der Schraube ist die zulässige Drehzahl der Maschine wesentlich bestimmend gewesen, nachdem man bald das Einschalten von Zahnradübersetzungen als unzweckmäßig verworfen hatte. Je nach Größe des Schiffes und der Maschine ist deshalb die Drehzahl zwischen 50 und 200 in der Minute anzunehmen. Torpedoboote gehen aber bei voller Geschwindigkeit weit darüber hinaus, noch viel weiter aber die jetzt vielfach versuchten Schiffe mit Dampfturbinen, die ihrem Wesen nach hohe Drehzahlen wünschenswert machen. So erhält der jetzt im Bau begriffene Kreuzer Lübeck eine Dampfturbine mit fast 700 Umdrehungen. Die kleinen Schnellboote mit Petroleummotoren, die durch die Erfolge der Landautomobile angeregt wurden, übertreffen aber teilweise auch diese Drehzahlen. So hatte ein Deimler-Boot von nur 11 m Länge eine 90 pferdige Maschine, die zur Erzielung geringen Gewichtes mit fast 1200 Umdrehungen lief.

*

Die bisher betrachtete Schiffschraube zeichnet sich gewiß durch allergrößte Einfachheit aus und ist wohl den wenigsten Störungen von allen Schiffspropellern ausgesetzt. Die freie Anordnung am Hinterschiffe hat zwar gelegentlich die Anwendung eines besonderen Schutzes durch ein Rahmenwerk nahegelegt, das unter Umständen auch begründet ist. So erhielt der Great Eastern, als er im Laufe seines schicksalreichen Lebens zum Kabeldampfer eingerichtet wurde, aus naheliegenden Gründen einen Schutzkorb um die Schraube. Denn nachschleppendes Tauwerk jeder Art ist der schlimmste Feind der Schraube. Man denke nur an den Kampf unseres kleinen „Meteor“ vor Havanna, dessen Schraube im entscheidenden Augenblicke durch das Tau-

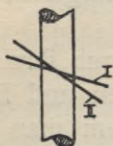
werk eines gestürzten Mastes unklar wurde. Im allgemeinen aber sind alle Zurüstungen zum Schutze der Schraube nicht in Aufnahme gekommen, denn sie vermindern die Geschwindigkeit und bieten doch immer nur einen bedingten Schutz, weil gerade die freie Anordnung der Schraube Klemmungen durch eingeschlichene kleinere Fremdkörper unmöglich macht.

Auch der Schutz, den die Einzelschraube durch ihre Lagerung im Schraubenbrunnen, zwischen Hintersteven und Ruderahmen hatte, ist entbehrlich erschienen, nachdem man dazu übergegangen ist, den Schiffen mehrere Schrauben zu geben. Das wurde einmal nahegelegt durch die Notwendigkeit, eine Teilung der immer mehr wachsenden Maschinenleistungen vorzunehmen, dann aber auch durch die ungemein größere Betriebssicherheit, die mehrere, auf je eine Schraube arbeitende, von einander ganz unabhängige Maschinen bieten. In der Regel beschränkt man sich auf zwei Schrauben, deren Wellen parallel neben dem Kiele angeordnet sind, doch sind auch drei Schrauben und mehr zur Anwendung gekommen. Der vorerwähnte Turbinenkreuzer „Lübeck“ erhält vier Schrauben, dem unglücklichen, fast oder nahezu kreisförmigen Popowka-Typ hatte man sogar bis zehn Schrauben gegeben!

*

Die immer noch herrschende Unsicherheit in der Bewertung der Schraubeneinzelheiten macht die zahlreichen besonderen Vorschläge zu Verbesserungen erklärlich, von denen aber nur einer unbestrittenen Erfolg gehabt hat. Bei der näheren Betrachtung der Flügelform (Figur 167) war noch eine gleichmäßige Steigung der peripherischen Elemente vorausgesetzt, d. h. die Begrenzung der zur Achse konzentrischen Streifen durch wirkliche Schraubenlinien. Denkt man sich ein solches Element im Wasser arbeitend, so erhält ein von ihm gefaßtes Wasserteilchen sofort den ganzen Druck, der es in der Achsenrichtung beschleunigen soll, eben weil der Steigungswinkel auf die ganze Länge des peripherischen Elementes konstant ist. Den Nachteil eines solchen plötzlichen Einsetzens der beschleunigenden Kraft haben wir beim Schaufelrade besprochen und auch das dagegen angewendete Mittel angedeutet. Dieses Mittel läßt sich an der Schraube leichter verstehen. Die Schraube muß, bei gegebener Drehzahl, einen

größeren Steigungswinkel erhalten, als der Schiffsgeschwindigkeit entspricht, denn ihre Aufgabe ist nicht, sich gerade so schnell durchs Wasser zu schrauben, daß sie kein Hindernis bietet, sondern sie soll, ihrerseits voreilend, das Wasser nach hinten drücken.



Figur 170.

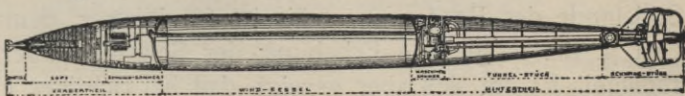
Und wenn ein peripherisches Element von der Stellung I Figur 170 zur Achse der Bedingung des bloßen glatten Durchziehens durch das Wasser bei großer Schiffsgeschwindigkeit genügen würde, so ist der größere Steigungswinkel der Stellung II erforderlich, damit das Element wirklich Leistung auf das Schiff abgibt. Wenn man nun aber das Element so krümmt, daß es an der vorgehenden Kante den kleinen Steigungswinkel hat und allmählich nach hinten in den größeren übergeht, so faßt

es ersichtlich die Wasserteilchen zunächst ohne Druck und beschleunigt sie allmählich, wie es sein soll, damit nicht bei plötzlichem Einzwängen des Wassers in den vom Propeller erzeugten Strom Stöße und Wirbel entstehen. Die Krümmung der Elemente ist immer nur schwach wegen des geringen Slips oder der kleinen Differenz der beiden bestimmenden Steigungswinkel. Das Element arbeitet auch beim Rückwärtsschlagen der Schraube ungünstiger, als bei konstanter peripherischer Steigung, dieser Umstand ist aber von geringerer Bedeutung.

*

Was sonst an Bestrebungen zur Verbesserung der Schraube aufgetreten ist, bezieht sich hauptsächlich auf die genauere Beherrschung der durch die Schraubendrehung verursachten Wasserbewegung, vor allem auf die Unterdrückung der schädlichen Abweichungen der Wasserteilchen von dem geraden Strome. Schon in den 40er Jahren des vorigen Jahrhunderts hatte Ericsson — damals in England — geglaubt, eine wesentliche Verbesserung zu erzielen durch Einschränken der kreisenden Bewegung des Wassers, die ihm von der Schraube ja zweifellos erteilt wird, wenn auch wahrscheinlich nicht in dem Maße, als man früher annahm. Ericsson wandte zwei dicht hintereinander angeordnete Schrauben an, die aber entgegengesetzte Steigung

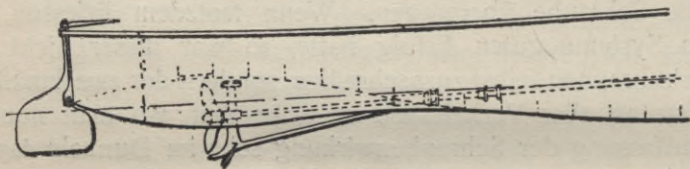
hatten, deshalb auch, um einen Vortrieb in derselben Richtung zu geben, entgegengesetzten Drehsinn bekamen. Zu dem Ende steckte die eine Schraube auf einer hohlen Welle, die als Führung für eine innere, die andere Schraube tragende Welle diente. Zahnräder im Inneren des Schiffes sorgten für gleiche, entgegengesetzte Drehung der Wellen. Die schädliche Kreisbewegung des Wassers, die von der einen Schraube ausging, sollte von der anderen aufgehoben werden. Der an sich richtige Gedanke hat sich indessen nicht als wirtschaftlich wertvoll erwiesen, da die vermehrte Reibung der Schrauben, und die große Unbequemlichkeit, die ihr entgegengesetzter Antrieb mit sich bringt, den Nachteil des kreisenden Mitnehmens des Wassers durch eine einzelne Schraube überwiegen. Wenn trotzdem Ericsson mit seinem Systeme guten Erfolg hatte, so war dieser nicht den Doppelschrauben selbst zuzuschreiben, sondern der zweckmäßigen Bestimmung aller Verhältnisse zu einer Zeit, wo man noch in der Auffassung der Schraubenwirkung sehr im Dunkeln tappte. Die Ericssonsche Doppelschraube ist übrigens später noch zu Ehren gekommen und zwar bei den automobilen Torpedos, wenn auch aus anderem Grunde, als dem Erfinder vorgeschwebt hatte. Eine einzelne Schraube bewirkt nämlich immer eine gewisse Seitenabweichung des Schiffes vom Kurse, die durch die Rudelage bekämpft werden muß. Denkt man sich die Schraube nur teilweise eintauchend, so bewirkt sie beim Drehen offenbar eine Verschiebung des Hinterschiffes zur Seite, weil sich die tangentialen Kräfte auf die Flügel nicht aufheben. Das ist aber auch nicht vollständig der Fall, wenn die Schraube ganz unter Wasser arbeitet, da das Wasser in der Nähe der Oberfläche leichter ausweicht, als in der Tiefe. Die dadurch entstehende Störung im Kurshalten ist gewöhnlich nicht erheblich, bei den Torpedos aber schon unzulässig, weil bei ihnen alles vermieden werden muß, was ihren geraden Lauf beeinträchtigen könnte. Die Ericssonsche Doppelschraube hat nun den gerügten Fehler nicht, weshalb sie trotz ihrer geringeren Einfachheit bei Torpedos (Figur 171) zur Anwendung kommt. Auch ist hier meist ein Schutzrahmen in



Figur 171. **Torpedo.**
 (Aus „Neudeck-Schröder, Das kleine Buch von der Marine,“ Kiel 1899.)

Anwendung, um jede Verletzung des empfindlichen Propellers beim Handhaben zu vermeiden.

Um dem radialen Auseinandertreiben des Wasserstromes infolge der Zentrifugalkraft entgegenzuwirken, hat man ferner die Schraube mit einem kürzeren oder längeren Rohrstücke umgeben, das gewiß auch in dem beabsichtigten Sinne wirkt, nur auch einen in seinem Einflusse überschätzten Fehler bekämpft, dafür aber wieder den größeren Nachteil vermehrter Reibung an den Rohrwänden herbeiführt. Auch diese Einrichtung ist deshalb an sich nicht als eine Verbesserung anzusehen, kann aber in weiterer Ausbildung in anderem Sinne nützlich werden. Man kann offenbar, wenn man die vermehrte Reibung nicht in An-



Figur 172.

rechnung bringt, das die Schraube umschließende Rohrstück beliebig lang machen, sogar durch das ganze Schiff nach vorn führen, ihm auch in seinem Verlaufe eine Krümmung geben, womit allerdings wieder eine mäßige Vergrößerung der Widerstände eintritt, weil die Wasserfäden von der geraden Richtung abgelenkt werden, und auch bei ganz sanfter Krümmung innere Wirbel nicht zu vermeiden sind. Man kann aber den Scheitel der Krümmung nach oben legen und gerade an der Stelle, wo die Schraube eingebaut ist, wodurch die Schraube über den Wasserspiegel zu liegen kommt. Dieser Grundgedanke ist benutzt, um flachgehende Schraubenboote herzustellen. Man hat nämlich in dem Hinterschiffe eine muldenartige Einbuchtung nach oben vorgesehen und in ihrer höchsten Erhebung die Schraube gelagert, der das Wasser in sanftem Anstiege von vorn unten zufließt, während es in schwacher Neigung nach hinten wieder abfließt (Figur 172). Diese nach unten offene Mulde ersetzt gewissermaßen das vollständige Umschlußrohr, sie ist beim Stillstande des Bootes nur teilweise im Wasser, denn der Zweck ist ja die möglichste Erhebung der Schraube über den Wasserspiegel. Es hat sich aber gezeigt, daß bei richtiger Formgebung die arbeitende Schraube, indem sie das Wasser ansaugt,

die Mulde sofort mit Wasser füllt, so daß sie trotz ihrer erhöhten Lage in Wirklichkeit ganz von ihm umgeben ist. Der Erfolg dieser Einrichtung ist durch viele Versuche gesichert, nur bedingt sie eine Verteuerung des Bootes selbst und ist deshalb bis jetzt auf besondere Fälle beschränkt geblieben.

Teilweise auch um ein flachgehendes Boot zu erhalten, aber auch, um die Wasserbewegung in und um den Propeller vollständig zu beherrschen, hat neuerdings Zeuner einen Turbinenpropeller entworfen und ausgeführt, der aus der rohrumschlossenen Schraube entstanden gedacht werden kann, seiner besonderen Form nach aber als umgekehrte Achsialturbine anzusehen ist. Der Name des Erbauers bürgt von vornherein für die klare Behandlung des Propellers, sehr im Gegensatze zu den meisten Schöpfungen, die von früher her unter dem Namen Turbinenschiffe oder • Reaktionschiffe bekannt waren. Der Zeunersche Propeller ist im Wesen eine Vollturbine mit Leitschaufelrad und Laufrad, welches letzteres nichts anderes, als eine besondere Schraubenform ist. Da aber dem Wasser beim Durchgange ganz bestimmte Wege gewiesen sind, und in dieser Hinsicht jede Unsicherheit aufhört, so mußte von der sorgfältigen Durcharbeitung des Systems auch ein Erfolg erwartet werden, den die Versuche bestätigt haben. Bis jetzt ist freilich nicht abzusehen, ob trotz mancher Vorzüge im einzelnen der Zeunersche Propeller bei seiner immerhin feinen und zarten Konstruktion in allgemeinere Aufnahme kommen wird.

*

Die Kolbendampfmaschinen zum Antriebe der Schrauben haben jetzt durchweg aufrechte Bauart mit untenliegender Welle, welche Anordnung sich bei den größten wie kleinsten Dampfmaschinen durch die tiefe Lagerung der Schraube als die natürlichste ergibt. Die kleinen Dampfmaschinen sind deshalb nur Miniaturbilder der großen. Wie die Dampfmaschine sich bei den Landfahrwerken nur in größerem Maßstabe als zweckdienlich erwies, so ist sie auch nicht der geeignete Motor für die kleineren Wasserfahrzeuge geworden. Trotz vieler Anstrengungen in dieser Richtung hat sie ihre stete Wartebedürftigkeit nicht abstreifen können, ihr immer umständlicher Betrieb genügt nicht den Anforderungen, die im besonderen Sportfahrzeuge stellen. Sehr fördernd ist des-

halb auch hier der ganz selbständig arbeitende, leichte und wenig Raum beanspruchende Petroleummotor geworden, dessen eigenartige Betriebsverhältnisse bei Besprechung der Automobile erörtert wurden. Auch die Schraube bedarf also der Einschaltung eines Zwischenmechanismus, der ihre Geschwindigkeit und ihre Drehrichtung unabhängig von dem gleichmäßig laufenden Motor zu regeln ermöglicht. Man hat aber noch einen anderen Weg zur Errichtung dieses Zweckes vorgeschlagen, indem man die Schraubenflügel vermittels einer in der hohlen Welle geführten Stange vom Boote aus auf ihrer Nabe verstellt, also sowohl verschiedene Steigungswinkel einstellt, wie auch entgegengesetzte Steigung gibt. Die Schraubenflügel können zwar nur für einen bestimmten Steigungswinkel die günstigste Form erhalten, indessen ist meist unerheblich, wenn sie für langsame Fahrt und beim Rückwärtsgange weniger vorteilhaft arbeiten. Die Formen der neueren sogenannten Motorboote selbst nähern sich vielfach der in Figur 150 schematisch angedeuteten, die eine besonders freie Bewegung der Schraube gestattet.

Die Bestrebungen der Motorboot-Industrie, die in den letzten Jahren einen bedeutenden Aufschwung genommen hat, zeigt vielfach ähnliche Tendenzen, wie der verwandte Automobilbau. Auch bei ihr ist die Neigung zu übermäßiger Steigerung der Geschwindigkeit erkennbar, die der Entwicklung im ganzen vielleicht wenig zuträglich ist. Doch ist andererseits der frische Zug nach eigenartiger Gestaltung erfreulich, und die gelegentlichen Uebertreibungen werden als Kinderkrankheiten zu betrachten sein.

Der Elektromotor hat leider für den Bootantrieb noch keine umfangreichere Verwendung finden können, so geeignet er selbst auch hier wie überall ist. Die schweren Akkumulatoren bilden dasselbe Hemmnis, das sie auch im Straßenbahnwesen nicht Fuß fassen ließ. Neuerdings hat man auch, wie bei größeren Automobilen, den Elektromotor lediglich als Uebertragungsmittel zwischen Wärmemotor und Schraube in Vorschlag gebracht, doch läßt sich noch nicht absehen, ob dieses im ganzen immerhin verwickelte Zwischenmittel einen nachhaltigen Erfolg haben wird.

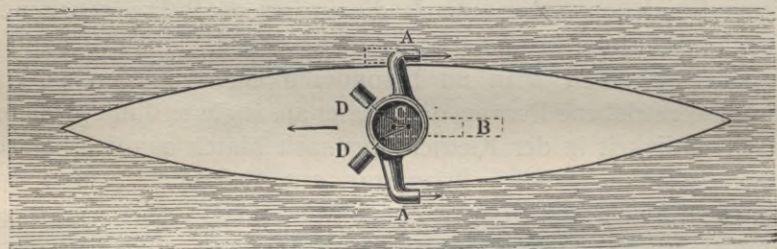
*

Eine sonderbare Rolle haben in der Entwicklung des Schiffswesens die sogenannten Reaktionpropeller gespielt. Schon von

Bernoulli vorgeschlagen, haben sie, trotz allmählich einziehender richtiger Erkenntnis vom Wesen der Propeller, immer wieder unberechtigte Hoffnungen erregt, und mit großen Opfern hat man sie zu verschiedenen Malen lebensfähig zu machen gesucht, ein Beweis für die Zähigkeit, mit der in der Technik gelegentlich von vornherein mindestens fragwürdige Ideen verfolgt werden.

Wie die Bezeichnung Reaktionspropeller nach jetziger Erkenntnis falsch ist, weil der Name in Wirklichkeit allen Propellern zukommt, so läßt sich auch der Reaktionspropeller nicht scharf gegen die schon besprochenen abgrenzen. Der Zeunersche Turbinenpropeller kann ebenso als Abart der Schraube aufgefaßt werden wie als Reaktionspropeller in dem ursprünglich damit verbundenen Sinne. Auch die in einem Rohre arbeitende einfache Schraube kann so bezeichnet werden. Unter Reaktionspropeller verstand man im besonderen eine von der Schiffsmaschine getriebene Pumpe, die Wasser ansaugte und mit größerer Geschwindigkeit in der Kielrichtung nach hinten ausstieß. Darin drückte sich die richtige Erkenntnis aus, daß der Vortrieb des Schiffes durch Beschleunigen einer Wassermasse nach hinten zu erfolgen hat, also die dynamische Auffassung aller Propeller. Fügt man die weitere Erkenntnis hinzu, daß im Interesse eines guten Wirkungsgrades vorteilhaft einer möglichst großen Wassermasse eine geringe Beschleunigung zu erteilen ist, so erhält man wieder die Grundbedingungen, denen die Propeller überhaupt zu genügen haben, und bei dieser Schlußweise kann man auch ohne den Begriff des Slip auskommen, oder ihn wenigstens in anderer Form auftreten lassen. Soll der Propeller gut arbeiten, so müssen alle schädlichen Stöße und Wirbel vermieden werden, das Wasser muß deshalb glatt hindurchfließen und die Beschleunigung allmählich erhalten, ganz wie wir beim Handruder, beim Rade und der Schraube gesehen haben. Nennt man nun einen Reaktionspropeller einen solchen, bei dem das Wasser durch ein eingekapseltes Organ beschleunigt wird, so stellt der Zeunersche Turbinenpropeller den vollkommensten Reaktionspropeller dar, denn der vorn eintretende Wasserstrom wird durch ein tunlichst wenig gekrümmtes Rohr dem Schaufelapparate zugeleitet, in bestimmten sanften Bahnen geführt und unter den günstigsten Bedingungen beschleunigt. Man dachte sich aber

den Reaktionpropeller früher in der Form einer im Schiffe selbst befindlichen Zentrifugalpumpe C Figur 173, die das Wasser von unten her ansaugte und durch Seitenröhren AA in der Schiffswand nach hinten drückte. In der schematischen Figur bedeuten DD die Dampfzylinder der Maschine. Als Vorzug wurde auch geltend gemacht die große Steuerfähigkeit des Reaktionsschiffes, da durch Drehen der Rohrkrümmer den Wasserstrahlen eine beliebige Richtung gegeben werden sollte, nach hinten für den Vorwärtsgang, nach vorn für den Rückgang, nach unten für den Stillstand des Schiffes, oder auch zum Drehen auf der Stelle durch entgegengesetzte Stellung der Krümmer. Die Maschine selbst brauchte deshalb beim Manövrieren nicht umgesteuert zu werden. Zunächst war aber das Ansaugen des Wassers von unten



Figur 173.

ein grundsätzlicher Fehler, weil das mit der Schiffsgeschwindigkeit horizontal zufließende Wasser beim senkrechten Aufsteigen eine plötzliche Richtungsänderung erfuhr und durch den ihm dabei erteilten Stoß einen großen Teil der Maschinenleistung unnütz verzehrte. Spätere, in England wieder angestellte Versuche vermieden auch diesen Fehler und ließen das Wasser durch ein nach vorn gerichtetes Rohr in sanfter Krümmung der Zentrifugalpumpe zufließen. Gegen diese selbst, wenn sie sonst richtig gebaut ist, läßt sich nur einwenden, daß sie den Schiffsraum beengt und einschließlich der Wasserfüllung einen erheblichen Teil des Displacements in Anspruch nimmt. Nun setzen aber die beweglich gedachten Ausflußrohre voraus, daß die Wasserstrahlen nur einen mäßigen Querschnitt haben. Vergleicht man damit den von einem Rade oder einer Schraube in Bewegung gesetzten Wasserstrom, dessen Querschnitt wir beispielweise schon für einen kleineren Dampfer auf mehr als 1 qm schätzen mußten, so erscheint die Beweglichkeit der Ausflußrohre sehr schwer

durchführbar und für größere Schiffe überhaupt ausgeschlossen. Bei den auf richtigerer Grundlage angestellten neueren Versuchen in England hatte man auch die beweglichen Rohrkrümmer fallen lassen und durch einfache weite Kanäle ersetzt. Die früher mangelnde Einsicht hielt aber an viel zu engen Rohrmündungen fest, wie sie sich durch die beabsichtigte Beweglichkeit ergaben, das austretende Wasser hatte deshalb eine Geschwindigkeit, die einen guten Wirkungsgrad des Propellers von vornherein ausschloß. Wie weit man bei den älteren Bestrebungen um einen Reaktionspropeller von der richtigen Auffassung entfernt war, beweist auch die vielfach auftretende Ansicht, daß die Ausgüßröhren unter Wasser liegen sollten, weil die austretenden Wasserstrahlen gewissermaßen an dem umgebenden Wasser eine Stütze finden müßten. Die wenig glückliche Verdeutschung des Wortes Reaktionspropeller mit Wasserprall-Maschine ist nur geeignet, einer solchen schiefen Anschauung Vorschub zu leisten. Es ist offenbar im wesentlichen gleichgültig, ob die Rohrmündungen über oder unter Wasser liegen, nur entsteht im ersteren Falle noch ein mäßiger Verlust durch die verlorene Druckhöhe des freien Wasserstrahles von der Rohrmündung bis zur Oberfläche des umgebenden Wassers.

*

Wie ein Reaktionspropeller — um diesen Namen noch beizubehalten — mit Zentrifugalpumpe im Schiffsinne an sich richtig zu formen wäre, ergibt sich aus allem, was über die Propeller gesagt wurde. Die erwähnten neuen Versuche in England, die mit einem in jeder Hinsicht sorgfältig entworfenen Apparate ausgeführt wurden, haben aber dargetan, daß dem Systeme keine Vorzüge vor der einfachen Schraube zukommen. Der Vorteil der bestimmteren Führung des Wassers, die keine wesentlichen Unsicherheiten über seine Bewegung im einzelnen aufkommen läßt, wird mehr als aufgewogen durch die unvermeidlichen Wirbel- und Reibungsverluste, die das Wasser bei seinem mehrfachen starken Richtungswechsel und an den großen Berührungsfächen im Propeller erfährt. Für den weiteren erheblichen Uebelstand des unbequemen Einbaus im Schiffe kann auch der Vorteil nicht Ersatz bieten, der aus der, innerhalb angemessener Grenzen beliebigen Höhenlage der Zentrifugalpumpe

folgt, wodurch allerdings das System, wenn es nur sonst gut wäre, für ganz flach gehende Schiffe geeignet würde.

Eines besonderen Reaktionpropellers mag hier noch gedacht werden, der in den 80er Jahren mit ziemlichem Geräusche auftrat und den Namen Hydromotor führte. Er bestand, kurz gesagt, in der Anwendung des Pulsometer-Prinzipes (Motoren Seite 118) zur Erzeugung der Wasserstrahlen, also in der Vermeidung einer Dampfmaschine mit Pumpe und unmittelbarer Benutzung des Dampfdruckes zum Beschleunigen des reagierenden Wassers in entsprechend großen Zylindern, die abwechselnd unter Kommando einer Steuerung arbeiteten. Manche Einzelheiten des Hydromotors waren auch sehr sachgemäß durchgebildet, und der Versuch mit einem ziemlich großen Schiffe in vieler Beziehung lehrreich, aber nur nach der negativen Seite. Nicht nur mußten auch hier — die eingehende Erörterung würde zu weit führen — die zu engen Ausflußrohre beibehalten werden, die Wasserstrahlen wirkten zudem noch absatzweise und während ihres jeweiligen Bestehens mit veränderlicher Geschwindigkeit, denn das Wasser in den Druckzylindern wurde nach dem Ansaugen durch den Dampfdruck allmählich beschleunigt, um gegen Ende der Arbeitperiode wieder verzögert zu werden. Die Grundbedingungen für das wirtschaftliche Arbeiten eines Propellers lassen sich deshalb mit dem Hydromotor überhaupt nicht erfüllen, der schon deshalb, von allen sonstigen Mißständen ganz abgesehen, schnell wieder in Vergessenheit geriet, ein Schicksal, das in Fachkreisen vorausgesagt war.

*

Von allen durch Motoren betriebenen Schiffspropellern, die jemals vorgeschlagen oder versucht wurden, haben sich deshalb nur das Rad und die Schraube bewährt. Die letztere, mit ihren näheren Verwandten, bildet jetzt den weitaus wichtigsten Propeller, dem nur noch für größere Schiffe bei beschränkter Wassertiefe das Rad vorgezogen werden muß. Die Aufgabe der nächsten Zeit wird sein, die Schraube auch für flaches Wasser anwendbar zu machen, die vielversprechenden Ansätze dazu lassen an der Erreichbarkeit des Zieles nicht zweifeln.

*

VI.

In Ergänzung des Vorstehenden sollen nun noch einige allgemeine Bemerkungen nachgetragen werden, die sich auf Motorschiffe überhaupt beziehen.

Der Wirkungsgrad der Propeller war bisher meist nur für diese selbst verstanden, und als abhängig gefunden von dem Slip und von den schädlichen lokalen Wasserbewegungen. Von der indizierten Maschinenleistung geht aber noch ein erheblicher Teil ab, der für die inneren Widerstände der Maschine einschließlich der Schraubenwelle, und für die Vermehrung des Schiffswiderstandes verbraucht wird. Wie schon an anderer Stelle gesagt, muß man in roher Annäherung die Maschinenleistung etwa doppelt so groß schätzen, als sich aus dem reinen Schiffswiderstande ergeben würde. Der Widerstand konnte annähernd proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit angenommen werden, und da die Leistung sich aus dem zu überwindenden Widerstande und der Geschwindigkeit zusammensetzt, so steigt sie annähernd mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit. Die erforderliche Leistung und damit der Kohlenverbrauch wächst also sehr schnell mit der Geschwindigkeit des Schiffes, und daraus ergeben sich für einen Handelsdampfer die ökonomischen Bedingungen für seine Geschwindigkeit. Bei Kriegsschiffen macht sich noch ein von dem Kohlenverbrauch abhängiger Faktor besonders geltend, der sogenannte Aktionradius oder anders gesagt, die günstigste Marschgeschwindigkeit. Nähme die Leistung oder der Kohlenverbrauch nur in einfachem Verhältnisse mit der Geschwindigkeit zu, so würde dieselbe Reisedecke immer dieselbe Kohlenmenge erfordern, gleichgültig, mit welcher Geschwindigkeit sie durchfahren wäre. Denn der doppelten Geschwindigkeit würde in der Stunde zwar der doppelte Kohlenverbrauch entsprechen, dafür würde aber auch nur die halbe Zeit zu dampfen sein. In Wirklichkeit aber kostet die doppelte Geschwindigkeit in der Zeiteinheit etwa die achtfache Kohlenmenge, dieselbe Strecke demnach den vierfachen Kohlenaufwand. Wenn dieses Verhältnis unbeschränkte Gültigkeit hätte, so würde daraus der Widersinn folgen, daß ein Schiff eine gewisse Strecke um so sparsamer zurücklegte, je langsamer es führe. Nun braucht aber ein Dampfer schon eine beträchtliche Kohlenmenge für den Leerlauf der Maschine, sogar für das bloße Unterdampfliegen, also für den Zustand, wo die

Maschine überhaupt noch keine mögliche Leistung hergibt. Daraus folgt, daß bei einer gewissen Geschwindigkeit des Schiffes ein Optimum eintreten wird, ein günstigstes Verhältnis zwischen dem Kohlenverbrauche und der durchfahrenen Strecke, und mit dieser Geschwindigkeit kann es mit seinem Kohlenvorrat die längste Strecke zurücklegen. Wenn also keine anderen Bedingungen bestimmend sind, wird ein Kriegsschiff mit seiner individuellen Marschgeschwindigkeit fahren. Die Angaben der Geschwindigkeit von Kriegsschiffen sind deshalb immer auf die größte Geschwindigkeit zu beziehen, während die Marschgeschwindigkeit im allgemeinen weniger als $\frac{2}{3}$ davon beträgt.

Bei allen Betrachtungen über die Propeller war bisher immer stillstehendes Fahrwasser vorausgesetzt, durch Fahren im Strome ändert sich die Geschwindigkeit in leicht bestimmbarem Grade. Fährt das Schiff dem Strome entgegen, so kann man es in einem großen Bassin mit stillstehendem Wasser schwimmend denken, und in bezug auf das Fahren in dem Bassin gelten natürlich die früher entwickelten Verhältnisse. Das Bassin bewegt sich aber mit der Stromgeschwindigkeit, die wirkliche Schiffsgeschwindigkeit ist also um die Stromgeschwindigkeit verkleinert. Das Umgekehrte gilt vom Fahren mit dem Strome.

*

Es hat natürlich nicht an revolutionären Gedanken im Schiffsbau gefehlt, die an der alten Grundform der Schiffe rüttelten und ihren Ersatz durch vermeintlich weniger Widerstand bietende anstrebten. Von den harmlosen Versuchen, die gewissermaßen durch Teilung des einheitlichen Schiffskörpers in zwei schmale gleicher Länge einen Erfolg erwarten, und hier und da als Wasserveeloziped oder unter anderen Namen auftreten, den Erbauern nur leider nie den Gefallen tun, aus ihrem beschaulichen Floß-Dasein sich zu Schnellläufern zu entwickeln, können wir hier absehen. Eine immer wiederkehrende Idee ist aber die Anwendung von Rollkörpern: In mißverständener Uebertragung des Rollprinzipes vom Lande auf das Wasser hegt man oft die Vorstellung, die Wasserschleife, nämlich die alte Schiffsform, müsse einen viel größeren Widerstand bieten, als etwa ein auf dem Wasser rollender Zylinder. In Frankreich hat man vor einigen Jahren noch mal in größerem Maßstabe den Versuch gemacht, das Rollschiff zu Ehren zu bringen; in der Form eines größeren Floßes, das von einer An-

zahl, teilweise mit Schaufeln versehener und von der Maschine gedrehter Hohlzylinder getragen wurde. Derartige Versuche führen aber notwendig nur zu Mißerfolgen. — Das gesamte Displacement der Hohlzylinder muß natürlich dem eines gleichwertigen Schiffes alter Form entsprechen. Die Bewegung eines schwimmenden Zylinders erfordert dabei immer das stete Verdrängen der entsprechenden Wassermenge, gleichgültig, ob der Zylinder rollt oder nicht. Die Reibung der benetzten Flächen im Wasser wird aber durch das Rollen auf ein Mehrfaches vergrößert, ein Rollschiff stellt deshalb nur eine an sich ungünstige Schiffform dar, deren Oberfläche noch eine besonders große Gleitgeschwindigkeit gegen das Wasser erhält.

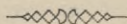
In ganz anderer Weise hat in den 80er Jahren der berühmte Genfer Physiker Raoul Pictet den Widerstand der Schiffsgefäße herabsetzen wollen, und zwar durch teilweises Heben aus dem Wasser während der Fahrt vermittelt der eigenen Maschine. Zu dem Ende gab Pictet einem kleinen Versuchboote eine muldenartige Form, ähnlich wie in Figur 148, zog aber das Hinterschiff nicht nach aufwärts, sondern hakenförmig nach abwärts, so daß beim Vertriebe durch die Maschine sowohl das Vorschiff wie das Hinterschiff infolge der in gleichem Sinne wirkenden geneigten Bodenflächen eine Hebung erfuhren (Figur 174). Diese mußte allerdings eintreten, die Tauchung des Schiffes also beim Fahren verringert werden, aber die zum steten Höherhalten des Schiffes



Figur 174.

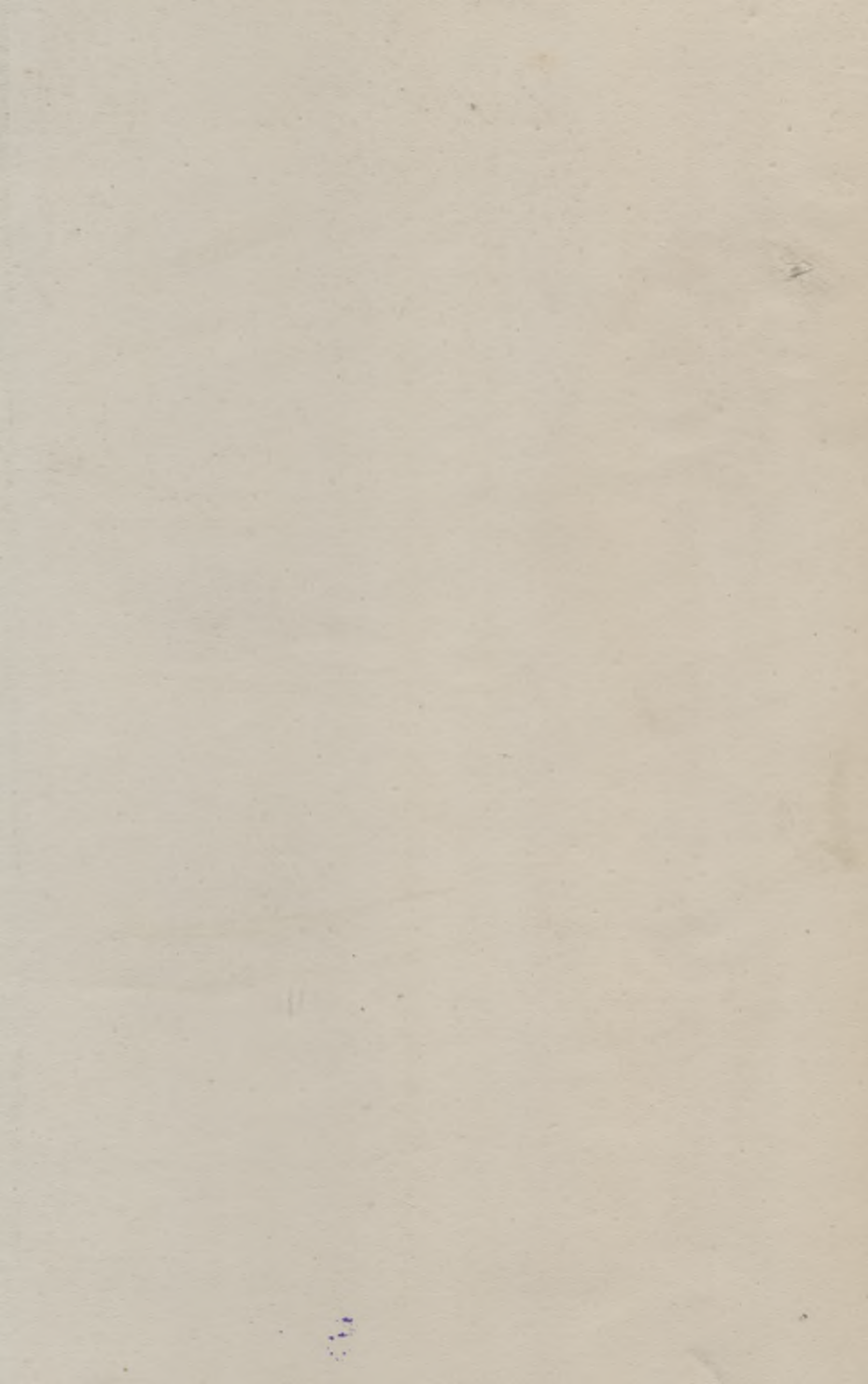
erforderliche Maschinenleistung erwies sich als viel größer, wie der Gewinn aus dem verringerten Displacement. Das breite glatte Heck, das allen sonstigen Erfahrungen mit Schwimmkörpern widerspricht, wird auch von vornherein bei Kundigen nur Zweifel an der Zweckmäßigkeit geweckt haben. Daß übrigens eine gewisse günstige Wirkung durch das dynamische Heben erzielt werden kann, beweisen die oft ziemlich stark nach hinten geneigten Schrauben der Schnellboote. Der etwas nach oben gerichtete Schraubendruck läßt das Hinterschiff beim Schnellfahren nicht so bedeutend sinken, wie es ohne den Kunstgriff der Fall sein würde.

Wenn etwas von Menschenschöpfungen ein Kompromiß genannt werden muß, ein Vermitteln zwischen widerstreitenden Bedingungen, so ist es ein Schiff. Tragfähigkeit, Widerstand, Stabilität, Baukosten und viele andere Sonderbedingungen kämpfen um den Vorrang, und die in gerechtem Abwägen festgelegte Schiffsform muß vor allem hinreichende Festigkeit haben. Flußschiffe, die überall gleichmäßig auf dem Wasser ruhen, stellen an die Festigkeit die geringsten Anforderungen, vorausgesetzt, daß die Ladung einigermaßen gleichmäßig gestaut wird. Ein Seeschiff aber kann im bewegten Wasser sehr ungünstig beansprucht werden, wie ein Blick auf die Figur 151 erkennen läßt. Es gleicht dann etwa einer Brücke, und außer den seitlich anprallenden Wogen wird es vor allem dem Verbiegen in der Längsrichtung zu widerstehen haben. Seetüchtige Holzschiffe, deren schwacher Punkt der unvollkommene Längsverband war, mußten deshalb immer verhältnismäßig kurz gehalten werden, und das Verhältnis von Länge zu Breite bewegte sich gewöhnlich zwischen 3 und 4, kleinere Klipperschiffe gingen bis 7. Die anderen Propellerschiffe, die zur Verringerung des Widerstandes auf ein immer größeres Längenverhältnis drängten, sind deshalb und auch wegen ihrer absoluten Größe nur durch den Eisenbau möglich geworden, der aber auch die neuen großen Segler in früher unbekanntem Verhältnissen auszuführen erlaubte. Die „Potosi“ von fast 9000 t Displacement wurde beispielweise achtmal so lang wie breit gebaut. Unsere üblichen Zigarrenformen haben, wie zum anschaulichen Vergleiche erwähnt sein mag, Längenverhältnisse zwischen 7 und 9. Die Popowkas (genannt nach ihrem Schöpfer, dem russischen Admirale) waren, in gewaltsamer Mißachtung aller Theorie und Erfahrung, ganz oder nahezu kreisrund, hatten also ein Längenverhältnis — wenn man hier noch von einem solchen sprechen will — von 1. Dagegen sind französische Flußdampfer bis zu 20 gegangen. Im Mittel zeigen eiserne Segler jetzt Längenverhältnisse zwischen 5 und 7. Jachten gehen bis 2,5 herab, sind dann aber sehr tief oder sehr flach und in ihrer Eigenart nicht unmittelbar mit Lastschiffen zu vergleichen. Große Frachtdampfer sind in allmählicher Zunahme bis 9 gestiegen, während kleinere Schlepper bei ihrer geringen Geschwindigkeit sich mit 3—5 begnügen können.



S. 61

S-96



WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

5342

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000294806