

# Physikalische Schul- experimente

Begründet  
von Georg Sprockhoff

Hans-Joachim Wilke

# Historische Experimente

# Physikalische Schulexperimente

Begründet von Georg Sprockhoff

## Historische Experimente

Herausgegeben von Hans-Joachim Wilke  
1. Auflage

Volk und Wissen  
Volkseigener Verlag Berlin  
1988

Verfaßt von

Werner Bohne (2.8.\* , 2.19.\* , 2.20. bis 2.23.), Josef Fischer (2.2.\* , 2.19.\*), Dr. Rolf Grabow (2.1.\* , 2.5.\* , 2.7.\* , 2.11.\*), Dr. Hans-Dieter Kolwig (2.1.\* , 2.5.\* , 2.7.\* , 2.11.\* bis 2.15.\*), Wolfgang Krug (2.3., 2.4., 2.6., 2.9., 2.24., 2.25.), Dr. Josef Peter (2.10.\* , 2.16. bis 2.18.), Dr. Reiner Ramlau (2.10.\* , 2.13.\* bis 2.15.\*), Prof. Dr. sc. Hans-Joachim Wilke (Vorwort, Kapitel 2, 2.2.\* , 2.8.\* , 2.11.\* , 2.12.\* , 2.15.\* , 2.19.\*)

Komplexe mit einem Stern (\*) wurden von mehreren Autoren verfaßt.

Redaktion: Willi Wörstenfeld

ISBN 3-06-022173-1

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1988

1. Auflage

Lizenz-Nr. 203/1000/88 (E 022173-1)

LSV 0645

Zeichnungen: Heinrich Linkwitz

Einband: Herbert Lemme

Typografie: Atelier vvv

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 5820 Bad Langensalza

Schrift: 9/10 Times, Monophoto

Redaktionsschluß: 21. 10. 1986

Bestell-Nr. 709 265 I

01240





# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>9</b>
<b>1. Notwendigkeit und Möglichkeiten des Einsatzes historisch bedeutsamer Experimente in der physikalischen Ausbildung</b>	<b>13</b>
1.1. Vorzüge des Einsatzes historischer Experimente in der physikalischen Ausbildung	14
1.2. Möglichkeiten des Einsatzes historischer Experimente im Physikunterricht	16
<b>2. Historisch bedeutsame Experimente und Möglichkeiten ihrer Nachgestaltung im Physikunterricht</b>	<b>21</b>
2.1. Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	21
2.1.1. Historisch bedeutsames Experiment Galileis zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung auf der geneigten Ebene	23
2.1.2. Schulexperiment zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung auf der geneigten Ebene	25
2.1.3. Historisches Experiment Huygens' zum freien Fall	27
2.1.4. Schulexperiment zum freien Fall	28
2.2. Die Gravitationskonstante	30
2.2.1. Historisches Experiment Cavendishs zur Bestimmung der Gravitationskonstanten mit der Drehwaage	31
2.2.2. Modellexperiment zur Bestimmung der Gravitationskonstanten mit der Drehwaage	33
2.3. Auftrieb in Flüssigkeiten	35
2.3.1. Historisches Experiment zum Auftrieb	36
2.3.2. Schulexperiment zum Auftrieb	37
2.4. Bernoullische Gleichung	38
2.4.1. Historisches Experiment zur Bernoullischen Gleichung	39
2.4.2. Schulexperiment zur Bernoullischen Gleichung	40
2.5. Druck und Gewichtskraft der Luft	42
2.5.1. Historische Experimente aus der „Pneumatika“ von Philon und Heron	44

2.5.2.	Schulexperimente zu den Apparaten von Philon und Heron .	46
2.5.3.	Historische Experimente Torricellis zum Luftdruck	49
2.5.4.	Schulexperiment mit der Torricellischen Röhre . . . . .	50
2.5.5.	Historische Experimente Guerickes zur Erzeugung und zum Nachweis eines Vakuums	51
2.5.6.	Schulexperimente zur Erzeugung und zum Nachweis eines Vakuums .	53
2.5.7.	Historische Experimente zum Druck und zur Gewichtskraft der Luft .	54
2.5.8.	Schulexperimente zum Druck und zur Gewichtskraft der Luft . .	57
2.5.9.	Historische Experimente Guerickes zu den Wirkungen des Luftdrucks	59
2.5.10.	Schulexperimente zu den Wirkungen des Luftdrucks .	61
<b>2.6.</b>	<b>Gesetze des idealen Gases.</b>	<b>63</b>
2.6.1.	Historisches Experiment zum Boyleschen Gesetz	64
2.6.2.	Schulexperiment zum Boyleschen Gesetz . . .	66
2.6.3.	Historisches Experiment zum Gesetz von Gay-Lussac	69
2.6.4.	Schulexperiment zum Gesetz von Gay-Lussac .	70
<b>2.7.</b>	<b>Dampfmaschinen</b>	<b>72</b>
2.7.1.	Die Dampfpumpen von Savery und Papin	76
2.7.2.	Schulexperimente zu den Dampfpumpen von Savery und Papin	78
2.7.3.	Die atmosphärische Dampfmaschine von Newcomen	81
2.7.4.	Schulexperimente zur atmosphärischen Dampfmaschine von Newcomen	83
2.7.5.	Watts einfach wirkende Dampfmaschine . . . . .	86
2.7.6.	Schulexperiment zur einfach wirkenden Dampfmaschine	87
<b>2.8.</b>	<b>Das mechanische Wärmeäquivalent .</b>	<b>89</b>
2.8.1.	Historisches Experiment zum mechanischen Wärmeäquivalent	90
2.8.2.	Schulexperiment zum mechanischen Wärmeäquivalent	91
<b>2.9.</b>	<b>Kinetische Gastheorie</b>	<b>93</b>
2.9.1.	Historisches Experiment zur inneren Reibung von Gasen .	95
2.9.2.	Schulexperiment zur inneren Reibung von Gasen	97
2.9.3.	Historisches Experiment von Brown .	98
2.9.4.	Schulexperiment zur Brownschen Bewegung	100
<b>2.10.</b>	<b>Die elektrische Elementarladung .</b>	<b>101</b>
2.10.1.	Historisches Experiment zum Nachweis der elektrischen Elementarladung	101
2.10.2.	Schulexperiment zum Nachweis der elektrischen Elementarladung .	105
<b>2.11.</b>	<b>Statische Elektrizität .</b>	<b>106</b>
2.11.1.	Elektrisiermaschinen . . . . .	108
2.11.2.	Schulexperiment zur Elektrisiermaschine	110
2.11.3.	Leidener Flasche . . . . .	112
2.11.4.	Schulexperimente zur Leidener Flasche.	114
2.11.5.	Elektrophor . . . . .	116
2.11.6.	Schulexperiment zum Elektrophor . . . . .	117
2.11.7.	Historisches Experiment zum Coulombschen Gesetz .	118
2.11.8.	Schulexperiment zum Coulombschen Gesetz	120
<b>2.12.</b>	<b>Galvanische Spannungsquellen .</b>	<b>122</b>
2.12.1.	Historisches Experiment Voltas zur Berührungsspannung .	125
2.12.2.	Schulexperiment zur Berührungsspannung . . . . .	127
2.12.3.	Historische Experimente Voltas mit der Voltaschen Säule und dem Becherapparat .	128
2.12.4.	Schulexperimente zur Voltaschen Säule und zum Becherapparat .	130

<b>2.13. Ohmsches Gesetz</b>	131
2.13.1. Historisches Experiment zum Ohmschen Gesetz	132
2.13.2. Schulexperiment zum Ohmschen Gesetz	134
<b>2.14. Magnetische Wirkungen elektrischer Ströme</b>	137
2.14.1. Historisches Experiment Ørstedts zur Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel	139
2.14.2. Schulexperiment zur Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel	140
2.14.3. Historisches Experiment Ørstedts zur Wirkung eines Magneten auf eine Stromschleife	141
2.14.4. Schulexperiment zur Wirkung eines Magneten auf eine Stromschleife	142
2.14.5. Historisches Experiment Ampères zur Wirkung zweier elektrischer Ströme aufeinander	143
2.14.6. Schulexperimente zur Wirkung zweier elektrischer Ströme aufeinander	144
<b>2.15. Elektromagnetische Induktion</b>	146
2.15.1. Historisches Experiment Faradays zur elektromagnetischen Induktion	147
2.15.2. Schulexperiment zur elektromagnetischen Induktion	148
2.15.3. Historisches Experiment Faradays zur Erzeugung eines kontinuierlichen Stromes durch elektromagnetische Induktion	150
2.15.4. Schulexperiment zur Erzeugung eines kontinuierlichen Stromes durch elektromagnetische Induktion	151
2.15.5. Historisches Experiment Faradays zur Selbstinduktion	153
2.15.6. Schulexperiment zur Selbstinduktion	154
<b>2.16. Hertzsche Wellen — Drahtlose Telegrafie und Telefonie</b>	156
2.16.1. Historisches Experiment zum Senden und Empfangen Hertzscher Wellen	158
2.16.2. Schulexperiment zum Senden und Empfangen Hertzscher Wellen	160
2.16.3. Historische Experimente Popows und Marconis mit Funkempfängern	163
2.16.4. Schulexperiment zum Funkempfänger	164
2.16.5. Historisches Experiment zum Edison-Effekt	165
2.16.6. Schulexperiment zum Edison-Effekt	166
2.16.7. Historisches Experiment zum Braunschen Kristalldetektor	167
2.16.8. Schulexperiment zum Braunschen Kristalldetektor	169
2.16.9. Historische Experimente zur Verstärkung und Gleichrichtung von HF-Signalen mit einer Triode	170
2.16.10. Schulexperimente zur Verstärkung und Gleichrichtung von HF-Signalen mit einer Triode	171
2.16.11. Historisches Experiment zur Braunschen Röhre	173
2.16.12. Schulexperiment zur Braunschen Röhre	174
<b>2.17. Experiment von J. Franck und G. Hertz</b>	175
2.17.1. Historisches Elektronenstoßexperiment von Franck und Hertz	176
2.17.2. Schulexperiment zum Franck-Hertz-Experiment	178
<b>2.18. Der äußere lichtelektrische Effekt</b>	180
2.18.1. Historisches Experiment Hallwachs' zum lichtelektrischen Effekt	181
2.18.2. Schulexperiment zum lichtelektrischen Effekt nach Hallwachs	182
2.18.3. Historische Experimente Lenards zum lichtelektrischen Effekt	183
2.18.4. Schulexperimente zum lichtelektrischen Effekt nach Lenard	185
2.18.5. Historisches Experiment von Lenard zur Abhängigkeit des Fotostroms von der Beleuchtungsstärke	186
2.18.6. Schulexperiment zur Abhängigkeit des Fotostroms von der Beleuchtungsstärke nach Lenard	187

<b>2.19. Die Lichtgeschwindigkeit .</b>	<b>187</b>
2.19.1. Historisches Experiment Foucaults zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit dem Drehspiegel.	188
2.19.2. Schulexperiment zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit dem Drehspiegel	189
<b>2.20. Brechung des Lichtes .</b>	<b>191</b>
2.20.1. Historisches Experiment zur Zerlegung weißen Lichtes .	192
2.20.2. Schulexperiment zur Zerlegung weißen Lichtes	194
<b>2.21. Interferenz des Lichtes .</b>	<b>195</b>
2.21.1. Historisches Experiment zu den Newtonschen Ringen	197
2.21.2. Schulexperiment zu den Newtonschen Ringen .	198
2.21.3. Historisches Experiment zur Interferenz . . .	199
2.21.4. Schulexperiment zur Interferenz am Doppelspalt	200
2.21.5. Historisches Experiment Fresnels zur Interferenz mit dem Doppelspiegel	201
2.21.6. Schulexperiment zur Interferenz mit dem Fresnel-Spiegel . .	202
2.21.7. Historisches Experiment Fresnels zur Interferenz mit dem Biprisma	203
2.21.8. Schulexperiment zur Interferenz mit dem Fresnel-Biprisma	204
<b>2.22. Polarisation des Lichtes</b>	<b>205</b>
2.22.1. Historisches Experiment zur chromatischen Polarisation	206
2.22.2. Schulexperiment zur chromatischen Polarisation .	207
<b>2.23. Linienspektren</b>	<b>208</b>
2.23.1. Historisches Experiment zu den Fraunhoferschen Linien	209
2.23.2. Schulexperiment zu den Fraunhoferschen Linien . . .	210
2.23.3. Historisches Experiment zur Umkehr der Natriumlinien	211
2.23.4. Schulexperiment zur Umkehr der Natriumlinien .	212
<b>2.24. Radioaktivität .</b>	<b>213</b>
2.24.1. Historisches Experiment von Becquerel zur Radioaktivität	214
2.24.2. Schulexperiment zur Radioaktivität . . . . .	216
2.24.3. Historisches Experiment zur Ablenkung von Bestrahlung im Magnetfeld	217
2.24.4. Schulexperiment zur Ablenkung von Bestrahlung im Magnetfeld	218
<b>2.25. Nachweismethoden für Kernstrahlung .</b>	<b>219</b>
2.25.1. Historisches Experiment zum elektrostatischen Strahlungsnachweis	221
2.25.2. Schulexperiment zum elektrostatischen Strahlungsnachweis	222
2.25.3. Historisches Experiment zur Szintillationsmethode .	224
2.25.4. Schulexperiment zur Szintillationsmethode . . . . .	225
2.25.5. Historisches Experiment zur Wilsonschen Nebelkammer	225
2.25.6. Schulexperiment zur Nebelkammer	227
<b>Quellennachweis .</b>	<b>230</b>
<b>Register</b>	<b>236</b>

## Vorwort

Das vorliegende Buch wendet sich in erster Linie an Physiklehrer im weitesten Sinne und an Physiklehrerstudenten. Es will ihnen helfen, einen bisher noch wenig für den Unterricht erschlossenen Bereich, die Beschreibung, Durchführung und Wertung grundlegender historischer Experimente für die Gestaltung eines interessanten, wissenschaftlichen und praxisbezogenen Physikunterrichts zu nutzen. Damit kann gleichzeitig ein wesentlicher Beitrag zur Herausbildung eines wissenschaftlichen Weltbildes der Schüler und zur Stärkung ihres Geschichtsbewußtseins geleistet werden.

Das Buch wendet sich weiterhin an Schüler und Studenten, die an der Physik oder an der Geschichte der Naturwissenschaften Interesse zeigen. Es vermittelt ihnen in leicht überschaubarer Form einen unmittelbaren Einblick in die experimentelle Arbeit großer Physiker, in die dabei aufgetretenen Probleme und Schwierigkeiten, die beschrittenen Lösungswege, die gewonnenen Erkenntnisse und deren Auswirkungen auf die Entwicklung der Wissenschaft und Technik, das Leben und Denken der Menschen. Die Anleitungen zur Durchführung der Grundexperimente mit heutigen Mitteln regen zur Selbsterstellung einfacher historischer Experimentieranordnungen und zum Experimentieren an.

Schließlich will das Buch alle die Leser ansprechen, die sich für die Geschichte der Naturwissenschaften, insbesondere die Geschichte der Physik, interessieren. Ohne ein aufwendiges Quellenstudium betreiben zu müssen, finden sie in dem Buch Auszüge aus den wegweisenden Untersuchungen großer Physiker, das „gewußt wie“, den erzielten physikalischen und methodologischen Erkenntniszuwachs, dessen Einordnung in den Erkenntnisstand der betreffenden Zeit und dessen Auswirkungen auf die weitere Entwicklung. Mit diesem Teil der Geschichte der Physik und ihrer Erkenntnisverfahren kann gleichzeitig ein Teil Kulturgeschichte der Menschheit aufbereitet werden. Wichtigstes Kriterium für die Auswahl der beschriebenen Experimente ist deren historischer Stellenwert. Vielen Experimenten kommt in der geschichtlichen Entwicklung der Physik eine große Bedeutung zu. Es fällt jedoch auf, daß einige Experimente aus der Fülle der übrigen deutlich herausragen. Diese Grundexperimente zeichnen sich gegenüber anderen dadurch aus, daß sie

- völlig neue Bereiche in der geschichtlichen Entwicklung der Physik eröffneten; als Beispiele hierfür seien die Entdeckung des Elektromagnetismus, der Hertzschen Wellen und der natürlichen Radioaktivität genannt,
- auf herangereifte prinzipielle Fragestellungen eine entscheidende Antwort gaben, wie z. B. die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien und die Untersuchungen zum Luftdruck,

- zu allgemeinen Gesetzen führen; als Beispiele seien das Coulombsche Gesetz und der Energieerhaltungssatz angeführt.

Wegen der großen praktischen Bedeutung wurden dabei auch einige Experimente, wie die, die im Zusammenhang mit der Entwicklung der Dampfmaschine stehen, aufgenommen.

Von diesen grundlegenden Experimenten sind im vorliegenden Buch nur solche dargestellt, die einen engen Bezug zur Schulphysik haben. Diese Einschränkung resultiert nicht nur aus der eingangs charakterisierten Zielstellung; sie folgt auch aus dem Anliegen, die Experimente mit vertretbaren Mitteln im historischen Gewande nachzuvollziehen. Wegen des großen apparativen Aufwandes und anderer Schwierigkeiten scheiden einige Experimente für einen Einsatz im Unterricht aus. Zu diesen Experimenten zählen auch einige wenige, die zwar einen deutlichen Bezug zur Schulphysik haben, deren Durchführung aber Probleme mit sich bringt.

Zusätzlich wurden einige wenige attraktive Experimente, so z. B. zum Weinautomat von Heron, die in engem Zusammenhang mit Grundexperimenten stehen, aufgenommen.

Das Buch ist in zwei Kapitel gegliedert. Im ersten Kapitel werden methodische Hinweise für die Einbeziehung historischer Experimente in den Physikunterricht gegeben. Das erfolgt ausgehend von den Potenzen dieser Experimente für den Unterricht und den Zielstellungen des Physikunterrichts und gipfelt in der Darstellung von Einsatzformen und -hinweisen.

Im zweiten Kapitel des Buches werden in 25 Komplexen grundlegende Experimente aus der Geschichte der Physik beschrieben, die in engem Zusammenhang mit der Schulphysik stehen und die mit vertretbaren Mitteln in ihrer historischen Form im Unterricht nachvollzogen werden können. In jedem Komplex erfolgt zunächst eine Einordnung der bedeutsamen Experimente in den historischen Prozeß der Erkenntnisgewinnung. Danach werden diese Experimente in ihrer historischen Form beschrieben, und nachfolgend wird eine Anleitung zu ihrem weitgehend originalgetreuen Nachvollzug gegeben.

Jeder Komplex ist mit zwei Zahlen gekennzeichnet, z. B. 2.5., 2.12. oder 2.24. Dort wird der zur damaligen Zeit erzielte Erkenntnisstand charakterisiert. Es werden die den Physikern bekannten Vorleistungen angegeben, die offenen Fragen und Probleme und die durch die betreffenden Experimente erzielten Erkenntnisfortschritte aufgezeigt. Es erfolgt eine Würdigung der Leistungen der Physiker, die die Experimente durchgeführt haben, eine Charakterisierung des erzielten Erkenntnisfortschrittes und dessen Bedeutung für die Entwicklung der Wissenschaft, des Weltbildes der Menschen, der Weiterentwicklung der Technik und der Gesellschaft.

Diese Auswahl der wichtigsten Grundexperimente, die historische Einordnung der wissenschaftlichen Leistungen und die Charakterisierung der Auswirkungen auf die Weiterentwicklung des wissenschaftlichen Weltbildes und des technischen sowie gesamtgesellschaftlichen Fortschrittes enthalten wesentliche Informationen für eine weitere Verbesserung des Physikunterrichts.

In jedem Komplex von Experimenten werden unter Überschriften, die mit drei Zahlen gekennzeichnet sind, wobei die dritte Zahl stets eine ungerade Zahl ist, wie z. B. 2.5.1. oder 2.12.3., die historischen Grundexperimente beschrieben. Dabei wird jeweils — soweit wie möglich — eine eigene Darstellung des jeweiligen Physikers wiedergegeben, sowohl in Worten als auch im Bild. Durch diese gestraffte Aufbereitung der wichtigsten Quellen wird dem Leser ein unmittelbarer Einblick in das Denken und Handeln, in die eingesetzten Mittel und Methoden, sowie in die erreichten Ergebnisse und die

dabei erzielte Meßgenauigkeit gegeben. Die Texte und Abbildungen sind in ihrer Auswahl und knappen Darstellung für den unmittelbaren Einsatz im Unterricht geeignet. Diese zielgerichtet ausgewählten Originalangaben können einen Beitrag zur Authentizität des Unterrichts leisten.

Unter der mit drei Zahlen gekennzeichneten Überschrift, wobei die dritte Zahl stets eine gerade Zahl ist, wie z. B. 2.5.2. oder 2.12.4., werden Schalexperimente beschrieben, die sich in der Wahl der Mittel und Methoden, der Art der Durchführung und der Auswertung eng an die historischen Experimente anlehnen. Sie stellen historische Experimente, nachvollzogen mit möglichst ähnlichen Mitteln, dar. Einige der hierfür erforderlichen Geräte sind in jeder Schulsammlung vorhanden, so daß auf diese zurückgegriffen werden kann. In anderen Fällen ist die Beschaffung der erforderlichen Geräte und Materialien mit vertretbaren Mitteln möglich. Schließlich wird die Selbstherstellung einiger einfacher Anordnungen empfohlen, die besonders in der außerunterrichtlichen Tätigkeit möglich ist und zu Anordnungen führt, die weitestgehend den Originalapparaturen entsprechen. Auf diese Weise ist ein unmittelbarer Bezug zu den beschriebenen historischen Originalapparaturen und Experimenten gegeben.

Die Anleitung zu jedem Schalexperiment besteht aus einer Zusammenstellung der empfohlenen Geräte sowie Hinweisen zur Vorbereitung, zur Durchführung und zur Auswertung der Experimente. In einigen Fällen geben „Methodische Hinweise“ Orientierungen für den Einsatz im Unterricht, und „Bemerkungen“ enthalten Empfehlungen für eine sichere experimentelle Durchführung, Erläuterungen zu bestimmten Details und Hinweise auf Variationsmöglichkeiten.

Die Empfehlungen zum Nachvollzug der historischen Experimente mit schulischen Mitteln — eng auf die Originaldarstellungen bezogen — ermöglichen eine besonders überzeugende Form der historischen Bezüge im Physikunterricht.

Die gerätetechnischen Angaben zu den Schalexperimenten erfolgen so präzise wie möglich. Damit ist einerseits eine enge Anlehnung an das historische Vorbild, andererseits die Erfolgssicherheit garantiert. Dennoch sind alle angegebenen Daten nur als Richtwerte zu verstehen. Geringfügige Abweichungen stellen den Erfolg nicht in Frage. Angegebene Meßdaten in den Beispielen sollen einen Einblick in die Größenordnung der zu erwartenden Werte, die zu erzielende Meßgenauigkeit und die auftretenden Abweichungen geben. Sie stellen reale, bei Beachtung der Anleitung und der gegebenen Hinweise leicht realisierbare Ergebnisse dar.

Immer dann, wenn Geräte, die von den Wissenschaftlern bei den historischen Experimenten benutzt wurden, heute in fertiger Form nicht beschaffbar sind, erfolgt der Hinweis auf eine Selbstherstellung, wenn diese leicht zu bewältigen ist. Ist dagegen die Ähnlichkeit der beschaffbaren Geräte mit den historischen ausreichend groß, so wird keine Selbstherstellung angeraten. Das trifft z. B. für Monozellen und Flachbatterien anstelle von galvanischen Elementen historischer Bauart zu.

Anschließend seien folgende Hinweise gegeben, die die Arbeit mit dem Buch erleichtern sollen:

- Jede Beschreibung eines Schalexperiments beginnt mit einer Stückliste der verwendeten Geräte. Dabei sind Hilfsmittel, die zur experimentellen Grundausstattung gehören und in verschiedenen Formen Einsatz finden können, wie Stativmaterial und Verbindungskabel, nicht mit aufgeführt.
- Sind als Spannungsquellen Stromversorgungsgeräte vorgesehen, so erfolgt in der Regel die Angabe der Höchstspannungen. Aussagen über die Stromstärken werden nur bei stärkeren Belastungen gegeben.
- Die Beschreibungen der experimentellen Anordnungen sind in der Regel so angelegt, daß sie mit Demonstrationsgeräten verschiedenster Ausführungen durchgeführt

werden können. Auf bestimmte Geräte zugeschnittene Aussagen können leicht auch auf ähnliche andere Geräte übertragen werden. Die jeweiligen Daten und Betriebsvorschriften sollten dann den Bedienanleitungen entnommen werden.

- Das hinter einem Gerät stehende Zeichen © bedeutet, daß eine Selbsterstellung des Gerätes empfohlen wird. Hierbei ist sowohl eine Einbeziehung von Schülern als auch von Handwerkern möglich. Je nach den Zugriffsbedingungen und den Bearbeitungsmöglichkeiten für die erforderlichen Materialien sind auch größere Abweichungen von den Anleitungen möglich. Unter Berücksichtigung der im jeweiligen historischen Experiment beschriebenen Anordnungen sind ggf. noch größere Annäherungen an die Originale möglich, als das in den Selbstbauhinweisen gegeben ist.
- Bei Hinweisen auf bestimmte Experimente wird die Nummer des Experiments angeführt, z. B. 2.7.4. Der Hinweis auf andere Experimentierkomplexe erfolgt durch einen schrägen Pfeil vor der Nummer des Komplexes, z. B. ↗ 2.24. Auf „Bemerkungen“ bei anderen Experimenten verweist das Zeichen Bem., z. B. vgl. Bem. 1 bei 2.6.2.
- Bei einigen Experimenten weisen Marken in der Überschrift auf besondere Gefahrenquellen hin. Genannt seien: Hochspannung, giftige Dämpfe und radioaktive Strahlung. Hierbei muß besonders sorgfältig auf die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen geachtet werden.



# **1. Notwendigkeit und Möglichkeiten des Einsatzes historisch bedeutsamer Experimente in der physikalischen Ausbildung**

Die Physik hat in ihrer historischen Entwicklung in einem gar nicht hoch genug einzuschätzendem Maße das Leben und das Denken der Menschen beeinflusst. Im Altertum war es vor allem die Erfindung einfacher Maschinen, die u. a. den Bau lebenswichtiger Bewässerungsanlagen ermöglichte oder zur Errichtung gewaltiger, heute noch bewunderter Bauwerke führte. Viele dieser Maschinen bestimmten auch im Mittelalter die Produktionsweise.

Erst die Erfindung und Vervollkommnung der Dampfmaschine in der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts revolutionierte große Teile der Produktion und des Verkehrswesens. Mit der Entdeckung der elektromagnetischen Induktion begann im 19. Jahrhundert der Siegeszug der Elektrizität, der über die Produktion hinaus das tägliche Leben der Menschen stark beeinflusste. Die Nutzung der Ende des 19. Jahrhunderts entdeckten Hertzschen Wellen in Form des Rundfunks und des Fernsehens hatte neben starken Wirkungen auf die Wissenschaft und Technik erhebliche Veränderungen in den sozialen Beziehungen zwischen den Menschen zur Folge.

Im 20. Jahrhundert sind es quantenphysikalische Prozesse im Bereich des Atomkerns (Kernumwandlungen und die dabei freiwerdende Energie) und der Hülle (Laser) sowie die durch die Mikroelektronik erschlossenen Möglichkeiten, die zunehmenden Einfluß auf das Leben der Menschen gewinnen. Das betrifft nicht nur die friedliche Nutzung der physikalischen Erkenntnisse, sondern auch die drohende Gefahr eines Kernwaffenkrieges.

Wissenschaftliche Forschungsergebnisse wurden schon immer für militärische Zwecke mißbraucht, so daß sie auf diese menschenunwürdige Weise einen starken Einfluß auf das Leben der Menschen ausübten. Mit der Erhöhung der Wirksamkeit der Waffen werden dabei immer mehr Menschen in Mitleidenschaft gezogen. Es liegt im Wesen der Kernwaffen begründet, daß ihre Produktion und Lagerung das Leben aller Menschen auf der Erde bedroht.

Die immer stärkere Konfrontation aller Menschen mit den Errungenschaften der Physik in Alltag und Beruf beeinflusste darüber hinaus auch ihr Denken. Grundlegende Entdeckungen formten in wesentlichem Maße das Weltbild der Menschen. Einige der gewonnenen Erkenntnisse sind von hoher philosophischer Bedeutung. Schließlich bildeten sich mit der Entwicklung der Physik auch bestimmte Erkenntnismethoden heraus. Sie beeinflussten immer mehr auch über die Physik hinaus die wissenschaftliche Arbeit.

Fast alle diese gravierenden Veränderungen resultieren aus einer relativ geringen Anzahl physikalischer Experimente, den historischen Grundexperimenten, oder sie stehen in engem Bezug zu diesen. Letztlich lassen sich die Fortschritte in der

Technik, in der Arbeit und in der Freizeit — die den Einfluß der Physik betreffen — auf diese historischen Grundexperimente zurückführen. Darüber hinaus stellen ihre Ergebnisse wesentliche Pfeiler des wissenschaftlichen Weltbildes dar. Es liegt deshalb nahe, den historischen Grundexperimenten der Physik auch beim Lernen und Studieren die ihnen gebührende Aufmerksamkeit zu schenken.

### 1.1. Vorzüge des Einsatzes historischer Experimente in der physikalischen Ausbildung

Trotz dieser großen Bedeutung der historischen Grundexperimente ist das historisch-entwickelnde Vorgehen in Physikunterricht und -vorlesung oft nur eine seltene Ausnahme, obwohl bei der Vermittlung einzelner anderer Wissenschaften damit große Erfolge erzielt werden. Immer wieder haben große Wissenschaftler auf diese noch nicht ausreichend erschlossenen Potenzen hingewiesen. So formulierte P. Langewin: „Nichts fördert so die allgemeine Entwicklung und die Herausbildung des kindlichen Bewußtseins wie die Bekanntschaft mit der Geschichte der menschlichen Bemühungen auf dem Gebiet der Wissenschaft, die sich in den Lebensbeschreibungen großer Gelehrter der Vergangenheit und in der allmählichen Evolution von Ideen widerspiegelt.“ F. Poske betonte bereits vor fast 100 Jahren, daß es im naturwissenschaftlichen Unterricht in erster Linie darauf ankommt, „den Schüler die geistigen Prozesse, durch die die Menschheit zu ihrer gegenwärtigen Erkenntnis gelangt ist, im Anschluß an die Geistesarbeiten großer Forscher nacherlebend von neuem vollziehen zu lassen“.

Der Einsatz historischer Experimente potenziert die Wirkungen dieses Vorgehens. Die Gründe hierfür sind einerseits im physikalischen Experiment an sich, andererseits in den Besonderheiten der grundlegenden historischen Experimente zu suchen.

Das physikalische Experiment ist für den Physikunterricht und das Studium der Physik von großer Bedeutung. Aus erkenntnistheoretischer Sicht ist es eine spezifische Methode der Erkenntnisgewinnung bzw. Bestandteil komplexerer Methoden. Dabei kann es sowohl Quelle der Erkenntnis als auch Kriterium der Wahrheit sein. Darüber hinaus ist es ein hervorragendes Mittel der Überführung gewonnener Erkenntnisse in die Praxis und damit der bewußten Umgestaltung von Natur und Technik. Die große didaktisch-methodische Bedeutung des Experiments kommt darin zum Ausdruck, daß es in allen didaktischen Phasen des Unterrichts Einsatz finden kann. Neben dem methodischen Aufbereiten des Erkenntnisprozesses dient es vor allem der Aktivierung der Schüler, der Schaffung von Bewährungssituationen, der didaktischen Vereinfachung und der Veranschaulichung. Schließlich leistet das Experiment einen wesentlichen Beitrag zur Persönlichkeitsentwicklung. Die Schüler erwerben Sach- und Methodenwissen, Können, Fähigkeiten und Gewohnheiten, und es wird ein Beitrag zur Herausbildung von Einsichten und Überzeugungen geleistet. Das Experiment kann für die Schüler zu einem echten Erlebnis werden.

Alle diese Vorzüge besitzt auch das historische Experiment. Darüber hinaus zeichnet es sich durch einige Besonderheiten aus, aus denen weitere methodische Vorteile erwachsen.

Von besonderer Bedeutung ist die Einfachheit und Übersichtlichkeit der historischen Anordnungen. Wesentliche Gründe hierfür waren oftmals die notwendige materielle Beschränkung, aber auch die bewußte Orientierung auf das Wesentliche, um alle störenden Einflüsse soweit wie irgend möglich auszuschalten. Das war damals, als man

von den Einflüssen noch nichts oder nur wenig wußte, um so mehr erforderlich. Durch die einfachen Anordnungen kommt das Wesen der zu demonstrierenden physikalischen Sachverhalte oft entschieden besser zum Ausdruck als bei Experimenten mit modernen Geräten. Bereits vor 120 Jahren formulierte der französische Chemiker J. B. Dumas: „In den heutigen Apparaten erscheint der erste Gedanke des Erfinders sehr oft in einer Form, die ihn seiner ursprünglichen Einfachheit beraubt. Was kann es aber Einfacheres geben als die Mittel, mit denen Volta, Dalton, Gay-Lussac, Arago, Malus und Fresnel die moderne Naturwissenschaft begründet haben?“ Diese Worte sind heute infolge der stürmischen Entwicklung des wissenschaftlichen Gerätebaus und der Meßtechnik, insbesondere der Elektronik, teilweise in noch stärkerem Maße gültig.

Infolge der Einfachheit der Anordnungen, aber auch der Notwendigkeit der Beschaffung oder Herstellung von Teilen ist eine Einbeziehung von Schülern in die experimentelle Arbeit möglich. So können einzelne Schüler dadurch ein besonders enges Verhältnis zu den historischen Experimenten erwerben, daß man sie bereits langfristig in die Vorbereitung der Experimente einbezieht. Interessierte Schüler können mit der Herstellung einfacher Geräte beauftragt oder in sie einbezogen werden. Weiterhin ist ihre Hilfe beim Aufbau der experimentellen Anordnung, bei ihrer Erprobung und im unterrichtlichen Einsatz möglich. Die Wirkung, die ein derartiges Vorgehen auf die Persönlichkeitsentwicklung hat, kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden. Der Nobelpreisträger P. Kapica brachte das in folgenden Worten zum Ausdruck: „Ein Schüler versteht ein physikalisches Experiment erst dann richtig, wenn er es selbst durchführen kann. Aber noch besser versteht er es, wenn er die Apparatur dafür selbst herstellt. Daher ist es immer zu begrüßen, wenn Schüler zum Anfertigen von Geräten herangezogen werden.“

Darüber hinaus sind die historischen Experimente durch das zusätzliche Moment des Besonderen ausgezeichnet. Den Schülern begegnen hier andere „Apparate“, als sie in der Regel im Physikunterricht üblich sind, und Denk- und Vorgehensweisen, die heute weniger gebräuchlich sind. Weiterhin sind es die Originalität und die Authentizität der Anordnungen, die den Experimenten eine besondere Wirkung verleihen. Genau eine solche Anordnung hat der Forscher benutzt, genau so ist er vorgegangen, genau zu denselben Ergebnissen ist er gelangt, er hatte genau dieselben Schwierigkeiten zu überwinden, als er dieses Experiment erstmals durchführte.

Der bewußte Nachvollzug des historischen Erkenntnisganges ermöglicht es, die Schüler in die Rolle des Forschers zu versetzen. Seine Aufgabe besteht im „Nachentdecken“. Das Nachvollziehen der historischen Erkenntnisfindung kann einen wesentlichen Beitrag zur Weckung des Erkenntnisinteresses und des natürlichen Forscherdranges der Schüler leisten. Durch geeignete historische Vorbetrachtungen ist es möglich, das Interesse der Schüler so zu beeinflussen, daß sie nicht nur begründete Prognosen über die erwarteten Prozeßabläufe und die Ergebnisse formulieren, sondern sich auch voll mit ihren Aussagen identifizieren und mit großer Spannung ihrer Verifikation entgegensehen. Es ist möglich, daß Schüler, die ursprünglich mehr historisch interessiert sind, bei einer Begegnung mit Historischem im Physikunterricht mehr Freude am Physikunterricht bekommen und dadurch zu besseren Leistungen gelangen.

Ein weiterer Vorzug der Nutzung historischer Experimente besteht in der damit gleichzeitig realisierbaren Vorbildwirkung der großen Physiker. Die Experimente und ihre Darstellung durch die Forscher lassen Einfallsreichtum, Schöpferium, Beharrlichkeit und große Begeisterung für die wissenschaftliche Arbeit erkennen.

Es kann sehr leicht deutlich gemacht werden, daß viele grundlegende Erkenntnisse mit erstaunlich einfachen Mitteln gemacht wurden (z. B. Rutherford) und daß viele Er-

kenntnisse nur mit großer Mühe gewonnen wurden. Einige heute berühmte Forscher, wie Ohm, Elster und Geitel, waren von Beruf Lehrer und haben sich in ihrer Freizeit der wissenschaftlichen Arbeit zugewandt.

Schließlich bedingt das Einbeziehen historischer Experimente im Verständnis und Wissen der Schüler eine engere Verknüpfung der Phänomene und Gesetze mit ihren Entdeckern. Die Namen und Persönlichkeiten der Forscher werden fester mit den von ihnen gefundenen Erkenntnissen verbunden. So erfolgt nicht nur schlechthin eine Verbindung etwa Becquerels mit der Radioaktivität, Faradays mit der Induktion, Galileis mit den Fallgesetzen, Newtons mit den Spektren und Mayers und Joules mit dem Gesetz von der Erhaltung der Energie, so wie das schon bei den Hertzschen Wellen oder dem Ohmschen Gesetz durch die Worte ausgedrückt ist; es werden auch wichtige Details von den Schülern bewußt wahrgenommen und verinnerlicht. Außerdem erfolgt eine bessere Einordnung der Entdeckung und der Entdecker in die gesellschaftliche Entwicklung.

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, daß die Beschreibung, Darstellung und Durchführung historischer Experimente infolge ihrer Vorzüge eine beträchtliche Erhöhung der Aktivität der Schüler ermöglichen kann. Der teilweise nachvollzogene historische Erkenntnisweg, die historische Einflechtung oder das Darstellen historischer Anordnungen in Bild und Originaltext stellen eine wirkungsvolle Ergänzung der herkömmlichen Strukturelemente des Physikunterrichts dar.

## 1.2. Möglichkeiten des Einsatzes historischer Experimente im Physikunterricht

Die folgenden Hinweise sind für den Einsatz der historischen Experimente für den obligatorischen und für den fakultativen Physikunterricht in der zehnklassigen allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule und der Erweiterten Oberschule gedacht. Sie sind damit auf die Schule in ihren verschiedenen Organisationsformen zugeschnitten. Eine Übertragung ist in angemessenem Maße auch auf die hochschulgemäße Ausbildung möglich. Der Einsatz der historischen Experimente kann sowohl in verschiedenen Formen als auch in den unterschiedlichen didaktischen Phasen des Unterrichts erfolgen. Im einfachsten Falle tritt das Experiment an die Stelle eines herkömmlichen Schulexperiments. Infolge der einfachen Anordnung, der Beschränkung der Mittel, der übersichtlichen Anordnung und der Konzentration auf das Wesentliche steht es dem herkömmlichen Schulexperiment in keiner Weise nach, sondern besitzt in der Regel außer den genannten Vorzügen noch eine Reihe vorteilhafter Besonderheiten.

Um die beabsichtigte Wirkung und die dem Experiment innewohnenden Potenzen in möglichst starkem Maße zum Tragen zu bringen, darf keine einseitige Beschränkung auf die Darstellung der im 2. Kapitel beschriebenen *Schulexperimente* erfolgen, d. h. auf die Nachgestaltung der historischen Experimente mit schulischen Mitteln. Diese *Schulexperimente* müssen immer im Zusammenhang mit den einführenden Bemerkungen zum jeweiligen Experimentierkomplex, vor allem aber den Beschreibungen und Abbildungen zu den *historischen Experimenten*, gesehen werden. Die vorgenommenen Beschreibungen zum *Schulexperiment* beschränken sich weitgehend auf den laborpraktischen Aspekt. Sie sind erforderlich, um das jeweilige Experiment funktionstüchtig aufbauen und durchführen zu können. Die wesentlichen Informationen, die beim unterrichtlichen Einsatz über dieses Laborpraktisch-Physikalische hinausgehen, sind in den anderen Teilen des jeweiligen Experimentierkomplexes beschrieben.

Im Unterricht empfiehlt sich in jedem Falle eine entsprechende historische Ein-

ordnung des Experiments, wie sie eingangs in jedem Experimentierkomplex beschrieben ist. Bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Experiments sollten dann wichtige Informationen aus dem *historischen Experiment* in den Unterricht einfließen. Es liegt nahe, die Abbildungen aus den historischen Quellen zu zeigen, um den Schülern einen Eindruck von der Originalapparatur zu vermitteln. Weiterhin empfiehlt es sich, die Entdecker oder Erfinder selbst zu Wort kommen zu lassen, indem einige ihrer Formulierungen vorgetragen werden. Bei der Auswertung der Experimente kann neben dem unmittelbaren Ziel des Unterrichts — einer Auswertung entsprechend dem zu vermittelnden physikalischen und methodologischen Wissen — auch eine Darstellung der Gedanken und Schlußfolgerungen der Forscher erfolgen.

Besonderes Gewicht sollte auf die Veränderungen im Wissen, im Denken und im Weltbild der Menschen, in der Technik und Produktion und im Arbeiten und Leben der Menschen gelegt werden, die die jeweilige Erfindung oder Entdeckung nach sich zog. Hierzu werden Hinweise in den Einleitungen zu den Experimentierkomplexen gegeben.

Der Einsatz der historischen Experimente im Physikunterricht kann in allen didaktischen Phasen erfolgen. Dabei kommen in den verschiedenen didaktischen Funktionen unterschiedliche Vorzüge dieser Experimente zum Tragen. Im folgenden sollen Hinweise zum Einsatz gegeben und solche Vorzüge aufgezeigt werden.

In der Phase der *Sicherung des Ausgangsniveaus* kann — wenn auch nicht so häufig — das historische Experiment in seiner einfachen Form das Wissen der Schüler bereitstellen helfen. In der Regel wird es sich dabei um ein Wiederholen der bereits in vorangehenden Unterrichtsstunden durchgeführten Experimente handeln. Zur Erreichung dieses Ziels genügt es meist, die Experimente nur in qualitativer oder halbquantitativer Form einzusetzen, um bei den Schülern die erwünschten Assoziationen hervorzurufen. Die ablaufenden Vorgänge können dabei ggf. verkürzt werden. Im Extremfall ist es ausreichend, nur noch einmal die historische Anordnung, evtl. im Bild, zu zeigen, ergänzt durch die erzielten Ergebnisse in Form der Meßdaten, der mathematischen Auswertung oder auch nur des Lehrsatzes, Gesetzes o. ä.

In der Phase der *Zielorientierung*, die in der Regel am Anfang des angestrebten Aneignungsprozesses liegt, kann durch den Einsatz eines historisch bedeutsamen Experiments eine starke Motivierung der Schüler erfolgen. Diese kann darin bestehen, daß sie den Schülern authentisch und überzeugend den zu einem bestimmten Zeitpunkt erreichten Erkenntnisstand verdeutlicht. So läßt die Demonstration der Experimente von Ørsted oder Ampère über den Elektromagnetismus die von diesen Forschern erkannten Zusammenhänge deutlich werden. Daran kann sich z. B. die Frage nach einer möglichen Verstärkung der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes anschließen, der Abhängigkeit der Stärke des Magnetfeldes einer Spule von den gewählten Parametern, der Möglichkeit der Nutzung der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes zur Konstruktion eines Elektromotors oder der Umkehrung des Ørstedexperiments im Sinne der elektromagnetischen Induktion.

Experimente zur Bernoullischen Gleichung, zum Auftrieb in Flüssigkeiten sowie zum Luftdruck können Fragen der Nutzung dieser Erscheinungen nach sich ziehen. Das Erkennen des Gesetzes von der Erhaltung der Energie in Form des mechanischen Wärmeäquivalents kann zur Auslösung von Diskussionen über die Konsequenzen bei der Konstruktion und Nutzung von Kraftmaschinen verschiedenster Art Anlaß geben. Ausgehend von den Experimenten Voltas und Heinrich Hertz' können Betrachtungen zu den verschiedenen Formen technischer Nutzung initiiert werden. Bedeutsam sind auch die Nutzungsmöglichkeiten der Linienspektren, deren Demonstration zu derartigen Fragen Anlaß sein kann.

Historische Experimente können auch zur Demonstration eines zu behandelnden Phänomens im Sinne eines Überraschungsexperiments an den Anfang der Erarbeitung gestellt werden. So kann ein Experiment Ørstedes oder Ampères zu Beginn der Behandlung des Elektromagnetismus zur Demonstration des Magnetfeldes eines stromdurchflossenen Leiters Einsatz finden, eine Anordnung Faradays zur Einführung der elektromagnetischen Induktion. Überraschend sind auch der von Bernoulli an strömenden Flüssigkeiten gefundene Zusammenhang der Drücke, die Frequenzabhängigkeit der Energie der Fotoelektronen beim lichtelektrischen Effekt und ihre Unabhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, die chromatische Polarisierung und das Auftreten Fraunhofer'scher Linien.

Nicht immer liegt die Deutung der Effekte sofort nahe, so daß mit einer solchen Einführung durch ein historisches Experiment in einen neuen Stoffabschnitt eine ggf. länger wirkende Problemsituation geschaffen wird. Die Lösung des Problems setzt dann ein umfangreiches Erarbeiten, oft ausgehend von einem Lösungsansatz im Sinne einer Hypothese oder Prognose, voraus.

In der Phase der *Arbeit am neuen Stoff* kann mittels des historischen Experiments eine systematische Untersuchung des Objekts, der Erscheinung oder des Vorganges erfolgen. Dabei liegt dieselbe Vorgehensweise wie beim Einsatz herkömmlicher Experimentiergeräte und Experimente nahe. Wenn der historische Weg einen weitgehend geradlinigen Erkenntnisgang darstellt und wenn er unseren Denkgewohnheiten entspricht, dann besitzt dieses historische Vorgehen im Sinne der Authentizität große Vorzüge. Die emotionale Wirkung dieses Nachvollziehens, des gedanklichen Hineinversetzens in den Forscher ist ein nicht zu unterschätzendes Moment der Aktivierung. Das Vortragen von historischen Texten, insbesondere die Schilderung der experimentellen Arbeit durch die Forscher, macht sowohl die Positionen, die Denkansätze als auch die Schwierigkeiten deutlich. Dabei kann gerade die andersartige Denkweise ein zusätzliches Moment des Interesses weckens sein.

Eine besonders große Bedeutung kommt den historischen Experimenten in der Phase der *Wiederholung* zu. Das wiederholte Aufgreifen eines Experiments ist eine wesentliche Voraussetzung für die dauerhafte Aneignung wichtiger Erkenntnisse. Dabei ist es sowohl möglich, wiederholt Gleiches zu demonstrieren als auch bewußt Andersartiges. Die Nutzung historischer Experimente im Unterricht ermöglicht es, sowohl das wichtige Gleiche den Schülern in einer anderen Gestalt nahezubringen, als auch Andersartiges.

In der Phase der *Systematisierung* kommt dem Vergleichen mehrerer gleichartiger oder verschiedenartiger Experimente eine besondere Bedeutung zu. Das Vergleichen wird dadurch begünstigt, daß man mehrere Experimente gleichzeitig zusammenstellt und gleichzeitig oder kurzzeitig nacheinander durchführt. In der Gegenüberstellung kommt auch den historischen Experimenten aus mehrerer Sicht eine große Bedeutung zu.

So ist beispielsweise eine Systematisierung mit Einbeziehung historischer Experimente oder ausnahmsloser Beschränkung auf historische Experimente möglich. Damit kann eine Systematisierung aus historischer Sicht erfolgen. So kann die schrittweise Umsetzung von Erkenntnissen bei der historischen Entwicklung der Wärmekraftmaschinen gezeigt werden, die unmittelbar aufeinanderfolgende Gewinnung von Kenntnissen über die magnetischen Wirkungen stromdurchflossener Leiter durch Ørsted und Ampère und die elektromagnetische Induktion durch Faraday. Weiterhin ist die etappenweise Gewinnung von Erkenntnissen über die Wellen- und Teilcheneigenschaften von Licht gut mittels Experimenten nachzugestalten.

Mit einer derartigen Systematisierung wird nicht nur dem historischen Aspekt Rechnung getragen; es erfolgt gleichzeitig eine Systematisierung aus physikalischer Sicht. Ein

wesentlicher Schwerpunkt liegt dabei bereits in der Auswahl der demonstrierten Experimente. Die Beschränkung auf die historischen Grundexperimente stellt gleichzeitig eine Konzentration auf das Wesentliche dar.

Schließlich kann auch ein gemeinsamer Einsatz von herkömmlichen Schulexperimenten und historischen Experimenten in der Phase der Systematisierung erfolgen. Dabei können die historischen Experimente den Schülern bereits bekannt sein, sie können aber auch als Variante der bisher eingesetzten herkömmlichen Experimente den Schülern erstmals begegnen. In diesen Fällen muß über die physikalische Systematisierung hinaus eine entsprechende historische Einordnung und Wertung erfolgen. Dadurch wird nicht nur eine wertvolle Ergänzung der Systematisierung aus historischer Sicht vollzogen; es werden außerdem zusätzliche interesseweckende Momente in die Systematisierung eingebracht. So ist es möglich und sinnvoll, historische Experimente zu den verschiedenen Erscheinungsformen der elektromagnetischen Induktion, zum Luftdruck und zu seinen Wirkungen, zu den magnetischen Wirkungen stromdurchflossener Leiter, zu den Arten der Spektren oder zu den Nachweismethoden für Kernstrahlung gleichzeitig oder aufeinanderfolgend durchzuführen, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauszuarbeiten. Der Vorzug der Systematisierung unter Nutzung historischer Experimente besteht damit in der anschaulichen Gegenüberstellung wesentlicher Objekte, Phänomene und Prozesse mit zusätzlicher Aufwertung historischer Aspekte.

In der Phase der *Anwendung* der gewonnenen Kenntnisse und Erkenntnisse besitzen die historischen Experimente den Vorzug, daß sie auf erste, in historischer Sicht bedeutsame Anwendungen orientieren. Damit wird neben den prinzipiellen Anwendungsmöglichkeiten zusätzlich dem historischen Aspekt Rechnung getragen, und es werden solche Anwendungen in den Blickpunkt der Betrachtungen gerückt, die große technische Veränderungen einleiteten und das Leben der Menschen maßgeblich beeinflussten. Die einfachen Anordnungen führen infolge ihrer Einprägsamkeit zu einem festen praxisbezogenen Wissen der Schüler.

Als Beispiele seien besonders die Wärmekraftmaschinen, die galvanischen Spannungsquellen, die Leidener Flaschen, die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes, die elektromagnetische Induktion und die drahtlose Telegrafie und Telefonie genannt.

Der Einsatz historischer Experimente in der Phase der *Kontrolle und Bewertung* wird nicht so häufig erfolgen, ist aber in einigen Fällen gut möglich. Die historischen Experimente können dabei im Sinne einer wiederholten Durchführung eingesetzt werden. Sie unterstützen das tiefgründige Reproduzieren der Kenntnisse. Historische Experimente stellen einen guten Gegenstand für das Beschreiben des Aufbaus, der Durchführung und der erzielten Ergebnisse dar, sie ermöglichen Erläuterungen, Erklärungen und Deutungen der beobachteten Erscheinungen, Prozesse und Resultate. Darüber hinaus geben sie Anregungen für eine historische Einordnung der Experimente und Erkenntnisse sowie zur Begründung apparativer Besonderheiten in Anlage, Methode und Ergebnis.

Das historische Experiment kann jedoch auch Variante der vorangehend im Unterricht demonstrierten herkömmlichen Anordnungen sein. Ähnlichkeiten und Abweichungen erfordern dann von den Schülern ein Übertragen der gewonnenen Erkenntnisse auf die veränderten Anordnungen, Abläufe, Auswertungen und Ergebnisse. Die einfachen, leicht überschaubaren historischen Anordnungen erleichtern das Wiedererkennen, das geistige Durchdringen und das Charakterisieren des Wesentlichen.

Um in der Phase der Kontrolle und Bewertung umfassende geistige Tätigkeiten zu stimulieren, bietet sich das Darstellen konkreter Sachverhalte in Form von varierten

experimentellen Anordnungen an. Betrachten und Analysieren, Wiedererkennen des Wesentlichen in einer anderen Form, das sind Vorzüge, die durch den Einsatz vorher noch nicht gezeigter historischer Experimente auftreten.

Damit sind die historischen Anordnungen ein wesentliches Moment der abwechslungsreichen und interessanten Gestaltung des Unterrichts, das einen Beitrag zur Verbesserung der Wiederholungs- und Kontrollstunden und -phasen leisten kann. Die daran anschließenden Betrachtungen, insbesondere das Aufzeigen historischer Bezüge, stellen ein weiteres Moment der Vergrößerung der Wirksamkeit von Wiederholungs- und Kontrollstunden dar. Dabei kann auch der gleichzeitige, wiederholte Einsatz von herkömmlichem Experiment und historischem Experiment erfolgen. Dadurch werden neben der Nutzung der oben beschriebenen Vorzüge vergleichende Betrachtungen möglich.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß die Einbeziehung historischer Grundexperimente in den Physikunterricht einen fundierten Beitrag zur Herausarbeitung des Wesentlichen leisten kann.



## 2. Historisch bedeutsame Experimente und Möglichkeiten ihrer Nachgestaltung im Physikunterricht

### 2.1. Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Während im Rahmen der Herausbildung der klassischen Mechanik die *Statik* Anfang des 17. Jahrhunderts bereits ein gewisses Niveau erreicht hatte, stand zu diesem Zeitpunkt die *Kinematik* und erst recht die *Dynamik* „irdischer“ Körper noch ganz am Anfang, obwohl Stimuli der Praxis — man denke besonders an die Entwicklung des Geschützwesens — durchaus vorhanden waren. Ein wesentliches Hemmnis waren ebenso wie auch in der „*Himmelsmechanik*“ antike Vorstellungen. So hatte die Bewegungslehre des Aristoteles, besonders über den Fall der Körper, einen dogmatischen Charakter erlangt, der erst durch Galileo Galilei (1564 bis 1642) überwunden wurde.

Mit der beschleunigten Bewegung von Körpern hatte sich Galilei bereits während seiner Lehrtätigkeit in Pisa (1589 bis 1592) und in Padua (1592 bis 1610) beschäftigt. Zusammenfassend und ausführlich sind seine Arbeiten zur Bewegung von Körpern in einer Schrift enthalten, die erst 1638 unter dem Titel „*Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die örtliche Bewegung betreffend*“ erschien, im folgenden kurz nach dem italienischen Titel als „*Discorsi*“ bezeichnet. Die „*Discorsi*“ sind in einer damals oft benutzten literarischen Form verfaßt: als Diskussion einiger Personen über bestimmte wissenschaftliche Probleme. Während Salviati weitgehend Galileis eigene Ansichten vertritt, wirft Sagredo als interessierter Laie Fragen und Probleme auf, und der Dritte, Simplicio, erhebt meist Einwände gegen aufgestellte Behauptungen oder fordert weitere Erklärungen.

Die zentrale Aussage der Aristotelischen Bewegungslehre besagte, daß beim freien Fall — also einer beschleunigten Bewegung — die (Fall-)Geschwindigkeit unterschiedlicher Körper im gleichen Medium proportional den Gewichtskräften dieser Körper ist.

Die Widerlegung dieser Behauptung durch Galilei erfolgt auf mehrerlei Weise, u. a. durch folgende Überlegung: Wenn man einen schwereren und einen leichteren Körper miteinander verbindet, so müßte während des Fallens der (schneller fallende) schwerere Körper durch den (langsamer fallenden) leichteren Körper gebremst werden und dadurch langsamer fallen. Beide Körper vereinigt fallen aber — laut Voraussetzung — wegen ihrer größeren Gewichtskraft schneller als der schwerere Einzelkörper allein. Die Behauptung des Aristoteles enthält demnach einen logischen Widerspruch und kann nicht zutreffend sein.

Galilei benutzt noch ein anderes Argument: „Ich zweifle sehr daran, daß Aristoteles je experimentell nachgesehen hat, ob zwei Steine, von denen der eine ein 10mal so großes Gewicht hat, als der andere, wenn man sie in ein und demselben Augenblick fallen ließe, z. B. 100 Ellen (etwa 50 bis 60 m, d. H.) hoch herab, so verschieden in ihrer

Bewegung sein sollten, daß bei Ankunft des größeren der kleinere erst 10 Ellen zurückgelegt hätte.“

Bei dem Einwurf Simplicios: „Man sieht's aus Ihrer Darstellung, daß Ihr darüber experimentiert habt, sonst würdet Ihr nicht reden vom Nachsehen“, denkt man natürlich sofort an die in der Literatur oft erwähnten und meist als Legende abgetanen Fallexperimente Galileis am Schiefen Turm zu Pisa (Abb. 2.1./1). Es ist anzunehmen, daß Gali-



Abb. 2.1./1 Schiefer Turm zu Pisa

lei derartige Experimente durchgeführt hat, auch wenn er darüber explizite nicht berichtet.

Das belegen auch andere Stellen in den „Discorsi“, etwa wenn die Gesprächspartner Salvatis These, daß „große und kleine Körper von gleichem spezifischem Gewicht sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegen“ zwar akzeptieren, für Körper unterschiedlichen spezifischen Gewichts aber bezweifeln, „denn Ihr werdet uns nicht zumuten zu glauben, daß ein Stück Kork sich ebenso schnell bewege wie ein Stück Blei“.

Das bietet Salvati Gelegenheit zu einigen wichtigen Aussagen, die wohl nur durch experimentelle Beobachtungen erklärbar sind: „Gold, Blei, Kupfer, Porphyry und andere schwere Körper fallen mit fast unmerklicher Verschiedenheit in der Luft; Gold von 100 Ellen Höhe (aus) kaum vier Fingerbreit früher als Kupfer: Angesichts dessen glaube ich, daß, wenn man den Widerstand der Luft ganz aufhobe, alle Körper ganz gleich schnell fallen würden.“

In diesem Zusammenhang wird auch ausführlich auf den Strömungswiderstand der Luft gegenüber fallenden Körpern eingegangen, etwa beim Fall einer aufgeblasenen Schweinsblase und eines „Bleikörpers von gleicher Form und Größe“.

Ausgehend von diesen Überlegungen, mit denen er die Bewegungslehre des Aristoteles widerlegt hatte, untersuchte Galilei die Beziehungen zwischen Weg, Geschwindigkeit

und Zeit bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung quantitativ (2.1.1.). Seine Aussagen, die er an der geneigten Ebene gefunden hatte, wurden wenig später durch Christiaan Huygens (1629 bis 1695) für den freien Fall eines Körpers experimentell bestätigt (2.1.3.).

Die Untersuchungen Galileis zu den Fallgesetzen sind aus mehrerlei Sicht von grundlegender Bedeutung:

Galilei schuf damit die Basis für die weitere Entwicklung der *Mechanik*. Weiterhin erkannte er die große Bedeutung des *Experiments*. Zwar wurde schon vor ihm experimentiert, Galilei führte aber *messende* Experimente durch und machte sie damit einer mathematischen Auswertung zugänglich. Vor allem benutzte und wertete er sie als Kriterium für die Richtigkeit der Überlegungen. Hervorzuheben ist schließlich, daß Galilei anstelle der bis dahin meist vorherrschenden Spekulation etwa über das „Wesen“ der Bewegung, das durch die Frage nach dem „Warum“ gekennzeichnet war, zunächst die Frage nach dem „Wie“ setzte und damit den richtigen Weg vom Einfachen zum Komplizierten beschritt.

### 2.1.1. Historisch bedeutsames Experiment Galileis zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung auf der geneigten Ebene

Galileis Vorgehen in den „Discorsi“ (3. Kapitel = „Dritter Tag“) läßt sich in folgenden Schritten zusammenfassen:

1. Deduktive Herleitung der Fallgesetze.
2. Überlegungen, auf welche Weise man diese Gesetze überprüfen kann und
3. Bestätigung durch das Experiment.

Zunächst stellt Galilei Beziehungen zwischen Geschwindigkeit, Weg und Zeit bei einer „natürlich beschleunigten Bewegung“, das heißt beim freien Fall, auf. Da die naheliegende Relation  $v \sim s$  Widersprüche enthält, benutzt er hypothetisch den Ansatz, daß die Fallgeschwindigkeit der Fallzeit proportional ist, in heutiger Darstellung  $v \sim t$ . Eine direkte experimentelle Überprüfung dieser Proportionalität war mit den damaligen Mitteln nicht möglich. Galilei hatte deshalb den genialen Gedanken, daß sich die (langsamere) Bewegung eines Körpers auf einer geneigten Ebene analog vollzieht und postulierte:

„Die Geschwindigkeitswerte, welche ein und derselbe Körper bei verschiedenen Neigungen einer Ebene erlangt, sind einander gleich, wenn die Höhen dieser Ebenen gleich sind.“

Die Körper haben, wenn sie in A oder D anlangen, die gleiche Geschwindigkeit wie ein von C aus frei fallender Körper in B (Abb. 2.1.1./1).

Diese Behauptung wird nicht nur geometrisch begründet, sondern auch durch ein als „zwingender Beweis“ bezeichnetes Experiment (Abb. 2.1.1./2). An einem an einer Wand befestigten Nagel hängt eine Kugel an einem Faden AB von etwa 1 m bis 1,5 m Länge. „Bringt man den Faden AB mit der Kugel nach AC, und läßt man die Kugel los, so wird dieselbe fallend den Bogen CBD beschreiben, fast bis zur Horizontalen CD. Nach häufiger Anstellung dieses Versuches wollen wir in der Wand bei E einen Nagel anbringen oder in F, damit der Faden AC, wenn er mit der Kugel den Punkt B erreicht hat, beim Nagel E festgehalten, und die Kugel gezwungen wird, den Bogen BG zu beschrei-

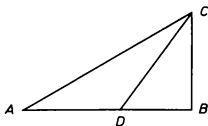


Abb. 2.1.1./1  
Zeichnung Galileis zur geneigten Ebene

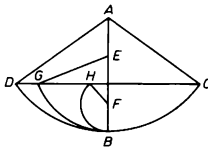


Abb. 2.1.1./2  
Zeichnung Galileis zum Pendelexperiment

ben, wobei wir erkennen werden, was ebendieselbe Geschwindigkeit leistet. Nun werden Sie bemerken, daß die Kugel im Punkt G wiederum den Horizont erreicht, und ebendasselbe geschieht, wenn das Hemmnis sich tiefer befindet, wie in F.“

Eventuellen Einwürfen kommt Galilei zuvor, indem er selbst darauf hinweist, daß die Bahn gekrümmt und nicht gerade wie auf der geneigten Ebene sei, und bemerkt: „Die absolute Richtigkeit wird uns später einleuchten, wenn wir die Folgerungen aus solcher Hypothese treffen und genau mit dem Versuch übereinstimmen sehen.“

Damit sind jedoch die Schwierigkeiten einer Geschwindigkeitsmessung noch nicht beseitigt. Auf der Proportionalität  $v \sim t$  basierend, stellt Galilei eine weitere These auf: „Wenn ein Körper von der Ruhelage aus gleichförmig beschleunigt fällt, so verhalten sich die in gewissen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die Quadrate der Zeiten.“ Dieser Satz wird mathematisch als zutreffend verifiziert und durch eine von Sagredo gegebene geometrische Beweisführung ergänzt, der bekräftigt: „Man sieht also, daß bei gleichförmiger Beschleunigung die in gleichen Zeiten durchlaufenen Wege sich wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5 verhalten, und faßt man die Gesamtstrecken zusammen, so wird in doppelter Zeit der vierfache Weg, in dreifacher Zeit der neunfache Weg zurückgelegt, und allgemein werden die Wege wie die Quadrate der Zeiten sich verhalten.“

Galilei läßt nun den stets skeptischen Simplicio fordern, „jetzt einen Versuch herbeizuführen, deren es so viele geben soll, und die sich mit den Beweisen decken sollen“ und durch Salviati bestätigen: „Ihr stellt in der Tat, als Mann der Wissenschaft, eine berechnete Forderung auf, und so muß es geschehen in den Wissenschaften, in welchen mathematische Beweise angewandt werden; diese alle erhärten ihre Prinzipien durch Experimente, und diese bilden das Fundament des ganzen späteren Aufbaues.“

Das Experiment (Abb. 2.1.1./3) zur Bewegung eines Körpers auf einer geneigten Ebene wird folgendermaßen beschrieben: „Auf einem Holzbrett von 12 Ellen Länge (etwa 6 m bis 7 m) war eine Rinne von etwas mehr als einem Zoll Breite. Dieselbe war sehr gerade gezogen, und um die Rinne glatt zu haben, war inwendig ein sehr glattes Pergament aufgeklebt; in dieser Rinne ließ man eine völlig runde und glattpolierte Messingkugel laufen. Das Brett wurde einerseits gehoben, bald eine, bald zwei Ellen hoch; dann ließ man die Kugel durch die Rinne rollen und verzeichnete die Fallzeit d. h. Rollzeit für die ganze Strecke; häufig wiederholten wir den einzelnen Versuch und fanden gar keine Unterschiede, auch nicht einmal von einem Zehntel eines Pulsschlages. Darauf ließen wir die Kugel nur durch ein Viertel der Strecke laufen, und fanden stets genau die halbe Fallzeit gegen früher. Dann wählten wir andere Strecken; bei wohl hundertfacher Wiederholung fanden wir stets, daß die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten, und zwar für jedwede Neigung der Ebene. Zur Ausmessung der Zeit stellten wir einen Eimer voll Wasser auf, in dessen Boden ein enger Kanal angebracht war, durch den ein feiner Wasserstrahl sich ergoß, der mit einem kleinen Be-

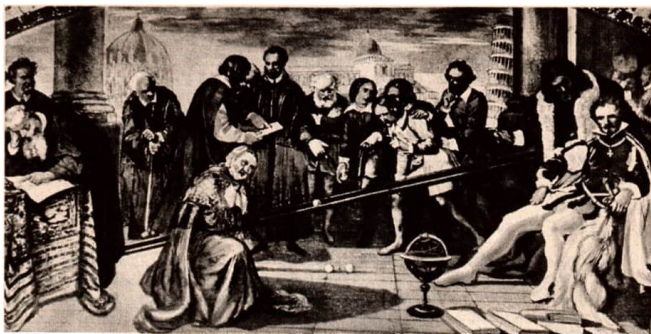


Abb. 2.1.1./3  
Galileis Experiment mit der Fallrinne

cher aufgefangen wurde, während einer jeden beobachteten Fallzeit. Das Wasser wurde auf einer sehr genauen Waage gewägt; aus den Differenzen der Wägungen erhielten wir die Verhältnisse der Gewichte und die Verhältnisse der Zeiten, und zwar mit solcher Genauigkeit, daß die zahlreichen Beobachtungen niemals merklich voneinander abwichen.“

Die Annahme  $s \sim t^2$  war demnach experimentell als zutreffend bestätigt und damit auch deren Grundlage, die Proportionalität  $v \sim t$ .

## 2.1.2. Schulexperimente zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung auf der geneigten Ebene

### *Zu Experiment 1*

1. Pendelkörper mit Haken
2. Faden (etwa 1,20 m)

### *Zu Experiment 2*

3. U-Profil aus Metall, mindestens 2,50 m lang
4. Eisenkugel (etwa 30 mm Durchmesser)
5. Abklärflasche (2 l)
6. Briefwaage (bis 500 g)
7. Becherglas (400 ml)
8. Stopfen mit Bohrung
9. Hahn mit gebogenem Glasrohr
10. Holzklotz (etwa 60 mm × 20 mm × 20 mm)
11. Glasrog (etwa 300 mm × 150 mm × 150 mm)
12. Stahlmaß (2 m)
13. Kreide

### Methodische Hinweise

1. Mit dem Experiment 1 wird gezeigt, daß der ausgelenkte Pendelkörper auch bei Verkürzung der Pendellänge während des Pendelvorganges die ursprüngliche Ausgangshöhe wieder erreicht (Reibung vernachlässigt). Es können energetische Betrachtungen und Vergleiche zur geneigten Ebene (wie im historischen Experiment beschrieben) durchgeführt werden.
2. Das Experiment 2 eignet sich vor allem zur Bestätigung. Es stellt einen einfachen Nachweis des Weg-Zeit-Gesetzes dar. Auf das Trägheitsmoment der rollenden Kugel braucht nicht eingegangen zu werden.

#### Experiment 1:

##### Lage des Umkehrpunktes bei sich ändernder Pendellänge

Die experimentelle Anordnung wird nach Abbildung 2.1.2./1 aufgebaut. Zur Stabilisierung der Anordnung befestigt man am unteren Ende des Stativstabes zwei Rundfüße. Die Länge des Pendels beträgt etwa 1 m. Der untere Querstab dient zur Markierung der Umkehrpunkte des Pendels. Ein Achszapfen wird am vertikalen Stativstab so befestigt, daß er zunächst in Richtung der Pendelbewegung zeigt.

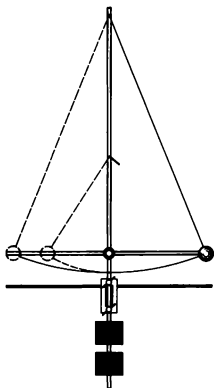


Abb. 2.1.2./1 Experimenteller Aufbau zur verkürzten Pendellänge

Lenkt man das Pendel bis zum Querstab aus und läßt es los, so erreicht die Kugel eine Zeitlang nahezu die gleiche Höhe in den Umkehrpunkten. Dreht man während des Vorganges die Kreuzmuffe mit dem Achszapfen um  $90^\circ$  zum Pendel herum, so wird die Pendellänge beim Durchgang des Pendels durch die Ruhelage verkürzt. Es zeigt sich, daß auch jetzt wieder das Pendel die gleiche Höhe (Querstab) erreicht. Dieses Experiment wird mit unterschiedlichen Einstellhöhen des Achszapfens wiederholt.

#### Experiment 2:

##### Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Mit dem U-Profil wird unter Verwendung von Stativmaterial eine geneigte Ebene, deren Neigungswinkel kleiner als  $10^\circ$  ist, aufgebaut. Sie soll sich beim Herunterrollen der Ku-

gel nicht durchbiegen. Wenn erforderlich, müssen weitere Unterstützungen unterhalb der Ebene angebracht werden (Abb. 2.1.2./2). Die Abklärflasche wird mit Hilfe von Stativmaterial erhöht aufgestellt. Man versieht sie mit dem Stopfen, in dessen Bohrung der Hahn mit dem gebogenen Glasrohr eingeführt wird. Anschließend füllt man sie — bei geschlossenem Hahn — mit Wasser. Der Glastrog wird unter die Öffnung des Glasrohres gestellt.

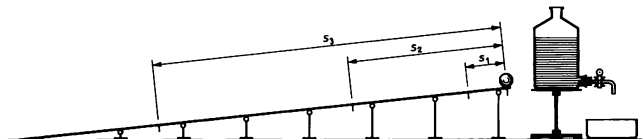


Abb. 2.1.2./2 Galileische Fallrinne

Man gibt die einzelnen Teilstrecken, jeweils vom Startpunkt quadratisch wachsend, vor und markiert sie mit Kreide an der geneigten Ebene. Dann legt man die Kugel auf den Anfangspunkt und den Holzklötzchen an den Endpunkt der zu untersuchenden Teilstrecke. Der Hahn der Flasche wird geöffnet, so daß ein feiner Wasserstrahl in den Glastrog läuft. Im Moment des Loslassens der Kugel hält man das Becherglas in den Wasserstrahl; wenn die Kugel den Holzklötzchen erreicht hat, nimmt man das Becherglas wieder aus dem Wasserstrahl heraus. Man bestimmt mit Hilfe der Briefwaage die Masse des ausgeflossenen Wassers. Das Experiment wird für die anderen Teilstrecken wiederholt. Als Ergebnis zeigt sich, daß die einzelnen Massen des ausfließenden Wassers sich wie 1:2:3 verhalten, wenn die Kugel die erste, zweite und dritte Teilstrecke durchläuft.

#### Beispiel für eine Meßreihe

Nr. der Messung	$s$ in cm	$m$ in g
1	25	25
2	100	51
3	225	75

### 2.1.3. Historisches Experiment Huygens' zum freien Fall

Im Zusammenhang mit seiner Erfindung der Pendeluhr (1657) und deren Verbesserung führte Christiaan Huygens an Pendeln umfangreiche Untersuchungen durch, deren Ergebnisse er 1673 veröffentlichte. Diese Arbeit ist wesentlich durch die damals übliche geometrische Beweisführung gekennzeichnet. Unter anderem fand Huygens auch Beziehungen zwischen der Schwingungsdauer von Pendeln, deren Länge und der Zeit für den freien Fall eines Körpers, die es ihm ermöglichten, „die Strecke zu bestimmen, die frei fallende Körper in einer gegebenen Zeit durchmessen“.

Rechnerisch findet Huygens, daß ein fallender Körper in einer Sekunde „fast 15 Pariser Fuß und 1 Zoll“ zurücklegt, das sind 489 cm. Ebenso wie Galilei mißt auch der Nieder-

länder dem Experiment entscheidende Beweiskraft zu, wenn er schreibt: „Dieses Ergebnis stimmt mit höchst sorgfältigen Versuchen, die ich angestellt habe, genau überein. Bei diesen Versuchen wurde der Zeitpunkt, in dem der Fall sein Ende erreichte, nicht durch das Ohr oder das Auge festgestellt, sondern nach einer anderen Methode bestimmt: Die für den Fall erforderliche Zeit wird durch (ein Viertel) der Schwingung eines Pendels angegeben.“

Huygens benutzte eine experimentelle Anordnung, die etwa der in Abbildung 2.1.4./1 dargestellten entsprochen haben muß. Das Pendel ist an einer lotrecht stehenden Tafel befestigt und wird zu Beginn des Experiments senkrecht zur Tafelebene aus seiner Ruhelage ausgelenkt. „Damit die Kugel dieses Pendels ihre Bewegung in demselben Augenblick beginnt wie das für den Fall bestimmte Gewicht, sind beide miteinander durch einen dünnen Faden verbunden und werden durch ihn festgehalten; der Faden wird durch Anzünden durchschnitten. Vorher wird aber an das Gewicht, das fallen soll, noch eine Schnur angebunden von einer solchen Länge, daß sie durch das fallende Gewicht gespannt wird, noch bevor das Pendel an die Tafel anschlägt. Das andere Ende der Schnur ist an einem Papierstreifen befestigt, und dieser wiederum so an die Tafel geheftet, daß er der Schnur bei einem leisen Zug leicht folgen und dann an der Stelle vorbeikommt, an der die Pendelkugel auf die Tafel auftreffen wird. Ist also von dem fallenden Gewicht die ganze Schnur verbraucht, so wird auch noch der Streifen um ein Stück heruntergezogen, bevor das Pendel die Tafel erreicht. Wie groß dieses Stück ist, gibt die Pendelkugel, die beruht ist, an, indem sie auf dem vorbeigleitenden Streifen ein Zeichen macht. Fügt man zu diesem Stück die Länge der Schnur hinzu, so erhält man genau die im Fall durchmessene Strecke.“

Die Schwingungsdauer  $T$  des verwendeten Pendels konnte Huygens mit Hilfe der von ihm gefundenen Proportion  $T_1^2 : T_2^2 = l_1 : l_2$  bestimmen, wobei  $T_1 = 2\text{ s}$  die Schwingungsdauer eines *Normalpendels* der Länge  $l_1 = 99,45\text{ cm}$  ist (von ihm als *Sekundenpendel* bezeichnet).

Eine Berechnung von  $g$  aus den ermittelten Werten  $\left(g = \frac{2s}{T^2}\right)$ , die mit den oben genannten Werten  $g = 978 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$  ergeben hätte, findet sich bei Huygens noch nicht.

## 2.1.4. Schulexperiment zum freien Fall

1. Pendelkörper
2. 2 Rollen mit Spitzenlagerung
3. Stoppuhr
4. Stahlmaß (2 m)
5. 4 Krokodilklemmen
6. Hakenkörper (50 g)
7. Papier, Blaupapier, Faden, Streichhölzer

### Methodische Hinweise

1. Mit dieser Anordnung lassen sich sehr genaue Werte für Fallstrecke und Fallzeit ermitteln.
2. Das Experiment eignet sich besonders für den Einsatz im Praktikum. Weiterführend kann eine Bestimmung von  $g$  durchgeführt werden.



### Experimentelle Anordnung

Aus Stativmaterial baut man die in Abbildung 2.1.4./1 dargestellte Anordnung auf. Die Pendellänge beträgt 99,5 cm. Auf dem Stelltisch befestigt man mit Krokodilklemmen Blaupapier, mit der Blauseite zur Kugel gewandt. Ein breiter Papierstreifen wird über dem Blaupapier so angebracht, daß er sich leicht nach unten lösen kann (z. B. durch Ankleben eines 2 mm breiten Papierstreifens). An der Kugel wird neben der Pendelaufhängung ein zweiter dünner Faden befestigt und über beide Rollen geführt. An das Ende des dünnen Fadens hängt man den Hakenkörper, so daß sich dieser an der Auftreffstelle des Pendels befindet. Dabei wird das Pendel ausgelenkt. Man achtet darauf, daß unterhalb des Hakenkörpers eine Fallstrecke von mindestens 125 cm Länge zur Verfügung steht. Der untere Faden einschließlich des Papierstreifens soll etwa 1300 mm lang sein.

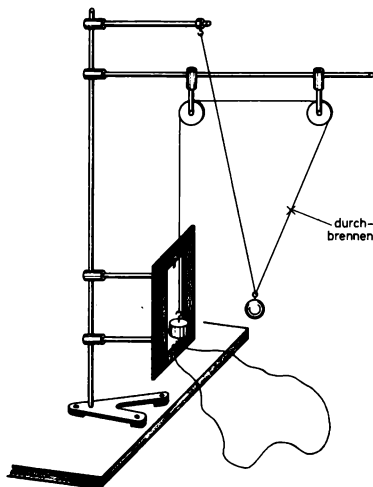


Abb. 2.1.4./1 Huygensches Pendelexperiment

### Experiment

Der Faden, der über beide Rollen läuft, wird durchgebrannt. Dabei fällt der Hakenkörper nach unten, spannt den Faden zwischen Hakenkörper und Papierstreifen und reißt diesen mit. In diesem Augenblick erreicht die Kugel den Stelltisch. Durch das Aufschlagen der Kugel wird auf der Rückseite des Papierstreifens eine Markierung vorgenommen.

### Auswertung

Die Fallstrecke  $s$  von der Befestigung des Fadens am Hakenkörper bis zur Markierung auf dem Papierstreifen wird gemessen. Danach bestimmt man experimentell die Zeit für eine Viertelschwingung des Pendels, indem für 10 volle Schwingungen die Zeit  $t$

mit der Stoppuhr gemessen wird. Der ermittelte Wert wird durch 40 dividiert. Anhand der bekannten Gleichung  $s = \frac{g}{2} \cdot t^2$  werden die experimentellen Werte überprüft, indem man nach der Fallbeschleunigung umstellt und den Wert für  $g$  berechnet.

#### Beispiel

Länge des Pendels  $l = 995 \text{ mm}$

Zeit für eine Viertelschwingung  $\frac{T}{4} = 0,5 \text{ s}$

Gemessene Fallstrecke  $s = 1225 \text{ mm}$

Berechneter Wert von  $g = 9,80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

## 2.2. Die Gravitationskonstante

Der deutsche Mathematiker und Astronom Johannes Kepler (1571 bis 1630), der bereits 1609 und 1619 seine drei Gesetze über die Bewegung der Planeten aufgestellt hatte, vermutete die Ursache dieser Bewegung in einer Kraft, die von der um ihre Achse rotierenden Sonne ausgeht, sich nur in ihrer Äquatorebene ausbreitet und die Planeten durch die Rotation mitzieht. In der Folgezeit setzte sich die Meinung durch, daß zwischen der Sonne und den Planeten sowie zwischen allen Himmelskörpern Anziehungskräfte wirksam seien.

Das Verdienst des englischen Physikers Isaak Newton (1643 bis 1727) war es, die hierbei wirkenden Gesetzmäßigkeiten in voller Klarheit erkannt zu haben. Im Jahre 1687 veröffentlichte er in den „*Philosophiae naturalis principia mathematica*“ sein Gravitationsgesetz. Den angenäherten Wert des Proportionalitätsfaktors  $\gamma$  ermittelte er, indem er die Masse der Erde aus ihrem Volumen und einem geschätzten Wert der Erddichte berechnete. Das Volumen der Erde konnte mit Hilfe der Ergebnisse der 1669 von Picard durchgeführten Gradmessung mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden. Zwar vermutete Newton, daß auch zwischen kleineren Massen eine solche Anziehung bestehe, doch hielt er sie für zu gering, als daß sie experimentell nachgewiesen werden könnte. Erst etwa hundert Jahre später, im Jahre 1798, gelang es dem englischen Chemiker und Physiker Henry Cavendish (1731 bis 1810), diese Naturkonstante experimentell zu bestimmen. Das Mitglied der Royal Society, John Michell (1724 bis 1793), hatte eine experimentelle Anordnung geschaffen, um damit die Dichte der Erde zu ermitteln. Seine Experimente erbrachten jedoch keine brauchbaren Ergebnisse. Diese Experimentieranordnung hatte Cavendish geerbt und benutzte sie fast unverändert. Zur Berechnung der Erddichte mit Hilfe des Gravitationsgesetzes benötigte er die Gravitationskonstante, die somit das eigentliche Ziel seiner Experimente war.

Durch die Kenntnis dieser universellen Naturkonstanten hat sich das Weltbild, das Wissen um den Aufbau unseres Sonnensystems, entscheidend verändert. So konnte man aus der Dichte und dem Volumen der Erde ihre Masse bestimmen. Dadurch wiederum war es möglich, die Masse des Mondes, der Sonne und der Planeten zu berechnen. Die Kenntnis des genauen Wertes der Gravitationskonstanten ist schließlich auch die Grundlage zur Berechnung der Bahnelemente von Raumflugkörpern.

Mit seinen Experimenten hat Cavendish die Methode zur Messung kleinster Kräfte durch die Tordierung dünner Drähte in der Präzisionsphysik eingeführt. Der von ihm ermittelte Wert  $\gamma = 6,71 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  war für seine experimentellen Möglichkeiten eine

hervorragende Leistung; zu Bahnberechnungen für einen Raumflugkörper wäre er jedoch nicht genau genug.

Nach Cavendish haben sich noch mehrfach Wissenschaftler mit dieser Aufgabe befaßt und verschiedene Methoden angewandt. Besonders hervorzuheben ist die Experimentieranordnung von Franz Richarz (1860 bis 1920). Er hängte an eine empfindliche Waage zwei gleiche Körper von je 1 kg so auf, daß sich der eine oberhalb, der andere unterhalb eines Bleiklotzes von etwa 2 m<sup>3</sup> Volumen befand. Aus dem Unterschied der Gewichtskräfte ermittelte er als Gravitationskonstante 1896 den Wert:

$$\gamma = 6,685 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = 6,685 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Aus neueren Messungen folgt:

$$\gamma = (6,670 \pm 0,007) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}.$$

### 2.2.1. Historisches Experiment Cavendishs zur Bestimmung der Gravitationskonstanten mit der Drehwaage

Die Anlage, die Cavendish von Michell übernommen hatte, bestand aus einer Kammer aus dicken Holzwänden, um Störungen von außen auszuschließen. In der Mitte dieses Raumes war unter der Decke ein sechs Fuß (etwa 183 cm) langer Balken angebracht, der durch einen Seilzug von außen gedreht werden konnte. An den Enden des Balkens hingen zwei Bleikugeln von je 8 Zoll Durchmesser (Abb. 2.2.1./1). Cavendish gab als Masse einer Kugel 2439000 grains (158 kg) an. Daraus kann man schließen, daß er sie durch Kugeln mit einem Durchmesser von 12 Zoll ersetzt hat. Darauf deutet auch seine Angabe hin: „The weights which Mr. Michell intended to use were 8 inches diameter.“ Unter dem Drehpunkt des Balkens war ein Torsionskopf angebracht, der durch einen Schneckentrieb von außen verstellbar werden konnte. Daran war ein dünner versilberter Kupferdraht befestigt, an dessen unterem Ende ein dünner Waagebalken aus Tannenholz

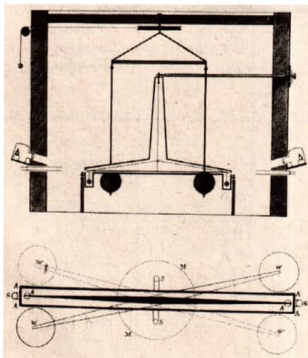


Abb. 2.2.1./1  
Cavendishs Experimentieranordnung  
zur Bestimmung der Gravitationskonstanten

hing. Er war 73,3 Zoll (186,2 cm) lang. An dessen Enden hingen an dünnen Drähtchen zwei Bleikugeln von je 2 Zoll (etwa 5 cm) Durchmesser und einer Masse von je 11262 grains (729 g). Der Torsionsdraht hatte einen Durchmesser von 0,2 mm und war  $39\frac{1}{4}$  Zoll lang.

Der Waagebalken befand sich in einem dünnwandigen Innengehäuse. An den schmalen Seitenwänden dieses Gehäuses war je eine Skale aus Elfenbein mit einer Einteilung in Zwanzigstelzoll (1,27 mm) angebracht. Dicht darüber spielten gleichartige Skalen, die an den Enden des Waagebalkens befestigt waren. Durch ihre Hundertstelzollteilung konnte die Stellung des Balkens auf etwa  $\frac{1}{4}$  mm genau abgelesen werden. Die Skalen

wurden von Lampen beleuchtet und konnten mit Fernrohren abgelesen werden.

Zu Beginn der Messung wurde der Balken mit den großen Kugeln quer gestellt (Abb. 2.2.1./2a). Danach wurde er gedreht, so daß sich die großen Kugeln den kleinen bis auf einen Mittelpunktabstand von 8,8 Zoll (22,3 cm) näherten. Der Abstand zwischen den Kugeloberflächen betrug dann nur noch etwa 4,5 cm (Abb. 2.2.1./2b).

Durch die Gravitationswirkung wurde der Waagebalken in Schwingung versetzt, und es hätte zu lange gedauert, abzuwarten, bis er zur Ruhe kam. Außerdem stellte Cavendish fest, daß die Ruhelage des Balkens langsam wanderte. Deshalb berechnete er die Ruhe-

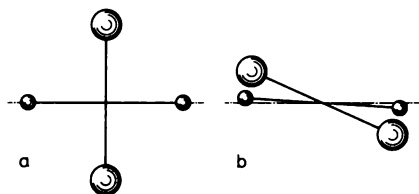


Abb. 2.2.1./2 Stellung der Kugeln a) zur Bestimmung der Mittellage, ohne Gravitationswirkung, b) Auslenkung des Waagebalkens bei Annäherung der großen Kugeln

Nummer des Aus-schlags	Umkehrpunkte in Skalenteilen ( $\frac{1}{20}$ Zoll)	$P_1$ $P_2$	Uhrzeit	Ruhelage in Skalenteilen	Durchgang durch die Mittellage
1	27,2	25 24	10 <sup>h</sup> 23' 4'' 10 <sup>h</sup> 23' 57''	24,6 24,7 24,75 24,8 24,58 24,9	} 10 <sup>h</sup> 23' 23''
2	22,1				
3	27				
4	22,6				
5	26,8				
6	23				
7	26,6				
8	23,4	25 24	11 <sup>h</sup> 5' 22'' 11 <sup>h</sup> 6' 48''		} 11 <sup>h</sup> 5' 22''

lage jeweils als arithmetisches Mittel aus drei aufeinanderfolgenden Schwingungsamplituden. Auch die Schwingungsdauer ermittelte er in ein und derselben Meßreihe. Dazu wählte er zwei Punkte  $P_1$  und  $P_2$  rechts und links von der Mittellage und bestimmte die Durchgangszeiten durch diese Punkte und die Umkehrpunkte der Schwingung. Die Tabelle auf S. 32 ist ein Ausschnitt aus siebzehn sehr umfangreichen Meßreihen.

Aus der letzten Spalte der Tabelle kann man die Schwingungsdauer berechnen. Sie betrug für drei Schwingungen 41 min 59 s und somit für eine Schwingung 13 min 59,6 s. Als Mittelwert aus allen Meßreihen ergab sich

$$T = 14 \text{ min } 8,6 \text{ s} = 848,6 \text{ s}.$$

Bei der nächsten Meßreihe wurden die großen Kugeln den kleinen von der anderen Seite her genähert. Die Ruhelage des Waagebalkens verschob sich dadurch bei den Meßreihen im Durchschnitt um 6,036 Skalenteile. Somit wurden die kleinen Kugeln durch die Gravitationswirkung jeweils um 3,833 mm aus ihrer Mittellage auf die großen Kugeln zu bewegt.

In sehr umfangreichen Berechnungen ermittelte Cavendish aus den Meßwerten für die Gravitationskonstante den Wert

$$\gamma = 6,71 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

und für die Dichte der Erde

$$\rho = 5,48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Nach neueren Messungen liegt die mittlere Dichte der Erde bei  $5,518 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

## 2.2.2. Modellexperiment zur Bestimmung der Gravitationskonstanten mit der Drehwaage

1. Gerät für Messungen in elektrischen und magnetischen Feldern
  - a) Grundgerät mit oberem und unterem Haltedraht
  - b) Kugelelektrode  $\varnothing$  26 mm mit kurzem Stiel
  - c) Kugelelektrode  $\varnothing$  26 mm mit langem Stiel
  - d) Kugelelektrode  $\varnothing$  26 mm mit kurzem Stiel und Isolierstab
  - e) Isolierstück für Objektträger
  - f) Isolierstück für Schlitten
  - g) Kupplungsstück für Objektträger
  - h) Kupplungsstück für Schlitten
2. Bandgenerator

### Methodische Hinweise

1. Gravitations-Drehwaagen sind sehr empfindliche Geräte, die mit hoher Präzision hergestellt, erschütterungsfrei aufgestellt und sorgfältig justiert werden müssen. Ein Schulexperiment mit einer Gravitations-Drehwaage ist für die Durchführung im Unterricht wenig geeignet, eine Selbstherstellung einer Gravitations-Drehwaage kann nicht empfohlen werden.

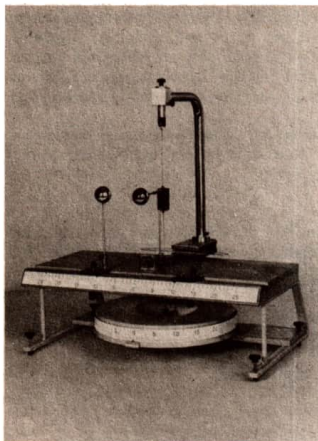


Abb. 2.2.2./1

Drehwaage zum Nachweis der Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern

2. Um den Schülern das Prinzip der Messung geringster Kräfte mit der Drehwaage zu veranschaulichen, wird ein Modellexperiment mit einem ähnlichen experimentellen Aufbau empfohlen. Im Modellexperiment werden die Gravitationskräfte durch die (viel größeren) elektrostatischen Anziehungskräfte ersetzt.
3. Es ist wichtig, den Schülern bewußtzumachen, daß es sich beim beschriebenen Experiment um ein Modellexperiment handelt, das in Anordnung und Art der Durchführung weitgehend mit dem historischen Experiment übereinstimmt. Es handelt sich dabei jedoch um andersartige Kräfte. Zur Herausarbeitung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden sollte auf das historische Experiment eingegangen werden.

### Experiment

Der Aufbau der Experimentieranordnung ist in Abbildung 2.2.2./1 dargestellt. Die Kugel mit dem kurzen Stiel wird mit dem zugehörigen Isolierstück am Objektträger befestigt, die Kugel mit dem langen Stiel mit dem entsprechenden Isolierstück an einem der beiden Schlitten. Der Schlitten wird zunächst weit nach der Seite geschoben. Das Gerät wird so justiert, daß der Zeiger auf der Nullmarke steht. Die Feineinstellung erfolgt mit dem Skalentopf, der im weiteren Verlauf des Experimentes nicht mehr verstellt wird.

Die beiden Kugelelektroden werden ungleichnamig elektrisch aufgeladen. Die Übertragung der Ladungen erfolgt mit der Kugelelektrode mit Isolierstab. Danach wird die auf dem Schlitten befestigte Kugel vorsichtig, aber zügig bis auf etwa 5 cm auf die andere Kugelelektrode zubewegt. Infolge der elektrischen Anziehung gerät die Drehwaage in Schwingungen. Der Ruhepunkt der Kugelelektrode, um den sie schwingt, hat sich zur angenäherten Kugelelektrode hin verschoben.

*Bemerkung*

Die Analogie zum historischen Experiment läßt sich dadurch verstärken, daß man ein paralleles Lichtbündel auf den Spiegel schickt und die Bewegung des Lichtzeigers beobachtet.

**2.3. Auftrieb in Flüssigkeiten**

Archimedes von Syrakus (etwa 287 bis 212 v. d. Z.) war der bedeutendste Naturwissenschaftler der Antike. Er hat auf vielen Gebieten so Hervorragendes geleistet, daß sein Werk noch im 16. und 17. Jahrhundert anregend auf die Entwicklung von Mathematik und Naturwissenschaft gewirkt hat.

Als Sohn eines berühmten Astronomen studierte er in der damaligen geistigen Metropole Alexandria bei den Schülern von Euklid. Seine wesentlichen Interessengebiete waren die Mathematik und die Mechanik, denen er während der 50jährigen Herrschaft des Königs Hieron II. nachgehen konnte. Er schuf die arithmetischen Grundlagen des Rechnens, Methoden zur Bestimmung von Flächen und Rauminhalten, die Grundlagen zur Statik und Hydrostatik und führte den Begriff des Schwerpunktes ein. Er widmete sich Fragen der Optik und Akustik und grundlegenden Problemen der Kriegstechnik. Die „Methodenlehre“ gibt Einblick in seine schöpferische Arbeit.

Archimedes unterschied sich ganz wesentlich von seinen Vorgängern und Zeitgenossen durch die Beschäftigung mit der Technik. Einerseits durchdrang er als Wissenschaftler die Probleme gedanklich und führte sie streng logisch zu einer theoretischen Lösung. Andererseits machte er, seine eigenen Theorien nutzend, wesentliche technische Erfindungen, die teilweise bis in die heutige Zeit wirksam sind, wie z. B. die nach ihm benannte Schraube als Vorläufer von Schiffsschrauben und Propeller.

Im Altertum war Archimedes als genialer Kriegersingenieur berühmt, dem es zu danken war, daß seine Vaterstadt im 2. Punischen Krieg zwei Jahre lang erfolgreich gegen die Römer verteidigt werden konnte. In einer seiner bedeutendsten Schriften „Über schwimmende Körper“ legte er die Grundlagen der Hydrostatik. Besonders genau wurde der Zusammenhang zwischen Volumen, Gewicht und Form fester Körper und dem Verhalten dieser Körper in Flüssigkeiten untersucht. Dadurch wurde der Bau größerer und sicherer Schiffe möglich. In dieser Schrift wurde erstmalig über den Auftrieb in Flüssigkeiten, seine Ursachen und seine Bestimmung geschrieben. Angeregt zu Untersuchungen über den Gewichtsverlust fester Körper beim Eintauchen in Flüssigkeiten wurde er angeblich durch entsprechende Beobachtungen bei einem Bad in der Wanne.

Eine direkte Folge der Entdeckung des Auftriebs war die Möglichkeit, die Dichte fester Körper zu bestimmen. Eine Legende besagt, Archimedes habe die Methode sofort genutzt, eine goldene Krone auf ihren Gehalt an weniger edlem Metall zu prüfen und eine gesicherte Aussage darüber zu machen.

### 2.3.1. Historisches Experiment zum Auftrieb

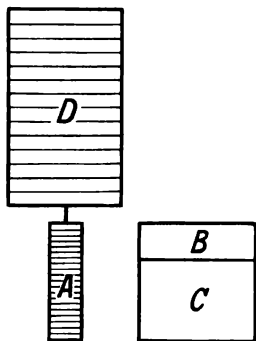
In der Schrift „Über schwimmende Körper“ definiert Archimedes zunächst den Begriff *Flüssigkeit*:

„Es sei vorausgesetzt, daß die Flüssigkeit einen solchen Charakter hat, daß von gleich gelegenen (d. h. vom Mittelpunkt der Erde gleich weit entfernt) und zusammenhängenden Teilen die stärker gedrückten die weniger gedrückten vor sich hertreiben, und daß jeder Flüssigkeitsteil von der oberhalb seiner gelegenen Flüssigkeit in lotrechter Richtung gedrückt wird, wenn die Flüssigkeit nicht durch ein Gefäß oder andere Umstände gedrückt wird.“ Dann wird der entscheidende Satz zum Auftrieb in § 7 formuliert:

„Ein Körper, der spezifisch schwerer ist als die Flüssigkeit, sinkt in dieser bis zum Grunde hinab und wird in der Flüssigkeit um so viel leichter, wie die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt.“

Anschließend wird in Form eines Gedankenexperiments der Nachweis der Richtigkeit dieser Aussage erbracht.

„Daß der Körper bis zum Grunde der Flüssigkeit sinkt, ist klar; denn die nahe ihm gelegenen Flüssigkeitsteile werden mehr gedrückt als die mit ihnen entsprechend liegenden Flüssigkeitsteile, da ja nach Voraussetzung der Körper spezifisch schwerer ist als die Flüssigkeit. Daß er aber in der angegebenen Weise leichter wird, wird nunmehr gezeigt werden.“



**Fig. 7.**

Abb. 2.3.1./1  
Schematische Darstellung des Archimedes  
zu dem von ihm entdeckten  
und nach ihm benannten Prinzip

Es sei ein Körper A (Fig. 7) spezifisch schwerer als die Flüssigkeit, sein Gewicht sei  $B + C$ . B sei die von A verdrängte Flüssigkeitsmenge. Es ist zu zeigen, daß der Körper A in der Flüssigkeit das Gewicht C hat. Es sei nun ein Körper C spezifisch leichter als die Flüssigkeit. Sein Gewicht sei gleich dem Gewicht von B, das Gewicht der von D verdrängten Flüssigkeitsmenge sei  $B + C$ . Der aus den Körpern A und D zusammengesetzte Körper ist so schwer wie die von ihm verdrängte Flüssigkeit. Es hat nämlich das Gewicht von  $A + D$  die Größe  $B + C + B$ , das Gewicht aber der von



A + D verdrängten Flüssigkeitsmenge ist ebenfalls B + C + B. Also wird der Körper A + D sich in der Flüssigkeit im Gleichgewicht befinden und weder steigen noch fallen. Der Körper A wird also nach unten mit der gleichen Kraft gezogen, mit der der Körper D nach oben gezogen wird. Der Körper D aber, da er spezifisch leichter ist als die Flüssigkeit, wird mit der Kraft des Gewichtes C nach oben getrieben. Denn es ist bewiesen worden (§ 6), daß Körper, die spezifisch leichter sind als die Flüssigkeit und die mit Gewalt in die Flüssigkeit getaucht werden, mit einer Kraft nach oben getrieben werden, die gleich ist der Differenz der Gewichte der verdrängten Flüssigkeitsmenge und des Körpers. Es ist aber die von D verdrängte Flüssigkeitsmenge um das Gewicht C größer als das Gewicht von D. Es ist also klar, daß der Körper A mit der Kraft des Gewichtes C abwärts gezogen wird.“

### 2.3.2. Schulexperiment zum Auftrieb

1. Zylindrischer Metallkörper und zylindrisches Gefäß gleichen Volumens
2. Federkraftmesser (3 N)
3. Becherglas
4. Wasser und andere Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Dichte (z. B. Spiritus und konzentrierte Salzlösung)

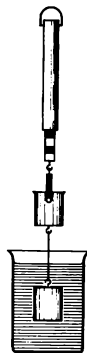


Abb. 2.3.2./1  
Experimentelle Anordnung  
zur Messung des Auftriebs  
in Flüssigkeiten

#### Methodische Hinweise

1. Die Erkenntnisse, daß ein in eine Flüssigkeit eintauchender Körper einen Gewichtsverlust erleidet und daß die Auftriebskraft in einer Flüssigkeit gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit ist, können mit diesem Experiment auf direktem Wege gewonnen werden.
2. Um den Allgemeinheitsgrad der gewonnenen Aussagen zu erhöhen, sollte man das Experiment mit verschiedenen Flüssigkeiten durchführen.
3. Die Verwendung eines Federkraftmessers gegenüber einer üblichen Balkenwaage hat den Vorteil der direkten Kraftmessung.

#### Experiment

Man zeigt zunächst, daß der Metallkörper genau in den Hohlzylinder paßt. Dann hängt man den Hohlzylinder an den Federkraftmesser, befestigt darunter den Metallkörper

und registriert die Gewichtskraft  $G_1$ . Nun läßt man den Metallkörper völlig in die Flüssigkeit eintauchen und liest die Gewichtskraft  $G_2$  ab.  $G_1 - G_2$  ist die Auftriebskraft (Abb. 2.3.2./1).

Füllt man dann den Hohlzylinder mit der Flüssigkeit, so ist die nun abgelesene Gewichtskraft  $G_3$  gleich  $G_1$ .

Das Ergebnis des Experiments entspricht also dem von Archimedes formulierten Satz: Ein Körper wird in einer Flüssigkeit um so viel leichter, wie die von ihm verdrängte Flüssigkeit wiegt.

### Bemerkungen

1. Beim Füllen des Hohlzylinders muß darauf geachtet werden, daß er bis zum Rand vollgefüllt ist.
2. Anstelle des Becherglases kann man ein Überlaufgefäß verwenden. Dann ist das Volumen der übergelaufenen Flüssigkeit gleich dem Volumen des Metallkörpers. Diese Flüssigkeitsmenge paßt genau in den Hohlzylinder.

## 2.4. Bernoullische Gleichung

Fast zwei Jahrtausende währten die Bemühungen um die Lösung der Probleme der Mechanik der Flüssigkeiten, ohne daß man wesentlich über hydrostatische Kenntnisse hinaus gelangte. Noch Newton bedauerte, daß es nicht gelang, „auch diese Naturphänomene aus mechanischen Prinzipien herzuleiten“. Johann Bernoulli (1667 bis 1748) schreibt dazu im Vorwort zu seiner „*Hydraulica*“: „Die Hydrostatik, die sich mit ruhendem Wasser in unten geschlossenen Gefäßen beschäftigt, hat ihre Grenzen und deduzierten Prinzipien. Damit lassen sich die Wirkungen und Erscheinungen klar und deutlich erklären, so daß im Umkreis dieser Wissenschaften kaum noch etwas zu wünschen übrig bleiben kann. Anders verhält es sich in der Hydraulik, wo es nicht nur um die Schwere des Wassers und seinen Druck geht, sondern außerdem um die Bewegung, die entsteht, wenn Wasser durch eine Öffnung hinausfließen kann oder wenn es gezwungen wird, aus einem Rohr in ein anderes von unterschiedlichem Querschnitt hinüberzufließen. Diese Wissenschaft, gewöhnlich Hydraulik genannt, ist gewiß äußerst schwierig, und bis jetzt glaubt man, daß die mechanischen Gesetze und Regeln für sie nicht gelten.“

Die Lösung dieses Problems gelang zwei um die Wissenschaft hochverdienten Männern, dem eben zitierten Johann Bernoulli und seinem Sohn Daniel Bernoulli (1700 bis 1782). Beide gehörten zu einer bedeutenden Schweizer Gelehrtenfamilie. Johann Bernoulli war Mathematiker und theoretischer Physiker. Er entwickelte die Variationsrechnung und das Prinzip der virtuellen Arbeit. Daniel Bernoulli beschäftigte sich mit Mathematik, Anatomie, Botanik und Physik. Er legte den Grundstein zur kinetischen Gastheorie (siehe Abschnitt 2.9.), untersuchte die Reaktionskraft strömenden Wassers und formulierte den Satz von der Erhaltung der Energie („lebendige Kraft“). Er empfahl die Verwendung der Schiffsschraube und behandelte das Phänomen der Kavitation.

Die Konsequenzen der Forschungsarbeiten beider Bernoullis für die Praxis waren enorm. Die Bernoullische Gleichung ist eine wesentliche physikalische Grundlage des dynamischen Auftriebs in Flüssigkeiten und Gasen, der bei Tragflächen, z. B. von Flugzeugen, genutzt wird, und eine Möglichkeit zur Erzeugung des Schubs in Flüssigkeiten und Gasen.

der z. B. durch Propeller erzeugt wird. Aber auch in Turbinen, Zerstäubern und Vergasern finden die Erkenntnisse Anwendung.

Johann und Daniel Bernoulli untersuchten unabhängig voneinander Druck und Geschwindigkeit in strömenden Flüssigkeiten und fanden, daß der statische Druck in einer strömenden Flüssigkeit kleiner ist als in einer ruhenden, und zwar um so kleiner, je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist. Diese Gesetzmäßigkeit wird durch die Bernoullische Gleichung ausgedrückt.

Die Wege zu dieser Erkenntnis waren unterschiedlich: Johann Bernoulli gründete seine Entwicklungen auf die Gesetze der allgemeinen Mechanik und leitete daraus die Bernoullische Gleichung her. Veröffentlicht wurde dies 1742 in seiner „*Hydraulica*“. Daniel Bernoulli verwendete das Prinzip von der Erhaltung der Energie und bewies dessen Nützlichkeit bei der Anwendung auf strömende Flüssigkeiten. Im 12. Kapitel seiner „*Hydrodynamica*“ (erschieden 1738) untersuchte er Druck und Strömungsgeschwindigkeit und kam dabei zu einem Vorläufer der Bernoullischen Gleichung. Er gewann seine Kenntnisse zunächst durch theoretische Überlegungen und verifizierte sie anschließend im Experiment. Dazu schrieb er:

„Diese Theorie kann nun durch einen sehr leichten Versuch bestätigt werden, der von größerer Bedeutung ist, weil bisher niemand derartige Gleichgewichtszustände, deren Anwendung sehr weit verbreitet ist, bestimmt hat, weil ferner durch die gleiche Methode der Druck der durch Rohrleitungen fließenden Wassermasse ganz allgemein für irgendwie geneigte, gekrümmte, verschieden weite Leitungen und für eine beliebige Wassergeschwindigkeit erhalten werden kann.“

### 2.4.1. Historisches Experiment zur Bernoullischen Gleichung

Zur Aufgabenstellung heißt es (Abb. 2.4.1./1): „Gegeben sei ein sehr weites Gefäß ACEB (Fig. 72), das ständig voll Wasser gehalten und mit einem waagerechten zylindrischen Rohr ED versehen wird. Am äußersten Ende befindet sich eine Öffnung o, welche das Wasser mit gleichförmiger Geschwindigkeit aussendet. Gesucht ist der Wasserdruck gegen die Rohrwände ED.“

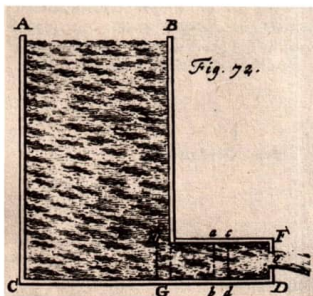


Abb. 2.4.1./1  
Experimentieranordnung D. Bernoullis  
(ohne Manometerrohr gm)

Seine theoretischen Ableitungen führten D. Bernoulli zu folgenden Ergebnissen:

$$\text{Druck: } \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot a,$$

$$\text{Geschwindigkeit: } \frac{\sqrt{a}}{n}.$$

Dabei ist  $a$  die Höhe des Wasserspiegels AB über der Öffnung  $o$  und  $n$  das Flächenverhältnis zwischen Rohr- und Öffnungsquerschnitt.

Den experimentellen Aufbau und die Meßverfahren zur Bestätigung der beiden Ausdrücke beschrieb er so:

*Druck:* „Hat man aber ein lotrechtes oder auch ein beliebig geneigtes Röhrchen  $gm$ , das mit dem waagerechten Rohr zusammenhängt, aber doch so, daß das Ende des eingesetzten Röhrchens nicht in den Hohlraum des waagerechten Rohres hineinragt, damit nicht das vorbeifließende Wasser an diesem Ende anstößt, dann wird die lotrechte Höhe  $gh$  des im angebrachten Rohr befindlichen Wassers gleich

$$\frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot a.$$

*Geschwindigkeit:* „Es ist aber bei dem Versuch Sorge zu tragen, daß das waagerechte Rohr innen gut geglättet, daß es vollkommen zylindrisch und waagrecht ist. Es soll genügend weit sein, damit infolge der Adhäsion des Wassers an den Wänden keine merkliche Bewegungsabnahme entstehen kann. Das Gefäß sei sehr weit und beständig mit Wasser gefüllt. Man muß auch beachten, wie groß die Fähigkeit des Glasröhrchens  $gm$  ist, um das in ihm stehende Wasser anzuheben . . . Obwohl man aber auf solche Art diesen Überständen zu begegnen vermag, damit beim Versuch ein merkbarer Fehler nicht mehr auftreten kann, wird dennoch, wenn wir größere Genauigkeit anstreben wollen, durch einen Versuch die ausfließende Wassermenge zu gegebener Zeit zu ermitteln sein, die bei der angeordneten Rohrweite die Geschwindigkeit des im Rohr fließenden Wassers vollständig richtig liefert, die wir in der Berechnung mit  $\sqrt{a/n}$  festgesetzt haben.“

Gemessen wurden also die Höhe der Wassersäule im Manometerrohr und die in einer bestimmten Zeit ausgeflossene Wassermenge als Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Die Meßergebnisse bestätigten die Voraussagen sowohl in ihrer mathematischen als auch in ihrer verbalen Form: „In Rohrleitungen dagegen ändert das Wasser seinen Druck um so mehr, mit je größerer Geschwindigkeit es durchströmt, und es übt nahezu den gewohnten Druck aus, wenn die Geschwindigkeit sehr gering ist.“

## 2.4.2. Schulexperiment zur Bernoullischen Gleichung

### Zu Variante a

1. Abklärflasche (2 l)
2. Glasrohr ( $\varnothing$  5 mm; Länge 25 cm)
3. Glasrohr ( $\varnothing$  8 mm; Länge 25 cm),

an das eine Manometerrohre ( $\varnothing$  2 mm; Länge 25 cm) T-förmig angeschmolzen ist

4. Glasrohr ( $\varnothing$  8 mm; Länge 5 cm)
5. 2 durchbohrte Gummistopfen
6. Gummischlauch ( $\varnothing$  6 mm; Länge 5 cm)
7. Auffangschale (etwa 3 l)
8. Färbemittel für Wasser (Tinte)
9. Quetschhahn

### *Zu Variante b*

Geräte 1. bis 9., außerdem

10. Meßzylinder (100 ml)
11. Stoppuhr
12. Glasrohr ( $\varnothing$  3 mm; Länge 5 cm)
13. Glasrohr ( $\varnothing$  5 mm; Länge 5 cm)
14. Glasrohr ( $\varnothing$  7 mm; Länge 5 cm)

### *Methodischer Hinweis*

Bei Variante a gewinnt man nur qualitative Aussagen, die Variante b gestattet zumindest halbquantitative Ergebnisse.

### *Variante a*

Die Experimentieranordnung wird nach Abbildung 2.4.2./1. aufgebaut. Die oben offene Abklärflasche wird mit angefärbtem Wasser gefüllt und mit dem Stopfen, in dem sich das Glasrohr befindet, verschlossen. Dabei ist darauf zu achten, daß in der Manometerröhre keine Luftblasen eingeschlossen sind. Die Höhe der Wassersäule in der Manometerröhre ist ein Maß für den statischen Druck. Auf die Geschwindigkeit des ausströmenden Wassers wird aus der Form des Wasserstrahls geschlossen.

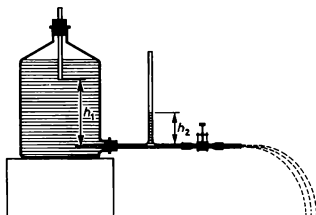


Abb. 2.4.2./1  
Experimenteller Aufbau zum Nachweis  
des Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit  
und statischem Druck  
in einer strömenden Flüssigkeit

Die Ausflußöffnung wird geöffnet und durch Verstellen des Quetschhahnes mehrmals vergrößert. In jedem Falle wird der statische Druck abgeschätzt.

Das Experiment führt zu dem Ergebnis, daß der statische Druck in einer strömenden Flüssigkeit kleiner ist als in einer ruhenden. Er ist um so kleiner, je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist.

### *Variante b*

Der Aufbau und der Ablauf des Experiments entsprechen dem in Variante a. Der Ausflußquerschnitt wird durch den Einsatz verschiedener Ausflußrohre vorgegeben. Zunächst

steckt man das dünnste in den Ausflußschlauch und füllt bei geschlossenem Quetschhahn die Abklärflasche. Dann wird der Quetschhahn voll geöffnet. Man mißt die Höhe  $h$  der Wassersäule in der Manometerröhre, die ein Maß für den statischen Druck ist, bestimmt die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  und trägt die Werte in eine Tabelle ein.

Die Geschwindigkeit wird ermittelt, indem man das Volumen des in einer bestimmten Zeit ausgeflossenen Wassers mißt und den Quotienten aus Volumen und Zeit berechnet. Dieser Vorgang wird für die anderen Ausflußrohre wiederholt.

Die Auswertung der Meßwerte führt zu dem Ergebnis, daß

$$h \sim \frac{1}{v^2}$$

ist.

### Bemerkungen

1. Das oben in der Abklärflasche steckende Glasrohr bewirkt unter sonst gleichen Bedingungen das gleichmäßige Ausfließen des Wassers, solange der Wasserspiegel in der Flasche oberhalb des unteren Endes des Glasrohres steht. Das Wasser verhält sich dann so, als ob seine Oberfläche die Höhe  $h_1$  über dem Ausfluß hätte (Abb. 2.4.2./1). Durch vertikales Verschieben dieses Glasrohres kann also die Ausflußgeschwindigkeit geändert werden.
2. Sollten die unter 12. bis 14. genannten Glasrohre nicht alle zur Verfügung stehen, kann der Querschnitt des Ausflußrohres auch durch Einschieben zylindrischer Glasstäbe oder Drähte entsprechend verändert werden.
3. Der infolge der Reibung auftretende lineare Druckabfall im horizontalen Glasrohr wirkt sich nur wenig störend aus, da der Druck immer an der gleichen Stelle gemessen wird.

## 2.5. Druck und Gewichtskraft der Luft

Die Anfänge der Aerostatik reichen bis in die alexandrinische Periode der griechischen Wissenschaft zurück (3. bis 1. Jh. v. u. Z.). Sie sind mit den Namen Philon von Byzanz (um 250 v. u. Z.) und Heron von Alexandria (um 100 v. u. Z.) verknüpft.

Originalschriften der beiden sind nicht vorhanden, wohl aber eine Anzahl mittelalterlicher Abschriften. In der Einleitung seiner „*Pneumatika*“ — in der eine große Anzahl von Experimenten und Apparaten beschrieben ist, bei denen der Luftdruck, komprimierte Luft oder ausströmender Wasserdampf wirken — schreibt Heron: „Das Studium der Pneumatik wurde von den alten Philosophen und Mechanikern sehr eifrig betrieben, indem die einen ihr Wesen theoretisch, die anderen durch Vorführung von Experimenten darlegten. Daher scheint es auch uns notwendig, die Erfindungen unserer Vorgänger, wie sie uns überkommen sind, in geordneter Reihenfolge zu entwickeln und unsere eigenen mit einzuschalten.“

Hinsichtlich der wichtigen Problematik des Vakuums nimmt Heron eine Stellung zwischen den Atomisten, die ein Vakuum zuließen, und Aristoteles ein, der die Existenz eines Vakuums verwirft, da die Natur einen „*horror vacui*“ — eine Abscheu vor dem Leeren — habe. Nach Heron gibt es „von Natur her“ kein kontinuierliches Vakuum, es komme aber in fein verteilter Form in der Luft, in der Feuchtigkeit, im Feuer und

in anderen Körpern vor. Zwischen den Molekülen (nicht im heutigen Sinne zu verstehen!) gäbe es leere Räume, ähnlich wie beim Sand am Meeresstrand. Mit dieser Hypothese war es Heron möglich, in gewissen Grenzen die Kompression und Entspannung von Luft, die Wirkungsweise von Pumpen und Hebern zu erklären. Heber wurden z. B. zum Umfüllen von Flüssigkeiten schon seit sehr langer Zeit benutzt, wie Abbildung 2.5./1 zeigt, eine ägyptische Darstellung aus dem 16. Jh. v. u. Z.



Abb. 2.5./1  
Anwendung von Weinhebern  
im alten Ägypten

Heron's Experimente sind keine Experimente im heutigen Sinne, ermöglichen aber einen Einblick in den doch bereits hohen Erkenntnisstand auf einigen Gebieten. Über die Verwendung dieser Apparate lassen sich nur Vermutungen anstellen. Die vielfältigen Variationen des Hebers dienten möglicherweise in Tempeln zusammen mit verschiedenen anderen Vorrichtungen (automatischer Tempeltüröffner, Opferaltäre usw.) dazu, die Macht der Priesterkaste durch anscheinend übernatürliche Vorgänge zu festigen und zu erhalten, etwa beim Kapselheber (2.5.1.). Nur wenn die von den Priestern geforderte (für den Anlauf des Hebers notwendige) Ölmenge eingegossen wurde, entleerte sich das Opfergefäß vollständig, d. h., die „Götter“ nahmen das Opfer an. Während des gesamten Mittelalters galt trotz gelegentlicher Diskussionen nahezu uneingeschränkt die Lehre vom „*horror vacui*“, die dogmatischen Charakter erlangt hatte, nicht zuletzt gestützt durch theologische Argumentationen. Erst Anfang des 17. Jh. begannen zu dieser Problematik wissenschaftliche Untersuchungen, die vor allem mit den Namen Evangelista Torricelli (1608 bis 1647) und Otto von Guericke (1602 bis 1686) verknüpft sind, wobei der Ausgangspunkt für deren Arbeiten sehr unterschiedlich war.

Torricelli, ein Schüler Galileis, wurde von einem Problem der Praxis angeregt: In den „*Discorsi*“ (↗ 2.1.) hatte Galilei berichtet, daß sich mit einer Saugpumpe Wasser nur bis zu einer bestimmten Brunnentiefe fördern ließ: „Als ich das sah, glaubte ich, die Pumpe sei verdorben, ich suchte den Meister auf, damit er sie zurecht mache, dieser aber versicherte, es fehle nichts, als daß das Wasser, welches zu tief stehe, nicht auf solche Höhe gehoben werden könne; und er fügte hinzu, daß es unmöglich sei, dasselbe ein Haar breit mehr als 18 Ellen (9 m bis 10 m) ansteigen zu lassen, und seien die Pumpen weit oder eng, es bleibe dies die äußerste Hubhöhe.“

Die Erklärung des „*Pumpenphänomens*“ gelang kurze Zeit nach Galileis Tod Evangelista Torricelli und Vincenzo Viviani (1622 bis 1703) (2.5.3.). Da Torricelli seine Ergebnisse und Erkenntnisse nicht veröffentlichte (wissenschaftliche Periodika gab es noch nicht),

sondern diese nur in zwei Briefen 1644 an den italienischen Gelehrten M. A. Ricci mitteilten, wurden sie zunächst noch nicht allgemein bekannt; Guericke erfuhr davon z. B. erst 1653.

Aus heutiger Sicht erscheinen die Torricellischen Experimente und ihre Erklärung einfach und naheliegend. Für die damalige Zeit stellten sie aber eine außerordentliche wissenschaftliche Leistung dar, die den alten peripatetischen Ansichten über das Vakuum den endgültigen Todesstoß versetzten.

Bei Guericke sind der Ausgangspunkt für seine Experimente Überlegungen zum kopernikanischen Weltsystem, dessen Anhänger er war. So warf Guericke u. a. die Frage auf, ob sich die Planeten in einem leeren Raum, also im Vakuum, bewegen oder ob der Raum von einer feinen Materie erfüllt ist. Aufgrund logischer Überlegungen gelangte er zu der Ansicht, daß ersteres zutrifft. Zu ähnlichen Schlüssen waren auch schon andere Gelehrte gelangt. Der entscheidende Fortschritt durch Guericke besteht darin, daß er versuchte, die Existenz eines Vakuums unter irdischen Bedingungen *experimentell* nachzuweisen, denn „Versuchen ist mehr Glaubwürdigkeit beizumessen als der Unwissenheit, die vorurteilsvoll mit Hirngespinnsten den Naturerscheinungen entgegenzutreten pflegt“.

Bei der Konstruktion der Geräte und Apparate kam Guericke seine fundierte Ausbildung als Ingenieur sehr zugute, wobei er an die Genauigkeit und an das Geschick der Handwerker hohe Anforderungen stellte. Zunächst entwickelte er die lange bekannte *Fewerspritze* (Abb. 2.5.5./1) zur Luftpumpe (Abb. 2.5.5./2) weiter und konnte damit die Existenz eines Vakuums nachweisen (2.5.5.) und das Verhalten von Körpern im *Leeren* untersuchen. Von der Fragestellung ausgehend, was *Luft* eigentlich sei, gelangte Guericke dann zur Untersuchung des Luftdrucks, dessen Wirkungen er mit eindrucksvollen Experimenten — auch öffentlich — demonstrierte (2.5.7. und 2.5.9.). Man muß hierbei besonders darauf verweisen, daß er seine Experimente bereits als „gezielte Fragen an die Natur“ einsetzte.

Guerickes Erfindung der Luftpumpe bildete den Ausgangspunkt für die spätere Entwicklung der Vakuumtechnik und ist ein herausragendes Beispiel für frühzeitige Leistungen bei der gezielten Entwicklung physikalischer Geräte.

Kaum ein halbes Jahrhundert nach Guericke's Veröffentlichung der „*Neuen Magdeburgischen Versuche über den leeren Raum*“ wurden die ersten Maschinen gebaut, bei denen die Wirkung des Luftdrucks Anwendung fand, die *atmosphärischen Dampfmaschinen* (2.7.3.).

## 2.5.1. Historische Experimente aus der „Pneumatika“ von Philon und Heron

Breiten Raum nehmen in der „*Pneumatika*“ von Heron Heber verschiedenster Art ein. Besonders interessant ist der sogenannte *Kapselheber*, ein selbstanlaufender Heber, durch den sich ein Gefäß *vollständig* entleert, nachdem ein bestimmtes vorgegebenes Flüssigkeitsvolumen eingefüllt wurde. Da der Kapselheber bereits von dem früher als Heron lebenden Philon beschrieben wurde, soll dessen Darstellung zitiert werden (Abb. 2.5.1./1): „Es sei das Gefäß a b g unten in der Mitte bei g durchbohrt. Durch das Loch setze man eine Röhre ein, welche genau in das Loch des Gefäßes paßt. Diese sei g d, welche fast bis zum oberen Rande a b gerade emporsteigt. Diese sei umschlossen von einer anderen (oben verschlossenen) Röhre e t k, die an dem Gefäß befestigt ist, jedoch mit der



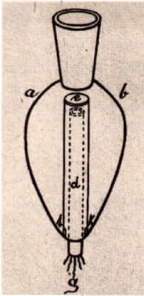


Abb. 2.5.1./1  
Philon's Kapselheber  
(Darstellung aus dem Mittelalter)

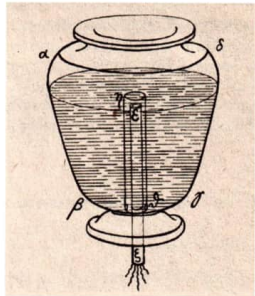


Abb. 2.5.1./2  
Kapselheber nach Heron  
(Darstellung aus dem Mittelalter)

Einschränkung, daß bei t und k Löcher freibleiben und eben hier Wasser eintreten kann. welches in das Gefäß gegossen wird. Dieses steigt allmählich von k und t nach e. Ist es bei e angelangt, so wird es durch g d nach unten in einen Behälter fließen“, bis das gesamte Gefäß entleert ist. Die Heronsche Anordnung (Abb. 2.5.1./2) ist analog.

Die Wirkungsweise der Heber wird durch Heron folgendermaßen erklärt: Saugt man mit dem Munde die Luft aus einem Gefäß oder einer Röhre, so bilden sich zwischen den Molekülen größere Zwischenräume „als natürlich ist“. Um den „natürlichen Zustand“ wieder herzustellen, dringt deshalb bei einem Heber sofort Flüssigkeit nach. Das weitere Ausfließen ist darauf zurückzuführen, daß die Flüssigkeit im längeren Schenkel eines Hebers schwerer ist als im kürzeren und diese „überwältigt und mit sich zieht“. Bei der Kompression von Luft rücken die Luftmoleküle näher aneinander und nehmen, wenn die Kraft aufhört, wegen der ihnen eigenen Spannkraft die ursprünglichen Abstände wieder ein bzw. suchen den alten Zustand wieder herzustellen.

Eine interessante, auf Kompression, Druckausgleich und Heberprinzip beruhende Anordnung ist Herons *Weinautomat*, der Wasser in Wein „verwandelt“ (Abb. 2.5.1./3): Das Gefäß  $\alpha\zeta$  ist mit Wein gefüllt, das Gefäß  $\gamma\delta$  ist leer. Beide Gefäße sind oben luftdicht verschlossen; im linken Gefäß ist ein Trichter  $\tau\nu$  eingesetzt. Das „Innenleben“ der Gefäße und deren Verbindung miteinander sind dem Beobachter verborgen. „Wenn

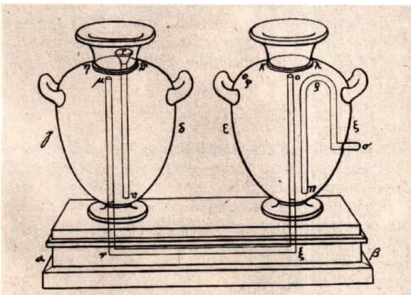


Abb. 2.5.1./3  
Heron's Weinautomat  
(Darstellung aus dem Mittelalter)

wir nun durch den Trichter Wasser in das Gefäß  $\gamma\delta$  gießen, so ist die Folge, daß die darin enthaltene Luft hinausgedrängt wird und durch die Röhre  $\mu\nu\xi\sigma$  in das Gefäß  $\epsilon\zeta$  strömt. Sobald die Luft hinübergeht, treibt sie den im Gefäß  $\epsilon\zeta$  enthaltenen Wein hinaus. Das wiederholt sich, so oft wir Wasser eingießen. Es ist augenscheinlich, daß die verdrängte Luft gleiches Volumen wie das eingegossene Wasser hat und eine diesem entsprechende Quantität Wein zum Ausfluß bringt. Auch wenn kein gekrümmter Heber sondern bloß ein offener Hahn bei  $\sigma$  angebracht sein sollte, kann das Resultat dasselbe sein."

## 2.5.2. Schalexperimente zu den Apparaten von Philon und Heron

### *Zu Experiment 1*

1. Durchsichtige Plastflasche (etwa 1000 ml)
2. Reagenzglas
3. Stopfen, durchbohrt, in die Plastflasche passend
4. Glasrohr (etwa 200 mm lang; 9 mm  $\varnothing$ )
5. Glastrog
6. Becherglas (400 ml)

### *Zu Experiment 2*

7. 2 durchsichtige Plastflaschen (je etwa 1000 ml)
8. 5 Stopfen, davon 4 durchbohrt
9. Glasrohr (etwa 1000 mm lang; 9 mm  $\varnothing$ )
10. Plasteschlauch (etwa 120 mm lang; 8 mm Innendurchmesser)
11. Glastrichter
12. 2 Bechergläser (400 ml)
13. Alleskleber

### *Methodische Hinweise*

1. Das Experiment 1 eignet sich besonders als Überraschungsexperiment. Zur Erklärung des Vorganges müssen neben Kenntnissen über den Luftdruck auch Kenntnisse über den Teilchenaufbau von Flüssigkeiten und über die Gewichtskraft vorhanden sein.
2. Mit dem Experiment 2 läßt sich das komplexe Zusammenwirken physikalischer Erscheinungen, wie die Verdrängung von Körpern, der Druckausgleich und der Gleichgewichtszustand, demonstrieren. Es kann zur Problemstellung und zur Festigung eingesetzt werden.

### *Herstellung des Kapselhebers*

Aus der durchsichtigen Plastflasche schneidet man den Boden heraus. Der durchbohrte Stopfen wird, wie Abbildung 2.5.2./1 zeigt, mit dem Messer eingekerbt. Anschließend schiebt man den Stopfen über das Glasrohr. Man achte darauf, daß der Teil des Glasrohres, welcher sich innerhalb der Plastflasche befindet, etwa 5 mm kürzer als die Länge des Reagenzglases ist. Danach verschließt man die Flaschenöffnung mit dem vorbereiteten Stopfen. Mit Stativmaterial wird dann die Flasche lotrecht aufgestellt, so daß sich der Stopfen unten befindet. Zuletzt stülpt man das Reagenzglas über das Glasrohr und stellt den Glastrog unter den Ausfluß.

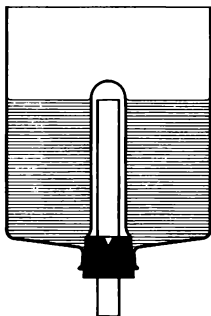


Abb. 2.5.2./1  
Kapselheber

### *Experiment 1: Kapselheber*

Die Anordnung wird zunächst bis dicht unter die Oberkante des Glasrohres mit Wasser gefüllt. Das Wasser läuft nicht aus. Dann gießt man weiteres Wasser in die Plastflasche. Das Wasser beginnt auszufließen und bewirkt ein völliges Entleeren der Flasche.

### *Wirkungsweise des Kapselhebers*

Zur Erklärung der Wirkungsweise des Kapselhebers müssen mehrere Gesetzmäßigkeiten herangezogen werden. Von besonderer Bedeutung sind die leichte Verschiebbarkeit der Flüssigkeitsmoleküle und die Adhäsionskräfte zwischen den Molekülen sowie die Gewichtskraft. Eine mögliche Erklärung ist die folgende: Erst nachdem der Flüssigkeitsstand die obere Kante des Glasrohres erreicht hat, kann die Flüssigkeit auslaufen. Infolge des geringen Durchmessers füllt sie den gesamten Querschnitt des Glasrohres aus. Da infolge der Abmessungen des Glasrohres die Länge der Flüssigkeitssäule im Rohr immer größer als die Differenz der Flüssigkeitssäulen von Plastflasche und Reagenzglas ist, ist der Druck im oberen Teil des Reagenzglases kleiner als der Luftdruck und bewirkt dadurch ein weiteres Ansaugen von Wasser aus der Plastflasche.

### *Herstellung des Weinautomaten*

Zuerst werden alle Glasrohre entsprechend der Länge der verwendeten Plastflaschen zugeschnitten und drei über der Gasflamme gebogen. Die gebogenen Glasrohre sollen dabei bis etwa 40 mm unterhalb der Öffnung der Plastflaschen reichen (Abb. 2.5.2./2). Danach versieht man die durchbohrten Stopfen mit den jeweiligen Glasrohren. Anschließend bohrt man entsprechend der Größe des Stopfendurchmessers in die eine Flasche eine und in die andere Flasche zwei Bohrungen in Bodennähe. Jetzt werden alle Öffnungen mit den vorbereiteten Stopfen verschlossen, und mittels Schlauch wird die Verbindung zwischen beiden Flaschen hergestellt. Ein kurzes Schlauchstück verwendet man als Zwischenstück für das Aufsetzen des Trichters. Sind die Flaschen sehr dünnwandig, sollte man alle unteren Stopfen mit Alleskleber in die Öffnungen einkleben.

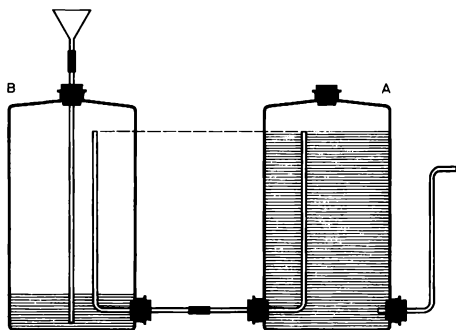


Abb. 2.5.2./2  
Weinautomat

### Experiment 2: Weinautomat

Mit Stativmaterial baut man die gefertigte Anordnung erhöht auf, so daß unter die Ausflußöffnung ein Becherglas gestellt werden kann. Man hält das Ausflußrohr der Flasche A zu, öffnet den oberen Stopfen der Flasche A und füllt so lange gefärbtes Wasser ein, bis es in die Flasche B eindringt und dort der Flüssigkeitsspiegel etwa 20 mm über dem unteren Ende des Trichterrohres steht. Anschließend verschließt man die Flasche A wieder und gibt die Öffnung des Ausflußrohres frei. Hierbei erfolgt ein geringes Auslaufen des Wassers, bis sich der Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

Jetzt stellt man ein Becherglas unter die Öffnung des Ausflußrohres. Das zweite Becherglas füllt man bis zur Hälfte mit Leitungswasser und gießt es in den Trichter der Flasche B. Im gleichen Augenblick beobachtet man das Auslaufen des gefärbten Wassers aus der Flasche A. Durch Vergleiche stellt man fest, daß stets so viel gefärbtes Wasser ausfließt, wie Leitungswasser zugeführt wird.

### Wirkungsweise des Weinautomaten

Die Anordnung arbeitet nach dem Prinzip des Druckausgleiches. Durch Einfüllen des Wassers in die Flasche B erhöht sich der Druck der eingeschlossenen Luft über den Flüssigkeitsoberflächen in den beiden Flaschen. Dieser erhöhte Druck bewirkt ein Verdrängen der Flüssigkeit aus der Flasche A. Das Wasser läuft so lange aus, bis sich in Flasche A wieder der Anfangsdruck eingestellt hat. Da die Größe des Druckunterschiedes durch das Volumen des eingegossenen Wasser hervorgerufen wird, muß das gleiche Volumen wieder ausfließen.

### Bemerkungen

1. Man achte bei allen Verbindungen und Verschlüssen darauf, daß diese völlig dicht sind.
2. Das Ausflußrohr beim Weinautomat darf nicht nach unten gebogen sein, da sonst Wasser aus der Flasche A herausgesaugt werden könnte.

### 2.5.3. Historische Experimente Torricellis zum Luftdruck

Torricellis Grundkonzeption war ebenso einfach wie genial: Wie verhält sich eine Flüssigkeitssäule, die zunächst eine einseitig verschlossene Röhre vollständig ausfüllt, wenn man die Röhre mit der Öffnung nach unten in ein mit der gleichen Flüssigkeit gefülltes Gefäß setzt? Bleibt die Röhre vollständig oder teilweise gefüllt oder entleert sie sich?

Da das Hantieren mit einer 10 m langen wassergefüllten Röhre große Schwierigkeiten bot und da Torricelli annahm, daß auch für andere Flüssigkeiten analoge Ergebnisse zu erwarten waren, benutzte er Quecksilber, dessen Dichte rund 13,6mal so groß wie die von Wasser ist, so daß eine Röhre von etwa 1 m Länge ausreichen mußte.

Eine Röhre aus Glas von etwa 2 Ellen Länge wurde mit Quecksilber gefüllt, mit dem Finger verschlossen, umgekehrt und in einen mit Quecksilber gefüllten Napf getaucht (Abb. 2.5.3./1. links). Gab man die Öffnung frei, so sank die Quecksilbersäule, bis sie bei etwa  $1\frac{1}{3}$  Ellen Höhe stehenblieb. Dieses Ergebnis entsprach Torricellis Erwartungen: die vermutete Proportion  $13,6:1 = 18:1\frac{1}{3}$  war zutreffend.

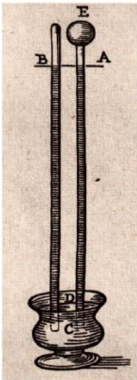


Abb. 2.5.3./1  
Torricellisches Grundexperiment

Das Experiment warf weitere Fragen auf: Warum war das Quecksilber bis auf diese Höhe herabgesunken? Hatte der „*horror vacui*“ eine Grenze? Was befand sich über der Quecksilbersäule? Etwa ein leerer Raum, also ein Vakuum? Oder war die Annahme eines „*horror vacui*“ falsch, und das vollständige Absinken der Quecksilbersäule wurde durch irgendwelche „inneren Kräfte“ verhindert?

Alle Fragen und Probleme löste Torricelli auf der Basis einer einzigen neuen Annahme: Die Erde ist von einer Lufthülle umgeben, deren Gewicht die Ursache für die bisher dem „*horror vacui*“ zugeschriebenen Erscheinungen ist. Er schrieb: „Auf der Oberfläche der Flüssigkeit, die sich im Napf befindet, lastet die Höhe von 50 Meilen Luft; was sollte also daran verwunderlich sein, daß das Quecksilber in dem Glas CE — wohin es weder Zuneigung noch Abneigung hat, sich so hoch erhebt, bis es im Gleichgewicht mit dem Gewicht der äußeren Luft ist? Diese Überlegung wurde

bestätigt durch die gleichzeitig mit dem Rohr A und dem Rohr B durchgeführten Experimente, in denen das Quecksilber sich stets im gleichen Horizont AB einstellte, ein fast sicheres Zeichen dafür, daß die Kraft nicht im Inneren zu suchen sei; denn eine größere Kraft hätte das Gefäß AE haben müssen, in dem sich mehr des verdünnten und anziehenden Etwas befand; und sie müßte viel kräftiger sein wegen der stärkeren Verdünnung als die des sehr kleinen Raumes B."

Torricellis Erklärung entspricht damit, abgesehen von der Ausdrucksform, den heutigen Ansichten, daß der Luftdruck dem Schweredruck der Flüssigkeitssäule das Gleichgewicht hält und daß sich über der Flüssigkeitssäule im Rohr ein Vakuum befindet.

Letzteres weist Torricelli durch ein weiteres Experiment nach: Wasser, das man an die Öffnung der im Quecksilbernapf stehenden Röhre brachte, stieg nach oben und füllte das Vakuum aus.

Dem Italiener ging es aber nicht nur um den Nachweis für die Existenz eines Vakuums. Vielmehr wollte er zeigen, daß sich die Länge der Quecksilbersäule ändert, da die Luft „bald schwerer und dichter, bald leichter und dünner“ ist.

Tatsächlich beobachtete er auch Änderungen der Länge der Quecksilbersäule, die aber offensichtlich durch „Wärme und Kälte“ verursacht wurden.



## 2.5.4. Schalexperiment mit der Torricellischen Röhre

1. Torricellische Röhre
2. Torricellische Röhre mit Kugel ③
3. Vertikalmaßstab
4. Quecksilberwanne
5. Quecksilberbrett
6. Quecksilbertropfer
7. Quecksilber
8. Pipette
9. Gummischlauchstück
10. Glasrohrstück, gebogen

### Methodische Hinweise

1. Entsprechend der Klassenstufe kann auf den Einfluß des Dampfdrucks des Quecksilbers bzw. des Wassers auf die Höhe der Flüssigkeitssäule hingewiesen werden (Terminus „Torricellische Leere“).
2. Das Teilexperiment 1 wird als Gleichgewichtszustand erklärt: Der Luftdruck (Schweredruck der Luft) hält dem Schweredruck der Quecksilbersäule das Gleichgewicht. Die Kugelerweiterung ist ohne Einfluß.

### Teilexperiment 1

Die beiden Röhren werden unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen nacheinander mit Quecksilber gefüllt, mit dem Finger verschlossen, umgekehrt und in die mit Quecksilber gefüllte Wanne gesetzt. Dann wird die Öffnung freigegeben und die Röhre an einem Stativ befestigt. Man beginnt mit der einfachen Röhre. In beiden Röhren stellt sich das gleiche Flüssigkeitsniveau ein (Abb. 2.5.3./1).

*Teilexperiment 2*

Zum Nachweis dafür, daß der Raum über der Quecksilbersäule praktisch leer ist, läßt man von der Öffnung der Röhren her gefärbtes Wasser emporsteigen. Dazu benutzt man eine Pipette, die durch das Gummischlauchstück und Glasrohrstück verlängert wurde.

Das Wasser füllt weitgehend den Raum über der Quecksilbersäule.

*Bemerkungen*

1. Für die Herstellung der Torricellischen Röhre mit Kugel benötigt man die Hilfe eines Glasbläfers. Der Kugeldurchmesser sollte etwa 2 cm betragen. Auf entsprechende Wanddicke ist zu achten.
2. Das benutzte Quecksilber muß sauber (fettfrei) und trocken, also ohne evtl. Wasserrückstände von vorherigen Experimenten sein.
3. Beide Röhren sind vor dem Experiment innen zu reinigen, und zwar mit Soda-lösung, destilliertem Wasser, Salpetersäure (Vorsicht!), destilliertem Wasser und Al-kohol (in dieser Abfolge), und gut zu trocknen.

## 2.5.5. Historische Experimente Guerickes zur Erzeugung und zum Nachweis eines Vakuums

Erste Experimente Guerickes, ein zuvor vollständig mit Wasser gefülltes Holzfaß leerzupumpen, um so nach seiner Meinung im Faß ein Vakuum zu erhalten, waren fehlgeschlagen. Wie er feststellte, war das Holz porös und damit luftdurchlässig.



Abb. 2.5.5./1  
Guerickes Experiment  
zum Auspumpen  
einer Kupferkugel

„Deshalb schien mir für mein Vorhaben eine Kupferhohlkugel A am geeignetesten. Solch eine Kugel ließ ich anfertigen und an ihrem oberen Ende mit einem messingenen Hahnstutzen B versehen; am anderen Ende ließ ich die Spritze (Pumpe) ansetzen. Wie bei dem früheren Versuch das Wasser, bemühte ich mich jetzt, die Luft herauszupumpen (Abb. 2.5.5./1). Anfänglich ließ sich der Stempel leicht bewegen, doch allmählich wurde es schwerer und immer schwerer, bis kaum noch zwei vierschrittige Männer

imstande waren, ihn herauszuziehen. Indes sie aber mit solcher Hinundherbewegung des Stempels fortfuhren, bis sie fast alle Luft schon ausgepumpt zu haben meinten, ward unversehens die kupferne Kugel mit lautem Knall und zu allgemeinem Schrecken so zusammengedrückt, wie man ein Leintuch in der Hand zerknüllt oder als wäre die Kugel von der Spitze eines Turms jählings herabgeschleudert worden. Die Schuld daran schrieb ich der Nachlässigkeit des Handwerkers zu, der vermutlich der Kugel keine hinreichend genaue Rundung gegeben hatte.“

Mit einer anderen „vollkommen runden Kugel“, deren Wanddicke offenbar größer war, gelang dann die Herstellung einer *Leere*, was Guericke damit begründete, daß aus dem Pumpenventil keine Luft mehr austrat.

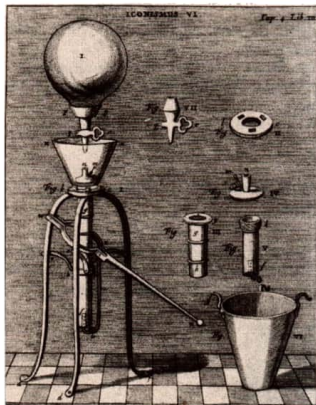


Abb. 2.5.5./2  
Transportable Luftpumpe von Guericke

Dieser „Beweis“ schien Guericke aber noch nicht überzeugend, so daß er weitere Experimente — nunmehr mit einer von ihm konstruierten speziellen Luftpumpe (Abb. 2.5.5./2) — durchführte, wobei er ein als Rezipient bezeichnetes Glasgefäß benutzte, das ausgepumpt wurde. „Ward nun die Öffnung unter Wasser getaucht, so sah man es nach Drehung des Hahns q mit großer Wucht und brodelnd wie siedendes Wasser oder ein aus der Erde hervorbrechender Springquell in das Glas eindringen, das es allmählich bis oben hin füllte, so daß nur ein haselnußgroßer Raum von Wasser frei blieb.“

Es zeugt von der großen Sorgfalt, mit der Guericke experimentierte, daß er sich sehr intensiv mit der Frage beschäftigte, worauf diese Luftblase zurückzuführen ist, und weitere Untersuchungen vornahm. Zwar ließ sich die Restluft durch verschiedene Maßnahmen verringern, aber nicht vollständig beseitigen. Der Hauptgrund lag in dem noch relativ hohen Restdruck, der mit Guericke's Pumpe nicht unterschritten werden konnte.

Daß ein evakuiertes Gefäß nahezu luftleer war, zeigte Guericke noch mit einem anderen Experiment, bei dem er ein zuvor vollständig mit Wasser gefülltes Gefäß zur Hälfte leerpumpte. Wurde das Glas von der Pumpe abgenommen und hin- und



herbewegt oder umgekehrt, so schlug das Wasser „... mit einem Klang an die Innenwandung des Glases an, als bestünde es aus festem Stoff oder aus Stein. Unversehens sprang auch das Glas, ich weiß nicht warum. Es erwies sich als nötig, ein neues, besonders dickes Glasrohr zu benutzen.“ Das Zusammenschlagen von „Teilstücken der Wassersäule“, bzw. des Wassers gegen die Gefäßwandungen bei „kräftigem Auf- und Abspringen des Glases“ führt Guericke richtig darauf zurück, daß keine Luft mehr vorhanden ist, wie „der harte und laute Zusammenprall beweist, der einzig und allein in so einem leergepumpten Glase erzeugt oder hervorgerufen werden kann“.

### 2.5.6. Schulexperimente zur Erzeugung und zum Nachweis eines Vakuums

#### *Zu Experiment 1*

1. Kolbenluftpumpe mit Drei-Wege-Hahn
2. dünnwandige Aluminiumflasche (z. B. Bierdose)
3. Gummistopfen, durchbohrt
4. Glasrohr (etwa 100 mm lang; 9 mm Ø)
5. Vakuumschlauch (etwa 300 mm lang; 8 mm Innendurchmesser)

#### *Zu Experiment 2*

- Gerät 1. und 5., außerdem
6. Glaskugel mit zwei Hähnen
  7. Glastrog

#### *Zu Experiment 3*

8. Wasserhammer

#### *Methodische Hinweise*

1. Das Experiment 1 eignet sich besonders als effektvolle Einführung zur Wirkung des Luftdrucks.
2. Das Experiment 2 zeigt anschaulich, daß der leergepumpte Raum vom Wasser eingenommen werden kann.
3. Der Wasserhammer kann für die Problemstellung eingesetzt werden.

#### *Experiment 1: Auspumpen einer Metallflasche*

Die Öffnung der dünnwandigen Aluminiumflasche wird so ausgearbeitet, daß man diese mit einem Stopfen mit Glasrohr dicht verschließen kann. Zwischen dem Glasrohr und dem Anschluß der Kolbenluftpumpe stellt man die Verbindung mit dem Vakuumschlauch her.

Mit der Kolbenluftpumpe pumpt man die Luft aus der Metallflasche heraus. Man beobachtet schon nach wenigen Kolbenhüben eine starke Deformierung der Metallflasche. Sie wird durch den äußeren Luftdruck hervorgerufen, dessen Verhältnis zum Druck in der Flasche mit jedem Kolbenhub größer wird.

### Experiment 2: Auspumpen einer Glaskugel

Die Glaskugel wird mittels des Vakuumschlauches mit der Kolbenluftpumpe verbunden. Die Hähne werden so reguliert, daß nur der Weg zur Pumpe frei ist. Anschließend wird die Luft aus der Glaskugel gepumpt. Danach verschließt man den Hahn der Glaskugel und trennt die Glaskugel von der Pumpe. Die eine Öffnung der Glaskugel wird in den mit Wasser gefüllten Glastrog getaucht und der Hahn geöffnet. Man beobachtet ein springbrunnenartiges Einfließen des Wassers in die Glaskugel. Der äußere Luftdruck, der auf die Wasseroberfläche wirkt, drückt das Wasser so lange in die Glaskugel, bis der Druckausgleich erreicht ist.

### Experiment 3: Wasserhammer

Man hält den Wasserhammer vertikal — die kugelförmige Erweiterung nach oben — in der Hand und führt eine ruckartige Bewegung nach unten aus. Nach Bruchteilen einer Sekunde hört man einen hellen Ton, als wäre ein Stück Metall in der Röhre herabgefallen (Abb. 2.5.6./I).

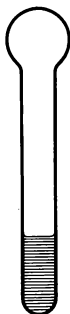


Abb. 2.5.6./I  
Wasserhammer

Durch die Trägheit verbleibt das Wasser während der ruckartigen Bewegung kurze Zeit in der Ausgangsstellung. Dann fällt es nach unten und schlägt durch den fehlenden Luftwiderstand hart auf den Boden des Gefäßes auf.

### 2.5.7. Historische Experimente zum Druck und zur Gewichtskraft der Luft

Unter der langen Überschrift „Einrichtung eines hydraulisch-pneumatischen Gerätes, das nicht nur Gelegenheit zu vielen Entdeckungen bietet, sondern auch im Studierzimmer zur geistigen Erquickung aufgestellt werden kann“ beschreibt Guericke eine Anordnung, mit der sich verschiedene Experimente ausführen lassen, deren logische Weiterführung nicht nur zu einem Wasserbarometer führte, sondern Guericke auch zu klaren Aussagen über den Luftdruck und dessen Ursachen gelangen ließ.

Der Apparat besteht aus zwei übereinanderstehenden kugelförmigen Gefäßen, die durch ein Rohr mit Absperrhahn miteinander verbunden sind, das fast bis zum Boden des unteren Gefäßes reicht, in dem sich stets etwas Wasser befinden soll (Abb. 2.5.7./1). Durch die Kappe des unteren Gefäßes sind weitere, bis zum Boden reichende Röhren mit entsprechenden Absperrhähnen und ein Hahn f ohne Röhre durchgeführt.

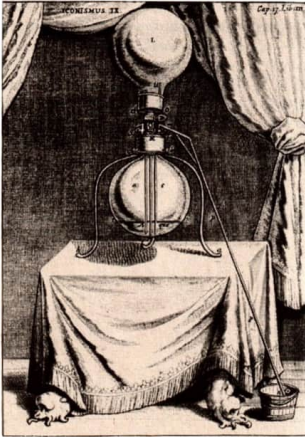


Abb. 2.5.7./1  
Guerickes „Hydro-pneumatischer Apparat“

Zunächst werden über den Anschluß f und bei geöffnetem Hahn d die beiden Gefäße weitgehend luftleer gemacht, anschließend f und d geschlossen. In f läßt sich der Ansatz der Röhre p einsetzen, deren anderes Ende in ein wassergefülltes Gefäß eintaucht. Werden nunmehr die Hähne f und n geöffnet, so steigt „das Wasser in kräftigem Strom in das untere Glas empor“, also entgegen seinem „gewöhnlichen Verhalten“, wie eine Marginalie Guerickes besagt.

Dieses Experiment führte er einigen Freunden und anderen an der Wissenschaft Interessierten vor. „Als nun einige Wißbegierige das Wasser durch die Leitung p p vom Fußboden des Zimmers her so eifertig in das leergepumpte Glas aufsteigen sahen, fragten sie mich, bis zu welcher Höhe sich das Wasser schließlich emporleiten lasse. Da ich dies selbst noch nicht wußte, mir aber auch nicht vorzustellen vermochte, das Glasgefäß würde das Wasser bis zu jeder beliebigen Höhe ansaugen, säumte ich nicht, einen diesbezüglichen Versuch anzustellen.“

Die Rohrleitung wurde verlängert und der Apparat zunächst im ersten, dann im zweiten Stockwerk des Hauses aufgestellt, wobei in beiden Fällen das Wasser bis in diese Höhe emporstieg. Das letzte Stück der aus Blech bestehenden Röhre p p ersetzte Guericke dann durch ein Glasrohr und konnte feststellen, daß eine maximale Steighöhe von etwa 19 Magdeburger Ellen zu verzeichnen war. Wiederholungen führten zum gleichen Ergebnis. Einige Tage später aber „beobachtete ich von einem Tag zum anderen kleine Unterschiede. Bisweilen stand nämlich das Wasser um eine, zwei, drei

oder mehr Handbreit höher, bisweilen um ebensoviel tiefer.“ Dieses Ergebnis ist nach Guericke „auf die Schwere der Luft rings um die Erde, d. h. auf ihren Druck zurückzuführen, der das Wasser zum Eindringen und zur Erfüllung eines jeden sonst stoffleeren Raumes nötigt, und zwar in einem dem Luftdruck entsprechenden Betrag. Fände nämlich das Aufsteigen infolge einer Scheu vor dem Leeren statt, so müßte das Wasser entweder der Leere beliebig hoch und bis ins Unendliche folgen oder ständig den gleichen Höhenstand einnehmen. Die Standhöhe des Wassers in der Röhre wird also aufrechterhalten durch eine Luftsäule, die der Wassersäule das Gleichgewicht hält.“ Das hier beschriebene Experiment entwickelte Guericke zu einem Wasserbarometer weiter. Er benutzte dazu mehrere Messingrohre a b, c d, e f, g h, die luftdicht übereinandergesetzt werden können (Abb. 2.5.7./2). Den Abschluß bildete eine einseitig geschlossene Glasröhre k l. Alle Rohre wurden vor dem Zusammenbau vollständig mit Wasser gefüllt, das Rohr a b tauchte in ein Wassergefäß ein. Werden dann die Hähne k und b geöffnet, „so wird man wahrnehmen, wie das Wasser aus dem Glase absinkt, aber schließlich dort zum Stillstand kommt, wo sein schon genannter Grenzwert liegt, bei etwa 18 bis 19 Ellen.“ Guericke, ein Mann für Effekte, fügte seinem Wasserbarometer noch eine kleine Änderung hinzu: Auf der Wasseroberfläche im Glasrohr schwamm eine kleine Holzfigur, die „mit dem Finger an einer festen Teilung den jeweiligen Luftdruck anzeigt“.

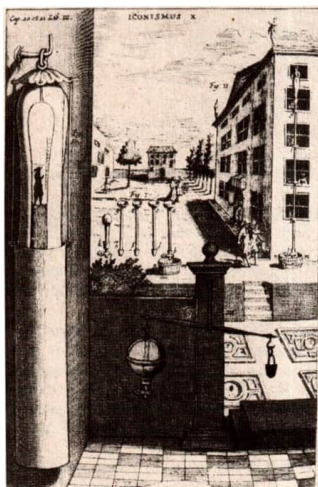


Abb. 2.5.7./2  
Guerickes Experimente  
mit einem Wasserbarometer  
und zur Wägung von Luft

Den Nachweis, daß die Ursache des Luftdrucks das Gewicht der Lufthülle der Erde ist, erbrachte Guericke durch eine Wägung der Luft: „Man hänge ein Glas (L in Abb. 2.5.7./2) an eine Waage und wäge es. Pumpt man es jetzt von aller Luft leer, so wird man bemerken, daß es nunmehr nach Maßgabe seines Fassungs-

vermögens eine oder zwei, usw. Unzen weniger wiegt. Gewährt man dann der Luft wieder Zutritt, so hört man sie nicht nur zischend einströmen, sondern sieht auch das Glas nach und nach sein früheres Gewicht wieder annehmen, was der gewichtigste Beweis für die Schwere der Luft ist.“

## 2.5.8. Schalexperimente zum Druck und zur Gewichtskraft der Luft

### *Zu Experiment 1*

1. Kolbenluftpumpe mit Drei-Wege-Hahn
2. 2 Kurzhalsrundkolben (2 l)
3. Glaskugel mit zwei Hähnen
4. 2 Gummistopfen, durchbohrt (einfach und dreifach)
5. 2 Glasanschlüsse mit Hahn
6. Glastrog
7. Glasrohr (etwa 1,2 m lang; 9 mm Ø)
8. Druckschlauch (etwa 120 mm lang; 8 mm Innendurchmesser)

### *Zu Experiment 2*

9. durchsichtiger Druckschlauch (z. B. Benzinschlauch, etwa 11 m lang)
10. Schlauchklemme
11. große Schüssel (etwa 400 mm Ø)
12. Glasrohr (etwa 30 mm lang, Durchmesser entsprechend dem Druckschlauch)
13. Farbstoff für Wasser

### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment 2 eignet sich zur Erarbeitung des Schweredruckes der Luft. Es kann im Raum durchgeführt werden, wenn dieser mindestens 10 m über der Erdoberfläche liegt.

### *Herstellen der Anordnung für Experiment 1*

Die Anordnung wird nach Abbildung 2.5.8./1 aufgebaut. Das Glasrohr schneidet man in vier Stücke von 150 mm (a), 250 mm (b), 300 mm (c) und 500 mm (d) Länge und biegt sie entsprechend der Abbildung über der Gasflamme (außer c). Anschließend werden die Glasrohre in die Stopfen eingeführt und mittels kurzer Stücke von Druckschlauch miteinander (einschließlich der Hähne) verbunden. Nachdem der untere Kurzhalsrundkolben etwa zu  $\frac{1}{5}$  mit Wasser gefüllt wurde, setzt man beide Rundkolben auf die Stopfen und bringt sie mit Hilfe von Stativmaterial in eine höhere Lage gegenüber dem Glastrog. Zuletzt füllt man den Glastrog zur Hälfte mit Wasser.

### *Experiment 1: Heber*

Zunächst wird die Glaskugel mit den zwei Hähnen — wie in 2.5.6. beschrieben — ausgepumpt und mit einem kurzen Schlauchstück an die experimentelle Anordnung angeschlossen. Dann wird nacheinander der Hahn  $H_3$  geschlossen, und die Hähne  $H_2$

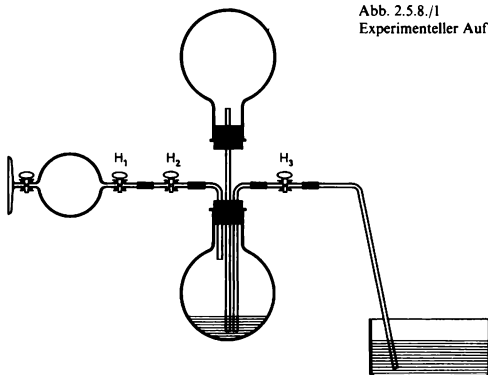


Abb. 2.5.8./1  
Experimenteller Aufbau des Heberröhren

sowie  $H_1$  werden geöffnet. Dabei gelangt ein Teil der eingeschlossenen Luft aus beiden Rundkolben, die durch das mittlere Glasrohr miteinander verbunden sind, in die Glaskugel. Dies kann man an der entstehenden Blasenbildung im Wasser des unteren Rundkolbens beobachten. Das Leerpumpen mit der Glaskugel muß mehrmals wiederholt werden. Hierzu wird der Hahn  $H_2$  geschlossen und die Glaskugel wieder mit der Pumpe verbunden. Läßt die Blasenbildung im unteren Rundkolben merklich nach, stellt man das Auspumpen der Luft ein und schließt den Hahn  $H_2$ . Öffnet man jetzt den Hahn  $H_3$ , so steigt das Wasser aus dem Glastrog durch das Glasrohr in den unteren Rundkolben.

Die Ursache für diese Erscheinung ist die gleiche, wie in 2.5.6. beschrieben.

### Vorbereiten des Experiments 2

In die Schüssel füllt man gefärbtes, abgekochtes Wasser. Vor dem Füllen des Schlauches schließt man diesen an eine Wasserleitung und läßt Wasser durchströmen, damit er innen benetzt wird. Danach läßt man das Wasser herauslaufen. Der Schlauch wird dann langsam, ihn spiralförmig legend, in die Schüssel eingetaucht und dadurch mit Wasser gefüllt. Hierbei hält man den Teil des Schlauches, welcher noch nicht eingetaucht wurde, oberhalb des Wasserspiegels, damit die im Schlauch befindliche Luft entweichen kann. Es empfiehlt sich, während des Eintauchens ständig gegen den Schlauch zu klopfen, damit eventuelle Blasen im Schlauch sich lösen und nach oben steigen. Anschließend wird das Glasrohr, welches über einer Gasflamme einseitig zu einer Spitze von etwa 4 mm Durchmesser ausgezogen wurde, ins Wasser getaucht, gefüllt und innerhalb des Wassers mit dem einen Ende des Schlauches verbunden. Das andere Ende des Schlauches knickt man etwa 50 mm um und verschließt es gut mit der Schlauchklemme.

### Experiment 2: Wasserbarometer

Man stellt die Schüssel mit dem Schlauch an das geöffnete Fenster des Raumes und befestigt das mit der Schlauchklemme verschlossene Ende des Schlauches senkrecht an

einem aufgestellten Stativstab. Dann nimmt man das untere Ende des Schlauches, die Glasöffnung nach unten haltend, heraus und läßt den Schlauch langsam aus dem Fenster. Hat der Schlauch einen Höhenunterschied von etwa 10 m erreicht, beobachtet man am verschlossenen Schlauchende ein Absinken des Wasserstandes bis auf ein bestimmtes Niveau. Dabei fließt ein Teil des Wassers aus dem offenen Ende des Schlauches ins Freie, bis der Schweredruck der Wassersäule gleich dem Luftdruck ist.

### *Bemerkungen*

1. Das Experiment 1 läßt sich vereinfacht durchführen, indem die Pumpe direkt an das Anschlußstück mit dem Hahn  $H_2$  angeschlossen wird. Es muß nur darauf geachtet werden, daß die Pumpe kein Wasser ansaugt.
2. Soll das Experiment 2 über mehrere Tage beobachtet werden, muß man das Ende des Schlauches mit dem Glasrohr in eine mit Wasser gefüllte Schüssel tauchen.

## **2.5.9. Historische Experimente Guericques zu den Wirkungen des Luftdrucks**

Zu den bekanntesten und eindruckvollsten Experimenten Guericques gehören ohne Zweifel die mit den sogenannten Magdeburger Halbkugeln. Sie bestehen aus Kupfer und haben einen Durchmesser von  $\frac{67}{100}$  Magdeburger Ellen (rd. 40 cm). Zur Dichtung

der aufeinander gesetzten Halbkugeln dient ein mit einer Wachs-Terpentin-Lösung getränkter Lederring. Der Schauversuch, mit dem Guericque vorführte, daß die evakuierten Halbkugeln „von 16 Pferden nicht auseinander gerissen werden können“, ist auch insofern bemerkenswert, weil er in diesem Zusammenhang auch eine Berechnung der auf die Halbkugeln wirkenden Kräfte durchführte. Ausgehend von der auf eine bestimmte Fläche wirkenden Gewichtskraft einer Wassersäule, die der Gewichtskraft der Luftsäule das Gleichgewicht hält, und dem Querschnitt der Kugel, findet er, daß „der Luftdruck die eine Halbkugel mit einem Gewicht von 2686 Pfund gegen die andere“ preßt.

Seine Rechnungen überprüfte er durch folgendes Experiment (Abb. 2.5.9./1): „Im Hofraum meines Hauses (ließ ich) einen Pfosten senkrecht in die Erde einrammen, in den oben ein hölzerner Arm eingefügt war. In diesen war ein eiserner Haken K eingelassen, an dem die beiden Halbkugeln nach vorangehender Vereinigung und nach Auspumpen der Luft angehängt werden konnten. Dann wurde eine breite Waagschale M beschafft, die an ihren Ecken mit vier Ketten versehen war, welche an die vier Ringe NN eingehängt wurden. Diese Waagschale wird mit so viel Gewicht belastet, wie zum Auseinanderreißen der Halbkugeln erforderlich ist.“

Ein anderes wichtiges Experiment Guericques zeigt die Abbildung 2.5.9./2, mit dem er ebenfalls die Wirkung des Luftdrucks demonstrierte. Die Apparatur besteht aus einem unten abgeschlossenen Kupferzylinder a von etwa einer Elle Länge (rund 60 cm), in dem ein Kolben R aus Eichenholz gleiten kann, der mit einer Rillendichtung versehen ist, in der sich Leinen oder Werg befindet (Abb. 2.5.9./2). Die Befestigung an dem Gerüst erfolgte so, daß sich der Kolben „in geradliniger Bewegung ohne seitliches Spiel hebt oder senkt, sich aber nicht höher emporziehen läßt als bis zu dem vorspringenden Stück Q. Ist der Stempel mit dem Kolben fast bis zum Boden herunter-

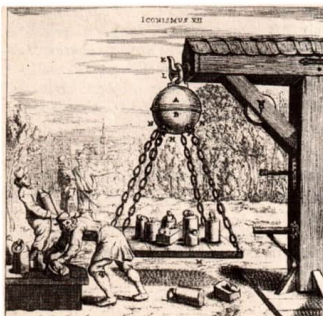


Abb. 2.5.9./1 Experiment Guerickes, zwei evakuierte Halbkugeln auseinanderzureißen

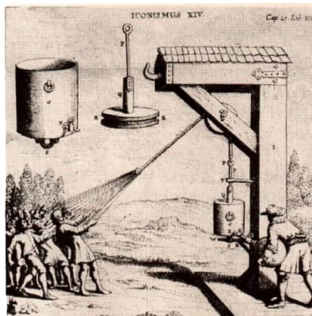


Abb. 2.5.9./2 Demonstration Guerickes zur Wirkung des Luftdrucks

gedrückt, so wird ein Seil über die Rolle herabgelassen und in den Stiel P eingehängt. Der Hahn H wird geschlossen, und nun ergreifen 20 oder mehr Mann das Tau und ziehen nach Kräften daran. Sie werden den Stempel aber nur ungefähr bis zur Hälfte hochziehen vermögen.“ An X wird nun ein evakuierter Kugelrezipient (L in Abb. 2.5.5./2) angeschlossen. Öffnet man die beiden Hähne am Rezipienten und am Zylinder, „so strebt der Stempel jährlings abwärts, und damit wird jegliches Bemühen unserer Arbeit vergeblich. Ich wage daher zu behaupten, daß dieses Glasgefäß L

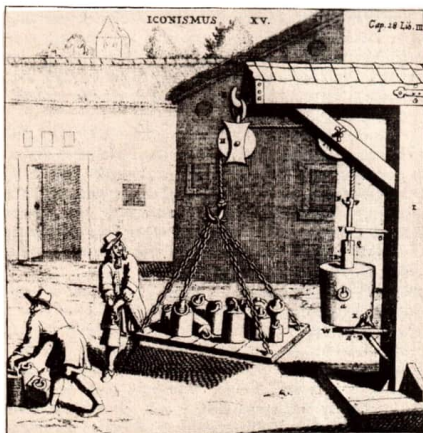


Abb. 2.5.9./3 Experiment Guerickes zu einer atmosphärischen Maschine



30 und mehr Männer an sich zu ziehen vermag. Als Ursache dieses Vorgangs ist der Luftdruck anzusehen, der den Kolben augenblicklich niederdrückt, sobald die im Kessel befindliche Luft abgesogen wird.“

Eine Variante dieses Experimentes zeigt Abbildung 2.5.9./3. An den Hahnstutzen X wird eine einfache Kolbenpumpe (Abb. 2.5.5./1) angeschlossen. Bei ihrer mehrfachen Betätigung wird der Kolben nicht ruckartig nach unten gedrückt, sondern „der Kolben R gleitet im Zylinder sanft und allmählich abwärts, während gleichzeitig die Waagschale emporsteigt“.

Die letzten beiden Anordnungen sind bereits als *atmosphärische Maschinen* anzusehen (→ 2.7.).

## 2.5.10. Schulexperimente zu den Wirkungen des Luftdrucks

### *Zu Experiment 1*

1. Kolbenluftpumpe mit Drei-Wege-Hahn
2. 2 Magdeburger Halbkugeln
3. 10 Körper (je 5 kg)
4. Holzbrett (etwa 450 mm × 350 mm × 20 mm)
5. Seil (etwa 3 m lang)
6. Ramsayfett
7. Vakuumschlauch (etwa 200 mm lang)

### *Zu Experiment 2*

Gerät 1. und 7., außerdem

8. Kolbenprober aus Glas, mit Schlauchanschluß (100 ml)
9. Glaskugel mit zwei Hähnen
10. 2 Rollen
11. Waagschale (etwa 100 mm Durchmesser)
12. 5 Körper (je 100 g)
13. Schnur (etwa 1 m lang; 2 mm Ø)

### *Methodische Hinweise*

1. Das Experiment 1 demonstriert sehr anschaulich die Kraftwirkungen, die durch den äußeren Luftdruck ausgeübt werden. Es hat gegenüber dem Auseinanderziehen der beiden Halbkugeln den Vorteil, daß auf die Gegenkraft nicht eingegangen werden muß.
2. Mit dem Experiment 2 läßt sich zeigen, daß man unter bestimmten Bedingungen mit Hilfe des Luftdrucks mechanische Arbeit verrichten kann.

### *Experiment 1: Hängende Magdeburger Halbkugeln*

Die Magdeburger Halbkugeln werden an einer stabilen Stivanordnung aufgehängt. Zum Auflegen der Körper fertigt man das Brett mit vier Bohrungen an. Das Seil schneidet man in zwei Hälften. Während mit der einen Hälfte das Brett an die untere Halbkugel gehängt wird, nutzt man die andere Hälfte als Auffangvorrichtung (Abb. 2.5.10/1).

Die Berührungsflächen der beiden Halbkugeln werden mit Benzin gesäubert und dann mit Ramsayfett eingestrichen. Nach dem Zusammensetzen pumpt man die Luft aus ihnen heraus. Danach schließt man den Hahn an den Magdeburger Halbkugeln und hängt sie entsprechend der Abbildung auf. Man legt nacheinander — bis zum Auseinanderreißen — die Körper auf das Brett.

Im Experiment betrug nach 20 Kolbenhüben die Masse der aufgelegten Körper 45 kg, um die beiden Halbkugeln voneinander trennen zu können.

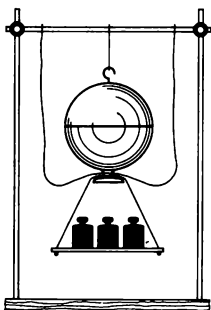


Abb. 2.5.10./1  
Magdeburger Halbkugel am Galgen

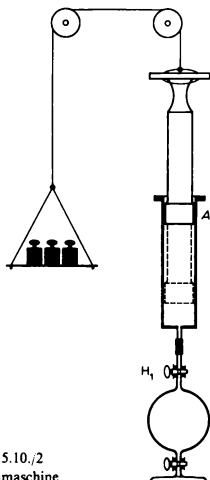


Abb. 2.5.10./2  
Kolbenmaschine

### Experiment 2: Kolbenmaschine

Den Kolbenprober mit Kolben stellt man unter Verwendung von Stativmaterial senkrecht auf. Der Kolben wird mit dünnflüssigem Öl eingerieben und über ein Seil, das man über beide Rollen führt, mit einer Waagschale verbunden (Abb. 2.5.10/2). Man bringt den Kolben in Stellung A und schließt die evakuierte Glaskugel mit Schlauchanschluß an die Öffnung des Kolbenprobers an. Wird der Hahn  $H_1$  der Glaskugel geöffnet, so bewegt sich der Kolben samt Seilzug nach unten. Die auf der Waagschale befindlichen Körper werden dabei angehoben.

### Bemerkung

Die erzielte Wirkung für Experiment 2 hängt von der Qualität des Vakuums, der Größe des Kolbenprobers und der Dichtheit aller Teile ab.

## 2.6. Gesetze des idealen Gases

Durch die Experimente von Guericke und Torricelli wurde bekannt, daß es einen dem Schweredruck in Wasser ähnlichen Luftdruck gibt, der vieles bewirkt, was bisher dem „horror vacui“ der Natur zugeschrieben wurde. Die Frage nach den Ursachen des Luftdruckes und dessen Bedeutung für den Bau von Pumpen erklärt die Vielfalt der auf diesem Gebiet durchgeführten Untersuchungen. Einen ganz wesentlichen Anteil daran hatte Robert Boyle (1627 bis 1691).

Das heute nach ihm benannte Gesetz wurde von Richard Towneley (1629 bis 1705) in Kenntnis Boylescher Meßwerte als Hypothese formuliert. Boyle verifizierte experimentell 1662 diese Hypothese, obwohl er ursprünglich keinen quantitativen Zusammenhang zwischen Volumen und Druck vermutete. Seine Untersuchungen gingen eigentlich in eine andere Richtung: ihn interessierte die Elastizität der Luft (Federkraft) und deren Fähigkeit, einen mechanischen Druck auszuüben. Boyle zeigte dabei (z. T. zusammen mit Robert Hooke (1635 bis 1703)) eine bemerkenswerte und bis dahin noch nicht dagewesene experimentelle Präzision. 17 Jahre nach Boyle veröffentlichte Edmé Mariotte (1620 bis 1684) einen Bericht über Experimente, die ihn zum gleichen Ergebnis führten wie Boyle. Es wird angenommen, daß Mariotte Boyles Ergebnisse kannte.

Ein Jahrhundert später standen die Gesetze der Gase wieder im Blickpunkt. Jetzt war der Zusammenhang zwischen Volumen und Temperaturänderung der Gase Gegenstand der Untersuchung. Die entscheidenden Erkenntnisse gewann Louis Joseph Gay-Lussac (1778 bis 1850), der hervorragend an der Entwicklung der Physik und Chemie beteiligt war.

Das nach ihm benannte Gesetz, welches besagt, daß sich das Volumen eines Gases bei einer Temperaturerhöhung um 1 Kelvin um  $1/273$  vergrößert, hat nicht nur Bedeutung wegen seiner Beschreibung des Verhaltens einer großen Klasse von Stoffen, sondern auch wegen seiner Beziehung zu einem der wichtigsten Begriffe der Thermodynamik, nämlich der absoluten Temperatur. Forschungen in dieser Richtung wurden gefördert durch die Notwendigkeit der Weiterentwicklung der Dampfmaschine mit dem Ziel der Verbesserung ihrer Leistung und ihres Wirkungsgrades.

Interessant ist hier die Historie sowohl wegen des Inhalts als auch wegen der Umstände bei der Ermittlung der Ausdehnungskoeffizienten der Gase. In seinen „Untersuchungen über die Ausdehnung der Gasarten und der Dämpfe durch die Wärme“ schreibt Gay-Lussac 1802: „Mehrere Physiker haben über die Ausdehnung der Gasarten durch Wärme Versuche angestellt. Die Resultate ihrer Untersuchungen weichen aber so weit voneinander ab, daß eine nochmalige Untersuchung zu wünschen ist, ...“ Er erkannte, daß seine Vorgänger nicht auf die „Gegenwart von Wasser in den Apparaten“ geachtet hatten, so daß Werte für den Ausdehnungskoeffizienten zwischen  $0,00392 \text{ K}^{-1}$  und  $0,0594 \text{ K}^{-1}$  erhalten wurden. Über den bedeutendsten seiner Vorgänger schreibt er: „Daß die atmosphärische Luft beim Erwärmen ausgedehnt wird, war zwar lange vor Amontons bekannt; er scheint aber der erste gewesen zu sein, der die Größe dieser Ausdehnung für eine gegebene Temperaturerhöhung zu messen suchte.“ Und weiter: „Wäre Amontons bei seinen Versuchen von einem genauer bestimmten Wärmegrade, als dem, den er den temperierten nennt, ausgegangen (welches jedoch nicht wohl tunlich war), so ließe sich aus seinen Versuchen die Ausdehnbarkeit der atmosphärischen Luft ziemlich nahe bestimmen.“

Aus seinen Messungen erhielt Gay-Lussac [und kurz nach ihm John Dalton (1766 bis 1844) den Wert  $0,00375 \text{ K}^{-1}$ . Dieser Wert wurde von Pierre Louis Dulong (1785 bis 1838) und Alexis-Therese Petit (1791 bis 1838) bestätigt. Erst 1837 fand Frederick

Rudberg (1800 bis 1839), daß dieser Wert um etwa 3% zu groß war. Heinrich Gustav Magnus (1802 bis 1870) und Henri Victor Regnault (1810 bis 1878) fanden schließlich 1842 unabhängig voneinander den Wert  $0,00366 \text{ K}^{-1}$  bis  $0,00367 \text{ K}^{-1}$ . Außerdem erkannten sie, daß sich nicht alle Gase völlig gleich ausdehnen.

Wilhelm Ostwald schreibt zu dieser Entdeckungsgeschichte: „Es wird ersichtlich, wie die endgültige Feststellung einer wichtigen und beständig benutzten Constanten, deren Messung gegenwärtig als Übungsaufgabe von Anfängern ausgeführt zu werden pflegt, wobei ohne Schwierigkeit eine Genauigkeit innerhalb eines Prozents erreicht wird, der wiederholten Anstrengung der hervorragenden Experimentatoren ihrer Zeit bedurft hat, bevor ein definitives Resultat erreicht wurde. Noch auffälliger ist die Tatsache, daß Gay-Lussac und Dalton in demselben Fehler, der ungenügenden Trocknung ihrer Gefäße und Gase, steckengeblieben waren, dessen Nichtberücksichtigung sie an ihren Vorgängern rügten und dessen Bedeutung sie ganz richtig erkannt hatten.“

### 2.6.1. Historisches Experiment zum Boyleschen Gesetz

Die Experimente, deren Ergebnisse zum Boyleschen Gesetz führten, wurden immer mit Quecksilber und kalibrierten Glasröhrchen durchgeführt, wobei eine Experimentieranordnung mit Überdruck (Abb. 2.6.1./1) und eine andere mit Unterdruck (Abb. 2.6.1./2) gegenüber dem normalen Luftdruck arbeitete.

Boyle selbst beschrieb die erste Anlage so:

„Wir nehmen dann ein langes Glasrohr, das durch eine geschickte Hand und mit Hilfe einer Flamme so gekrümmt wurde, daß der umgebogene Teil parallel zum Rest der Röhre war und die Öffnung dieses kürzeren Teiles des Hebers (wenn ich das ganze Instrument so nenne) hermetisch abgeschlossen ist. Die Länge wurde in Zoll eingeteilt (jeder wieder unterteilt in 8 Teile). Ein gerader Papierstreifen, der diese Einteilung enthielt, wurde sorgfältig an das Rohr geklebt. Dann gaben wir soviel Quecksilber hinein wie nötig ist, um den gekrümmten Teil des Hebers zu füllen und trotzdem in beiden Armen die gleiche Höhe der Quecksilbersäule, also annähernd eine horizontale Linie zu erreichen (wir sahen uns vor), die an die Unterkante des Papierstreifens reichte. Dies gelang durch häufiges Neigen der Röhre, so daß die Luft frei aus dem einen Teil in den anderen über das Quecksilber hinweg gelangen konnte (ich sage, wir sahen uns vor). So stand zuletzt die im kürzeren Zylinder eingeschlossene Luft unter dem gleichen Druck wie die übrige Luft. Dies getan, begannen wir, in den längeren Teil des Hebers Quecksilber zu füllen, das durch sein Gewicht in den kürzeren Teil eindrang, wo sich die eingeschlossene Luft vor der geraden Skale befand. Weiteres Quecksilber wurde eingegossen, bis die Luft in dem kürzeren Teil, durch Verdichtung reduziert, nur noch die Hälfte des Raumes einnahm, den es vorher besessen hat (ich sage besessen, nicht gefüllt). Wir richteten unsere Augen auf den längeren Teil des Glases, an dem auch so ein sorgfältig in Zoll und dessen Teile unterteilter Papierstreifen angeklebt war und beobachteten nicht ohne Freude und Genugtuung, daß das Quecksilber im längeren Teil der Röhre 29 Zoll höher stand als im anderen“ (der äußere Luftdruck entsprach ebenfalls einer Quecksilbersäule von 29 Zoll — Anm. d. Übers.). „Da diese Beobachtungen sehr gut mit unserer Hypothese übereinstimmen und diese stützen, lehren wir: ... je größer das Gewicht ist, das sich auf die Luft stützt, desto eindringlicher ist ihr Bestreben nach Ausdehnung ...“

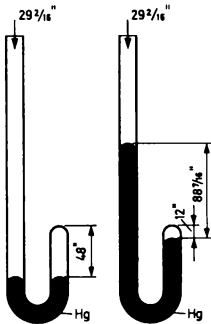


Abb. 2.6.1./1 Anordnung zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Druck und Volumen bei Überdruck nach der Beschreibung von Boyle

Tabelle 1

A	B	C	D	E
48	0	29 2/16	29 2/16	1398
42	4 6/16	33 8/16	33 1/7	1407
36	10 2/16	39 4/16	38 7/8	1413
30	17 15/16	47 1/16	46 3/5	1412
24	29 11/16	58 13/16	58 2/8	1412
21	37 15/16	67 1/16	66 4/7	1408
18	48 12/16	77 14/16	77 2/3	1402
15	63 15/16	93 1/16	93 1/5	1398
12	88 7/16	117 9/16	116 4/8	1398

### Bedeutung der Spalten

- A: Volumen der eingeschlossenen Luft  
 B: Druck auf die eingeschlossene Luft (bedingt durch die Quecksilbersäule)  
 C: Gesamtdruck auf eingeschlossene Luft (einschl. äußerer Luftdruck von 29 2/16" Quecksilbersäule)  
 D: berechneter Wert des Gesamtdruckes der eingeschlossenen Luft unter der Annahme des reziproken Verhaltens von Druck und Volumen  
 E: Produkt von Druck und Volumen (original nicht vorhanden)

Tabelle 2

A	B	C	D	E
1	0	29 3/4	29 3/4	29,75
3	20 2/8	9 4/8	9 15/12	28,3
6	24 7/8	4 7/8	4 23/24	29,25
9	26 3/8	3 3/8	3 11/36	30,38
12	27 1/8	2 5/8	2 23/48	31,5
16	27 6/8	2	1 55/64	32
20	28	1 6/8	1 9/80	35
24	28 2/8	1 4/8	1 23/96	36
28	28 3/8	1 3/8	1 1/16	38,5

### Bedeutung der Spalten

- A: Volumen der eingeschlossenen Luft  
 B: Unterdruck der eingeschlossenen Luft  
 C: Gesamtdruck der eingeschlossenen Luft  
 D: Unter der Voraussetzung der umgekehrten Proportionalität zwischen Druck und Volumen berechneter Gesamtdruck der eingeschlossenen Luft  
 E: Produkt von Druck und Volumen (nicht original)

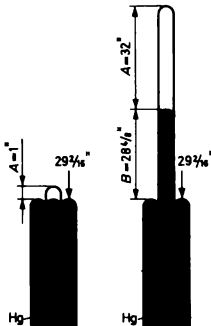


Abb. 2.6.1./2 Anordnung zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Druck und Volumen bei Unterdruck nach der Beschreibung von Boyle

Später erhielt er eine viel längere Apparatur, zu deren Bedienung 2 Personen erforderlich waren. Als er mehr und mehr Quecksilber in den längeren Arm goß und sich das Volumen im kürzeren Arm verringerte, schlußfolgerte er:

„Es ist evident, daß gewöhnliche Luft, die auf die Hälfte zusammengedrückt wird, ungefähr eine doppelt so große Federkraft erhält. Wenn man diese komprimierte Luft weiter unter Druck setzt, und zwar in die Hälfte des engen Raumes, ergibt sich daraus eine Federkraft, die doppelt so groß ist wie vorher und folgerichtig 4mal so groß wie die von gewöhnlicher Luft. Und es gibt keinen Zweifel, daß wir, wenn wir mit einer größeren Menge Quecksilber und einem sehr kräftigen Rohr versehen gewesen wären, durch eine weitere Kompression der eingeschlossenen Luft ein Gegengewicht zum Druck eines viel größeren und schwereren Quecksilberzylinders hätten schaffen können. Noch weiß wahrscheinlich niemand, wie nahe man an die unendliche Kompression der Luft herankommt, wenn nur die Druckkraft hinreichend groß ist!“

In Tabelle 1 sind in den Spalten A bis D die von Boyle gemessenen und berechneten Werte erfaßt, wobei hier aus Platzgründen nur jeder 3. Wert aufgeschrieben ist. Daraus ergibt sich zufällig ein Gang der Daten in Spalte E, der bei Berücksichtigung aller Ergebnisse nicht vorhanden ist. Alle Zahlenangaben dieser Spalten sind in Zoll angegeben. In den Spalten A und B befinden sich die Meßergebnisse, in Spalte C der Gesamtdruck auf die eingeschlossene Luft, und Spalte D enthält den Druck der eingeschlossenen Luft, den man berechnet, wenn man von  $p \cdot V = \text{konst.}$  ausgeht. Die Spalte E existiert bei Boyle nicht, sie stellt das Produkt der Werte aus den Spalten A und C dar. Die sehr gute Übereinstimmung dieser Ergebnisse mit dem angenommenen Gesetz ist um so erstaunlicher, als Boyle bei seinen Experimenten keine Vorsichtsmaßregeln traf, um Temperatureinflüsse auch nur zu beachten.



## 2.6.2. Schulexperiment zum Boyle'schen Gesetz

### *Zu Variante a*

1. Gerät zur Herleitung des Boyle'schen Gesetzes
2. Quecksilber, Quecksilbertropfer, Quecksilberbrett, Auffanggefäß für Quecksilber, Trichter zum Zurückgießen des Quecksilbers
3. Barometer

### *Zu Variante b*

- Geräte 1. und 3., außerdem
4. angefärbtes Wasser

### *Methodische Hinweise*

1. Die experimentelle Anordnung ist einfach und übersichtlich. Die Genauigkeit entspricht den schulischen Ansprüchen. In der letzten Spalte der Tabelle ist das Produkt  $p \cdot l$  eingetragen. Bei konstantem Rohrquerschnitt kann jedoch exakt auf  $p \cdot V$  geschlossen werden.
2. Der funktionale Zusammenhang zwischen Druck und Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge ist wohl das Wesentliche dieses Experiments, weshalb ein  $p$ - $V$ -Diagramm empfohlen wird. Aus historischer Sicht gibt es sicher auch die erreichte Genauigkeit wieder.

### Variante a: Messung mit Quecksilber

Das Experiment wird über dem Quecksilberbrett durchgeführt. Für einen sicheren Stand des Gerätes zur Herleitung des Boyle'schen Gesetzes ist zu sorgen, am besten mit Stativmaterial und einer Tischklemme. Der untere Hahn, unter dem das Quecksilberauffanggefäß steht, ist geschlossen, der obere Hahn zunächst geöffnet. Beide Hähne müssen sehr gut abgedichtet sein. Dann wird soviel Quecksilber eingefüllt, bis es in beiden Schenkeln gerade an der Nullmarke der Skale steht. Jetzt wird der obere Hahn geschlossen, in beiden Schenkeln herrscht der äußere Luftdruck. Durch portionsweises Nachgießen von Quecksilber wird der Druck auf die eingeschlossene Luft stufenweise vergrößert und damit ihr Volumen kleiner.

Gemessen werden die relativen Höhen  $h$  der Quecksilbersäule als Maß für den

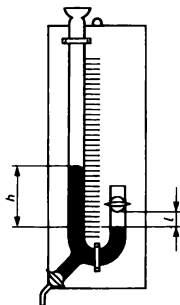


Abb. 2.6.2./1  
Experimentelle Anordnung zu Variante a

Abhängigkeit der Länge der Luftsäule vom Gesamtdruck  
(äußerer Luftdruck  $p_0 = 1016 \text{ hPa}$ )

Quecksilbersäule Höhe $h$ Schweredruck $p_1$		Gesamtdruck $p = p_0 + p_1$	Länge $l$ der eingeschlossenen Luftsäule	$p \cdot l$
in mm	in hPa	in hPa	in mm	in hPa · mm
0	0	1016	240	$2,44 \cdot 10^5$
25,5	34,0	1050	231,5	$2,43 \cdot 10^5$
82	109,3	1125,3	215,5	$2,43 \cdot 10^5$
142	189,3	1205,3	200,5	$2,42 \cdot 10^5$
183	244	1260	192	$2,42 \cdot 10^5$
216	288	1304	185	$2,41 \cdot 10^5$
274	365,3	1381,3	174	$2,40 \cdot 10^5$
312,5	416,7	1432,7	167,5	$2,40 \cdot 10^5$
398,5	531,3	1547,3	154	$2,38 \cdot 10^5$
452	602,7	1618,7	147	$2,38 \cdot 10^5$
489	652	1668	143	$2,39 \cdot 10^5$

Schweredruck des Quecksilbers, die Längen  $l$  der eingeschlossenen Luftsäule als Maß für deren Volumen sowie der äußere Luftdruck  $p_0$  (Abb. 2.6.2./1). Berücksichtigt man, daß die Höhe  $h$  dem Volumen  $V$  proportional ist, so ergibt sich

$$p \cdot V = \text{konstant}$$

oder

$$p \sim \frac{1}{V}.$$

### Variante b: Messung mit Wasser

Der experimentelle Aufbau entspricht dem in Variante a. Anstelle von Quecksilber wird Wasser verwendet.

Abhängigkeit der Länge der Luftsäule vom Gesamtdruck  
(äußerer Luftdruck  $p_0 = 1016 \text{ hPa}$ )

Wassersäule Höhe $h$		Gesamtdruck	Länge $l$ der eingeschlossenen Luftsäule	$p \cdot l$
in mm	in hPa	in hPa	in mm	in hPa · mm
0	0	1016	240	$2,44 \cdot 10^5$
147,5	14,5	1030,5	236,5	$2,44 \cdot 10^5$
274	24,2	1040,2	233	$2,42 \cdot 10^5$
344,5	33,8	1049,8	231,5	$2,43 \cdot 10^5$
439	43,1	1059,1	229	$2,43 \cdot 10^5$
530	52,0	1068,0	227,3	$2,43 \cdot 10^5$
662,5	65,0	1081,0	224,5	$2,43 \cdot 10^5$
789,5	77,5	1093,5	221,5	$2,42 \cdot 10^5$
909,3	89,2	1115,2	219,3	$2,42 \cdot 10^5$

Unter Berücksichtigung der Proportionalität zwischen Länge  $l$  und Volumen  $V$  folgt

$$p \cdot V = \text{konstant}.$$

### Bemerkungen

1. Mit dem benutzten Gerät hat man gegenüber dem von Boyle verwendeten den Vorteil, daß die schwierige Arbeit entfällt, beide Quecksilberoberflächen auf gleiche Höhen einzustellen. Das läßt sich leicht durch die beiden Hähne am Gerät erreichen.
2. Bei der Verwendung von Quecksilber sind unbedingt die geforderten Sicherheitsbestimmungen zu beachten. Beim Entleeren darf auf keinen Fall der obere Hahn zuerst geöffnet werden.
3. Bei der Verwendung von Wasser ist die Durchführung des Experiments weniger aufwendig als mit Quecksilber. Das Ergebnis ist jedoch nicht so eindrucksvoll.



4. Findet anstelle von Quecksilber Wasser Verwendung, so ist es effektvoller, wenn man zwei unabhängige, durch einen Schlauch verbundene Glasrohre benutzt, von denen das eine möglichst mehrere Meter lang sein sollte. Dieses kann man auch aus mehreren Glasrohren und Schlauchstücken zusammensetzen.

### 2.6.3. Historisches Experiment zum Gesetz von Gay-Lussac

Sein Vorgehen bei der experimentellen Untersuchung des Zusammenhanges zwischen dem Volumen und der Temperaturänderung eines Gases beschreibt Gay-Lussac so: „Der gläserne Ballon (Abb. 2.6.3./1) ist mit einem eisernen Hahne versehen, mit welchem sich eine gebogene Röhre JD verbinden läßt. Mit dem Hebel LL und den Schnüren läßt sich der Hahn auch unter Wasser öffnen und schließen. Ist der Ballon voll Gas, schließe ich den Hahn, befestige die Röhre JD und stelle den Ballon in ein Gestell aus Eisen EFGH, welches ich dann in ein kupfernes Gefäß AD, das voll Wasser ist, setze.

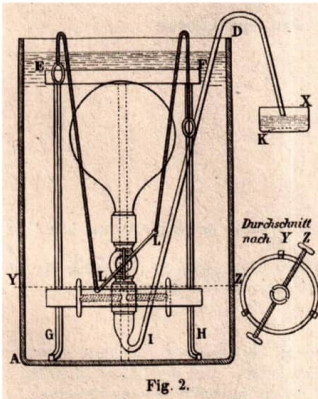


Abb. 2.6.3./1

Abbildung der Originalapparatur von Gay-Lussac

Darauf erwärme ich das Wasserbad um den Ballon und öffne beim Steigen des Thermometers etwa von 10 zu 10 Grade den Hahn und drehe ihn sogleich wieder zu.

Hat das Wasser 15–20 Minuten gekocht, so ziehe ich das Ende der Röhre JD aus dem Quecksilber, damit sich die Luft im Inneren mit der äußeren Luft völlig ins Gleichgewicht setzen könne und schließe daraufhin sogleich den Hahn. Nachdem das Wasserbad durch Eis oder Wasser abgekühlt wurde, ziehe ich den Apparat heraus, nehme den Ballon aus dem Gestelle, schraube die Röhre JD und den Hebel LL ab und tauche den Ballon ganz in ein Bad von gegebener Temperatur, wo ich ihn lange genug lasse, daß er dieselbe Temperatur annehmen kann.

Wird dann der Hahn geöffnet, so steigt Wasser in den Ballon, und zwar ist das

Volumen dieser Wassermasse dem Volumen der durch die Wärme aus dem Ballon herausgetriebenen Luft vollkommen gleich. Ich schließe nun den Hahn, nehme den Ballon heraus, trockne ihn ringsumher mit Sorgfalt ab und wäge ihn. Darauf wird er voll Wasser und ganz wasserleer gewogen.“ Auf diese Weise bestimmte Gay-Lussac die Volumina.

„Sechs Versuche mit atmosphärischer Luft, bei denen ich ... alles, was Unzuverlässigkeiten erzeugen konnte, möglichst vermied, gaben mir folgende Resultate: Atmosphärische Luft, die bei der Temperatur des schmelzenden Schnees ein Volumen von 100 Teilen einnahm, bis zur Wärme des kochenden Wassers erhitzt, hatte sich ausgedehnt bis zu einem Volumen von 137,4 137,6 137,54 137,55 137,48 137,57 solcher Teile, welches im Mittel eine Ausdehnung bis auf etwa 137,5 Teile ergibt.“

Weitere Experimente mit „Wasserstoffgas, Sauerstoffgas und Stickgas“ brachten ganz ähnliche Ergebnisse. Auch „kohlen-saures Gas, salzsaures Gas, schweflig-saures Gas und Salpetergas“ wurden untersucht, woraus Gay-Lussac schloß, „daß überhaupt alle Gasarten sich durch gleiche Grade von Wärme, unter übrigens gleichen Umständen, verhältnismäßig ganz gleich expandieren“.

## 2.6.4. Schulexperiment zum Gesetz von Gay-Lussac

1. Glaskugel zum Wägen der Luft
2. Glaswanne oder Eimer
3. Thermometer bis 100 °C (Teilung  $\frac{2}{10}$  K)
4. Tauchsieder (1000 W)
5. Waage mit Wägesatz bis 2 kg

### Methodische Hinweise

1. Es ist nützlich, heißes Wasser vorzubereiten, da sonst der zeitliche Aufwand groß wird.
2. Das Ergebnis ist eine wichtige Naturkonstante. Diese bildet die Grundlage für die Temperaturdefinition und die Festlegung des absoluten Nullpunktes.

### Experiment

Der Aufbau der Experimentieranordnung erfolgt entsprechend Abbildung 2.6.4./1. Die gut ausgetrocknete Glaskugel wird zunächst durch Fetten der Hähne einwandfrei verschließbar gemacht. Dann wird die Masse  $m_1$  der luftgefüllten Kugel bestimmt.

Die Kugel wird so am Stativmaterial befestigt, daß sie, ausgenommen der obere Hahn, voll im wassergefüllten Gefäß untertauchen kann. Die Kugel wird in das vorgeheizte Wasser mit geschlossenen Hähnen gebracht, danach wird der obere Hahn geöffnet. Mit dem Tauchsieder wird das Wasser zum Sieden gebracht und einige Minuten beim Sieden gehalten. Die Temperatur des Gases entspricht dann der zu messenden Temperatur  $\vartheta_{\max}$  des Wassers.

Man schließt den oberen Hahn, nimmt die Kugel aus dem Wasser und bringt sie in Eiswasser (oder Leitungswasser) der Temperatur  $\vartheta_{\min}$ . Unter Wasser wird der eine Hahn geöffnet. Es strömt nun so lange Wasser ein, bis der Luftdruck innen gleich dem Außendruck ist. Der Hahn ist zu schließen, wenn das eingeschlossene Gas die Wassertemperatur angenommen hat.

Die nun teilweise mit Wasser gefüllte Kugel wird herausgenommen, sehr sorgfältig abgetrocknet und deren Masse  $m_2$  bestimmt. Danach wird durch Ansaugen die Kugel völlig mit Wasser gefüllt, wieder gut abgetrocknet und deren Masse  $m_3$  gemessen.

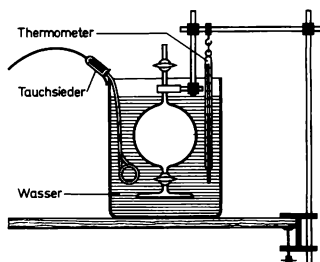


Abb. 2.6.4./1  
Experimentieranordnung für das Gesetz  
von Gay-Lussac

Wegen der Proportionalität von Masse und Volumen kann man das innere Gesamtvolumen der Kugel aus der Differenz von  $m_3$  und  $m_1$  berechnen. Das Volumen  $\Delta V$ , um das sich das Volumen zusammengezogen hat, ergibt sich aus der Differenz von  $m_2$  und  $m_1$ .

$V_0$  berechnet sich somit aus der Gleichung

$$V_0 = V - \Delta V$$

Mit  $\Delta \vartheta = \vartheta_{\max} - \vartheta_{\min}$  wird schließlich der gesuchte Ausdehnungskoeffizient berechnet nach der Gleichung

$$\alpha = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta \vartheta}.$$

Für die Massen, Volumina und Temperaturen wurden z. B. folgende Ergebnisse ermittelt:

$$m_1 = 235,2 \text{ g}$$

$$m_2 = 517,3 \text{ g}$$

$$m_3 = 1340,5 \text{ g}$$

$$V = 1105,3 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V = 282,1 \text{ cm}^3$$

$$V_0 = 823,2 \text{ cm}^3$$

$$\vartheta_{\max} = 98 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_{\min} = 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta \vartheta = 97,2 \text{ K}$$

Daraus folgt für den Ausdehnungskoeffizienten

$$\alpha = 0,0035 \text{ K}^{-1}$$

#### Bemerkungen

1. Der Fehler liegt bei maximal 5%.
2. Die Abweichung vom Tabellenwert ( $\alpha = 0,0036 \text{ K}^{-1}$ ) ist unter schulischen Bedingungen zu akzeptieren.
3. Eine höhere Genauigkeit wird durch eine sorgfältige Trocknung der Luft erreicht.

## 2.7. Dampfmaschinen

Obwohl die Dampfmaschine heute in technischer Hinsicht ohne Bedeutung ist, wird sie zu Recht noch im Physikunterricht behandelt. Zum einen, weil ihre Entwicklung, zumindest im letzten Drittel des 18. Jahrhunderts, bereits auf bestimmten physikalischen Erkenntnissen über die Verdampfung, die Expansion und Kondensation von Wasserdampf, die latente Wärme u. a. basierte, und zum anderen, weil sie ein hervorragendes Beispiel für den Zusammenhang zwischen gesellschaftlichem, naturwissenschaftlichem und technischem Fortschritt ist. Und nicht zuletzt ist die Dampfmaschine auch einer der Ausgangspunkte für die Entwicklung der Thermodynamik.

Erste Hinweise auf die Anwendung von Wasserdampf finden sich schon in der Antike, z. B. bei Herons Äolipile, einer Art Reaktionsturbine (Abb. 2.7./1). Sie wurde aber nicht weiterentwickelt und stellte nur eine Kuriosität dar, ebenso wie die im Mittelalter und in der Renaissance beschriebenen *Püsteriche* (Abb. 2.7./2).

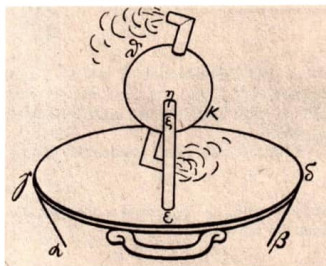
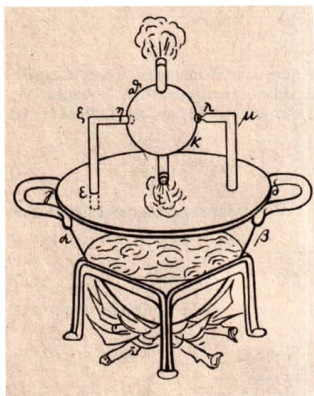


Abb. 2.7./1 a und b  
Äolipile des Heron von Alexandria  
(Darstellung aus dem Mittelalter)

Die Entwicklung von Dampfkraftanlagen setzte erst an der Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert ein, und zwar in England, dem damals ökonomisch am weitesten fortgeschrittenen Land Europas. Nach der bürgerlichen Revolution von 1648 kam es dort zu einer lebhaften Entwicklung verschiedener Wirtschaftszweige, besonders des Kohlebergbaus und Erzbergbaus. Da die oberen Lagerstätten erschöpft waren, mußten die Schächte immer tiefer abgeteuft werden. Damit erhöhten sich die Schwierigkeiten der Wasserhaltung. Die bis dahin benutzten Schöpfwerke und Pumpen, teilweise von Wasserrädern angetrieben, meist aber durch tierische oder menschliche Muskelkraft, reichten nicht mehr aus, so daß es zu Grubenstilllegungen kam. Es bestand deshalb ein dringendes gesellschaftliches Bedürfnis nach neuen Möglichkeiten zur Lösung der mit der Wasserhaltung verbundenen Probleme.

Ein erster brauchbarer Vorschlag für eine neue Art der Wasserförderung erfolgte durch den englischen Ingenieur Thomas Savery (1650 bis 1715), der 1698 ein Patent

für eine Dampfpumpe erhielt (2.7.1). Obwohl das Wasser vielen Bergwerksbesitzern im wahrsten Sinne des Wortes „bis zum Halse stand“, kamen nur einige wenige Saverysche Dampfpumpen zum praktischen Einsatz, da wegen des außerordentlich hohen Kohleverbrauchs der Nutzeffekt sehr gering war.

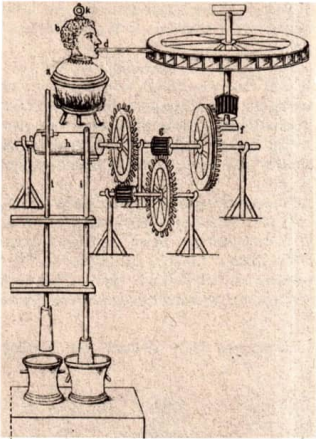


Abb. 2.7./2  
Dampfbetriebenes Pochwerk von Branca (1629)

Ebensowenig Erfolg wie Savery hatte der in Diensten des Landgrafen von Hessen tätige französische Wissenschaftler Denis Papin (1647 bis 1712). Nach vielversprechenden Experimenten mit dem Modell einer atmosphärischen Kolbenmaschine (2.7.3), die aber aus verschiedenen Gründen nicht weitergeführt werden konnten, wandte sich Papin ebenfalls der Dampfpumpe zu (2.7.1). Um den Landgrafen für seine Experimente zu gewinnen und somit die notwendigen finanziellen Mittel zu erhalten, schlug Papin vor, mit einer solchen Vorrichtung in ein Turmreservoir Wasser zu fördern, das dann z. B. ein Wasserrad oder einen Springbrunnen antreiben könne.

Das Prinzip der Papinschen Dampfpumpe erwies sich als brauchbar; es wurde mit einer solchen Vorrichtung eine Förderhöhe von 70 Fuß (rund 22 m) erreicht. Die mangelhafte technische Ausführung (Abdichtung, Bruch des Steigrohres), eine Folge des unzureichenden Könnens der Handwerker auf diesem für sie weitgehend neuen Gebiet, hatte jedoch zur Folge, daß weitere Versuche unterblieben, zumal das Interesse des Landgrafen erlosch.

Auch schien die Dampfpumpe nicht dazu geeignet, die eingangs genannten Aufgaben im Grubenwesen zu erfüllen.

Der entscheidende Fortschritt gelang dem englischen Eisenwarenhändler, Werkzeugmacher und Schmiedemeister Thomas Newcomen (1663 bis 1729), der aus seiner beruflichen Tätigkeit die Schwierigkeiten der Wasserhaltung in den Bergwerken kannte. Er entwickelte eine neuartige *Feuermaschine* — so nannte man noch lange Zeit die Dampfmaschine —, die dem Prinzip nach eine atmosphärische Maschine mit ge-

trenntem Dampfkessel und Zylinder war. 1705 entstand ein erstes Versuchsmodell, und bereits 1711/12 kamen die ersten Newcomen-Maschinen zum praktischen Einsatz (2.7.3). Sie bewährten sich so gut, daß die Anzahl solcher atmosphärischer Maschinen im englischen Bergbau schnell anstieg. Durch laufende Verbesserungen konnte der Kohleverbrauch zwar gegenüber den ersten Maschinen gesenkt werden; er war aber dennoch sehr hoch. Trotz dieses Mangels hielt sich die Newcomen-Maschine noch bis zum Ende des 18. Jahrhunderts, und einige Exemplare arbeiteten als Wasserhaltungsmaschinen sogar noch im 19. Jahrhundert (Abb. 2.7./3).

Während die Dampfpumpen (2.7.1) und die atmosphärische Maschine (2.7.3) weitgehend auf empirischer Grundlage entstanden und durch technisch-konstruktive Veränderungen weiterentwickelt worden waren, wurde mit der Wattschen Dampfmaschine eine qualitativ neue Stufe erreicht, da wissenschaftliche Erkenntnisse über neu entdeckte kalorische Vorgänge einfließen, vor allem hinsichtlich der Verdampfung des Wassers und der Kondensation des Wasserdampfes bzw. physikalischer Eigenschaften des Wasserdampfes.

James Watt (1736 bis 1819) erhielt 1763 als Universitätsmechaniker den Auftrag, das Modell einer Newcomen-Maschine (Abb. 2.7./4) zu reparieren. Dabei machte er sich Gedanken, wie die Nachteile dieser Maschine zu beseitigen seien, wobei er auch Erkenntnisse von Joseph Black (1728 bis 1799) nutzen konnte, die dieser bei der Untersuchung von Wärmeübergängen, insbesondere hinsichtlich der spezifischen und latenten Wärme, gefunden hatte, bzw. indem er eigene Experimente auswertete. Watts wichtigste Überlegungen waren folgende:

- Wasserdampf hat das Bestreben zu expandieren und kann deshalb den Kolben verschieben.

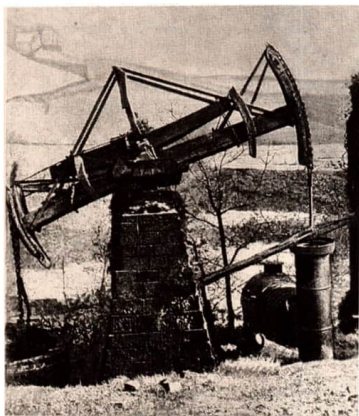


Abb. 2.7./3 Überreste einer wahrscheinlich von Newcomen gebauten Maschine, die noch 1830 in Betrieb war (Aufnahme von 1894)

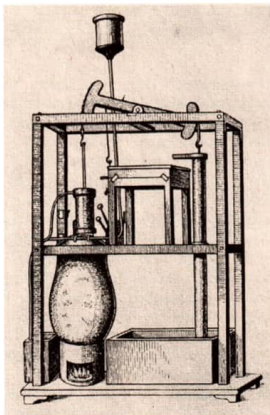


Abb. 2.7./4 Modell der von Watt benutzten Newcomen-Maschine

- Eine große Leistung ist zu erwarten, wenn Anfangstemperatur und Anfangsdruck des Dampfes hoch sind, da sich beide bei der Expansion verringern.
- Die laufende Abkühlung und Erwärmung des Zylinders der Newcomen-Maschine könnte vermieden werden, wenn man die Kondensation des Dampfes an eine andere Stelle der Maschine verlegt.

Watt schreibt in diesem Zusammenhang: „Weil Dampf ein elastischer Dunst ist, der sich ausdehnen und in einen vorher luftleer gemachten Raum stürzen muß, überlegte ich mir, daß ich nur einen luftverdünnten Raum in einem getrennten Gefäß herzustellen brauchte und von diesem Gefäß aus eine Verbindung zu dem Zylinder machen müßte. Dann wird der Dampf aus dem Zylinder in das luftleer gemachte Gefäß stürzen, und die Maschine kann arbeiten.“

Watts Überlegungen fanden ihren Niederschlag in einem Modell, dessen Kolben einen Durchmesser von 36 mm hatte. Da dieses Modell befriedigende Ergebnisse lieferte, baute Watt nach Überwindung vieler Schwierigkeiten — vor allem finanzieller Art — in den Jahren 1776/77 die ersten einfach wirkenden Dampfmaschinen (2.7.5).

Gegenüber der atmosphärischen Newcomen-Maschine war die Wattsche einfach wirkende Dampfmaschine ein außerordentlicher Fortschritt, was sich auch in einem Wirkungsgrad von 0,03 bis 0,04 gegenüber dem Wirkungsgrad der Newcomen-Maschine von 0,01 widerspiegelte. Aber ebenso wie letztere ließ sie sich nur als Antrieb für Pumpen oder von Gebläsen verwenden.

Seit der Mitte des 18. Jahrhunderts war es in England zu umwälzenden Veränderungen gekommen, die als industrielle Revolution bekannt sind. Sie ging aus von der Textilverarbeitung, speziell von Verbesserungen an Webstühlen, der Erfindung neuer Spinnmaschinen u. a., die dazu geführt hatten, daß die Handarbeit in den kapitalistischen Manufakturen und in den Handwerksbetrieben durch die maschinelle Produktion in Fabriken ersetzt wurde und daß auf breiter Front ein Übergang zur kapitalistischen Produktionsweise mit einer ungeheuren Steigerung der Arbeitsproduktivität erfolgte. Damit verbunden war auch ein Aufstieg der Maschinenindustrie, vor allem der Eisen- und Hüttenindustrie, in die immer mehr Werkzeugmaschinen Eingang fanden. Den neuen Arbeitsmaschinen standen aber hemmend die veralteten, qualitativ und quantitativ unzureichenden *Kraftmaschinen*, also Antriebsmaschinen, gegenüber, die noch immer im wesentlichen auf menschlicher Muskelkraft bzw. auf „Wasserkraft“ basierten. Letztere hatten zusätzlich den Nachteil, daß die Produktion mit Hilfe von Wasserrädern von Wasserläufen abhängig, also ortsgebunden war.

Es bestand damit ein dringender Bedarf an neuen Antriebsmaschinen. Die weitere Entwicklung der Wattschen Dampfmaschine muß deshalb in engstem Zusammenhang mit der industriellen Revolution gesehen werden, denn sie ermöglichte die stürmische Entwicklung der kapitalistischen Produktionsweise.

Allerdings bedurfte die Wattsche Maschine wesentlicher Veränderungen und Verbesserungen: Da die meisten Arbeitsmaschinen rotierende Bewegungen ausführten, mußte die translatorische Bewegung des Kolbens bzw. der Kolbenstange auf irgendeine Weise in eine rotierende Bewegung umgewandelt werden. Als einfachste Möglichkeit bot sich hierfür der bereits lange bekannte Kurbeltrieb an, der aber patentrechtlich geschützt war. Watt und seine Mitarbeiter benutzten deshalb zunächst einen „verkappten“ Kurbeltrieb, das sogenannte Planetenradgetriebe (Abb. 2.7./5, rechts). Durch ein Schwungrad ließ sich zwar eine fortlaufende Drehbewegung aufrechterhalten. Sie war aber stoßweise und unregelmäßig, denn der Kolben der Dampfmaschine führte ja jeweils einen Arbeits- und einen Leerhub aus.

Der Gedanke, den Dampf wechselnd auf den Kolben wirken zu lassen, lag natürlich

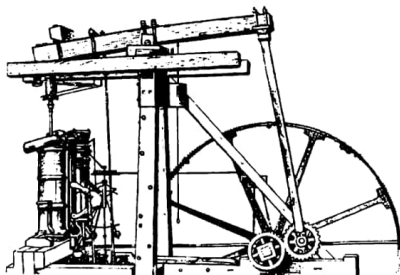


Abb. 2.7./5 Doppelt wirkende Dampfmaschine Watts mit Planetenradgetriebe und Parallelogrammführung von 1788 (70 Jahre in Betrieb)

auf der Hand. Aber hier bestand eine große technische Schwierigkeit: Mit der an der Kolbenstange und am Balancier befestigten Kette ließen sich nur Zugkräfte, aber keine Druckkräfte übertragen. Eine direkte Verbindung von Kolbenstange und Balancier schied aus, da sich erstere translatorisch bewegt, der Befestigungspunkt am Balancier aber einen Kreisbogen beschreibt. Watt löste das Problem durch eine Konstruktion, die er selbst zu seinen bedeutendsten Leistungen zählte, durch die Parallelogrammführung (Abb. 2.7./5, links oben).

Mit der Erteilung weiterer Patente, die vor allem die Steuerung der Maschine betrafen, hatte die Wattsche doppelt wirkende Maschine um 1784 bereits einen relativ hohen Entwicklungsstand erreicht, so daß sie in breitem Umfang in der Industrie Eingang fand (Abb. 2.7./6).

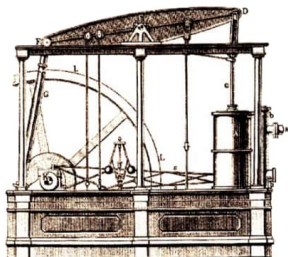


Abb. 2.7./6 Dampfmaschine Wattscher Bauart mit Parallelogrammführung (rechts oben). Kurbeltrieb, Schwungrad und Zentrifugalregler (Anfang 19. Jahrhundert)

### 2.7.1. Die Dampfpumpen von Savery und Papin

Das Prinzip der von Thomas Savery entwickelten Dampfpumpe ist denkbar einfach (Abb. 2.7.1./1): In einem gesonderten Kessel B wird Dampf erzeugt, der in einen Dampfaufnehmer S strömt. Nach Unterbrechung der Dampzufuhr bei C kondensiert



der Dampf in S, wenn man diesen mit kaltem Wasser aus E berieselt. Dadurch entsteht im Dampfaufnehmer ein Unterdruck, das Ventil b öffnet sich, und der Luftdruck drückt das zu fördernde Grubenwasser durch das Rohr D in den Dampfaufnehmer. Ist dieser genügend gefüllt, so wird nach Öffnen von C durch den aus dem Kessel nachströmenden Frischdampf das Wasser in dem Steigrohr A nach oben gedrückt.

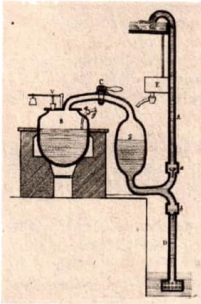


Abb. 2.7.1./1  
Schema der  
Dampfpumpe von Savery

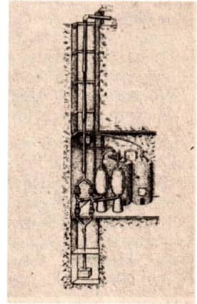


Abb. 2.7.1./2  
Saverysche  
Dampfpumpe  
mit zwei Dampf-  
aufnehmern

Um den Betrieb der Maschine kontinuierlich zu gestalten, stattete sie Savery mit zwei Dampfaufnehmern und einem zusätzlichen Speisewasserkessel aus, durch den der Hauptdampfkessel in regelmäßigen Abständen nachgefüllt werden konnte (Abb. 2.7.1./2).

Der Dampf- und damit auch der Brennstoffverbrauch war enorm, denn zunächst kondensierten erhebliche Dampfmengen an der Oberfläche des kalten Förderwassers, bevor die eigentliche Wasserförderung einsetzte. Ein weiterer Mangel bestand darin, daß die Saverysche Dampfpumpe auf der Grubensohle aufgestellt werden mußte. Außerdem erreichte man nur geringe Förderhöhen, da der Dampfdruck aus Materialgründen 3 at nicht überschreiten durfte.

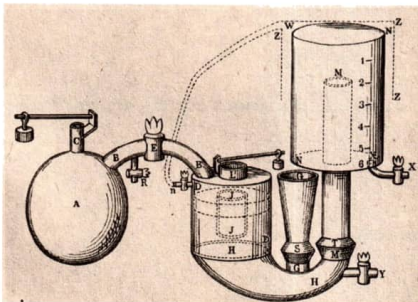


Abb. 2.7.1./3  
Originalzeichnung  
der Papinschen Dampf-  
pumpe

Denis Papin hatte 1704 von Leibniz die Zeichnung einer Saveryschen Dampfpumpe erhalten. Nach gründlicher Analyse konstruierte Papin selbst eine Dampfpumpe, die er im Sommer 1706 erprobte (Abb. 2.7.1/3). Ihre Wirkungsweise läßt sich in drei Arbeitstakten beschreiben:

1. Der Hahn E ist geschlossen, der Hahn n geöffnet. Der Zylinder D D füllt sich über den Wassereinlauf G G mit Wasser.
2. Im hohlen Schwimmkolben F F aus Blech befindet sich ein zylindrischer Einsatz I I, in den durch die Öffnung L ein glühend erhitztes Eisenstück eingesetzt werden kann. L, n und das Ventil S werden nun geschlossen, E wird geöffnet.
3. Der in den Zylinder einströmende Dampf drückt den Schwimmkolben nach unten und damit auch das Wasser, das durch das Ventil T in das Rohr MM bzw. in den Windkessel NN gelangt. Von X kann es dann durch ein längeres Steigrohr zu einem Reservoir gefördert werden.

Nachdem der Schwimmkolben seine unterste Stellung erreicht hat, wiederholen sich die Takte 1 bis 3. Das Ventil T kann sich jetzt bei Takt 1 nicht öffnen, da auf ihm der Druck der Wassersäule M M lastet. Eine erneute Einführung des glühenden Eisenstücks ist erst wieder nach einigen Arbeitszyklen erforderlich.

Es ist physikalisch bemerkenswert, daß Papin in einer 1707 erschienenen Schrift seine Konstruktion mit Saverys Dampfpumpe vergleicht, in der die heißen Dämpfe „kaltem Wasser begegnen, welches sie niederschlägt und den größten Teil ihrer Kraft vernichtet. Aber mittels unseres Kolbens F F treffen die Dämpfe immer dieselbe Oberfläche des Metalls, welches bald so stark erwärmt wird, daß die Dämpfe nur sehr wenig Kraft — sich niederschlagend — verlieren. Ich mache darauf aufmerksam, daß Herr Savery seine Pumpen durch Ansaugen füllen will, wenn die Dämpfe — sich erkaltend niederschlagend — einen luftleeren Raum zurücklassen, welcher sich mit Wasser füllen muß, das durch ein Rohr emporsteigt.“

Aus eigenen Untersuchungen folgert Papin, daß dieses Verfahren ungünstig, weil langwierig ist. Bei ihm füllt sich der Zylinder nach dem Prinzip der verbundenen Gefäße mit dem zu fördernden Wasser. Der oberhalb des Kolbens befindliche Dampf tritt dabei durch den Hahn n aus.

Schließlich weist Papin noch auf das rotglühende Eisen hin, das durch L eingeführt wird, „ebenfalls ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der Maschine, denn dadurch erhalten die Dämpfe eine noch größere und heftigere Ausdehnung wie in A A, und dadurch braucht man ein gut Teil Dampf weniger“. Beachtenswert sind auch die beiden Sicherheitsventile bei C und L.

## 2.7.2. Schulexperimente zu den Dampfpumpen von Savery und Papin

### *Zu Experiment 1*

1. Papinscher Topf
2. Heizplatte (1200 W)
3. Rundkolben (500 ml)
4. Gummistopfen mit Bohrungen für zwei Glasrohre
5. T-Stück mit Dreizehgehahn
6. gebogene Glasrohre ③
7. gerades Glasrohr (500 mm)

- 8. 2 Bechergläser (2000 ml)
- 9. flache Wanne (etwa 300 mm × 200 mm × 100 mm)
- 10. Gummischlauchstücke
- 11. Gummischlauch zur Wasserleitung
- 12. Gummischlauch zum Papinschen Topf

### Zu Experiment 2

- Geräte 1., 2., 5., 6., 8., 10., 12., außerdem
- 13. Glasrohr (300 mm lang: 45 mm Ø)
- 14. Holzscheibe (40 mm Ø) Ⓢ
- 15. Glastrichter

- 16. Glaszylinder der Modellsaugpumpe mit Ventil
- 17. 2 Gummistopfen mit Bohrung für ein Glasrohr
- 18. T-Stück mit Dreivegehahn

### Methodischer Hinweis

Die Experimente sind sehr gut geeignet, Kenntnisse und Erkenntnisse der Schüler über das Sieden und Kondensieren, den Luftdruck und den Schweredruck in Flüssigkeiten zu wiederholen.

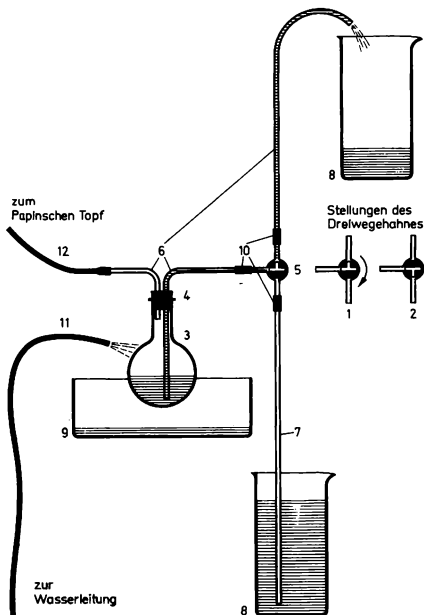


Abb. 2.7.2./1  
Experiment  
zur  
Saveryschen Dampfmaschine

## Experiment 1

Der Zusammenbau der experimentellen Anordnung erfolgt gemäß Abbildung 2.7.2./1. Ein Arbeitstakt wird folgendermaßen demonstriert:

1. Dreiwegehahn in Stellung 1 bringen. Dampfzufuhr vom Papinschen Topf her vorsichtig etwas freigeben, bis Dampf am Ende von 6 ausströmt.
2. Dreiwegehahn in Stellung 2 bringen und sofort Dampfzufuhr unterbrechen.
3. Rundkolben mit kaltem Wasser berieseln zur Kondensation des Wasserdampfes.
4. Wenn sich der Rundkolben zu etwa  $\frac{2}{3}$  gefüllt hat, den Dreiwegehahn wieder in Stellung 1 drehen und Dampfzufuhr freigeben. Kurz vor der vollständigen Entleerung des Rundkolbens ist wieder entsprechend den Punkten 2, 3 und 4 zu verfahren.

## Experiment 2

Der experimentelle Aufbau geht aus Abbildung 2.7.2./2 hervor. Der Trichter wird mit Wasser gefüllt. Der Dreiwegehahn A wird in Stellung 1, der Dreiwegehahn B in Stellung 0 gedreht, so daß sich der Zylinder 13 und ein Teil des Steigrohres 6 mit

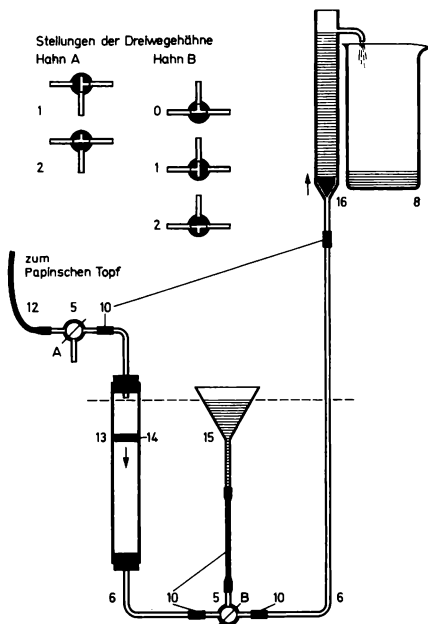


Abb. 2.7.2./2  
Experiment zur  
Papinschen Dampfmaschine

Wasser füllen. Es ist darauf zu achten, daß sich stets genügend Wasser im Trichter befindet.

Ein Arbeitstakt verläuft folgendermaßen:

1. Hat der Schwimmkolben die in der Abbildung gezeigte Lage erreicht, wird Hahn B in Stellung 2 gebracht. Nachdem man den Dreiwegehahn A in die Stellung 2 gedreht hat, gibt man vorsichtig die Dampzufuhr vom Papinschen Topf her frei. Der Dampf drückt das Wasser in das Steigrohr bzw. das Gefäß 16, von dem es in das Becherglas 8 strömt. Hat der Schwimmkolben seine unterste Stellung erreicht, wird die Dampzufuhr unterbrochen.
2. Die Dreiwegehähne A und B werden in Stellung 1 gedreht, so daß sich der Zylinder erneut mit Wasser füllen kann.

#### *Bemerkungen*

1. Das Öffnen des Hahnes am Papinschen Topf muß stets langsam vorgenommen werden; der Hahn ist nur teilweise zu öffnen.
2. Es ist darauf zu achten, daß während des Hantierens an den Dreiwegehähnen der Druck im Papinschen Topf nicht zu stark ansteigt.
3. Die Holzscheibe beim Experiment 2 muß nach dem Experiment aus dem Zylinder genommen werden, da sie quellen und den Zylinder zersprengen kann.

### **2.7.3. Die atmosphärische Dampfmaschine von Newcomen**

Bevor sich Denis Papin mit der Dampfpumpe (2.7.1.) beschäftigte, entwickelte er 1690 das Modell einer atmosphärischen Kolbenmaschine (Abb. 2.7.3./1). Im Zylinder, der einen Durchmesser von 63 mm hatte, befand sich etwas Wasser. Der Kolben war mit einer verschließbaren Öffnung versehen. Zunächst wurde der Kolben nach unten gedrückt, wobei die darunter befindliche Luft durch die Kolbenöffnung entwich, die anschließend verschlossen wurde. Der durch Erhitzung des Wassers sich bildende Dampf bewegte dann den Kolben so weit nach oben, bis ihn eine in eine Nut der Kolbenstange einrastende Klinke in dieser Stellung festhielt. Nun konnte die zu hebende Last durch ein über zwei Rollen laufendes Seil mit der Kolbenstange ver-

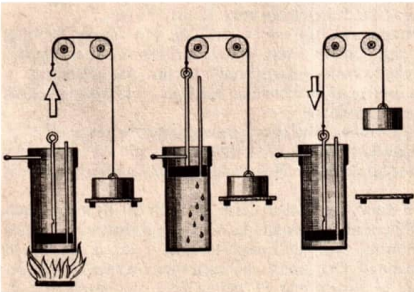


Abb. 2.7.3./1  
Schema der atmosphärischen  
Kolbenmaschine Papins

bunden werden. Nach der Kondensation des Dampfes drückte der Luftdruck den Kolben nach unten.

Auf den Kenntnissen dieser Papinschen Kolbenmaschine und der Saveryschen Dampfpumpe aufbauend, konstruierte 1705 Thomas Newcomen ein erstes Modell der nach ihm benannten atmosphärischen Dampfmaschine. Und bereits 7 Jahre später arbeiteten solche Maschinen in Bergwerken als *Wasserhaltungsmaschinen*!

Die wichtigsten Fortschritte gegenüber der Papinschen Kolbenmaschine waren die Trennung von Dampfkessel und Zylinder und die Kaltwassereinspritzung. Die Verbindung der Kolbenstange des Zylinders und des Gestänges der Schachtpumpe wurde mit Hilfe des sogenannten Balanciers hergestellt (Abb. 2.7.3./2).

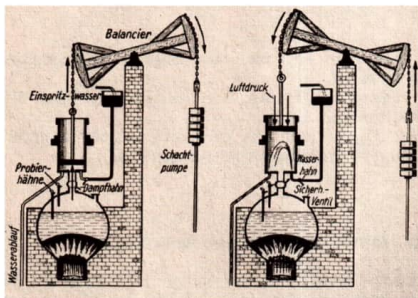


Abb. 2.7.3./2  
Schema der atmosphärischen  
Kolbenmaschine Saverys

Beim Öffnen des Dampfahnes füllte sich der Zylinder unter dem Kolben mit Dampf, und das Gewicht des Pumpengestänges, das meist noch zusätzlich belastet war, zog den Kolben nach oben. Nach Schließen des Dampfahnes wurde in den Raum unter den Kolben kaltes Wasser eingespritzt, das die Kondensation des Dampfes beschleunigte. Aufgrund des dadurch entstehenden Unterdrucks im Zylinder drückte der Luftdruck (der Zylinder war oben offen) den Kolben nach unten; der Balancier senkte sich links, hob sich rechts und damit auch das Pumpengestänge. Nach Ablass des Kondens- und Einspritzwassers wiederholten sich die Arbeitsgänge. Die Maschine „ließ“ sehr langsam; pro Minute erfolgten etwa 12 bis 15 Hübe.

Wegen der noch mangelhaften Fertigungstechnik war es schwierig, eine sichere Dichtung des Kolbens zu erreichen. Man goß deshalb etwas Wasser auf den Kolben; welches dann zwischen Kolben- und Zylinderwand gelangte und so für eine ausreichende Dichtung sorgte. Um den Hub zu begrenzen, brachte man federnde Holzbalken auf dem Mauerwerk an, auf die der Balancier aufschlug.

Anfangs wurden die verschiedenen Hähne von Hand gestellt, aber schon nach 1718 benutzte man den von Henry Beighton (1688 bis 1754) erfundenen, mit dem Balancier verbundenen Steuerbaum, der die entsprechenden Hebel und Nocken im jeweils richtigen Augenblick betätigte.

Der Hauptnachteil der Newcomen-Maschine bestand darin, daß sich der Zylinder durch die Kaltwassereinspritzung abkühlte und daß bereits beim Dampfeintritt ein Teil des Dampfes kondensierte. Auch erwärmte sich das Einspritzwasser ziemlich schnell, so daß ein geringerer Unterdruck entstand. Der Kohleverbrauch dieser ersten Maschinen war sehr hoch; 17 kg Steinkohle je Stunde und PS galten als nicht ungewöhnlich.

(Zum Vergleich: Große Heißdampfmaschinen nach dem Wattschen Prinzip erreichten zu Beginn des 20. Jahrhunderts Werte von etwa 0,4 kg Kohle je Stunde und PS.) Bei Newcomens Erfindung wurde der Kolben nicht durch expandierenden Dampf bewegt, sondern durch den unterschiedlichen Druck an der Oberseite (Luftdruck) und an der Unterseite (stark verminderter Druck nach Kondensation von Wasserdampf) des Kolbens. Insofern ähnelt die Newcomen-Maschine Guericks atmosphärischer Maschine (2.5.9.).

## 2.7.4. Schulexperimente zur atmosphärischen Dampfmaschine von Newcomen

### Zu Experiment 1

- |                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1. Papinscher Dampfzylinder | 3. Becherglas (1000 ml) |
| 2. Bunsenbrenner            | 4. Plastilin            |

### Zu Experiment 2

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 5. Papinscher Topf     | 7. Dampfzylinder mit Kolben und Kolbenstange ⑤, dazu erforderliches |
| 6. Heizplatte (1200 W) | Material siehe Abbildungen 2.7.4./1 und 2.7.4./2.                   |

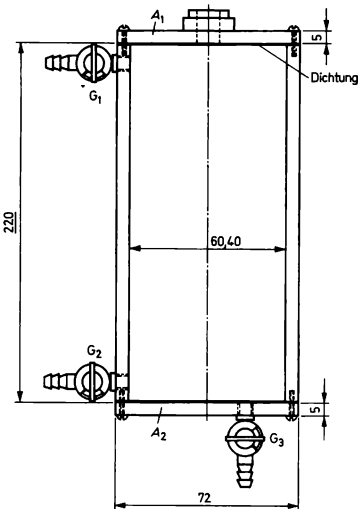


Abb. 2.7.4./1  
Dampfzylinder (Ausführungsbeispiel)

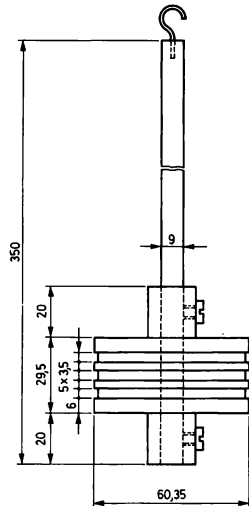


Abb. 2.7.4./2  
Kolben für Dampfzylinder (Ausführungsbeispiel)

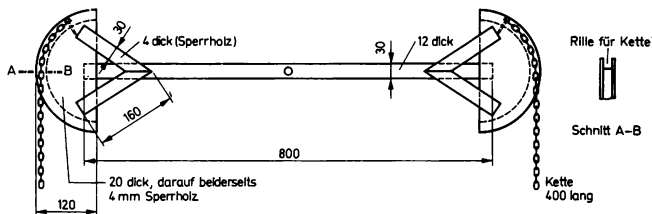


Abb. 2.7.4./3 Balancier (Ausführungsbeispiel)

8. Balancier ③, dazu erforderliches Material siehe Abbildung 2.7.4./3.

9. 2 Gliederkettenstücke, je 40 cm lang

10. T-Stück mit Dreiweghahn

11. flache Wanne (etwa 300 mm × 200 mm × 100 mm)

12. großer Trichter

13. Wägestück

14. Schlauchverbindungen oder Gummischläuche

### Methodische Hinweise

1. Das Experiment ist gut geeignet, das Wissen der Schüler über Sieden und Kondensieren, den Luftdruck und Energieumwandlungen zu festigen.
2. Das 2. Experiment erfordert in der Bereitstellung der Geräte einen hohen Aufwand. Wegen der historischen Bedeutung und der großen Anschaulichkeit ist es jedoch gerechtfertigt.

### Herstellen des Zylinders mit Kolben und des Balanciers

Für die Herstellung des Zylinders und des Kolbens ist es ratsam, einen Fachmann heranzuziehen. Die in den Abbildungen 2.7.4./1 und 2.7.4./2 angegebenen Abmessungen stellen Richtwerte dar. Sie können je nach dem vorhandenen Material variiert werden. Als Werkstoff ist Messing besonders geeignet. Die Deckplatten  $A_1$  und  $A_2$  sind unter Zwischenlage einer Heißdichtung mit 4 Gewindeschrauben befestigt. Als Hähne  $G_1$  bis  $G_3$  können solche von Gaskocheranschlüssen verwendet werden. Eine zusätzliche Dichtung der Kolbenrillen ist nicht erforderlich, da sich dort Wasser ansammelt und für ausreichende Dichtung sorgt.

Die Anfertigung des Balanciers erfolgt gemäß Abbildung 2.7.4./3 aus Holz. Er kann auch durch eine stabile Holzleiste von rechteckigem Querschnitt ersetzt werden. Das Drehlager wird aus Stativteilen zusammengestellt.

### Experiment 1

Der Papinsche Dampfzylinder (Abb. 2.7.4./4) wird mit etwas Wasser gefüllt und über der Bunsenbrennerflamme erhitzt, bis aus der kleinen Öffnung am oberen Zylinderende Dampf austritt. Dann wird der Bunsenbrenner entfernt und die Öffnung mit etwas Plastilin verschlossen. Danach taucht man den Zylinder in das Becherglas mit kaltem Wasser. Es entsteht durch die Kondensation des Dampfes ein Unterdruck und der Luftdruck treibt den Kolben schlagartig nach unten.



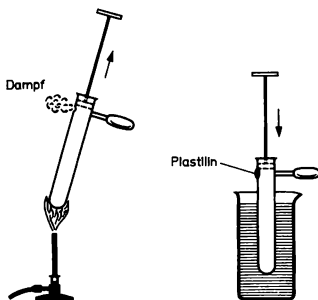


Abb. 2.7.4./4  
Experimente zur Papinschen  
atmosphärischen Maschine

### Experiment 2

Der experimentelle Aufbau geht aus Abbildung 2.7.4./5 hervor. Die Hähne  $G_1$ ,  $G_2$  und  $G_3$  sind stets geöffnet.

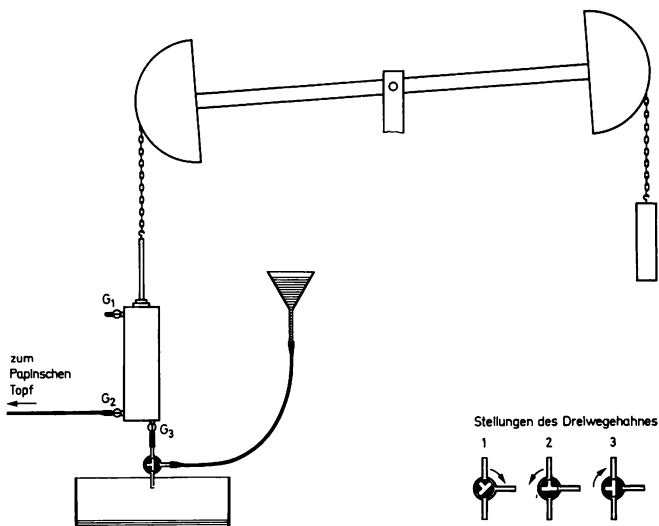


Abb. 2.7.4./5 Experiment zur atmosphärischen Maschine von Newcomen

Ein Arbeitstakt wird folgendermaßen demonstriert:

1. Dreiwegehahn in Stellung 1. Dampfahh am Papinschen Topf langsam öffnen. Das Wägestück zieht den Kolben nach oben.
2. Dampfahh am Papinschen Topf schließen. Dreiwegehahn in Stellung 2 bringen, bis die notwendige Menge Wasser aus dem Trichter in den Zylinder gespritzt ist. Drehwegehahn wieder in Stellung 1 drehen. Der Luftdruck ( $G_1$  ist geöffnet!) drückt den Kolben nach unten.
3. Dreiwegehahn in Stellung 3, damit Kondens- und Einspritzwasser abfließen (evtl. Dampfahh am Papinschen Topf wenig öffnen).

#### Bemerkungen

1. Es ist günstig, vor dem eigentlichen Experiment den Zylinder mit durchströmendem Dampf zu erwärmen, damit beim ersten Arbeitstakt nicht zuviel Dampf an den noch sehr kalten Zylinderwänden kondensiert.
2. Das Wägestück ist so groß zu wählen, daß es beim Herunterdrücken des Kolbens nicht ruckartig emporgeschleudert wird. Es ist sorgfältig zu befestigen!
3. Das Wasser im Trichter muß rechtzeitig ergänzt werden.

### 2.7.5. Watts einfach wirkende Dampfmaschine

Im Jahre 1769 erhielt James Watt ein auf 14 Jahre befristetes Patent, seine „neu erfundene Methode der Verminderung des Verbrauches von Dampf und Brennstoff in *Feuermaschinen* zu benutzen, auszuüben und zu verkaufen“. Die wichtigsten Patentansprüche sind nach Watt folgende:

„Erstens, das Gefäß, in welchem die Kräfte des Dampfes zum Antrieb der Maschine Anwendung finden sollen, welches bei gewöhnlichen Feuermaschinen Dampfzylinder genannt wird und welches ich Dampfgefäß nenne, muß während der ganzen Zeit, wo die Maschine arbeitet, so heiß erhalten werden, als der Dampf bei seinem Eintritte ist, und zwar erstens dadurch, daß man das Gefäß mit einem Mantel aus einem die Wärme schlecht leitenden Material umgibt, und daß man dasselbe zweitens mit Dampf umgibt.

Zweitens muß der Dampf bei solchen Maschinen in Gefäßen zur Kondensation gebracht werden, welche von den Dampfgefäßen oder -zylindern getrennt sind und nur von Zeit zu Zeit mit diesen in Verbindung stehen. Diese Gefäße nenne ich Kondensatoren, und es sollen dieselben, während die Maschinen arbeiten, durch Anwendung von Wasser mindestens so kühl gehalten werden, als die die Maschine umgebende Luft.

Drittens . . .

Viertens beabsichtige ich die Expansionskraft des Dampfes zum Antrieb des Kolbens zu gebrauchen, in derselben Weise, wie der Druck der Atmosphäre jetzt bei gewöhnlichen Feuermaschinen benutzt wird. In Fällen, wo kaltes Wasser (zur Kondensation des Dampfes) nicht in Fülle vorhanden ist, können die Maschinen durch diese Dampfkraft allein betrieben werden, indem man den Dampf, nachdem er seine Arbeit getan hat, in die freie Luft austreten läßt.

Endlich wende ich zur dampf- und luftdichten Dichtung des Kolbens oder anderer Maschinenteile an Stelle von Wasser Öle, harzige Körper, Tierfett etc. an.“

Die wichtigste Veränderung gegenüber den Newcomen-Maschinen war neben der Einführung des Kondensators die Ausschaltung des atmosphärischen Drucks als Agens zum Betrieb der Maschine. Die Wattsche Maschine war also tatsächlich eine *Dampfmaschine*.

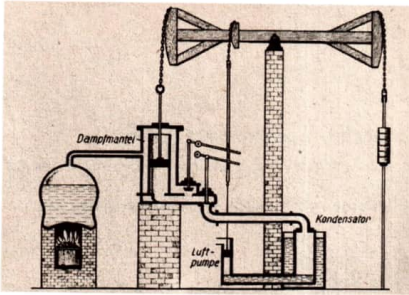


Abb. 2.7.5./1  
Schema der einfach  
wirkenden Dampfmaschine  
von Watt

Das Prinzip der ersten Watt'schen Dampfmaschine von 1776 zeigt die Abbildung 2.7.5./1. Dampfmantel und oberer Zylinderraum sind ständig mit Dampf gefüllt. Nach Öffnen des Dampfventils strömt Dampf auch unter den Kolben, auf dessen beiden Seiten jetzt der gleiche (Dampf-)Druck herrscht. Das Pumpengestänge und dessen Zusatzgewicht ziehen deshalb mittels des Balanciers den Kolben nach oben. Nun wird durch den Hebel am Steuerbaum das Dampfventil geschlossen und durch die Luftpumpe im Kondensator ein Unterdruck erzeugt. Gleichzeitig öffnet sich das Ventil zum Kondensator.

Der Dampf aus dem unteren Zylinderteil strömt in den Kondensator und kondensiert dort. Der Dampfdruck im oberen Zylinderteil drückt den Kolben nach unten, und der Balancier zieht das Pumpengestänge empor.

Da der Dampfdruck ausschließlich bei der Abwärtsbewegung Arbeit verrichtet, wurde diese Maschine als *einfach wirkende Dampfmaschine* bezeichnet. Obwohl die Watt'sche Maschine nur mit einem Dampfdruck von 1,4 at arbeitete, also eine Niederdruckmaschine war, brachten die Einführung des Kondensators und die anderen technischen Veränderungen erhebliche Kohleersparungen. So benötigte die einfachwirkende Dampfmaschine nur die Hälfte der Kohlemenge einer „guten“ atmosphärischen Maschine.

## 2.7.6. Schulexperiment zur einfach wirkenden Dampfmaschine

1. Papinscher Topf
2. Heizplatte (1200 W)
3. Dampfzylinder mit Kolben ☹ (siehe 2.7.4.)
4. Balancier aus Holz ☹ (siehe 2.7.4.)
5. 2 Gliederkettenstücke, je 40 cm lang
6. T-Stück mit Dreiwegehahn
7. Zweiwegehahn
8. flache Wanne (etwa 300 mm × 200 mm × 100 mm)
9. Wägestück
10. Gummischläuche und Gummischlauchverbinder
11. 3 gebogene Glasrohre ☹
12. Glasrohr (4 cm Ø; Länge entsprechend Wanne 8)



Dampfdruck. Das Wägestück 9 auf der rechten Seite des Balanciers zieht den Kolben nach oben.

2. Durch die Luftpumpe wird im Kondensator 12 ein Unterdruck erzeugt (Stellung des Dreiwegehahns an der Pumpe beachten!).
3. Nacheinander werden nun die Hähne 6 und 7 in die Stellung 2 gedreht. Der Dampf unter dem Kolben strömt zum Kondensator und kondensiert, der Dampf auf der Kolbenoberseite drückt den Kolben nach unten.
4. Schließlich wird Hahn 7 in Stellung 1 gebracht, dann Dreiwegehahn 6 ebenfalls wieder in Stellung 1.

### *Bemerkungen*

1. Man kann auch alle nach dem Zweiwegehahn 7 folgenden Teile weglassen und — wie schon von Watt vorgeschlagen — den Dampf direkt in die umgebende Luft ausströmen lassen.
2. Das Wägestück zur Beschwerung ist so groß zu wählen, daß es beim Herabdrücken des Kolbens nicht ruckartig emporgeschleudert wird.
3. Die Luftpumpe ist nach dem Gebrauch gut zu trocknen.

## **2.8. Das mechanische Wärmeäquivalent**

Das Prinzip von der Erhaltung und Umwandlung der Energie, eine der fundamentalen Erkenntnisse der gesamten Naturwissenschaften, wurde zwischen 1842 und 1847 unabhängig voneinander von verschiedenen Wissenschaftlern angegeben. Für seine allgemeine Anerkennung waren mehrere Jahrzehnte notwendig. Im allgemeinen schreibt man seine Entdeckung dem deutschen Arzt Julius Robert Mayer (1814 bis 1878) und dem britischen Experimentalphysiker James Prescott Joule (1818 bis 1889) zu. Beide formulierten den allgemeinen Satz, daß Wärme, mechanische Arbeit, Elektrizität und andere äußerlich sehr verschiedene physikalische Erscheinungen lediglich verschiedene Formen ein und derselben Sache, die man damals „*lebendige Kraft*“ nannte, seien. Die konsequent mathematische Darstellung und die strenge mechanische Begründung der Gültigkeit dieses Prinzips für alle Teilgebiete der Physik gab Hermann von Helmholtz (1821 bis 1894) im Jahre 1847. Mayer berechnete 1842 das sogenannte mechanische Wärmeäquivalent aus einer neuartigen und tiefgehenden Deutung der spezifischen Wärmekapazitäten idealer Gase bei konstantem Druck bzw. bei konstantem Volumen; experimentell wurde der Wert für das mechanische Wärmeäquivalent erstmals 1843 von James Prescott Joule ermittelt.

Joule war von Untersuchungen über die Wärmewirkungen des elektrischen Stromes ausgegangen und hatte dabei erkannt, daß „Wärme“ und „mechanische Arbeit bewegter Körper“ ineinander gleichwertig umwandelbar sind. „Wir besitzen demnach in der Magnetoelektrizität eine Kraft, welche imstande ist, durch mechanische Mittel Wärme zu zerstören oder zu erzeugen“, ja darüber hinaus wird es möglich, „Wärme mit mechanischer Kraft in absolute numerische Beziehung zu bringen“, d. h. das mechanische Äquivalent der Wärme experimentell einwandfrei zu bestimmen, lauten die Schlußfolgerungen einer Arbeit „Über die erwärmenden Wirkungen der Magnetoelektrizität und über den mechanischen Wert der Wärme“, die er der Sektion für mathematische und physikalische Wissenschaften der British Association vorlegte. Er bestimmte darin den Wert des mechanischen Wärmeäquivalents zu 417 kpm/Cal.

In einem Nachtrag gab er dem Energieprinzip folgende Fassung: „Nach diesem allen werden wir zugeben müssen, daß Graf Rumford recht hatte, wenn er die bei der Bohrung von Kanonenröhren entwickelte Wärme der Reibung zuschrieb . . . Ich habe selbst durch Versuche bewiesen, daß sich Wärme beim Durchgange von Wasser durch enge Röhren entwickelt . . . Ich werde keine Zeit verlieren, diese Versuche zu wiederholen und auszudehnen, da ich überzeugt bin, daß die gewaltigen Naturkräfte durch des Schöpfers ‚Werde‘ unzerstörbar sind, und daß man immer, wo man eine mechanische Kraft aufwendet, ein genaues Äquivalent an Wärme erhält.“

Joule hat immer wieder neuartige Experimente zur Bestimmung der Wärmeäquivalente erdonnen und durchgeführt mit dem Ziel, „... imstande zu sein, einige neue und sehr feine Versuche mitzuteilen, um das mechanische Äquivalent der Wärme mit der Genauigkeit bestimmen zu können, welche die Bedeutung desselben für die Physik verlangt“.

### 2.8.1. Historisches Experiment zum mechanischen Wärmeäquivalent

Im Laufe seiner umfangreichen Untersuchungen zum elektrischen Wärmeäquivalent ist Joule auch auf das Grundprinzip zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents gestoßen. Danach kann Wärme durch mechanische Reibung erzeugt werden und sowohl die durch Reibung erzeugte Wärme (Energiedifferenz) sowie die dazu notwendige mechanische Energie können gemessen werden. Er beschreibt die Bestimmung des Wärmeäquivalents „durch die Wärme-Erregung bei Reibung von Flüssigkeiten“ (1847) in folgender Weise (Abb. 2.8.1./1 und 2):

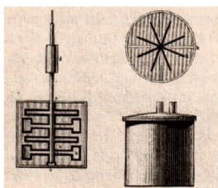


Abb. 2.8.1./1 Rührwerk der Jouleschen Experimentieranordnung

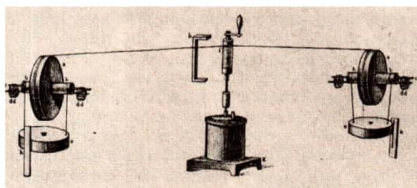


Abb. 2.8.1./2 Joulesche Experimentieranordnung

„In dem Phil. Magaz. für Sept. 1845 gab ich einen kurzen Bericht von Versuchen, die ich der britischen Naturforscher-Versammlung zu Cambridge vorgetragen hatte, und durch welche ich zeigte, daß durch die Reibung des Wassers, erzeugt durch Bewegung eines horizontalen Schaufelrades, Wärme erregt werde. Diese Versuche, obwohl völlig hinreichend die Äquivalenz der Wärme zur mechanischen Kraft darzutun, waren nicht geeignet, das Äquivalent mit großer Genauigkeit numerisch festzusetzen, da der Apparat in freier Luft aufgestellt und folglich deren abkühlender Wirkung ausgesetzt war. Ich habe nun die Versuche unter günstigeren Bedingungen und mit einem genaueren Apparat wiederholt.

An dem messingenen Schaufelrad hatte ich ein messingenes Rahmwerk angebracht, welches der Flüssigkeit hinreichenden Widerstand darbot. Dadurch war der Wandwiderstand

der Flüssigkeit gegen die Schaufeln sehr beträchtlich gemacht. Die angewandte Kanne war von Kupfer, umgeben von einer Hülle aus dünnem Zinn. Sie war verschlossen durch einen zinnernen Deckel mit einem geräumigen Loche zur Durchführung der Achse des Rades und zur Einführung eines empfindlichen Thermometers. Die Bewegung wurde dem Rade mitgeteilt durch eine auf der Achse sitzende Trommel, um welche eine Schnur gewickelt war, durch die mittels empfindlicher Rollen zwei Gewichte, jedes von 29 Pfund (etwa 13 kg), zu der Höhe von  $5 \frac{1}{4}$  Fuß gehoben werden konnten. Wenn die Gewichte mittels Drehung des Rades diesen Raum durchlaufen hatten, wurde die Trommel abgenommen, die Schnur wieder aufgewickelt und die Operation wiederholt. Nachdem dies zwanzig Mal geschehen, wurde die Temperatur bestimmt. Ich bemerke auch, daß sowohl die Versuche über die Reibung des Wassers, als auch die über die Interpolationen, zur Ermittlung des Effekts der umgebenden Atmosphäre, unter ähnlichen Umständen angestellt, ein jeder 40 Minuten dauerte.“

In der Auswertung der ermittelten Meßwerte stellt Joule fest: „Wir sehen also, daß die Gewichte von 29 Pfund, indem sie eine Höhe von 1265,13 Zoll durchfallen,  $0,668^\circ$  im Apparat erzeugen. Zur Reduktion dieser Größen ist es nötig, erstlich die Reibung der Rollen und der Schnur beim Abwickeln von der Trommel zu ermitteln. Das Äquivalent eines Fahrenheit'schen Grades Wärme bei 1 Pfd. (engl.) Wasser fand ich also gleich 781,5 Pfd. gehoben um einen Fuß.“

Diesem Ergebnis liegt eine mehrfach korrigierte Temperaturmessung und eine genaue Wasserwertsbestimmung der Apparatur zugrunde, so daß der ermittelte Zahlenwert für das mechanische Wärmeäquivalent nur wenig von dem heute international festgelegten abweicht.

## 2.8.2. Schulexperiment zum mechanischen Wärmeäquivalent

1. Glasspülbürste
2. Becherglas (600 ml)
3. 2 Rollen
4. 2 Wägestücke mit Haken (100 g)
5. Körper mit Haken (2 kg)
6. Thermometer  $\left( \text{Teilung } \frac{1}{10}^\circ \text{K} \right)$
7. Dederonfaden (1 mm  $\varnothing$ : 5 m lang)
8. Glyzerol (200 ml)

### Experimentelle Anordnung

Gemäß Abbildung 2.8.2./1 wird an der Tischkante ein Stativstab von 1 m Länge stabil vertikal befestigt. An ihm sind übereinander 2 feste Rollen angebracht, so daß die darauf liegenden Fäden an der Tischkante vorbeilaufen. Die Rollen sind an unterschiedlich langen Stielen befestigt.

Nach der gegenüberliegenden Seite sind am vertikalen Stativstab übereinander zwei Kugellager befestigt. In diese Kugellager wird als Welle ein Stativstab von 50 cm Länge eingeführt. An seinem unteren Ende trägt er eine Muffe, in die der Stiel der Glasspülbürste eingespannt ist. Beim Befestigen ist auf einen zentralen Sitz zu achten. Die Bürste ragt in das Becherglas, dessen Innenwände sie mit ihren Borsten berühren soll. Das Becherglas wird ebenfalls am vertikalen Stativstab befestigt, so daß kein Verdrehen möglich ist.

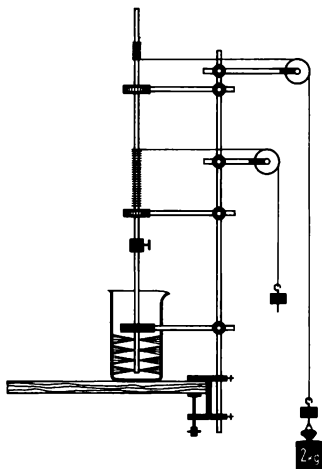


Abb. 2.8.2./1  
Experimentelle Anordnung zur Bestimmung  
des mechanischen Wärmeäquivalents

Auf der Welle wird gegenseitig an zwei übereinanderliegenden Stellen jeweils etwa 1 m Faden aufgewickelt. Die freien Enden der Fäden werden über je eine Rolle geführt und mit einer Schlaufe versehen. In jede Schlaufe wird ein 100-g-Wägestück eingehängt. An eines der kleinen Wägestücke wird das 2-kg-Wägestück gehängt, so daß es sich auf den Boden bewegt und dabei den anderen Faden weiter aufwickelt.

Das Becherglas wird mit Glycerol gefüllt. Dabei müssen alle Borsten in die Flüssigkeit hineinragen.

Die so zusammengestellte Anordnung muß einige Stunden stehenbleiben, bis sich ein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat.

### Experiment

Die Temperatur des Glycerols wird gemessen. Nachfolgend wird das große Wägestück abgehängt und an das andere kleine Wägestück angehängt. Es bewegt sich zu Boden und versetzt die Bürste in Drehbewegung. Dabei wickelt sich der andere Faden wieder auf. Nach dem Aufsetzen auf den Boden wird das Wägestück wieder umgehängt. Der Vorgang erfolgt so oft, daß sich das Wägestück insgesamt 40 mal zu Boden bewegt hat. Die Temperatur des Glycerols wird erneut gemessen. Sie hat sich um etwa 1 Kelvin erhöht.

### Beispiel

Gewichtskraft des großen Wägestückes  $F_G = 2 \text{ kp}$

Fallstrecke  $l = 1 \text{ m}$

Anzahl der Bewegungsabläufe  $n = 40$

Anfangstemperatur  $21,2^\circ \text{C}$

Endtemperatur  $22,3^\circ \text{C}$



Volumen des Glyzerols  $200 \text{ cm}^3$

Dichte des Glyzerols  $1,26 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Spezifische Wärmekapazität des Glyzerols  $c = 0,57 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Die an das Rührwerk abgegebene Energie errechnet sich aus der Gleichung

$$E_{\text{mech}} = F_G \cdot l \cdot n$$

$$E_{\text{mech}} = 2 \text{ kp} \cdot 1 \text{ m} \cdot 40$$

$$E_{\text{mech}} = 80 \text{ kpm}$$

Die an das Glyzerol abgegebene Energie beträgt

$$E_{\text{therm}} = c \cdot m \cdot \Delta\theta$$

$$E_{\text{therm}} = 0,57 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,2 \text{ dm}^3 \cdot 1,26 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot 1,1 \text{ K}$$

$$E_{\text{therm}} = 0,158 \text{ kcal}$$

Daraus folgt:  $1 \text{ Cal} = 506 \text{ kpm}$

#### Bemerkungen

1. Die Vorzüge der Verwendung von Glyzerol gegenüber Wasser liegen in der größeren Viskosität und der geringeren spezifischen Wärmekapazität des Glyzerols.
2. Vor der Durchführung des Experiments ist unbedingt der vollständige Temperaturausgleich abzuwarten. Das Experiment sollte zügig durchgeführt werden, damit die vom Glyzerol nach außen abgegebene Wärme vernachlässigbar klein bleibt.
3. Um den unmittelbaren Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen Joules zu ermöglichen, werden im Beispiel die damals üblichen Einheiten benutzt.
4. Der zu große Betrag für die aufzuwendende mechanische Energie resultiert aus den Reibungsverlusten der Apparatur außerhalb des Rührwerks und der Tatsache, daß auch das Becherglas und die Bürste mit erwärmt werden müssen. Es empfiehlt sich deshalb, mit einem dünnwandigen Becherglas und einer Bürste möglichst kleiner Masse zu arbeiten.

## 2.9. Kinetische Gastheorie

Die Entwicklung der kinetischen Gastheorie ist mit vielen Namen verbunden. Sie erstreckte sich über einen langen Zeitraum.

Bereits 1738 legte Daniel Bernoulli (1700 bis 1782) die Beschreibung einer Theorie vor, in der die Gasgesetze aus einem „Billardkugel“-Modell hergeleitet wurden. Diese kinetische Theorie befindet sich in Übereinstimmung mit modernen Auffassungen. Damals wurde sie aber wegen der noch herrschenden Wärmestofftheorie nicht akzeptiert. Erst deren Überwindung begünstigte Arbeiten zur kinetischen Theorie. Mehr als 100 Jahre nach Bernoulli griffen unter anderem James Prescott Joule (1818 bis 1889), August K. Krönig (1822 bis 1879), Rudolf Clausius (1822 bis 1888) und James Clerk Maxwell (1831

bis 1879) seine Ideen wieder auf und schufen eine wirklichkeitsadäquate kinetische Gastheorie.

Diese Theorie beeinflusste ganz wesentlich die Entwicklung der Thermodynamik. Sie entsprach den Bestrebungen der Zeit, alle Vorgänge mechanisch zu deuten. Durch Entwicklung und Nutzung statistischer Methoden wurde eine neue Betrachtungsweise eingeführt, die sich als außerordentlich fruchtbar für die gesamte Physik erwies. Mit dieser kinetischen Theorie wurde es möglich, stärker zum Wesen der Erscheinungen vorzudringen, als dies die phänomenologische Betrachtung erlaubte. Dadurch wurden auch große Fortschritte auf den Gebieten Wärmekraftmaschinen, Wärmeübertragung und in der Chemie möglich.

Experimente zum Nachweis der Gültigkeit der kinetischen Gastheorie müssen ermöglichen, wesentliche Daten der Moleküle und deren Bewegung zu bestimmen. Zwei Experimentgruppen spielten dabei eine besondere Rolle:

1. die Untersuchung der inneren Reibung von Gasen durch Maxwell und Oskar E. Meyer (etwa 1865),

2. die Entdeckung der Brownschen Bewegung (1827) und ihre Deutung (1905).

Die kinetische Gastheorie macht völlig andere Voraussagen über die Abhängigkeit der inneren Reibung in Gasen vom Druck und der Temperatur, als bis dahin angenommen wurde. Nach der alten Ansicht müßte die innere Reibung mit wachsender Dichte zunehmen und mit steigender Temperatur kleiner werden, so wie das bei tropfbaren Flüssigkeiten der Fall ist. Maxwell und O. E. Meyer (1834 bis 1909) wiesen jedoch unabhängig voneinander nach, daß die Aussagen der kinetischen Theorie richtig sind, nämlich, daß die innere Reibung von der Dichte unabhängig ist und mit steigender Temperatur zunimmt.

Bei ihren experimentellen Untersuchungen benutzten sie sowohl runde, an einem Torsionsdraht waagrecht aufgehängte schwingende Scheiben als auch Kapillaren, durch die das Gas hindurchströmen mußte. Mit diesen Anordnungen bestimmten sie die innere Reibung. Die zuletzt genannte Kapillarmethode ist gerätemäßig wesentlich einfacher und wird deshalb hier beschrieben.

Der englische Botaniker Robert Brown (1773 bis 1858) war vor allem erfolgreich auf dem Gebiet der Systematisierung von Pflanzen tätig. Dabei entdeckte er 1827 bei Untersuchungen mit dem Mikroskop, daß sich die in einer Flüssigkeit befindlichen sehr kleinen Körper unregelmäßig bewegen. Diese nach ihm benannte *Brownsche Bewegung* wurde erst lange nach ihrer Entdeckung in ihrem Wesen richtig gedeutet. 1905 schrieb Albert Einstein (1879 bis 1955) in seiner Arbeit „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“: „Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der Brownschen Molekularbewegung identisch sind.“ 1906 schrieb er: „... teilte mir Herr Siedentopf (Jena) mit, daß er und andere Physiker — zuerst wohl Herr Prof. Gouy (Lyon) — durch direkte Beobachtung zu der Überzeugung gelangt seien, daß die sogenannte Brownsche Bewegung durch die ungeordnete Wärmebewegung der Flüssigkeitsmoleküle verursacht sei. Nicht nur die qualitativen Eigenschaften der Brownschen Bewegung, sondern auch die Größenordnung der von den Teilchen zurückgelegten Wege entspricht durchaus den Resultaten der Theorie.“

Bereits vorher hatte es viele Deutungsversuche gegeben, aber wahrscheinlich führte Gouy 1888 die ersten exakten Untersuchungen durch.

Die Brownsche Bewegung ermöglichte die Bestimmung wichtiger thermodynamischer Größen, wie der Boltzmann-Konstanten und der mittleren freien Weglänge der Moleküle.

Robert W. Pohl äußerte über die Bedeutung der Brownschen Bewegung: „Die Brownsche

Bewegung gehört zu den bedeutsamsten Erscheinungen im Bereich der heutigen Naturwissenschaft. Hier ist dem Beobachter einmal ein Blick hinter die Kulissen des Naturgeschehens vergönnt. Es erschließt sich ihm eine neue Welt, das rastlose, sinnverwirrende Getriebe einer völlig unüberschaubaren Individuenzahl.“

### 2.9.1. Historisches Experiment zur inneren Reibung von Gasen

Oskar E. Meyer untersuchte bei Gasen die innere Reibung und deren Abhängigkeit von der Temperatur. Er führte seine Experimente mit Kapillarrohren verschiedener lichter Weite durch. Eines seiner Experimente beschrieb er so (Abb. 2.9.1./1): „Meine Absicht, die Luft durch eine enge Röhre so strömen zu lassen, daß trotz der

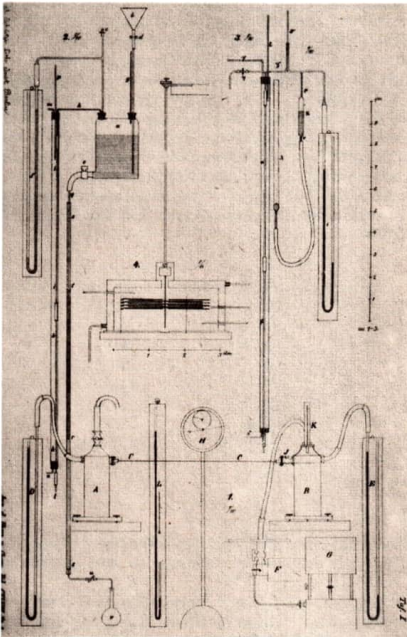


Abb. 2.9.1./1

Tafel 1:

Geräte zur Untersuchung  
der inneren Reibung von Gasen

Strömung der Druck der Luft sich nicht verändere, habe ich auf zweierlei Art erreicht. Bei dem ersten Apparate, der in Fig. 2 Taf. I in 10fach verkleinertem Maßstabe abgebildet

ist, geschah die Regulierung des constanten Drucks automatisch durch den Apparat selber.“ Weiter wird die Füllung der Flasche beschrieben, und dann heißt es: „Verschließt man den Hahn c als auch den Quetschhahn d, öffnet aber den unten angebrachten gläsernen Hahn e, so wird etwas Wasser ausfließen, und es wird die im oberen Teile von a befindliche Luft entsprechend verdünnt werden. . . . In den luftverdünnten Raum in a strömt durch ein System von Glasröhren h, i, k, welche durch dickwandige, eingefettete und mit Draht fest umwundene Kautschukschläuche untereinander luftdicht verbunden sind, Luft von außen ein, sobald der Glasstöpsel l herausgezogen wird.“ Es folgt die Beschreibung des Mantelrohres zur möglichen Einleitung von Dampf. „Von den 3 Röhren h, i, k ist i die Capillare, die den Transpirationsversuchen unterworfen werden soll; h und k sind Glasröhren gewöhnlicher Weite, von denen k den Zweck hat, die Luft bereits vor dem Eintritt in die Capillare i zu erwärmen.“ Meyer beschreibt die Durchführung des Experiments wie folgt: „Nachdem die Apparatur gefüllt und die Hähne c und d geschlossen waren, wurde durch Öffnung des Glashahns e die Luft verdünnt. In diesem Zustand ließ ich den Apparat mindestens einen Tag stehen, um die von dem Wasser absorbierte Luft bis auf einen dem Druck entsprechenden Grad demselben zu entziehen. Beim Beginne der Beobachtung wurde dann der Stöpsel l herausgezogen und der Hahn u bis zu einer passend scheinenden Stellung, die sich leicht nach der Zahl der fallenden Tropfen beurteilen läßt, geöffnet . . . War nun erreicht, daß sich während einer Dauer von etwa 10 Minuten kein erhebliches Schwanken des Manometers, noch auch des Thermometers wahrnehmen ließ, so begann ich die Messung, indem mit einem Pendelschlage einer Sekunden-Uhr das gewogene Fläschchen, das 100 cm<sup>3</sup> faßte, unter die Öffnung des unteren Hahnes geschoben wurde . . . War das Fläschchen gefüllt, so wurde wiederum mit dem Schläge einer Secunde der Hahn e geschlossen, darauf auch u.“ Danach wurde das Fläschchen abermals gewogen. Aus der großen Anzahl von Tabellen sei die vom 19. Mai 1872 hier aufgeschrieben:

Mai 19.

	Nicht erwärmt	erwärmt
Manometer	77,9	83,2
Barometer 0°	74,82	74,78
Therm. i. d. Flasche	20,8	24,3
Therm. i. d. Röhre	20	99
Beobachtungsdauer	10'	12'
Gewicht des Wassers	86,83	75,62
Temp. d. Wassers	20,6	21,5
Reibungskoeffizient	0,000180	0,000212

Daraus erhielt er die Interpolationsformel

$$\eta = 0,000171(1 + 0,0024 \cdot \vartheta),$$

in der zwar der Temperaturkoeffizient mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist, die aber eindeutig eine direkte Abhängigkeit der inneren Reibung von der Temperatur ausweist.

Die obigen Werte wurden mit einer Kapillare mit 0,32 mm Innendurchmesser gemessen. Gleiche Werte für den Reibungskoeffizienten erhielt Meyer bei der Benutzung einer Kapillare von 0,14 mm Durchmesser, woraus der Schluß zu ziehen ist, daß die äußere Reibung zwischen Luft und Glas zu vernachlässigen ist.

Damit wurde die von der kinetischen Theorie vorausgesagte Proportionalität zwischen innerer Reibung und Temperatur bei Gasen experimentell bestätigt.

## 2.9.2. Schüllexperiment zur inneren Reibung von Gasen

- |   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. Kapillarrohr (80 cm lang; 0,35 mm Innendurchmesser oder kleiner) | 6. Thermostat (bis 100 °C) |
| 2. Glasrohr (1 m lang; etwa 25 mm Durchmesser)                      | 7. Glasrohre               |
| 3. Abklärflasche (etwa 2 l)   | 8. Gummischlauch           |
| 4. Meßzylinder (100 ml)   | 9. 3 Auslaufventile        |
| 5. Stoppuhr   | 10. Gummistopfen           |
|   | 11. angefärbtes Wasser     |

### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment läßt nur qualitative Aussagen zu. Das hat keine Auswirkungen auf die zu gewinnende Erkenntnis. Trotz des relativ einfachen Aufbaus ist die Reproduzierbarkeit der Meßwerte gut.
2. Es ist nützlich, die Schüler darauf hinzuweisen, daß bei Flüssigkeiten eine völlig andere Temperaturabhängigkeit der inneren Reibung vorliegt.

### Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau erfolgt entsprechend Abbildung 2.9.2./1. Das Kapillarrohr e ist von Wasser umflossen, dessen Temperatur durch den Thermostaten auf bestimmten Werten gehalten wird. Da die Luft zunächst durch ein dickeres etwa 10 cm langes Glasrohr im Wasser fließt, ist sicher, daß sie in der Kapillare überall die Temperatur des Wassers hat. Dem Wasser in der Abklärflasche gibt man etwas Spannungsmittel bei. Dadurch wird die Reproduzierbarkeit der Meßwerte deutlich besser.

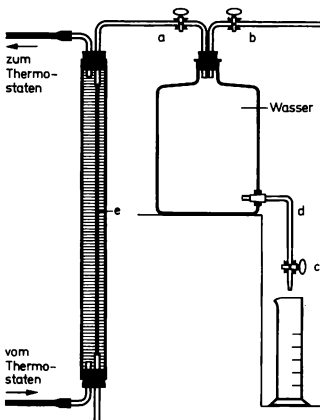


Abb. 2.9.2./1  
Experimenteller Aufbau  
zur Bestimmung der inneren Reibung von Gasen

*Experiment*

Gemessen wird das Volumen der Luft, das in einer bestimmten Zeit durch ein Kapillarrohr gezogen wird, wobei das Volumen umgekehrt proportional der inneren Reibung ist. Die Sogwirkung entsteht durch Wasser, das aus einer Abklärflasche tropft.

Zunächst bringt man das Wasser in der Glasröhre mit Hilfe des Thermostaten auf die gewünschte Temperatur. Alle 3 Ventile sind geschlossen.

Als erstes öffnet man den Hahn c, worauf über das Rohr d so lange Wasser abläuft, bis sich in der Abklärflasche über dem Wasser der Druck nicht mehr ändert. Dann öffnet man den Hahn a, wartet noch einige Sekunden und mißt dann mit einem Meßzylinder und einer Stoppuhr die in einer bestimmten Zeit austropfende Wassermenge, die das gleiche Volumen hat wie die durchgesaugte Luft.

Das gleiche wiederholt man dann bei einer anderen Temperatur. -

*Beispiel für ermittelte Meßwerte*

(Die notierten Werte sind das Ergebnis mehrerer Messungen, haben also eine hohe Sicherheit.)

Temperatur in °C	Zeit in min	Volumen in cm <sup>3</sup>
20	5	100
90	5	80

*Ergebnis:* Mit steigender Temperatur steigt auch die innere Reibung der Luft.

*Bemerkungen*

1. Bei Kapillarrohren mit geringerem Innendurchmesser ist der nachzuweisende Effekt noch wesentlich deutlicher.
2. Eine grobe Messung des Innendurchmessers einer Kapillare ist mit Hilfe eines Drahtes bekannten Durchmessers, der sich gerade noch hineinschieben läßt, möglich.
3. Um die experimentellen Bedingungen möglichst konstant zu halten, sollte man darauf achten, daß die Höhe des Wasserspiegels in der Abklärflasche nicht allzusehr schwankt.
4. Die Messung des Unterdrucks in der Abklärflasche ist leicht durch den Anschluß eines U-Rohr-Manometers am Hahn b möglich. In unserem Experiment wurde als Differenz zum äußeren Luftdruck ein Wert von 490 mm Wassersäule gemessen.
5. Auf den Thermostaten kann man verzichten, wenn der Durchmesser des Mantelrohres groß genug ist. Bei genügender Wärmedämmung, z. B. durch Umwickeln mit Schaumgummi, genügt die Wärmekapazität des eingefüllten heißen Wassers, um die Temperatur während der Messung annähernd konstant zu halten. Ein eingefügtes Thermometer ermöglicht die Kontrolle der Temperatur.

**2.9.3. Historisches Experiment von Brown**

Unter der Überschrift „*Mikroskopische Beobachtungen über die in Pollen der Pflanz enthaltenen Partikeln, und über das allgemeine Vorkommen activer Molecüle in organischen und unorganischen Körpern; von Robert Brown*“ erschien 1828 in den *Annalen der Physik* die Beschreibung einer botanischen Untersuchungsfolge und daraus zu ziehende Schlußfolgerungen.

„Die Beobachtungen, welche ich hier summarisch mitzuteilen beabsichtige, sind sämtlich mit einem einfachen Mikroskope angestellt und zwar mit einer und derselben Linse, deren Brennweite ungefähr  $\frac{1}{32}$  Zoll betrug.“ So beginnt der Artikel, in dem es um eine „Untersuchung über das unbefruchtete Pflanzenei (Ovulum) und um die Struktur des Pollens und seine Wirkungsweise auf den Stempel bei Samenpflanzen gehen soll“.

Zunächst untersuchte er die Pflanze Mandelröschen (*Clarkia pulchella*) und stellte fest, daß die Körner ihres Pollens „... mit Partikeln oder Körnchen von ungewöhnlicher Größe gefüllt (waren). Ihre Länge schwankte von fast  $\frac{1}{4000}$  Zoll bis ungefähr  $\frac{1}{5000}$  Zoll ... Als ich die Gestalt dieser in Wasser getauchten Partikeln untersuchte, bemerkte ich, daß viele von ihnen sichtlich in Bewegung waren. Ihre Bewegung bestand nicht bloß aus einer Ortsveränderung in der Flüssigkeit ... , sondern auch nicht selten aus einer Veränderung der Teilchen selbst. Einige wenige Partikeln sah man sich um ihre eigene Achse drehen ... Nach häufiger Wiederholung dieser Beobachtungen überzeugte ich mich, daß diese Bewegungen weder von Strömungen in der Flüssigkeit, noch von deren allmählicher Verdampfung herrührten, sondern den Partikelchen selbst angehörten.“ Er beobachtete auch „Partikeln von weit geringerer Größe, die anscheinend sphärisch und in rascher oscillatorischer Bewegung begriffen waren“, und nannte diese „Molecul“.

Er dehnte seine „Beobachtungen auf mehrere Pflanzen derselben natürlichen Familie“ aus und fand, „daß bei ihnen ... im Allgemeinen dieselbe Form und ähnliche Bewegungen der Partikeln vorhanden waren“.

Unter der oben genannten Zielstellung untersuchte Brown „viele Species mehr oder weniger wichtiger und merkwürdiger Familien“. „In allen diesen Pflanzen wurden Partikeln gefunden, welche ... ähnliche Bewegungen wie die bereits beschriebenen zeigten.“

Bei einer Sorte Pollen findet er sphärische Partikeln von zweierlei Größe, die „nach Eintauchung in Wasser gewöhnlich in lebhafter Bewegung begriffen“. Er vermutet, daß „die scheinbare Bewegung der größeren Partikeln vielleicht durch eine Oscillation der zahlreichen Moleculé veranlaßt worden ist“.

Hartnäckig bemüht er sich darum zu bestimmen, wie weit die Bewegung der Teilchen geht.

„Nachdem ich bei den Partikeln des Pollens aller von mir untersuchten lebenden Pflanzen eine Bewegung beobachtet hatte, wurde ich zunächst zu der Untersuchung geführt, ob dieselbe auch nach dem Tode der Pflanzen fortbestände, und auf wie lange. In Pflanzen, die entweder getrocknet oder einige Tage in Weingeist aufbewahrt worden waren, fanden sich beide Arten der Pollen-Partikeln in einer ebenso deutlichen Bewegung, wie bei den lebenden Pflanzen.“ Auch Pflanzen, welche „wenigstens ein Jahrhundert hindurch getrocknet in einem Herbarium aufbewahrt worden waren, zeigten noch die Moleculé ... in offener Bewegung“.

Als er schließlich auch in zerquetschten Pflanzenteilen diese Bewegung fand, glaubte er „in der Tat die vorausgesetzten constituierenden oder elementaren Moleculé der organischen Körper“ gefunden zu haben, die damals im Gespräch waren.

Er untersuchte weiter „Producte von organischen Körpern, Steinkohle, ... selbst Staub und Ruß“. Sogar fossiles Holz zeigte die genannten Eigenschaften. Dann kamen Fensterglas, einfache Erden, Metalle und eine große Anzahl von Mineralien an die Reihe. Selbst als er die untersuchten Stoffe erhitzte oder gar verbrannte und dann in Wasser legte, fand er die Partikeln in Bewegung.

Eine Erklärung des Sachverhaltes findet sich nicht. „Ich werde gegenwärtig nicht weiter ins Detail gehen, noch über diese, wie es scheint in unorganischen und organischen Körpern so allgemein verbreiteten Moleculé irgendeine Vermutung wagen.“

Diese Aufzählung beweist die Gründlichkeit Browns. Eine Begründung fand er jedoch nicht. Diese war zu seiner Zeit nicht möglich, da das Wesen des untersuchten Phänomens, die Bewegung entsprechend kleiner Teile als Ergebnis der thermischen Bewegung der Moleküle, erst sehr viel später erkannt wurde. Die kinetische Theorie ermöglichte dann eine zwanglose Erklärung. Sie wurde ihrerseits durch diese Erscheinung experimentell gestützt.

## 2.9.4. Schulexperiment zur Brownschen Bewegung

1. Mikroskop, etwa 600fache Vergrößerung mit Beleuchtungseinrichtung
2. Pollen beliebiger Blüten oder PVAC-Suspension (Latexfarbe oder -kleber) oder Tusche
3. Objektträger mit Hohlschliff und Deckgläser
4. Wasser

### *Methodische Hinweise*

1. Die Beobachtung der Teilchenbewegung ist sehr eindrucksvoll, kann aber nur jeweils von einem Schüler vorgenommen werden, was für die Planung des Unterrichts von Wichtigkeit ist. Deshalb ist eine Objektivierung über Fernsehkamera und Bildschirm nützlich.
2. Um zu gewährleisten, daß die Schüler wirklich die gewünschten Effekte beobachten, ist es notwendig, sie vorher gründlich mit dem zu Erwartenden vertraut zu machen, falls keine Projektion möglich ist.

### *Experiment*

Man gibt einen sehr kleinen Tropfen der aufzuschlämmenden Substanz in die Höhlung des Objektträgers, füllt mit Wasser auf und verrührt. Das Wasser darf nur noch eine geringe Trübung aufweisen. Mit einem Deckgläschen wird das Präparat abgedeckt und auf den Objektträgertisch des Mikroskops gebracht. Das Mikroskop wird zunächst so eingestellt, daß der Abstand zwischen Objektiv und Präparat sehr klein ist. Dann wird bei gleichzeitiger Beobachtung des Präparates im Mikroskop dieser Abstand langsam vergrößert, bis man deutlich die Bewegung der Partikeln beobachten kann.

### *Bemerkungen*

1. Die genannten Substanzen sind gleichermaßen gut geeignet, jedoch kann man bei einigen Tuschsorten neben der Translationsbewegung auch Rotationsbewegung beobachten.
2. Durch Optimierung der Beleuchtung des Präparates kann man zu hervorragenden Beobachtungsergebnissen kommen.
3. Subjektiv erleichtert wird die Beobachtung bei Verwendung eines Mikroskops mit binokularem Tubus.



## 2.10. Die elektrische Elementarladung

In der Mitte des 19. Jahrhunderts gelangte Michael Faraday bei seinen Experimenten zur elektrolytischen Zersetzung wäßriger Lösungen zu dem Ergebnis, daß zur Abscheidung einer bestimmten Anzahl einwertiger Atome immer die gleiche Elektrizitätsmenge erforderlich ist, daß zur Abscheidung zweiwertiger Atome eine doppelt so große Elektrizitätsmenge benötigt wird usw. Es lag also nahe, sich der Spekulationen Benjamin Franklins (1706 bis 1790) über die Existenz von „Atomen der elektrischen Materie“ zu erinnern und intensiv nach der „natürlichen Einheit der Elektrizität“, der elektrischen Elementarladung  $e$ , zu suchen.

Die erste Abschätzung des Betrages von  $e$  geht auf den britischen Forscher G. Johnstone Stoney (1826 bis 1911) zurück. Aus der Elektrizitätsmenge, die notwendig ist, um aus einer wäßrigen Lösung 1 Gramm Wasserstoff abzuscheiden, und aus der Anzahl von Molekülen in 1 Mol Wasserstoff, d. h. aus der Avogadro-Konstanten, berechnete er im Jahre 1874 den viel zu kleinen Wert  $e = 0,1 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Die Abschätzung Stoney's mußte fehlschlagen, weil zu jener Zeit nur die Größenordnung der Avogadro-Konstanten bekannt war. Die damals benutzten, mit Hilfe der kinetischen Gastheorie ermittelten Werte schwankten zwischen  $2 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  und  $20 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Aber selbst bei Kenntnis des exakten Wertes hätte Stoney lediglich zeigen können, daß zur Abscheidung eines Wasserstoffatoms *im statistischen Mittel* eine Elektrizitätsmenge  $e$  erforderlich ist.

Der schwerwiegende Mangel, sich stets auf Aussagen über einen statistischen Mittelwert beschränken zu müssen, wurde erst 1909 von Robert Andrews Millikan (1868 bis 1953) überwunden. Seine Tropfenmethode gestattete es, erstmals kleinste Elektrizitätsmengen zu isolieren. Sie führte zur vollen Bestätigung der atomistischen Theorie der Elektrizität und bewies die Existenz einer unteilbaren elektrischen Elementarladung. In den Jahren nach 1909 entwickelte Millikan die Tropfenmethode zu höchster experimenteller Perfektion weiter und erhielt schließlich  $e = (1,591 \pm 0,002) \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Damit war nicht nur die Messung einer der wichtigsten physikalischen Konstanten gelungen, es war auch die atomistische Struktur der elektrischen Ladung belegt und damit eine wesentliche Grundlage für die Elektronentheorie, für das Periodensystem der Elemente und die Kernphysik geschaffen.

### 2.10.1 Historisches Experiment zum Nachweis der elektrischen Elementarladung

Bei der Tropfenmethode Millikans werden winzige geladene Öltropfen zwischen die waagrecht angeordneten Platten eines Luftkondensators gebracht. Im ersten Schritt des Experiments sind beide Platten geerdet, und auf die Öltropfen wirken die Schwerkraft, die Auftriebskraft und die Stokes'sche Reibungskraft  $\vec{F}_R = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot \vec{v}$ . Es gilt:

$$(1) \quad 0 = \frac{4\pi}{3} r^3 (\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}}) \cdot g - 6\pi\eta_{\text{Luft}} \cdot r \cdot v$$

Im zweiten Schritt bleibt die untere Platte geerdet, und die obere wird auf ein negatives Potential gelegt, welches ausreicht, einen die positive Elektrizitätsmenge  $q$  tragenden Tropfen zur Richtungsänderung zu zwingen. Dann gilt:

$$(2) \quad 0 = q \cdot E - \frac{4\pi}{3} r^3 (\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}}) \cdot g - 6\pi\eta_{\text{Luft}} \cdot r \cdot v_2$$

Aus (2) läßt sich der Tropfenradius  $r$  mit Hilfe von (1) eliminieren:

$$(3) \quad q = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{g \cdot \eta_{\text{Luft}}}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( \frac{1}{g(\varrho_{\text{Öl}} - \varrho_{\text{Luft}})} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(v_1 + v_2) \cdot v_1^{\frac{1}{2}}}{E}.$$

Es ist also möglich,  $q$  durch Messung der Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  exakt zu bestimmen, wenn nur die Viskosität von Luft,  $\eta_{\text{Luft}}$ , die Dichten von Öl und Luft,  $\varrho_{\text{Öl}}$  bzw.  $\varrho_{\text{Luft}}$ , sowie die elektrische Feldstärke  $E$  mit ausreichender Genauigkeit bekannt sind. Man kann das Vorgehen auch so interpretieren: Im ersten Schritt des Experiments wird vom Öltropfen, von dem zwar die Dichte, nicht aber der Radius bekannt ist, durch Messung von  $v_1$  die Masse bestimmt, und im zweiten Schritt wird durch Messung von  $v_2$  festgestellt, welche Elektrizitätsmenge der Tropfen trägt.

Millikan ging davon aus, daß alle Elektrizitätsmengen  $q$  stets als ganzzahlige Vielfache  $q = n \cdot e$  der Elementarladung  $e$  auftreten müßten, und versuchte, diese in allen von ihm bestimmten  $q$ - und  $\Delta q$ -Wert als gemeinsamen Faktor aufzuspüren. „Aber als diese Gleichung [Gleichung (3)] an unterschiedlichen Tropfen und damit auch an Tropfen unterschiedlicher Größe getestet wurde, stellte sich heraus, daß die für  $e$  erhaltenen Werte stets um so größer waren, je kleiner die Geschwindigkeit unter dem Einfluß der Gravitation  $[v_1]$  war. Hingegen lieferte die Gleichung perfekt übereinstimmende Ergebnisse, solange die verschiedenen Tropfen mit der gleichen Geschwindigkeit  $v_1$  fielen.“ Millikan erkannte, daß die Stokesche Reibungskraft nicht länger als  $\vec{F}_R = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot \vec{v}$  angesetzt werden darf, sobald die mittlere freie Weglänge  $l$  der Luftmoleküle nicht mehr sehr klein gegenüber dem Radius  $r$  der Tropfen ist. Dies war aber bei seinen Experimenten gerade der Fall, und das Reibungsgesetz mußte korrigiert werden. Millikan verwendete

$$F_R = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \left/ \left( 1 + A \frac{l}{r} \right) \right.,$$

wobei  $A$  eine zunächst noch unbestimmte Konstante war. In den Gleichungen (1) bis (3) war dann selbstverständlich für  $\eta_{\text{Luft}}$  jeweils  $\eta_{\text{Luft}} \left/ \left( 1 + A \frac{l}{r} \right) \right.$  zu setzen.

Die komplizierte Aufgabe, im ersten Schritt jetzt neben  $r$  auch noch  $A$  bestimmen zu müssen, löste Millikan durch ein spezielles Verfahren der sukzessiven Approximation und erhielt  $A = 0,874$ .

Die mit der Korrektur verbundenen Schwierigkeiten entfallen jedoch, wenn nur die Existenz einer elektrischen Elementarladung bewiesen, nicht aber deren exakter Betrag gemessen werden soll. Derartige Experimente wurden von Millikan 1909 durchgeführt. Da innerhalb einer Versuchsreihe immer nur ein einziger Tropfen untersucht wird, dessen Ladung sich während des Experiments veränderte, und da die Geschwindigkeit  $v_1$  des Tropfens von seiner Ladung  $q$  nicht abhängt, reduziert sich die Gleichung (3) zu

$$(4) \quad q = C_1 \cdot (v_1 + v_2) = C_2 \cdot (1/t_1 + 1/t_2).$$

Hierin sind  $C_1$  und  $C_2$  nicht weiter interessierende Konstanten und  $t_1$  und  $t_2$  die Zeiten, die der Tropfen braucht, um sich über die Meßstrecke zu bewegen. Ändert sich die Ladung des Tropfens von  $q$  auf  $q'$ , so gilt:

$$(5) \quad \Delta q = q' - q = C_1 \cdot (v'_2 - v_2) = C_2 \cdot (1/t'_2 - 1/t_2).$$

Eine der von Millikan verwendeten Apparaturen ist in Abbildung 2.10.1./1 dargestellt. Der Zerstäuber A ragt in ein zylindrisches Messinggefäß D. Er erzeugt Öltropfen eines Durchmessers von  $0,2 \mu\text{m}$  bis  $1 \mu\text{m}$ , die aufgrund des mit der Zerstäubung verbundenen

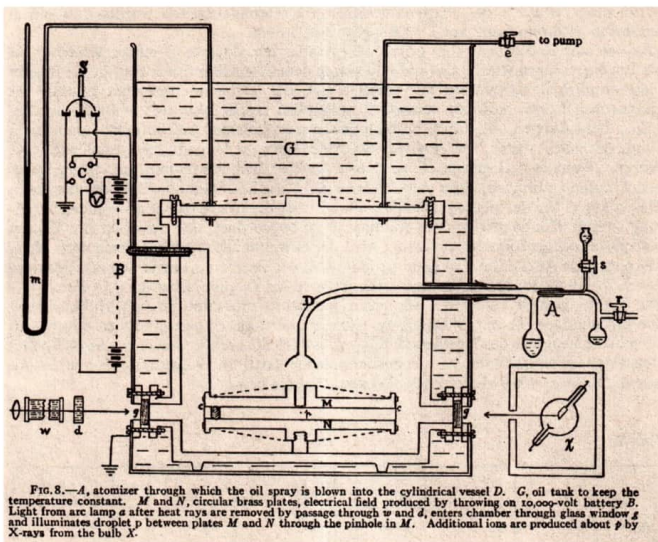


Abb. 2.10.1./1 Von Millikan verwendete Apparatur

Reibungsprozesses mehr oder weniger stark geladen sind. Die zur Zerstäubung notwendige Luft ist vollkommen staub- und wasserfrei. Zur Druckmessung dient das Quecksilbermanometer m. Die beiden kreisförmigen Kondensatorplatten M und N aus Messing haben einen Durchmesser von 22 cm. Sie werden durch Hartgummistützen im Abstand von 16 mm gehalten. Die Potentialdifferenz zwischen beiden Platten beträgt maximal 10 kV; sie wird durch die Batterie B erzeugt. Der Kippschalter S dient zum abwechselnden Laden und Entladen des Kondensators. Einige wenige Öltröpfchen können ein kleines Loch p in der Mitte der oberen Platte passieren und geraten so in den Raum zwischen den Kondensatorplatten. Dieser Zwischenraum wird von links mit einer Bogenlampe beleuchtet und von vorn mit Hilfe eines Meßfernröhres betrachtet. Von rechts kann die sich zwischen den Platten befindende Luft durch Röntgenstrahlung ionisiert werden. Um dies alles zu ermöglichen, enthält das äußere Gehäuse drei Glasfenster g, und auch der Hartgummiring c, der beide Platten umschließt, besitzt drei Öffnungen. Da jegliche Konvektion der Luft zwischen den beiden Platten vermieden werden muß, steht das ganze Gefäß in einem Ölbad G konstanter Temperatur. Zusätzlich wird die von der Bogenlampe erzeugte Wärme durch eine Wasserzelle w und eine Kupferchloridzelle d absorbiert.

Wurde der Schalter S jeweils im rechten Moment umgeschaltet, dann konnte ein positiv geladener Tropfen (bei Umpolung auch ein negativ geladener) stundenlang zwischen den beiden Platten in Bewegung gehalten werden. Die Meßstrecke betrug bei Millikans Ex-

perimenten etwa  $2/3$  des Plattenabstandes; die Durchlaufzeiten wurden mit einem speziellen „Chronoskop“ auf  $1/1000$  s genau gemessen.

„Als wir das Experiment zum ersten Mal ausführten, dauerte es einige Minuten, bis ein Ion eingefangen wurde. Der Einfang wurde dem Betrachter durch eine Änderung der Geschwindigkeit signalisiert, mit welcher sich der Tropfen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes aufwärts bewegte.“ Anfänglich beschränkte sich Millikan nur auf solche Umladungen, die durch Einfang der in gewöhnlicher Luft immer vorhandenen Ionen verursacht waren. Später ging er aber dazu über, die Umladungen gezielt herbeizuführen. „Wenn es z. B. gewünscht wird, eine positive Elementarladung auf einen gegebenen Tropfen zu bringen, dann wird letzterer mit Hilfe des Feldes dicht an der negativen Platte, sagen wir der oberen, gehalten. Dann wird die Quelle der ionisierenden Strahlung — eine Röntgenröhre oder Radium — so angeordnet, daß zwischen den Platten eine gleichmäßige Ionisierung erzeugt wird. Da sich nun alle positiven Ionen nach oben, alle negativen nach unten bewegen, befindet sich der Tropfen in einem Schauer positiver Ionen. Wenn die Ionisation intensiv genug ist, wird der Tropfen sicherlich getroffen.“

Die Tabelle enthält Teile eines originalen Meßprotokolls samt der von Millikan nach den Gleichungen (4) und (5) durchgeführten Auswertung. Es gelang ihm zu zeigen, daß sowohl die Ladung  $q$  des Tropfens (7. Spalte) als auch die Ladungsänderung  $\Delta q$  (4. Spalte) stets als ganzzahlige Vielfache einer bestimmten Größe (6. und 9. Spalte) auftreten. Damit war die Existenz einer elektrischen Elementarladung bewiesen.

Tabelle

$t_1$	$t_2$	$\frac{1}{t_2}$	$\left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1}\right)$	$n$	$\frac{1}{n} \left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1}\right)$	$\left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}\right)$	$n$	$\frac{1}{n} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}\right)$		
in s	in s	in s <sup>-1</sup>	in s <sup>-1</sup>		in s <sup>-1</sup>	in s <sup>-1</sup>		in s <sup>-1</sup>		
11,848	80,708	,01236	,03234	6	,005390	,09655	18	,005366		
11,890	22,366	,04470				7	,005358	,12887	24	,005371
11,908	22,390									
11,904	22,368	,007192	1	,005348	,09138					
11,882	140,565					,01254	18	,005374		
11,906	79,600								,01616	
11,838	34,748	,02870	3	,005387	,11289					21
11,816	34,762									
11,776	34,846									

Dauer des Experiments: 45 min  
 Plattenabstand: 16 mm  
 Meßstrecke: 10,21 mm  
 Anfangsspannung: 5088,8 V  
 Endspannung: 5081,2 V  
 Temperatur: 22,82 °C

Druck: 75,62 cm Hg  
 $\rho_{\text{Oil}}$ : 0,9199 g · cm<sup>-3</sup>  
 $\eta_{\text{Luft}}$ : 0,0001824 P  
 $v_1$ : 0,08584 cm · s<sup>-1</sup>  
 (Mittelwert)



## 2.10.2 Schalexperiment zum Nachweis der elektrischen Elementarladung

1. Millikan-Kammer  $\Phi$ , dazu erforderliches Material:
  - a) Plastikplatte (50 mm  $\times$  27 mm  $\times$  10 mm)
  - b) 2 Messingplatten (40 mm  $\times$  10 mm  $\times$  1 mm)
  - c) 2 Deckgläser (50 mm  $\times$  27 mm  $\times$  0,5 mm)
  - d) Deckglas (27 mm  $\times$  10 mm  $\times$  0,5 mm)
  - e) dünner Gummi- oder Plastschlauch (25 cm)
  - f) isolierter Kupferdraht (40 cm)
  - g) Alleskleber
2. Glasküvette (10 cm  $\times$  5 cm  $\times$  2 cm)
3. Optikleuchte (12 V; 50 W)
4. Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
5. Optische Bank (50 cm)
6. 2 Kondensorlinsen ( $f = +120$  mm)
7. Prismenstisch
8. 4 Klemmreiter
9. Mikroskop, 100fache Vergrößerung, mit Okularmikrometer
10. Stromversorgungsgerät (100 V - )
11. Unterrichtsquellensatz ( $^{85}\text{Kr}$ )
12. Stoppuhr
13. Widerstand (100 k $\Omega$ ; 0,1 W)
14. Schalter

### Methodische Hinweise

1. Mit dem Experiment wird nachgewiesen, daß sich die elektrische Ladung feiner Rauchpartikel beim Umladen durch ionisierende Strahlung sprunghaft um ganzzahlige Vielfache einer kleinsten Ladung ändert.
2. Das Experiment eignet sich in der historischen Form nur für subjektive Beobachtung und kann daher in Arbeitsgemeinschaften als anspruchsvolles Experiment eingesetzt werden.
3. Die Zuleitungen zu den Kondensatorplatten und die Kondensatorplatten selbst müssen so gut isoliert sein, daß ein Berühren von spannungsführenden, leitenden Teilen des Gerätes ausgeschlossen ist.

### Herstellen der Millikankammer

Aus der Plastikplatte wird entsprechend Abbildung 2.10.2./1 ein Zwischenraum herausgefräst. Die Kammer ist von oben und unten zweimal durchbohrt. Auf die beiden Innenflächen der Kammer werden die Messingplatten geklebt, an die zuvor je ein Kupferdraht angelötet wurde. Die Messingplatten besitzen je eine Bohrung von 2 mm Durchmesser, die mit der größeren Bohrung durch die Kammerwand zusammenfallen muß. In die größeren Bohrungen wird ein Schlauch gesteckt. Danach werden die Gläser aufgeklebt und die Kammer mit Alleskleber abdichtet.

### Experiment

Die Optikleuchte, die beiden Kondensorlinsen, die mit Wasser gefüllte Küvette sowie die Millikan-Kammer werden auf der optischen Bank angeordnet (Abb. 2.10.2./2).

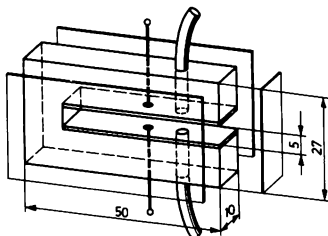


Abb. 2.10.2./1  
Aufbau der Millikan-Kammer

Der Abstand des Kondensors und der Leuchte von der Kammer wird so gewählt, daß das Bild des Glühfadens der Leuchte in der Mitte der Kammer entsteht. Die Beobachtung der Teilchen in der Kammer erfolgt im Dunkelfeld. Das Mikroskop wird daher um  $90^\circ$  seitlich versetzt an einem Stativ befestigt und das Objektiv unmittelbar an das Kammerfenster gebracht. Die beiden Kondensorplatten werden mit dem Stromversorgungsgerät verbunden. Die untere Platte wird geerdet. In die Zuleitung zur oberen Platte wird ein Schutzwiderstand von  $100\text{ k}\Omega$  geschaltet. Die beiden Platten können mit einem Schalter kurzgeschlossen werden. Der Schalter ist zunächst geschlossen. An die Platten wird eine Spannung von etwa  $100\text{ V}$  — gelegt.

Zur Durchführung des Experiments wird Tabakrauch durch den Schlauch in die Kammer geblasen und der Schlauch mit einem Quetschhahn verschlossen. Die Rauchpartikel erscheinen als helle Pünktchen auf dunklem Grund und fallen mit konstanter Geschwindigkeit nach unten (im Mikroskop nach oben). Öffnet man den Schalter, so bewegen sich die negativ geladenen Partikel nach oben (im Mikroskop nach unten), und zwar um so schneller, je größer ihre elektrische Ladung ist. Man sucht sich ein Teilchen, das sich möglichst langsam bewegt, für die weitere Messung heraus. Durch Öffnen und Schließen des Schalters sorgt man dafür, daß dieses Partikel stets eine bestimmte, möglichst große Strecke, die mit der Strichteilung des Okularmikrometers festgelegt wird, durchläuft. Man mißt die Fallzeit  $t_1$  sowie die Steigzeit  $t_2$  und notiert diese Werte. Nun werden die Partikel umgeladen. Dazu wird für einige Sekunden der Beta-Strahler ( $^{85}\text{Kr}$ ) an die Kammer gebracht, so daß die Luft in der Kammer ionisiert wird. Die negativen Luftionen sammeln sich bei geöffnetem Schalter vor der positiven Platte und die dort befindlichen Rauchpartikel nehmen mit hoher Wahrscheinlichkeit eine oder mehrere zusätzliche negative Ladungen an. Infolge der vergrößerten Ladung wird die Steigzeit kleiner, die

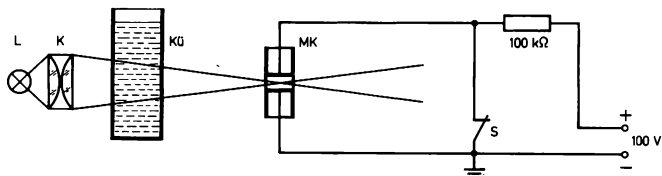


Abb. 2.10.2./2  
Nachweis der elektrischen Elementarladung

Fallzeit bleibt unverändert. Das Umladen wird noch ein- oder zweimal wiederholt, wobei stets die Fall- und Steigzeiten gemessen und festgehalten werden.

Die Auswertung des Experiments benützt die Gleichungen (4) und (5) von 2.10.1. Man zeigt, daß die Terme  $\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_2}$  und  $\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2}$  ganzzahlige Vielfache je einer konstanten

Größe sind. Die Ladung der Rauchpartikel ändert sich beim Umladen nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft in ganzzahligen Vielfachen eines elementaren Ladungsquantums.

## 2.11. Statische Elektrizität

Obwohl vereinzelte Kenntnisse zur Elektrizität, vor allem durch William Gilberts (1540 bis 1604) Untersuchungen an geriebenen Körpern (1600) vorlagen, wurden wesentliche Fortschritte auf dem Gebiet, das man historisch als Reibungselektrizität bezeichnet, erst im 18. Jahrhundert erreicht. Sie begannen mit Arbeiten von Gray und Dufay in den Jahren zwischen 1729 und 1737. Stephen Gray (1670 bis 1736) fand den Unterschied zwischen Leitern und Isolatoren, Charles Dufay (1698 bis 1738) die Gesetzmäßigkeiten der elektrischen Anziehung und Abstoßung, wobei er auch als erster die These von zwei Elektrizitätsarten aufstellte.

Nach 1740 setzte dann eine stürmische Entwicklung ein, die ihren Ursprung in der Erfindung der Elektrisiermaschine (1743/44) und der Leidener Flasche (1745/46) hatte. Die damit erreichbaren sehr beeindruckenden Wirkungen, wie etwa elektrische Funkenüberschläge und physiologische Vorgänge (Erteilen „elektrischer Schläge“), führten unter Gelehrten und Laien zu einem regelrechten Enthusiasmus im Hinblick auf diese neue „Naturkraft.“

Das hatte zwei Auswirkungen: Zum einen wurden elektrische Experimente ein beliebter Unterhaltungsgegenstand in höfischen und bürgerlichen Kreisen (Abb. 2.11./1), und zum anderen führte die Beschäftigung mit der Elektrizität zu vielen neuen Erkenntnissen. Innerhalb von 40 Jahren war das mit den damaligen Mitteln zugängliche Gebiet der Reibungselektrizität nahezu erschlossen.

Für die spätere Entwicklung haben aus dieser Periode in gerätetechnischer Hinsicht die Elektrisiermaschine, der Elektrophor und die Leidener Flasche besondere Bedeutung.

Mit der Elektrisiermaschine (2.11.1.), vor allem in ihrer späteren Form als Glasscheibenmaschine, ließen sich sehr hohe Spannungen erreichen. Ein anderes, sehr bequemes Mittel zur Erzeugung hoher Spannungen war der auf Influenzwirkungen beruhende

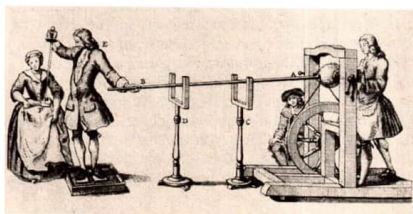


Abb. 2.11./1  
Zeitgenössische  
elektrische Experimente  
mit einer  
Glaskugelmaschine

Elektrophor (2.11.5.). Die später entwickelten Influenzmaschinen nutzten Prinzipien und Vorzüge beider Anordnungen. Derartige Geräte dienten nicht nur als einfache Hochspannungsquellen für zahlreiche Experimente; die ihnen zugrunde liegenden Wirkungsweisen finden heute noch in modernsten Anlagen zur Erzeugung höchster Spannungen, z. B. in Form von Van de Graaffschen Bandgeneratoren, Verwendung.

Die Leidener Flaschen und die Franklinschen Tafeln oder Platten (2.11.3.) waren die ersten Formen des Kondensators. Für kleine Kapazitäten und hohe Spannungen werden Leidener Flaschen noch heute in nur wenig abgewandelter Form benutzt.

Die elektrostatischen Arbeiten im 18. Jahrhundert fanden einen relativen Abschluß, als es Coulomb gelang, durch das nach ihm benannte Gesetz eine erste quantitative Darstellung der zwischen elektrischen Ladungen wirkenden Kräfte zu geben (2.11.7.). Erst dadurch erhielt die Elektrostatik die notwendige Grundlage für ihre weitere Entwicklung, die dann im 19. Jahrhundert zur Einführung des Begriffes elektrisches Feld, der eine neue Betrachtungsweise kennzeichnet, führte.

## 2.11.1. Elektrisiermaschinen

Während in der Anfangsperiode der Reibungselektrizität geriebene Glasröhren, Schwefel- und Harzstangen als Elektrizitätsquellen dienten, benutzte man nach 1745 in zunehmendem Maße auch Elektrisiermaschinen. Ihre Hauptbestandteile waren

- der zu reibende Körper und dessen Antriebsmechanismus,
- das Reibzeug und
- der „Aufnehmer“ für die erzeugte Elektrizität, meist als „Konduktor“ bezeichnet.

Der zu reibende Körper war eine rotierende hohle Glaskugel oder ein Glaszylinder. Die Drehung erfolgte mit einer Kurbel, einem Riemtrieb oder einem Zahnradgetriebe. Das einfachste *Reibzeug* war die trockene Hand. Aber schon 1745 wurde ein mit Roßhaar gefülltes ledernes Reibkissen benutzt, durch das die Glaskugel im allgemeinen positive Elektrizität erhielt.

Die Konduktoren bestanden aus einem Metallstab oder -rohr, das an isolierenden Seidenfäden aufgehängt war (Abb. 2.11.1./1) oder auf isolierende Glasstützen gesetzt wurde. Später benutzte man auch kugelförmige Konduktoren. Zur Abnahme der Ladungen von der Glasoberfläche dienten Ketten oder Büschel aus feinen Drähten, die mit dem Konduktor leitend verbunden waren.

Als Beispiel einer relativ einfachen Glaskugelmaschine soll eine von Joseph Priestley (1733 bis 1804) benutzte Konstruktion beschrieben werden (Abb. 2.11.1./2). Der zu reibende Körper ist ein Rundkolben (von Priestley als *Glaskugel mit Hals* bezeichnet), dessen Hals überstehend von einer Messingkappe umschlossen ist, in die sich eine Achse einschieben und festschrauben läßt. Auf dieser Achse sitzt ein Rad eines Riemetriebs (c), (d), (b), der in einem Gestell aus Mahagoniholz eingesetzt ist. An diesem Gestell ist eine federnde, verstellbare Stütze (i) angebracht, auf der das Reibzeug (h) befestigt wird. „Damit das Reibzeug gegen die Kugel überall gleich drücke, muß es auf einer nach der Gestalt der Kugel gekrümmten, metallenen Platte liegen und mit etwas ziemlich Weichem ausgestopft sein. Das Reibzeug (h) ist von der Feder (i) durch eine Glastafel (j) getrennt, welche dasselbe vollkommen isoliert; die Kette (k) aber bringt dasselbe wieder in Communication, wenn man positive Elektrizität haben will.“



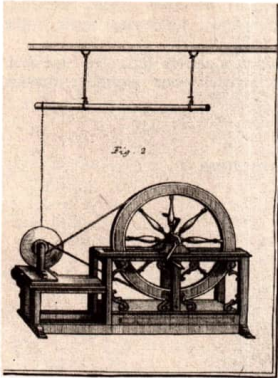


Abb. 2.11.1./1  
Glaskugelmaschine  
von Nollet mit Konduktor

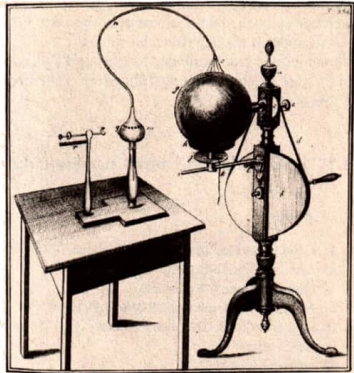


Abb. 2.11.1./2 Glaskugelmaschine von Priestley

Der Konduktor (q m) ist bei Priestley ein hohler, birnenförmiger Kupferkörper, der auf „einem Pfeiler und einer festen Unterlage aus gedörrtem Holze ruhet“, das als Isolator dient. Vom Konduktor geht ein biegsamer Messingdraht zur Kugel, an dessen Ende „drey oder vier spitzige Drahte (o), welche zwey bis drei Zoll lang sind“, befestigt sind. Beim Drehen der Kugel wird mittels Spitzenwirkung der Konduktor positiv elektrisch, während die negative Ladung des Reibzeugs durch die Kette abgeleitet wird. Soll der Maschine negative Elektrizität entnommen werden, erdet man mit der Kette den Konduktor (q m) und „schraubt eine kurze messingene Ruthe,

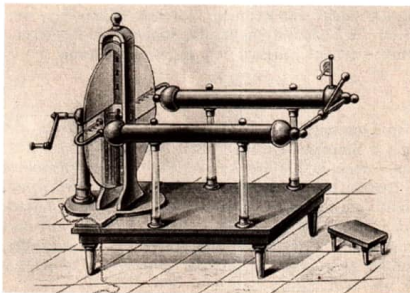


Abb. 2.11.1./3  
Glasscheibenmaschine  
von Ramsden

welche an einem Ende mit einem Knopfe versehen ist, an einen kleinen Schnabel, welcher sich an dem Reibezeuge über der Glastafel befindet. Diese messingene Ruthe dient sodann als negativer Konduktor“.

Verschiedene Nachteile der Kugel- und Zylindermaschinen führten dazu, daß diese nach 1770 durch die leistungsfähigeren Scheibenelektriermaschinen verdrängt wurden (Abb. 2.11.1./3).

## 2.11.2. Schulexperiment zur Elektriermaschine

### *Zu Variante a*

1. Elektriermaschine ③, dazu erforderliches Material:
  - a) Kurzhalsrundkolben (500 ml)
  - b) Gummistopfen mit Bohrung
  - c) Metallstab (80 mm lang; 9 mm Durchmesser)
  - d) Kupferdraht, flexibel (etwa 100 mm lang; 2,5 mm<sup>2</sup>)
  - e) Isolierstütze
  - f) Schwungmaschine
2. Elektroskop

### *Zu Variante b*

Geräte 1. und 2., außerdem

3. Uhrglas
4. Fensterleder
5. Rundtisch (100 mm Durchmesser)

### *Methodische Hinweise*

1. Mit der selbstgebauten Elektriermaschine lassen sich nur geringe Ladungsmengen trennen. Aus diesem Grunde sollte sie nur zur einführenden Behandlung der Ladungstrennung eingesetzt werden.
2. Man sollte darauf hinweisen, daß nicht die Reibung zwischen Glaskolben und Hand bzw. Leder die Ursache für die Ladungstrennung ist, sondern die Berührung beider Körper. Durch die Reibung erfolgt lediglich eine engere Berührung.

### *Aufbau der Elektriermaschine*

In den exakt zentrisch gebohrten Gummistopfen wird der Metallstab 30 mm tief eingeführt. Mit dem so vorbereiteten Stopfen verschließt man den Rundkolben. Das freie Ende des Metallstabes spannt man in die vertikal gestellte Schwungmaschine (Abb. 2.11.2./1). Durch leichtes Drehen prüft man den zentrischen Lauf des Rundkolbens und korrigiert gegebenenfalls am Sitz des Gummistopfens. Von einem kurzen Stück Kupferdraht wird an beiden Seiten die Isolierung entfernt. Er wird mit dem einen Ende in die Isolierstütze eingespannt. Das andere Ende spreizt man auseinander. Die Isolierstütze wird mit Stativmaterial so befestigt, daß die gespreizten Drähte den Rundkolben federnd berühren.

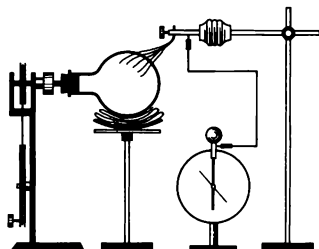


Abb. 2.11.2./1 Experimentelle Anordnung zur Reibungselektroskopmaschine. Bei Variante a entfällt die Halterung mit Uhrglas und Leder. Es wird die untere Hälfte des Rundkolbens mit beiden Händen umschlossen.

#### *Variante a: Erzeugen der Spannung durch Berührung mit den Handflächen*

Die selbstgebaute Elektrisiermaschine und das Elektroskop werden nebeneinander aufgestellt. Der an der Isolierstütze befestigte Kupferdraht wird leitend mit dem Elektroskop verbunden. Die zweite Leitung erfolgt über den menschlichen Körper, den Fußboden und den Experimentiertisch.

Während ein Experimentator die untere Hälfte des Rundkolbens mit beiden Händen umschließt, bedient ein zweiter Experimentator die Schwungmaschine. Man beobachtet am Elektroskop einen Ausschlag. Der Ausschlag wird größer, je länger und schneller die Elektrisiermaschine bedient wird.

Durch die enge Berührung zwischen Glaskolben und Hand treten Elektronen aus dem Glas aus und fließen über die Hand zur Erde ab. Der Kolben wird dabei positiv aufgeladen.

#### *Variante b: Erzeugen der Spannung durch Kontakt mit Leder*

Man benutzt die für Variante a beschriebene Anordnung. Anstelle der Hände verwendet man jetzt Leder als Reibzeug. Hierzu stellt man die in Abbildung 2.11.2./1 dargestellte Halterung mit Uhrglas und Leder unter den Rundkolben. Das Leder wird dabei mehrmals gefaltet, damit es federnd gegen den Kolben drückt.

Während man mit einer Hand das Leder festhält, bedient man mit der anderen die Schwungmaschine. Dabei schlägt das Elektroskop aus. Auch hier läßt sich die Spannung, wie in Variante a beschrieben, beeinflussen.

#### *Bemerkung*

Mit einem aufgeladenen Glas- und/oder Plaststab kann man nachweisen, daß sich der Rundkolben positiv aufgeladen hat. Beim Annähern eines geladenen Glasstabes an das Elektroskop wird der Ausschlag größer.

### 2.11.3. Leidener Flasche

Die Erfindung der Leidener Flasche erfolgte nahezu gleichzeitig Ende 1745 in Deutschland und in den Niederlanden. So hatte der Jurist und Domdekan Ewald Jürgen von Kleist (1700 bis 1748) von Experimenten berichtet, bei denen er einen in ein Medizingläschen gesteckten Nagel elektrisierte. Wenn er das Gläschen in der Hand hielt und mit einem Finger den Nagel berührte, erhielt er einen elektrischen Schlag, der besonders stark war, wenn in das Gläschen etwas Quecksilber oder Weingeist gefüllt wurde.

Den ebenfalls 1745 in Leiden durchgeführten Experimenten lag folgende Zielstellung zugrunde: Professor Pieter van Musschenbroek (1692—1761) und dessen Freunde versuchten, die Ladung eines elektrisierten Körpers möglichst lange zu erhalten. Sie glaubten, daß dies z. B. möglich sei, wenn man etwas Wasser, das sich in einem (elektrisch isolierenden) Gefäß befindet, elektrisiert. Priestley berichtet darüber: „Es ward aber keine beträgliche Entdeckung gemacht, als bis es Herrn Cunäus wiederfuhr, daß, als er einsmahl in der einen Hand ein gläsernes Gefäß mit Wasser hielt, welches vermittelst eines Drahtes mit dem Konduktor der Elektrisiermaschine Communication hatte, und mit der anderen Hand denselben von der Röhre los machte, er mit einem mahl durch einen plötzlichen Schlag in seinen Armen und in seiner Brust erschreckt ward, dergleichen er bei diesem Experiment am wenigsten erwartet hatte.“ (Abb. 2.11.3./1)

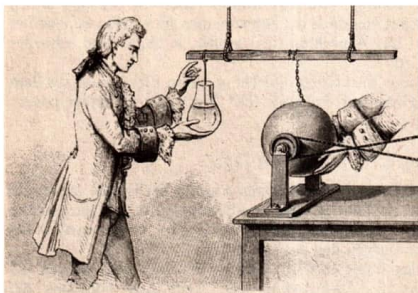


Abb. 2.11.3./1  
„Elektrisieren“ von Wasser  
(Leidenschες Experiment)

Musschenbroek, der das Experiment wiederholte, muß von dessen Ergebnis sehr beeindruckt gewesen sein, denn er berichtete, daß er in Armen, Schultern und Brust regelrecht betäubt gewesen sei und kaum noch atmen konnte und sich erst nach zwei Tagen von dem Schreck wieder erholt habe!

Die *Leidener Flasche*, wie sie bald allgemein genannt wurde, war nichts anderes als ein Zylinderkondensator, wobei dessen Innenbelegung die Flüssigkeit bildete, das Glasgefäß das isolierende Dielektrikum war und die Hand die äußere Belegung darstellte.

Veränderungen und Verbesserungen an der Leidener Flasche erfolgten bereits in den auf die Erfindung folgenden zwei Jahren. So ersetzte man zunächst die Flüssigkeit durch Bleischrot und versah die Außenseite des Gefäßes mit einer Zinnfolie, um die „Anzahl der Berührungspunkte an der auswärtigen Seite des Glases zu verstärken“. Schließlich

benutzte man als Innenbelegung ebenfalls eine angeklebte Zinnfolie. In den Glasbecher — diese Form bevorzugte man meist — wurde ein Draht geführt, um den am unteren Ende ein feiner Draht so gewunden war, daß er die Innenbelegung an mehreren Stellen berührte, während sich am oberen Ende eine kleine Metallkugel befand. Mit Hilfe eines Korkens wurde der Draht axial gehalten (Abb. 2.11.3./2).

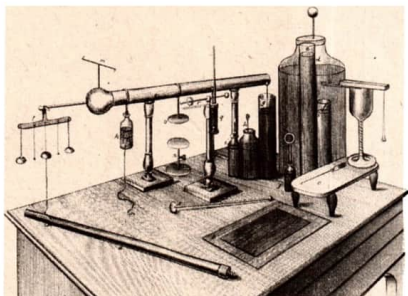


Abb. 2.11.3./2  
Elektrische Geräte  
(Mitte 18. Jh.):  
Leidener Flaschen,  
links: elektrisches  
Glockenspiel,  
rechts: Elektroskop  
aus 2 Holundermarkkugeln,  
vorn: Franklinsche Platte

Um noch stärkere Wirkungen zu erreichen, stellte man mehrere Leidener Flaschen zu *elektrischen Batterien* zusammen, indem man jeweils deren Außen- bzw. Innenbelegungen verband (Abb. 2.11.3./3).

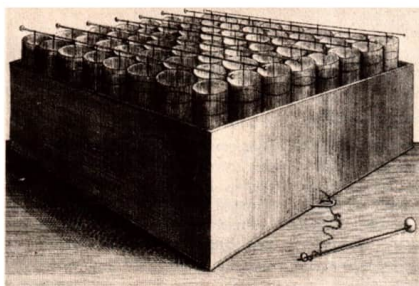


Abb. 2.11.3./3  
Batterie Leidener Flaschen

Der Plattenkondensator, später als Franklinsche Tafel oder Platte bezeichnet, wurde um 1747 erfunden. Es handelte sich dabei um eine Glasplatte, die beiderseits — bis auf einen schmalen Rand — mit Zinnfolie beklebt war.

Hinsichtlich der Erklärung der Leidener Flasche gab es zwar unterschiedliche Ansichten, je nachdem, ob von zwei elektrischen Fluida oder nur von einem elektrischen Fluidum ausgegangen wurde. Beide Hypothesen setzten aber voraus, daß eine der Belegungen der Leidener Flasche geerdet sein mußte. Stellte man die Person, welche die Leidener Flasche zur Aufladung in der Hand hielt, auf einen Isolierschemel o. ä., so kam es zu keiner Aufladung.

## 2.11.4. Schulexperimente zur Leidener Flasche

### *Zu Experiment 1*

1. Becherglas (400 ml)
2. Kupferdraht, blank (etwa 300 mm lang; 2,5 mm<sup>2</sup>)
3. Elektroskop
4. Influenzmaschine

### *Zu Experiment 2*

- Gerät 1. bis 4., außerdem
5. Ladungsgabel
  6. Alleskleber
  7. Aluminiumfolie (etwa 350 mm lang; 100 mm breit)
  8. Bleischrot (etwa 2 kg)

### *Zu Experiment 3*

- Geräte 4. und 5., außerdem
9. Leidener Flasche

### *Zu Experiment 4*

- Geräte 4., 5. und 9., außerdem
10. 2 Leidener Flaschen
  11. Kupferdraht, blank (etwa 900 mm lang; 2,5 mm<sup>2</sup>)
  12. Aluminiumfolie (etwa 500 mm lang, 100 mm breit)

### *Methodischer Hinweis*

Die Leidener Flaschen eignen sich gut für die einführende Behandlung der Speicherung von elektrischen Ladungen und für die Erarbeitung des Begriffes Dielektrikum.

### *Herstellung einer Leidener Flasche mit Metallbelegung*

Für die Ummantelung des Becherglases schneidet man ein Stück Aluminiumfolie von 250 mm Länge und 100 mm Breite und eine Kreisscheibe von 90 mm Durchmesser zu. Die Kreisscheibe schneidet man vom Rand mehrmals 10 mm tief axial ein. Das Becherglas wird außen, etwa 10 mm über dem Boden, ringsherum mit Kleber bestrichen und dann zentrisch auf die Kreisscheibe gestellt. Anschließend werden die eingeschnittenen Teile nach oben gefaltet. Danach wird die Seitenwand des Becherglases mit dem zweiten Stück Folie ummantelt. Dazu reicht es aus, die Aluminiumfolie nur an der lotrechten Naht zusammenzukleben.

Für die Durchführung des Experiments 1 benötigt man noch den in Abbildung 2.11.4./1 und für die Experimente 2 und 3 den in Abbildung 2.11.4./2 dargestellten Kupferdraht. Man biegt ihn so, daß er sich straff über den Rand des Becherglases schieben läßt. Die in Abbildung 2.11.4./2 dargestellten Windungen sollen den Boden des Becherglases federnd berühren.

### *Experiment 1: Leidener Flasche mit Wasser*

Das Becherglas ohne Ummantelung wird bis 20 mm unterhalb des oberen Randes mit Wasser gefüllt und der vorgefertigte Draht (Abb. 2.11.4./1) eingetaucht. Man umfaßt

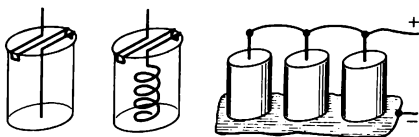


Abb. 2.11.4./1 Gebogener Kupferdraht für das Experiment 1

Abb. 2.11.4./2 Gebogener Kupferdraht für die Experimente 2 und 3

Abb. 2.11.4./3 Parallelschaltung der Leidener Flaschen

das Becherglas im unteren Teil mit der Hand und bringt den Draht kurzzeitig mit einem Pol der Influenzmaschine in Berührung. Nun nähert man das Becherglas dem Elektroskop, so daß der Draht dieses berührt. Der Zeiger des Elektroskops schlägt aus.

#### *Experiment 2: Leidener Flasche mit Außenbelegung und Bleischrot*

Das Becherglas mit Außenbelegung wird bis etwa zur Hälfte mit Bleischrot gefüllt und der vorbereitete Kupferdraht eingeführt. Anschließend lädt man die Flasche auf, indem die Außenbelegung mit einem Verbindungsleiter an einen Pol der Influenzmaschine und der Draht mit Hilfe der Ladungsgabel an den anderen Pol angeschlossen wird. Nachdem die Flasche von der Influenzmaschine getrennt wurde, weist man die elektrische Ladung mit dem Elektroskop nach.

Der Nachweis kann auch durch Kurzschließen der Leidener Flasche erfolgen. Hierzu hält man das eine Ende der Ladungsgabel an die Außenbelegung und nähert das andere dem Kupferdraht. In einer Entfernung von etwa 2 mm bis 3 mm springt ein Funke über.

#### *Experiment 3: Leidener Flasche mit Innen- und Außenbelegung*

Die beiden Pole der Influenzmaschine verbindet man leitend mit der Innen- bzw. Außenbelegung einer Leidener Flasche. Danach trennt man die Flasche wieder von der Influenzmaschine. Der Nachweis der Ladungen erfolgt wie im Experiment 2 beschrieben.

#### *Experiment 4: Batterie von Leidener Flaschen*

Die drei Leidener Flaschen werden nebeneinander auf den Tisch gestellt und parallel geschaltet (Abb. 2.11.4./3). Als Anschlüsse für die Außenbelegung verwendet man Aluminiumfolie, auf die man die Flaschen stellt.

Mit Hilfe der Influenzmaschine lädt man die Leidener Flaschen — wie im Experiment 2 beschrieben — auf. Danach überbrückt man die beiden Pole der Batterie mit der Ladungsgabel. Es springt ein kräftiger Funke über.

Hält man ein Stück Papier zwischen die Funkenstrecke, so wird es durchschlagen. Man kann das winzige Loch sehen, wenn man das Papier gegen das Licht hält.

#### *Bemerkung*

Die Experimente mit Leidener Flaschen, insbesondere mit Batterien von Flaschen, sind nicht ungefährlich. Man sollte deshalb direkte Berührungen mit beiden Anschlüssen vermeiden.

## 2.11.5. Elektrophor

Die *Franklinsche Tafel* — ein Plattenkondensator mit einer Glasplatte als Dielektrikum — wurde zwischen 1762 und 1771 von verschiedenen Gelehrten eingehend untersucht. Bei diesen Untersuchungen ging es unter anderem um die Klärung der Frage, ob nach dem Aufladen einer Franklinschen Tafel die Elektrizität auf den Metallbelegungen oder auf der Glasoberfläche haftet.

Hinsichtlich der Beantwortung dieser Frage und der Wirkungsweise der Franklinschen Tafel gab es erhebliche Kontroversen unter den Gelehrten.

In diese Auseinandersetzungen griff 1771 Alessandro Volta ein, der in einem Brief eine neue Apparatur beschrieb, die er als *elettroforo perpetuo* bezeichnete. Diese zog sofort die Aufmerksamkeit der Physiker auf sich. Welche Schritte Volta zu seiner Erfindung führten, läßt sich heute nicht mehr genau nachvollziehen. Im Prinzip verband er die beweglichen Belegungen einer Franklinschen Tafel mit einer Harz- oder Siegellackscheibe, von ihm selbst „Harzkuchen“ genannt, die durch Reiben elektrisch aufgeladen werden konnte.

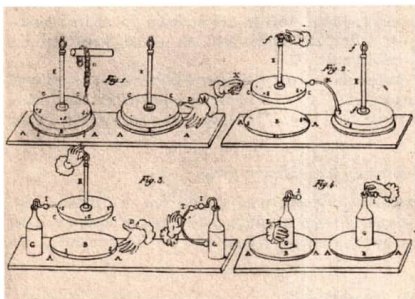


Abb. 2.11.5./1  
Elektrophor von Volta

Die Abbildung 2.11.5./1, Fig. 1, zeigt eine Originaldarstellung des Voltaschen Elektrophors. A A ist eine flache Metallschüssel, die mit einer geschmolzenen Mischung aus zwei Teilen Harz (Schellack, Kolophonium, Siegellack), einem Teil Wachs und drei Teilen Terpentin gefüllt wurde (Wachs und Terpentin sollten Risse in der erkalteten Masse verhindern.). Die Oberfläche B dieses Harzkuchens sollte möglichst eben sein, was sich z. B. dadurch erreichen ließ, daß man während des Erkaltes der Mischung ein stark erhitztes Eisenblech horizontal über die Form hielt. C C ist ein Deckel aus Metall, im Durchmesser etwas kleiner als der Harzkuchen, der mit einem isolierenden Griff E versehen war.

Bei abgenommenem Deckel machte man den Harzkuchen durch Reiben elektrisch negativ. Dazu benutzte man einen Fuchsschwanz, mit dem der Harzkuchen „gepeitscht“ wurde. Danach wurde der Deckel aufgesetzt. Ein Übergang der negativen Ladungen vom Harzkuchen zum Deckel erfolgte nicht, da die erforderliche Berührung wegen der Oberflächenbeschaffenheit des Harzkuchens nur an wenigen Stellen gegeben war und die Ladungen auf dem Harzkuchen nicht beweglich waren. In dem elektrisch leitenden Deckel trat jedoch Influenz auf: Die dem Kuchen zugewandte



Seite wurde elektrisch positiv, die abgewandte elektrisch negativ. Durch Verbinden des Deckels mit der Erde (Abb. 2.11.5./1) floß die influenzierte negative Ladung vom Deckel ab. Wurde der Deckel am isolierten Griff abgehoben, so war er stark positiv geladen. Diese Ladung ließ sich beispielsweise auf ein Elektroskop oder eine Leidener Flasche übertragen (Abb. 2.11.5./1, Fig. 3).

Dieser Vorgang ließ sich beliebig oft wiederholen, ohne daß der Harzkuchen neu aufgeladen werden mußte. (Natürlich trat über längere Zeit eine allmähliche Entladung aufgrund hoher Luftfeuchtigkeit oder Staubbinding auf.)

Im vorigen Jahrhundert wurde der Elektrophor auch im Unterricht häufig benutzt, wobei man anstelle eines Harzkuchens oft eine Hartgummiplatte verwendete, die an der Unterseite mit einer Zinnfolie versehen war oder direkt auf den Tisch gelegt wurde.

## 2.11.6. Schulexperiment zum Elektrophor

1. Harzkuchen ☉, dazu erforderliches Material:
  - a) Metallform (Deckel einer Blechbüchse, etwa 200 mm Durchmesser)
  - b) Terpentin (etwa 300 g)
  - c) Siegelack (etwa 300 g)
2. Metallplatte (Aluminium, etwa 180 mm Durchmesser; 3 mm dick)
3. Plastgriff (etwa 100 mm lang; 20 mm Durchmesser)
4. Elektroskop
5. Fellstück
6. Alleskleber

### *Methodischer Hinweis*

Das Experiment eignet sich zur Einführung bei der Behandlung der Influenz in den höheren Klassen oder zur Problemstellung bezüglich des Energieerhaltungssatzes. Bei der ständigen Wiederholbarkeit des Experiments, ohne daß der Harzkuchen wieder aufgeladen werden muß, sollen die Schüler erkennen, daß beim Abheben des Metalltellers Arbeit zur Überwindung der anziehenden Kraft verrichtet wird. Sie sollen weiterhin erkennen, daß keine Ladungen vom Harzkuchen auf den Metallteller übergehen.

### *Herstellen des Harzkuchens*

In einer Blechbüchse werden das Terpentin und der Siegelack unter Umrühren über einer Glasflamme geschmolzen. Ist die Masse sehr dünnflüssig, gießt man sie in die waagrecht liegende Metallform. Kurz vor dem Erstarren wird — wie im historischen Teil beschrieben — mit Hilfe einer elektrischen Heizplatte für eine ebene Fläche gesorgt. Auf die Metallplatte klebt man im Zentrum den Plastgriff auf.

### *Experiment*

Der Harzkuchen wird auf den Tisch gelegt und mit dem Fell elektrisch aufgeladen. Danach weist man mittels des Elektroskops nach, daß die Metallscheibe nicht elektrisch geladen ist. Anschließend legt man die Metallscheibe auf den geladenen Harzkuchen, hebt wieder ab und führt sie zum Elektroskop. Auch jetzt zeigt das Elektroskop keinen Ausschlag an. Schließlich legt man die Metallscheibe wieder auf den

Harzkuchen und berührt die Scheibe kurzzeitig mit der Hand. Führt man sie jetzt zum Elektroskop, so schlägt es aus. Das Experiment kann ständig wiederholt werden, ohne daß der Harzkuchen wieder aufgeladen werden muß.

#### *Deutung des Ergebnisses*

Wird die Metallscheibe auf den elektrisch geladenen Harzkuchen aufgelegt, so verschieben sich durch Influenz die Ladungen. Die wanderungsfähigen Elektronen bewegen sich zur dem Harzkuchen abgewandten Seite der Metallplatte. Wird die Platte abgehoben, ohne daß diese vorher berührt wurde, so verschwindet die Influenzwirkung, und es stellt sich der ursprüngliche neutrale Zustand wieder ein. Wird aber die Metallscheibe vor dem Abheben berührt, so fließen die wanderungsfähigen Elektronen teilweise über die Hand und den menschlichen Körper zur Erde ab. Hebt man jetzt die Platte ab, so ist sie positiv geladen.

#### *Bemerkung*

Harzkuchen, Metallteller und Raum müssen zum Experimentieren trocken sein.

### **2.11.7. Historisches Experiment zum Coulombschen Gesetz**

Die ersten quantitativen Messungen auf dem Gebiet der Elektrostatik erfolgten durch Charles Augustin Coulomb (1736 bis 1806) in den Jahren 1785/86. Er untersuchte die Gesetzmäßigkeiten der Abstoßung zweier gleichnamig geladener Körper bzw. die Anziehung zwischen zwei ungleichnamig geladenen Körpern. Dabei bediente sich Coulomb u. a. einer Torsionswaage, deren physikalische Grundlagen er selbst 1784 untersucht und veröffentlicht hatte. Bereits in der Benutzung dieses neuartigen Meßgerätes, mit dem sich sehr geringe Kräfte in der Größenordnung von  $10^{-4}$  Gran ( $\approx 5 \cdot 10^{-7}$  N) bestimmen ließen, liegt eine bedeutende Leistung Coulombs:

Das Gehäuse besteht aus einem Glaszylinder von 32,5 cm Durchmesser und gleicher Höhe und ist oben durch eine Glasplatte abgeschlossen. In ihr sind zwei Öffnungen von 4,5 cm Durchmesser; in die mittlere ist eine Glasröhre von 65 cm Höhe eingekittet. Am anderen Ende der Röhre befindet sich, ebenfalls eingekittet, ein kurzes Kupferrohrstück H, in welches das Torsionsmikrometer No. 1/2 (Abb. 2.11.7./1) drehbar eingesetzt werden kann, das mit einem Teilkreis a b von  $360^\circ$  und einem Zeiger i o versehen ist. Am Drehknopf b wird der Torsionsdraht aus Silber von 0,035 mm Durchmesser befestigt, an dessen Ende zur Beschwerung ein Metallzylinder von 2 mm Durchmesser hängt. Oberhalb dieses Zylinders ist bei C ein mit isolierendem Schellack überzogener Strohhalm angebracht, an dessen einem Ende ein 4 cm langes Schellackstäbchen eine Holundermarkkugel a trägt, während am anderen Ende eine kleine mit Terpentin getränkte Papierscheibe g der Kugel das Gleichgewicht hält und die Schwingungen dämpft. Um den Glaszylinder A B C D wurde in Höhe der Kugel ein Papierstreifen mit einer  $360^\circ$ -Teilung geklebt.

Zunächst dreht man die Deckscheibe so, daß sich deren Öffnung m ungefähr beim Punkt Null der Kreisteilung befindet. Dann wird das Torsionsmikrometer auf Null gestellt und in der Hülse H so weit gedreht, bis sich die Kugel auf den Nullpunkt der Papierskala einspielt. Durch m führt man eine weitere, isoliert befestigte, gleich große Holundermarkkugel t ein, welche die bewegliche Kugel a berührt. Mit Hilfe eines kleinen geladenen Konduktors (Abb. 2.11.7./1, unten links) wird den beiden Kugeln

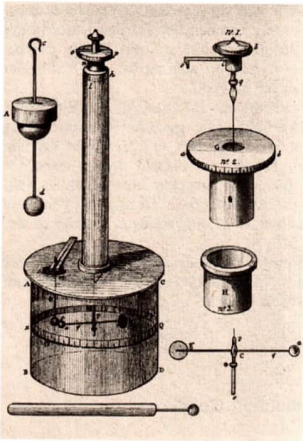


Abb. 2.11.7./1  
Coulombs Experiment  
zum Abstandsgesetz (Abstoßung)

durch kurzzeitiges Berühren eine gleich große Ladung erteilt, was zu einer Auslenkung der beweglichen Kugel und zur Torsion des Drahtes führt. Man erzeugt nun durch Drehen des Knopfes b „eine dem Torsionswinkel proportionale Kraft, welche die Kugel a der Kugel t zu nähern sucht“. Coulomb formuliert dann: „Ich werde hier nur einige Versuche anführen, die leicht zu wiederholen sind, und die das Gesetz der Abstoßung sofort erkennen lassen.

*Erster Versuch:* Nach der Elektrisierung der beiden Kugeln hat sich die Kugel a von der Kugel t um  $36^\circ$  entfernt, während der Index des Mikrometers auf 0 steht.

*Zweiter Versuch:* Nachdem der Aufhängedraht mittels des Knopfes b des Mikrometers um  $126^\circ$  gedreht worden ist, haben sich die beiden Kugeln bis auf einen Abstand von  $18^\circ$  einander genähert.

*Dritter Versuch:* Nach Torsion des Aufhängedrahtes um  $567^\circ$  haben sich die beiden Kugeln bis auf  $8\frac{1}{2}^\circ$  genähert.

*Erklärung und Ergebnisse dieses Experiments*


Solange die Kugeln noch nicht elektrisiert sind, berühren sie sich, und der Mittelpunkt der Kugel a ist von dem Punkte, in welchem die Torsion des Aufhängedrahtes Null ist, nur um die Hälfte der Durchmesser der beiden Kugeln entfernt . . . Indem ich die Kraft berechnete, deren es bedurfte, um diesen Draht zu tordieren, wenn man sie im Punkte a, der vier Zoll von dem Drahte l P oder dem Aufhängungsmittelpunkte entfernt ist, angreifen läßt, fand ich . . . daß man, um diesen Draht um  $360^\circ$  zu tordieren, nur eine Kraft von  $1/340$  Gran ( $1,53 \cdot 10^{-6}$  N) im Punkte a, wirkend am Hebelarm a P von vier Zoll Länge, anzuwenden braucht: da nun die Torsionskräfte . . . sich wie die Torsionswinkel verhalten, so entfernte die geringste abstoßende Kraft zwischen den beiden Kugeln sie beträchtlich voneinander. Wir finden bei unserem ersten Versuche, bei dem der Index des Mikrometers auf dem Punkte 0

steht, daß die Kugeln einen Abstand von  $36^\circ$  haben, was zur gleichen Zeit eine Torsionskraft von  $36^\circ = 1/3400$  Gran bewirkt; beim zweiten Versuch beträgt der Abstand der Kugeln  $18^\circ$ , aber da man das Mikrometer um  $126^\circ$  gedreht hat, so folgt daraus, daß bei einem Abstand von  $18^\circ$  die abstoßende Kraft  $144^\circ$  betrug: also ist bei der Hälfte der ersten Entfernung die Abstoßung der Kugeln viermal so groß.

Bei dem dritten Versuche hat man den Aufhängedraht um  $567^\circ$  tordiert, und die beiden Kugeln befanden sich nur noch in  $8\frac{1}{2}^\circ$  Entfernung. Die gesamte Torsion betrug folglich  $576^\circ$ , viermal so viel, wie die des zweiten Versuches, und es fehlte nur ein halbes Grad, damit die Entfernung der beiden Kugeln bei diesem dritten Versuche gerade auf die Hälfte derjenigen des zweiten Versuches zurückgeführt wäre. Es geht also aus diesen drei Versuchen hervor, daß die abstoßende Wirkung, welche zwei gleichartig elektrisierte Kugeln aufeinander ausüben, dem umgekehrten Verhältnis des Quadrates der Entfernungen folgt.“

Als Gesamtergebnis seiner Untersuchungen formuliert Coulomb: „Die abstoßende Kraft zweier kleiner, gleichartig elektrisierter Kugeln steht im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat des Abstandes der Mittelpunkte der beiden Kugeln.“

## 2.11.8. Schulexperiment zum Coulombschen Gesetz

1. Torsionswaage , dazu erforderliches Material:

- 2 Tischtennisbälle
- Trinkröhrchen (240 mm lang; 6 mm Ø)
- Pappscheibe (50 mm Ø)
- Kupferdraht, blank (etwa 700 mm lang; 0,07 mm Ø)
- Kupferdraht, blank (etwa 200 mm lang; 1,8 mm Ø)
- Kupferdraht, blank (etwa 100 mm lang; 3,5 mm Ø)
- Glaszylinder (etwa 250 mm Durchmesser; 150 mm hoch)
- 2 Isolierstützen
- Holzklötzchen (etwa 250 mm × 250 mm × 250 mm)
- Wägestück (20 g)
- Radiodrehknopf
- Bananenstecker
- Winkelmesser ( $360^\circ$ )
- Graphit (Bleistiftmine)
- Alleskleber
- Papier

2. Plaststab

3. Fell

4. Ladungsöffel

### Methodischer Hinweis

Das Experiment sollte nur zur qualitativen Bestätigung des Abstandsgesetzes eingesetzt werden, da durch die hohe Empfindlichkeit das Einstellen und das Auspendeln der Torsionswaage viel Zeit in Anspruch nimmt. Dabei entladen sich außerdem die Kugeln teilweise, so daß eine Messung erheblich fehlerbehaftet ist.

### Aufbauen der Torsionswaage

Das Trinkröhrchen schneidet man auf eine Länge von 200 mm und befestigt an dem einen Ende mit Alleskleber die zugeschnittene Pappscheibe und am anderen Ende einen durchbohrten und mit Graphit bestrichenen Tischtennisball. Aus dem 1,8 mm dicken Kupferdraht biegt man den in Abbildung 2.11.8./1 dargestellten doppelten Haken und die Reiter zum Austarieren um das Trinkröhrchen. Das eine Ende des Torsionsdrahtes befestigt man an einem Haken des Trinkröhrchens. An das andere Ende lötet man ein etwa 20 mm langes Stück 1,8 mm dicken Kupferdraht und schraubt daran den Bananenstecker. Dann baut man mit Stativmaterial die in Abbildung 2.11.8./2

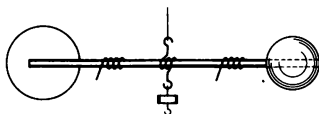


Abb. 2.11.8./1  
Waagebalken der Torsionswaage

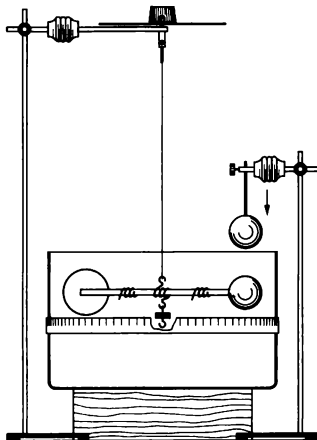


Abb. 2.11.8./2  
Selbst hergestellte Torsionswaage

dargestellte Anordnung auf. Hierbei wird der Bananenstecker mit der Torsionswaage durch die Bohrung der Isolierstütze gesteckt. Den Winkelmesser und den Radio-drehknopf setzt man auf den Bananenstecker und schraubt letzteren fest. An den zweiten Haken des Trinkröhrchens hängt man das kleine Wägestück. Die Torsionswaage wird mittels der Reiter horizontal ausgerichtet. Dann wird der Glaszylinder, auf den man etwa in der Mitte einen Papierstreifen mit einer 360°-Teilung aufgeklebt hat, von unten über die Torsionswaage geführt und auf den Holzklötz gestellt. Zum Schluß schraubt man in die zweite Isolierstütze den dicken Kupferdraht mit dem durchbohrten, graphierten und aufgeklebten Tischtennisball und bringt den Ball auf die gleiche Höhe wie der Tischtennisball am Trinkröhrchen.

### Experiment

Nachdem die Torsionswaage zur Ruhe gekommen ist, führt man den feststehenden Tischtennisball vorsichtig an den beweglichen Tischtennisball heran, so daß sich beide gerade berühren. Dann läßt man den Plaststab auf und nimmt mit dem Ladungsöffel

einen Teil der Ladung ab. Mit dem Ladungsöffel berührt man den feststehenden Tischtennisball. Man beobachtet eine Abstoßung des beweglichen Tischtennisballes vom feststehenden. Mit dem Radiodrehknopf kompensiert man durch langsames, gleichmäßiges Drehen den Ausschlag. Es zeigt sich, daß der Winkel, den der Radiodrehknopf überstreicht, mit kleiner werdendem Abstand größer wird.

Beim Berühren erhalten die beiden Tischtennisbälle die gleiche Ladung vom Ladungsöffel. Die Folge ist eine Abstoßung. Da die Kraft umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes ist, nimmt sie beim Annähern der Bälle stark zu.

### Bemerkungen

1. Es darf nur eine geringfügige Ladung auf die Bälle gebracht werden, damit der im historischen Teil aufgeführte Winkel von  $36^\circ$  nicht wesentlich überschritten wird. Das erreicht man durch Ausprobieren.
2. Der kurze Draht, an dem der feststehende Tischtennisball befestigt ist, sollte in seiner Stärke nicht verringert werden, da er sonst beim Verändern der Lage stark schwingt. Dadurch wird die Torsionswaage heftig angestoßen.
3. Die Ruhelage, die der Torsionsdraht einnimmt, kann sich ändern. Es empfiehlt sich, den feststehenden Tischtennisball samt Stativmaterial an die Torsionswaage heranzuführen.
4. Das Experiment kann auch mit dem Gerät für Messungen in elektrischen und magnetischen Feldern durchgeführt werden, das der Coulombschen Anordnung weitgehend entspricht.

## 2.12. Galvanische Spannungsquellen

Bei anatomischen und physiologischen Untersuchungen an Muskeln und Nerven von Tieren machte der italienische Arzt und Anatomieprofessor Luigi Galvani (1737 bis 1798) Ende 1780 eine ihm unerklärliche Beobachtung: „Ich seziierte einen Frosch und präparierte ihn, wie die Abbildung (links) zeigt und legte ihn auf einen Tisch, auf dem eine Elektriziermaschine stand. Wie nun der eine von den Leuten, die mir zur Hand gingen, mit der Spitze des Skalpellmessers die inneren Schenkelnerven DD des

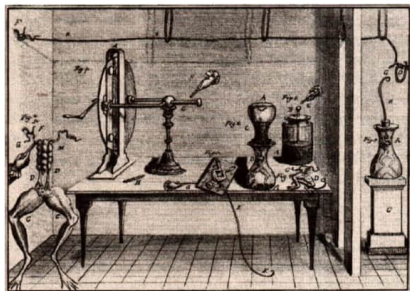


Abb. 2.12./1  
Galvanis Grundexperiment  
(Nachweis  
elektromagnetischer Wellen)

Frosches zufällig ganz leicht berührte, schienen sich alle Muskeln derart zusammenzuziehen, als wären sie von Krämpfen befallen. Der andere aber, welcher uns bei Elektrizitätsversuchen behilflich war, glaubte bemerkt zu haben, das sich das ereignet hätte, während dem Konduktor der Maschine ein Funken entlockt wurde.“ (Abb. 2.12./1). Erst 1786 verfolgte Galvani diese Beobachtungen weiter, als er die „atmosphärische Elektrizität“ untersuchte. Dabei stellte er fest, daß nicht nur bei Gewittern, sondern auch bei heiterem Himmel zuweilen Kontraktionen präparierter Froschschenkel auftraten, die mit Messinghaken an einem eisernen Balkongitter befestigt waren. Nach einigen Quellen soll das geschehen sein, wenn die im leichten Wind schaukelnden Froschschenkel gegen das eiserne Gitter schlugen. Galvani gibt allerdings keine Begründung, warum er die anschließenden Experimente im Studierzimmer weiterführte. Bei diesen Experimenten verband er Nerven und Muskeln durch unterschiedliche Leiter bzw. Isolatoren miteinander (Abb. 2.12./2).

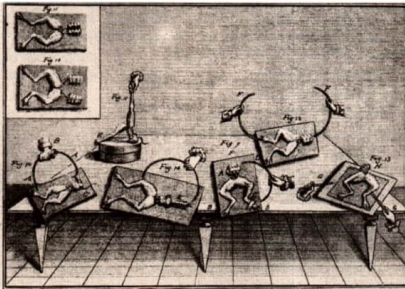


Abb. 2.12./2 Galvanis Grundexperimente mit metallischem Schließungsbogen

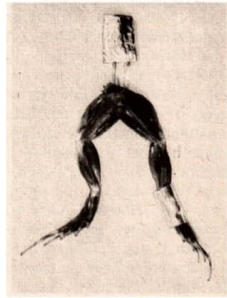


Abb. 2.12./3 Präparierter Froschschenkel mit metallischer Belegung am Kruralnerv und Muskel

Die beim Einsatz von Leitern auftretenden Kontraktionen wurden stärker, wenn die freigelegten Nerven und die Schenkelmuskeln mit metallischen Belegungen versehen waren (Abb. 2.12./3). Die Experimente ohne äußere Elektrizitätsquellen suchte Galvani so zu erklären, daß der Nerv und die an ihn grenzende Muskelfläche die eine Belegung, die äußere Muskelfläche die andere Belegung einer Art Leidener Flasche (2.11.3.) bilden. Die leitende Verbindung Nerv — Außenmuskelfläche entlädt diesen Kondensator und reizt dabei den Schenkel zu Kontraktionen.

Daß die Kontraktionen besonders heftig waren, wenn der Schließungsbogen aus zwei verschiedenen Metallen bestand (Fig. 12 in Abb. 2.12./2), beachtete Galvani nicht weiter, obwohl es hierzu bei der Leidener Flasche kein Analogon gab. Woher die „Aufladung“ des Tierpräparates rührte, wußte Galvani nicht zu sagen. Er suchte die Ursache in einer *tierischen Elektrizität*.

Erst 1791, also rund 11 Jahre nach den ersten Experimenten, veröffentlichte Galvani seine Ergebnisse und Hypothesen, die in der Gelehrtenwelt einen großen Widerhall fanden.

Einer der eifrigsten Experimentatoren, die Galvanis Experimente nachvollzogen und weiterführten, war der italienische Physikprofessor Alessandro Volta (1745 bis 1824).

Eines seiner grundlegenden Experimente bestand darin, den Nerv eines Froschschenkels frei zu präparieren und an zwei eng benachbarten Stellen mit Zinnfolie zu belegen. Berührte er die Belegungen mit einer äußerst schwach geladenen Leidener Flasche, so kam es zu einer Muskelkontraktion. Da hierbei keinerlei Verbindung Nerv — Muskel bestand, mußte Galvanis Erklärung falsch sein; das Froschpräparat war vielmehr nur ein sehr empfindlicher Indikator für eine elektrische Entladung. Kontraktionen der Muskeln traten aber auch auf, wenn Volta als Belegungen des Nerven zwei verschiedene Metallfolien benutzte und diese leitend verband. In Hunderten von Experimenten an Kaltblütern, vor allem an Fröschen, aber auch an Warmblütern, erweiterte Volta in den folgenden Jahren seine Erkenntnisse, die ihn immer entschiedener als Gegner der „tierischen Elektrizität“ Galvanis hervortreten ließen.

Die Voltaschen Experimente waren in der Hauptsache Variationen eines Grund-experiments: Zwischen zwei sich berührende unterschiedliche Metalle wurde als Indikator ein tierisches Präparat geschaltet, so daß ein geschlossener Kreis entstand. Die Stärke der Kontraktionen wurde erheblich von der Art der Metalle beeinflußt. Volta stellte eine *Tafel der Leiter 1. Klasse* auf, in der Metalle, verschiedene Mineralien und Holzkohle angeordnet waren. Ihre Wirkung war um so stärker, je weiter sie in der Tabelle auseinander standen. Unter *Leiter 2. Klasse* verstand Volta solche Leiter, die „selbst flüssig sind oder eine Flüssigkeit in sich enthalten, worunter alle tierischen Körper und alle ihre frischen und saftigen Teile gehören“.

„Kommt nun ein Leiter dieser zweiten Klasse zwischen zwei der ersten und wird von ihnen berührt, so entsteht ein immerwährender Lauf“ des elektrischen Fluidums. Es sei besonders darauf verwiesen, daß bei allen diesen Experimenten Voltas ein geschlossener Stromkreis — in heutiger Ausdrucksweise — vorhanden war. Über eine Frage war sich Volta zunächst noch nicht im klaren: Wird das elektrische Fluidum durch die Berührung der beiden Leiter 1. Klasse miteinander oder durch die Berührung von Leitern 1. und 2. Klasse in Bewegung gesetzt? Diese Problematik führte ihn zu seinen Experimenten über die Kontaktspannung (2.12.1.).

Im Jahre 1800, drei Jahre nach diesen Experimenten, erschien die nächste Arbeit Voltas „Über Elektrizität, hervorgerufen durch den bloßen Kontakt von leitenden Substanzen verschiedener Art“, in der es heißt: „Das Wesentlichste dieser Ergebnisse ist die Herrichtung eines Apparates, welcher durch seine Wirkung, d. h. durch die Schläge, welche er in den Armen usw. hervorbringt, einer schwach geladenen elektrischen Bat-



Abb. 2.12./4  
Volta führte seine  
Experimente Napoleon vor



terie Leidener Flaschen ähnlich ist, aber unaufhörlich wirkt, deren Ladung nach jedem Entladungsschlag sich von selbst wiederherstellt, mit anderen Worten eine unerschöpfliche Ladung besitzt.“

Die Voltasche Veröffentlichung erregte erhebliches Aufsehen. 1801 ließ sich Napoleon die Experimente von Volta vorführen (Bild 2.12./4). In aller Welt wurden die Voltaschen Experimente nachvollzogen.

Die Aufstellung der Spannungsreihe und die Entwicklung der Voltaschen Säule war einer der größten Fortschritte in der Geschichte der Physik. Mit den *galvanischen Elementen*, wie sie zu Ehren von Galvani genannt wurden, standen Elektrizitätsquellen zur Verfügung, die zur Entdeckung der chemischen, thermischen und magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes führten. Bereits 1800 „zerlegten“ Anthony Carisle (1768 bis 1840) und William Nicholson (1754 bis 1815) Wasser in seine Bestandteile, stellte Sir Humphry Davy (1778 bis 1829) Natrium und Kalium als Metalle rein dar und erzeugte 1821 zwischen zwei Kohlestäben einen Lichtbogen, nachdem schon 1805 John Wilkinson (1728 bis 1808) einen dünnen Platindraht durch *galvanische Elektrizität* zum Glühen und Schmelzen gebracht hatte. Auch die Entdeckung des Elektromagnetismus und seine Untersuchung sind direkte Auswirkungen der Voltaschen Arbeiten.

Als die Nachteile der einfachen Kupfer-Zink-Elemente, insbesondere die Polarisation, durch die Konstruktion der Elemente von Sir William Grove (1811 bis 1896), Robert Wilhelm Bunsen (1811 bis 1899) u. a. beseitigt worden waren, fanden sie praktische Anwendung in der Schwachstromtechnik, besonders in der Telegrafie. •

### 2.12.1. Historisches Experiment Voltas zur Berührungsspannung

Nachdem es für Volta eindeutig feststand, daß zwei Leiter 1. Klasse und ein mit ihnen in Verbindung stehender Leiter 2. Klasse Ursache für das Auftreten von Elektrizität ist, warf er die Frage auf, „durch welche von den drei heterogenen Berührungen, die dabei statt haben, das elektrische Fluidum den Impuls erhalte, welcher es zu dieser Strömung bestimmt. Ist es die wechselseitige Berührung der beiden Metalle und ist es diese allein? Oder rührt dieser Impuls allein oder hauptsächlich von der gegenseitigen Berührung des Leiters 2. Klasse mit dem Metall A auf der einen und dem Metall Z auf der andern Seite her?“

Zur Klärung dieser Problematik führte Volta 1796/97 eine Reihe von Experimenten durch, denen er folgende Hypothese zugrunde legte: Bei der wechselseitigen Berührung, etwa von Silber und Zinn, erzeugt sich eine Kraft, durch welche das Silber elektrisches Fluidum abgibt, das vom Zinn aufgenommen wird. Ist der Kreis nicht durch einen feuchten Leiter geschlossen, so entsteht in dem Zinn eine Anhäufung des elektrischen Fluidums, eine positive Elektrizität; im Silber ein Mangel, „bis die *Intensität* oder *Spannung der Elektrizität* (tensione elettrica)“ einen bestimmten Grad erreicht hat, der nicht überschritten werden kann, da dem ein den Metallen innewohnender Widerstand entgegenwirkt.

Daraus ergibt sich Voltas Grundexperiment: Jeweils zwei Platten von etwa 3 Zoll Durchmesser aus verschiedenen Metallen (z. B. Silber, Messing, Eisen, Blei, Zinn, Zink) werden an isolierenden Griffen befestigt und in „möglichst genaue Berührung“ gebracht, dann „auf einen Zug und senkrecht“ — ohne zu verkanten — getrennt. Die eine Platte erweist sich als positiv, die andere als negativ elektrisch. Der Nachweis dieser

Aufladung war sehr schwierig. Anfangs benutzte Volta einen auf Influenzwirkung beruhenden Duplikator.

Mit einem einfachen Versuch gelang ihm schließlich doch ein direkter Nachweis der Berührungs- und Kontaktspannung. Dazu verwendete er ein *Bennetsches Elektrometer*, das zwei Streifen dünnster Goldfolie enthielt, und das von ihm erfundene, jedoch nicht so empfindliche Strohhalmelektrometer (Abb. 2.12.1./1).

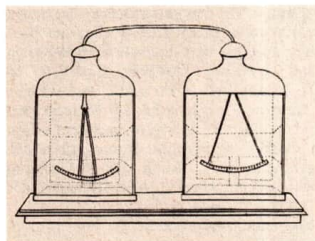


Abb. 2.12.1./1  
Strohhalmelektrometer von Volta

An die Platten wurden, wie schon bei den anderen genannten Experimenten, hohe Anforderungen gestellt: Sie mußten vollkommen glatt, sauber, trocken und eben sein, damit ihr Abstand so gering wie möglich war. Durch Erdung einer der Platten während des Experiments ließ sich die Spannung verdoppeln.

„Um bei dem einfachsten anzufangen, wiederhole man die Versuche und bringe sogleich die Platte nach der Trennung unmittelbar mit dem Kopf eines sehr empfindlichen Elektrometers in Berührung; die Goldblättchen werden etwas divergieren und damit einige Elektrizität anzeigen. Diese Divergenz ist nicht so klein, daß man etwa die Augen anstrengen müßte. Mit zwei Platten, einer aus Silber und einer aus Zink, die beide recht glatt sind, daß sie merklich miteinander cohärieren, usw. glückte es mir, die Goldblättchen durch eine einzige Berührung der Silber- oder Zinkplatte mit dem Hut des Elektrometers, gleich nachdem ich sie auseinander genommen habe, um mehr denn eine Linie (2,2 mm) divergieren zu machen.“ Damit war allerdings die eingangs gestellte Frage noch nicht beantwortet, ob auch eine Berührungsspannung zwischen Leitern 1. und 2. Klasse existiert. Volta war klar, daß ein Nachweis in der oben genannten Weise nicht möglich ist, da eine Trennung einer Metallplatte von einer Flüssigkeit wegen der am Metall anhaftenden Flüssigkeitsschicht gar nicht erfolgt. Deshalb beschränkte er sich auf solche Leiter 2. Klasse wie „grünes“ Holz, feuchtes Leder, mit Wasser getränkte Ziegel, also praktisch nur auf Wasser, und erhielt dementsprechend so geringe Kontaktspannungen, daß sie gerade noch mit dem Multiplikator nachzuweisen waren. Und obwohl er von den Froschenkelexperimenten wußte, daß „die elektrische Aktion, welche sich bei der Berührung einer Menge salziger Flüssigkeiten, vorzüglich gewisser Säuren, mit gewissen Metallen, und der konzentrierten Alkalien mit fast allen Metallen, erzeugt, häufig stärker und ausgezeichnet ist, als die, welche die wechselseitige Berührung zweier wenig voneinander verschiedener Metalle hervorbringt“, mißt Volta fälschlich doch dem Kontakt der Metalle die Hauptwirkung als Erreger (motori) der Elektrizität zu (2.12.3.).

## 2.12.2. Schulexperiment zur Berührungsspannung

1. Wulf-Elektroskop
2. Kupferplatte (etwa 50 mm × 50 mm; 3 mm dick)
3. Zinkplatte (etwa 50 mm × 50 mm; 3 mm dick)
4. Metallgriff (etwa 50 mm lang; 13 mm Durchmesser)
5. optische Bank mit Reitern
6. Optikleuchte (12 V; 50 W)
7. transparenter Schirm
8. Linse ( $f = +100$  mm)
9. Alleskleber
10. Graphit (Bleistiftmine)
11. Goldblatt (etwa 70 mm lang; 0,5 mm breit; 1 µm dick)
12. Stromversorgungsgerät (12 V; V A)

### *Methodischer Hinweis*

Die auftretende Kontaktspannung zwischen zwei Metallen ist sehr gering. Sie liegt bei etwa 1 V. Durch das Auseinanderziehen der beiden Platten wirkt die Anordnung wie ein Plattenkondensator, bei dem der Plattenabstand bei konstanter Ladung vergrößert wird. Dadurch vergrößert sich die Spannung, und es wird möglich, diese mit einem empfindlichen Elektrometer nachzuweisen. Auf diesen Sachverhalt sollten die Schüler hingewiesen werden, damit sie keine falschen Vorstellungen über den Betrag der Kontaktspannung erhalten.

### *Experimentelle Anordnung*

Die beiden Metallplatten werden plangeschliffen und poliert, so daß eine enge Berührung gewährleistet ist. Auf die nicht polierte Seite der Zinkplatte wird der Metallgriff aufgeklebt. Um eine ausreichende Leitfähigkeit zu garantieren, wird dazu dem Alleskleber fein zerriebene Bleistiftmine beigemischt.

Die Empfindlichkeit des Wulf-Elektroskops wird dadurch erhöht, daß dieses mit Goldblatt versehen wird. Dazu wird die Überwurfmutter am oberen Teil gelöst und der Anzeigteil vorsichtig aus dem Gehäuse nach oben herausgezogen. An der oberen Befestigung des Bändchens wird zusätzlich das Goldblatt angebracht. Es wird zwischen Papier zugeschnitten und vorsichtig abgehoben. Man befestigt es mit einem kleinen Tropfen Alleskleber, dem zerriebene Bleistiftmine zugesetzt ist. Auf diesen Tropfen drückt man das obere Ende des Goldblattes, so daß es parallel zum Bändchen liegt. Danach wird der Anzeigteil wieder ins Gehäuse gebracht und befestigt. Lampengehäuse, Wulf-Elektroskop, Abbildungslinse und Schirm werden entsprechend Abbildung 2.25.2./1 auf der optischen Bank angeordnet. Die Abstände werden so gewählt, daß nach Anschließen der Lampe an die Spannungsquelle das Meßsystem scharf auf dem Projektionsschirm abgebildet ist. Die Kupferplatte wird auf die Platte am oberen Ende des Wulf-Elektroskops aufgelegt, so daß ihre polierte Fläche nach oben zeigt. Auf diese wird die Zinkplatte aufgelegt.

Damit ist die Kupferplatte direkt mit dem Meßsystem verbunden. Die Gegenelektrode wird geerdet und dem Goldblatt bis auf etwa 1 mm genähert.

### Experiment

Die Zinkplatte wird so von der Kupferplatte abgehoben, daß beide zu jedem Zeitpunkt möglichst parallel zueinander liegen. In der Projektion ist ein Ausschlagen des Goldblattes zu beobachten. Beim innigen Berühren zweier Metalle tritt zwischen ihnen eine Spannung auf.

### Bemerkungen

1. Man achte darauf, daß während der Durchführung des Experiments die Metallplatten trocken sind und die relative Luftfeuchtigkeit gering ist.
2. Der Effekt hängt in starkem Maße davon ab, wie eng sich die Platten berühren. Sie sollten deshalb gut geschliffen und poliert sein.
3. Ein Elektroskop mit noch größerer Empfindlichkeit läßt sich mit einfachen Mitteln leicht herstellen. Sein Aufbau entspricht weitgehend dem des Wulf-Elektroskops.

## 2.12.3. Historische Experimente Voltas mit der Voltaschen Säule und dem Becherapparat

Die Krönung von Volta's Arbeiten zur galvanischen Elektrizität war die Konstruktion der später nach ihm benannten Säule und des Becherapparates.

Für die Säule benutzte er einige Dutzend Platten, z. B. aus Silber und Zink, von etwa einem Zoll Durchmesser „von annähernd gleicher Gestalt und Größe. Mit einem etwas geringeren Durchmesser werden runde Scheiben aus Leder, Pappe oder ähnlichen Materialien hergestellt, die imstande sind, Feuchtigkeit aufzunehmen und zurückzuhalten. Die Metallplatten sollen „rein und trocken“ sein, die nichtmetallischen mit Wasser oder „besser mit Salzwasser getränkt und dann leicht abgetrocknet, damit die Flüssigkeit nicht von ihnen abtropft“. Nun werden die Platten übereinandergestapelt: zunächst eine Silberplatte, dann eine Zinkplatte, hierauf eine feuchte Platte, wieder eine Silberplatte, eine Zinkplatte, eine feuchte Platte usw. Den Abschluß bilden eine Silberplatte und eine Zinkplatte. Damit diese Säule nicht umfällt, werden die Platten seitlich von 4 isolierenden Stäben gehalten (Abb. 2.12.3./1).

Durch Reihenschaltung derartiger Säulen erreichte Volta größere Wirkungen: „Ist sie soweit, daß sie 20 bis 30 Paare von Metallen enthält, so wird sie bereits fähig sein, am Elektrometer von Cavallo mit Hilfe des Kondensators Anzeigen über 10 oder 15 Grad zu geben.“ Des besseren Kontaktes wegen werden die untersten Metallplatten mit Blechstreifen versehen, die in größere wassergefüllte Gefäße eintauchen (Abb. 2.12.3./2). Taucht man die Hände in die beiden Gefäße, so daß ein Stromkreis entsteht, erhält man sehr starke elektrische Schläge. „Der Strom der elektrischen Flüssigkeit erregt nicht nur Zusammenziehungen in den Muskeln, welche er in seinem Laufe durchströmt, sondern er erregt auch die Organe des Geschmacks, des Gesichts, des Gehörs und des eigentlichen Gefühlssinnes.“

Einigermaßen verwunderlich ist Volta's Feststellung, daß bei der Säule die „genaue und ausgedehnte Berührung der feuchten Platten sehr wichtig ist, während die metal-

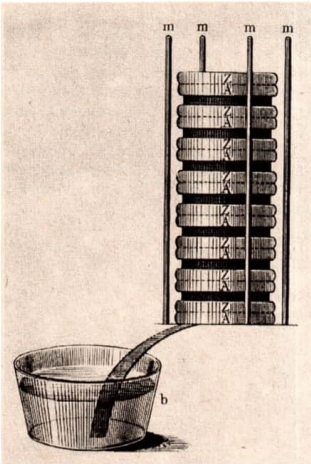


Abb. 2.12.3./1  
Voltasche Säule

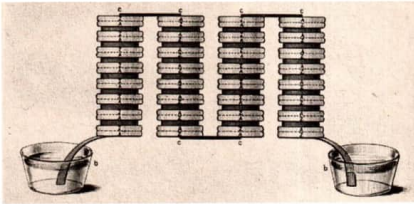


Abb. 2.12.3./2  
Metallplatten  
mit Blechstreifen und  
wassergefüllten Gefäßen

lenen Platten jedes Paares sich nur in wenigen Punkten zu berühren brauchen“. Das widerspricht der bei seinen Untersuchungen zur Kontaktspannung (2.12.1.) gewonnenen Erkenntnis, nach der es gerade auf engste Berührung der Metalle ankommt. Andererseits hält er aber doch daran fest, sonst würden sich nicht am Anfang und Ende der Säule jeweils Plattenpaare befinden, sondern nur jeweils eine Platte.

Den Becherapparat (Abb. 2.12.3./3) beschreibt er wie folgt: „Man ordnet eine Reihe

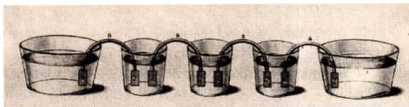


Abb. 2.12.3./3  
Becherapparat

von mehreren Tassen, gläserne (kleine Trinkgläser oder Becher) sind am geeignetsten, die zur Hälfte mit reinem Wasser, oder besser mit Salzwasser oder Lauge gefüllt sind; man verbindet sie und bildet aus ihnen eine Art Kette mittels ebenso vieler metallener Bögen, von denen ein Arm A aus Kupfer oder Messing ist, während der andere Z, welcher in den folgenden Becher taucht, aus Zinn oder besser aus Zink ist. Die beiden Metalle, aus denen jeder Bogen besteht, sind an irgendeiner Stelle oberhalb der Flüssigkeit zusammengelötet.“

Durch die Beschränkung auf physiologische Wirkungen fielen Volta die wichtigen chemischen, thermischen und anderen Prozesse nicht auf. Dadurch entgingen ihm auch die Veränderungen an den Metallplatten bzw. in den Leitern 2. Klasse, die bei länger geschlossenem Stromkreis deutlich in Erscheinung treten.

### **2.12.4. Schulexperimente zur Voltaschen Säule und zum Becherapparat**

#### *Zu Experiment 1*

1. 6 Kupferplatten (etwa 50 mm × 50 mm; 2 mm dick)
2. 6 Zinkplatten (etwa 50 mm × 50 mm; 2 mm dick)
3. 2 Kabelschuhe
4. Becherglas (250 ml)
5. Pappe oder Fensterleder (etwa 150 mm × 100 mm; 0,5 mm dick)
6. Massestück (100 g)
7. Kochsalz (etwa 10 g)
8. Spannungsmesser (10 V —)

#### *Zu Experiment 2*

Geräte 1. bis 3. und 8., außerdem

9. 6 Bechergläser (250 ml)
10. Kupferdraht, blank (etwa 500 mm; 1,8 mm Ø)
11. Becherglas (1000 ml)
12. Kochsalz (etwa 50 g)

#### *Methodischer Hinweis*

Voltasche Säule und Becherapparat zeigen, daß zwischen zwei unterschiedlichen Metallen, die durch einen Elektrolyten leitend miteinander verbunden sind, eine Spannung besteht. Man kann diese Anordnungen bei der Behandlung von Spannungsquellen einsetzen.

#### *Experiment 1: Voltasche Säule*

Man schneidet die 6 Kupfer- und 6 Zinkplatten zu und säubert deren Oberflächen mit Schmirgelpapier. An eine Kupfer- und eine Zinkplatte lötet man je einen Kabelschuh an. Anschließend werden aus Pappe oder Fensterleder Scheiben geschnitten, die eine etwa 4 mm kürzere Kantenlänge als die Metallplatten besitzen. Diese Scheiben trinkt man in der Salzlösung und läßt sie gut abtropfen. Danach baut man die in

Abbildung 2.12.4./1 dargestellte Säule auf. Damit die Säule sicher steht, legt man unter die Zinkplatte mit dem angelöteten Kabelschuh etwas Pappe als Ausgleich. Die Säule wird durch Auflegen des Massestückes beschwert.

Die beiden äußeren Platten mit dem angelöteten Kabelschuh werden mit dem Drehspulmeßgerät verbunden (Abb. 2.12.4./1).

Das Meßgerät zeigt eine Spannung von etwa 3,0 V an.

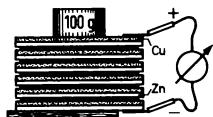


Abb. 2.12.4./1  
Aufbau einer Voltaschen Säule

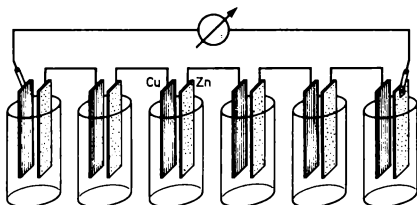


Abb. 2.12.4./2  
Voltascher Becherapparat

### Experiment 2: Voltascher Becherapparat

Aus dem Kupferdraht biegt man fünf Krampen, deren Schenkel etwa 40 mm lang und 60 mm voneinander entfernt sind. An den einen Schenkel jeder Krampe lötet man eine Zinkplatte, an den anderen eine Kupferplatte. Die beiden restlichen Platten werden mit Kabelschuhen versehen. Entsprechend dem Abstand der Krampen stellt man die 6 Bechergläser auf und taucht die vorbereiteten Metallplatten ein (Abb. 2.12.4./2). Anschließend werden alle Bechergläser mit der hergestellten Kochsalzlösung bis etwa zur Hälfte gefüllt.

An die äußeren Anschlüsse des Becherapparates schließt man das Drehspulmeßgerät an (Abb. 2.12.4./2). Es zeigt eine Spannung von etwa 4,6 V an.

### Bemerkungen

1. Durch den Anschluß des Drehspulmeßgerätes fließt in der Säule bzw. im Becherapparat ein elektrischer Strom. Infolge der dadurch bedingten chemischen Veränderungen geht der Ausschlag am Meßgerät allmählich zurück.
2. Nach Abschluß der Experimente sollten die Metallplatten mehrmals abgespült werden, damit sie sich nicht zersetzen.

## 2.13. Ohmsches Gesetz

Je mehr sich die Physiker mit dem von galvanischen Batterien erzeugten elektrischen Strom und seinen vielfältigen Wirkungen beschäftigten, desto dringender empfanden sie das Bedürfnis, die beobachteten Phänomene nicht nur qualitativ zu beschreiben, sondern auch einer quantitativen Erfassung zugänglich zu machen. Es galt, die Wirksamkeit der galvanischen Batterien zu ihrer eigenen Beschaffenheit (Art, Größe, Anzahl und Anordnung der Elemente) und zu der Beschaffenheit des zur Schließung des Stromkreises verwendeten Leitungsdrahtes ins Verhältnis zu setzen.

Der erste, der dies in umfassender Weise tat, war Georg Simon Ohm (1789 bis 1854). Bei seinen Experimenten benutzte er zunächst ein Kupfer-Zink-Element, welches sich jedoch wegen der auftretenden Polarisierungseffekte als zu unbeständig erwies und ihn zu falschen Resultaten führte. Auf den Rat von Johann Christian Poggendorf (1796 bis 1877) hin ging Ohm dann zu dem wenige Jahre zuvor von Thomas Johann Seebeck (1770 bis 1831) erfundenen Thermoelement über und stellte 1826 das *Gesetz der Stromstärke* auf. Da er außerdem erkannte, daß die Unbeständigkeit der galvanischen Elemente durch den Stromfluß selbst verursacht wird, war es ihm möglich, die Gültigkeit seines Gesetzes auch anhand der ungleich wirksameren und daher technisch bedeutenderen galvanischen Batterien erfolgreich zu testen.

Aus dem *Gesetz der Stromstärke* leitete Ohm in einer späteren theoretischen Abhandlung das *Gesetz des Spannungsgefälles* ab, und er war überzeugt, das Fundamentalgesetz des Galvanismus gefunden zu haben.

Ohms Publikationen stießen bei einigen seiner Zeitgenossen auf ablehnende Kritik und wurden von den meisten anderen lange Zeit ignoriert. Erst etwa 10 Jahre später wurde ihm die gebührende Anerkennung zuteil.

Das Ohmsche Gesetz ist ein grundlegendes Gesetz der gesamten Elektrizitätslehre. Heute empfinden wir es als sehr einfach. Die große Leistung Ohms lag in der meisterhaften Überwindung der experimentellen Schwierigkeiten und in der Klarheit der Begriffe, die sich erst später allmählich durchsetzten. Der Weitblick Ohms ist leicht an der Tatsache zu erkennen, daß seine Leistungen erst viele Jahre später voll gewürdigt wurden.

### 2.13.1. Historisches Experiment zum Ohmschen Gesetz

Zur Messung der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes hängte Ohm eine Magnetnadel in eine von ihm selbst entworfene „Coulombsche Drehwaage von besonderer Einrichtung“. Mit Hilfe dieses Torsionsgalvanometers, eines in mehrfacher Hinsicht äußerst bemerkenswerten Meßinstrumentes, konnte er die Wirkung des Stromes auf die sich stets in gleicher Position befindende Magnetnadel direkt bestimmen. Da die Beziehung des anfänglichen Ausschlages der Magnetnadel zur Stromstärke noch nicht bekannt war, bediente er sich somit der einzig exakten Methode zur Strommessung, die in der damaligen Zeit überhaupt möglich war. Da Ohm die Wahl des Meßinstrumentes in seinen Arbeiten nicht begründet, darf angenommen werden, daß er sich dieses Umstandes gar nicht bewußt war und es ihm nur auf die recht hohe Empfindlichkeit des Torsionsgalvanometers ankam.

Um die Zuverlässigkeit seiner Ergebnisse zu unterstreichen, schilderte Ohm seine in Abbildung 2.13.1./1 wiedergegebene experimentelle Anordnung in aller Ausführlichkeit: „Ein in der Gestalt einer eckigen Klammer gegossenes Stück Wismut  $a\ b\ b'\ a'$ , dessen längere Seite  $bb'$   $6\frac{1}{2}$  Zoll und dessen kürzere Schenkel  $ab, a'b'$  jeder  $3\frac{1}{2}$  Zoll betragen, war durchgängig 9 Linien breit und 4 Linien dick. An jeden dieser Schenkel befestigte ich mittelst zweier Schrauben Kupferstreifen  $abcd, a'b'c'd'$ , die 9 Linien breit, 1 Linie dick und zusammengerechnet 28 Zoll lang und so gebogen waren, daß ihre freien Enden  $cd, c'd'$  in zwei an dem hölzernen Gestelle  $fghi$  angebrachte, mit Quecksilber gefüllte Schälchen  $m, m'$  ragten, wenn die ganze Vorrichtung auf dem Gestelle saß. Auf der oberen Platte  $ff$  des Gestelles sitzt die Drehwaage. Der Glaszylinder  $vv$ , auf welchem sie sitzt, ist 6 Zoll hoch und  $4\frac{1}{2}$  Zoll weit. Sie selbst besteht aus 2 Teilen, wovon der eine  $nop$  mit einer schwach konischen



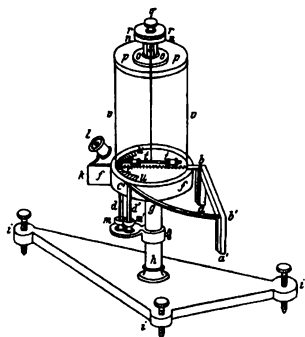


Abb. 2.13.1./1  
Experimentelle Anordnung Ohms

Höhlung versehen und auf der oberen Platte des Glaszylinders festgekittet ist, der andere qrs mit seinem 8 Linien dicken konisch auslaufenden Zapfen in die Höhlung des ersten genau paßt und mit seiner 3 Zoll breiten Scheibe rr auf der ebenso breiten Scheibe nn des ersten Teils aufliegt.“ (1 preußischer Zoll = 26,2 mm; 1 preußische Linie = 2,2 mm.)

Zur Aufhängung der Magnetnadel verwendete Ohm keinen runden Draht, sondern einen Goldlahn, ein sehr dünnes Goldband, weil dieses trotz einer relativ geringen Länge und damit geringen Empfindlichkeit gegen Erschütterungen keinen allzu großen Verdrillungswiderstand besitzt. Die Aufhängevorrichtung ist exakt zentrisch am Zapfen qs angebracht. „Die Magnetnadel tt ist aus 0,8 Linien dickem Stahldraht gefertigt und nicht volle 2 Zoll lang, ihre beiden Enden in zylinderförmigen Stücken Elfenbein, deren eines einen zart zugespitzten, nach unten etwas umgebogenen Messingdraht in sich trägt. Diese messingene Spitze, die als Zeiger dient, liegt dicht über dem auf dem Gestelle ruhenden, in Grade eingeteilten Bogen von Messing uu. Die Drehwaage wurde auf die obere Platte des Gestelles dergestalt festgekittet, daß eine mitten durch den Kupferstreifen bc gezogene, mit dem mittelsten Teilstrich des Gradbogens uu und einem dicht vor diesem Bogen lotrecht ausgespannten einfachen Seidenfaden in einerlei Richtung liegende gerade Linie und zugleich auch die Magnetnadel im magnetischen Meridiane lagen, während der Zeiger an der Drehwaage auf Null gestellt war.“

Die Berührungsstellen von Wismut und Kupfer ab und a'b' wurden in Gefäße mit schmelzendem Eis bzw. siedendem Wasser geschoben. „Die Beobachtung geschah in der Art, daß jedesmal, wenn die Nadel durch den elektrischen Strom des Apparates abgelenkt worden war, der Lahn so lange durch den beweglichen Teil der Drehwaage entgegengedreht wurde, bis die messingene Spitze der Nadel hinter dem Seidenfaden auf dem mittleren Teilstrich des Gradbogens stand; dann wurde die Größe der Drehung oben an der Drehwaage in Hundertteilen einer ganzen Umdrehung abgelesen, welche Zahl bekanntlich die Kraft ausdrückt, womit auf die Nadel gewirkt worden ist.“

Für die Experimente verwendete Ohm Leiter aus plattiertem Kupferdraht einer Dicke von 7/8 Linien, die mit ihren Enden in das Quecksilber der Schälchen m und m'

getaucht wurden. „Ich hatte mir 8 verschiedene Leiter vorgerichtet, die ich in der Folge mit 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 bezeichnen werde und die respektive 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 Zoll lang waren.“ Die fünf verschiedenen Meßreihen Ohms sind in der Tabelle zusammengestellt. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Meßreihen führte Ohm auf Temperaturschwankungen am Thermoelement zurück und stellte fest: „Obige Zahlen lassen sich sehr genügend durch die Gleichung

$$X = \frac{a}{b + x}$$

darstellen, wobei  $X$  die Stärke der magnetischen Wirkung auf den Leiter, dessen Länge  $x$  ist,  $a$  und  $b$  aber konstante, von der erregenden Kraft und dem Leitungswiderstand der übrigen Teile der Kette abhängige Größen bezeichnen.“ Für die IV. und V. Meßreihe erhielt er beispielsweise  $a = 6800$  und  $b = 20,25$ . Verringerte er die Temperaturdifferenz an den Verbindungsstellen des Kupfer-Wismut-Thermoelementes von 100 K auf etwa 10 K, veränderte sich der Betrag von  $b$  nicht, während  $a$  nur noch ein Zehntel des ursprünglichen Betrages erreichte. Daraus zog Ohm die richtige Schlußfolgerung, „daß  $a$  bloß von der erregenden Kraft,  $b$  bloß von dem unveränderlichen Teil der Leitung abzuhängen scheint“.

Nach moderner Lesart lautet Ohms Gleichung

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

wobei  $I$  die Stromstärke,  $E$  die elektromotorische Kraft der Spannungsquelle,  $R_1$  die Summe aus dem inneren Widerstand der Spannungsquelle und dem Widerstand der unveränderlichen Zuleitungen sowie  $R_2$  der Widerstand des veränderlichen Meßdrahtes ist.

Zeit der Beobachtung	Versuchsreihen	Leiter							
		1	2	3	4	5	6	7	8
8. Jan.	I	326 3/4	300 3/4	277 3/4	238 1/4	190 3/4	134 1/2	83 1/4	48 1/2
11. Jan.	II	311 1/4	287	267	230 1/4	183 1/2	129 3/4	80	46
	III	307	284	263 3/4	226 1/4	181	128 3/4	79	44 1/2
15. Jan. (1826)	IV	305 1/4	281 1/2	259	224	178 1/2	124 3/4	79	44 1/2
	V	305	282	258 1/4	223 1/2	178	124 3/4	78	44

## 2.13.2. Schulexperiment zum Ohmschen Gesetz

- I. Torsionsgalvanometer ⑤, dazu erforderliches Material:
  - a) Deckplatte aus Plaste (etwa 340 mm × 340 mm × 6 mm)
  - b) Kupferdraht (etwa 0,8 m; 2,2 mm Ø)
  - c) Kupferdraht (etwa 7 m; 1,8 mm Ø)
  - d) Radiodrehknopf
  - e) Winkelmesser 360

- f) Plaststreifen (etwa  $300 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$ )
  - g) 2 Telefonbuchsen
  - h) 2 Lüsterklemmen (für 4 mm Drahtstärke)
  - i) Glasgefäß (etwa  $300 \text{ mm } \varnothing$ ; 350 mm hoch)
  - j) Magnetnadel (etwa 200 mm lang)
  - k) Metallachse (4 mm  $\varnothing$ ; 40 mm lang)
  - l) Alleskleber
  - m) Lötzinn
2. Stromversorgungsgerät (2 V/5 A)
  3. 3 Widerstandsdrähte je  $10 \Omega$  (0,8 m; 0,5 mm  $\varnothing$ )
  4. 4 Isolierstützen
  5. Schalter

### Methodischer Hinweis

1. Wegen des relativ großen Zeitaufwandes für die Erarbeitung des Gesetzes sollte das Experiment nur zur Bestätigung eingesetzt werden.

### Herstellen des Torsionsgalvanometers

Das Torsionsgalvanometer wird entsprechend Abbildung 2.13.2./1 hergestellt. In die Deckplatte wird im Schnittpunkt der beiden Diagonalen ein Loch für die Achse des Radiodrehknopfes gebohrt. Die hindurchgeführte Achse nimmt oberhalb den Radiodrehknopf und unterhalb eine Lüsterklemme auf. Im Radiodrehknopf befindet sich seitlich eine Bohrung, in die ein kurzer Draht als Zeiger eingeführt wird. Unter dem Radiodrehknopf klebt man auf die Deckplatte einen in der Mitte durchbohrten Winkelmesser auf. Aus Kupferdraht wickelt man dann eine Kastenspule von etwa  $270 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  (gemessen von Mitte zu Mitte) mit 10 Windungen. An der Stelle des Durchgangs für den Plaststreifen, an dem die Magnetnadel mittels der zweiten Lüsterklemme aufgehängt wird, drückt man die Spule nach beiden Seiten etwas auseinander.

Die Drahtenden der Kastenspule kürzt man auf 20 mm und entfernt die Isolierung. An die Enden lötet man Kupferdraht von 2,2 mm Durchmesser und biegt diesen, wie in der Abbildung 2.13.2./1 dargestellt. Der verstärkte Draht dient zur Stromzuführung und zur stabilen Aufhängung der Kastenspule. Die beiden anderen Enden des Kupferdrahtes verbindet man mit den Telefonbuchsen, welche in die dafür vorgesehenen

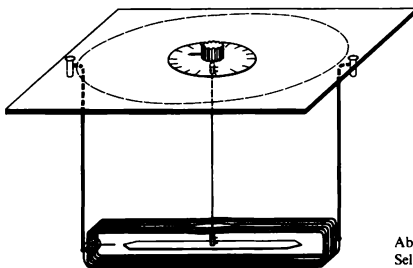


Abb. 2.13.2./1  
Selbst hergestelltes Torsionsgalvanometer

Bohrungen der Deckplatte eingelassen wurden. Man achte darauf, daß die Bohrungen für die Telefonbuchsen auf der verlängerten Verbindungslinie zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  des Winkelmessers liegen und noch innerhalb des Glasgefäßes angeordnet sind. Damit verläuft einerseits die Kastenspule parallel zur Verbindungslinie, und andererseits liegt die Deckplatte an allen Stellen des Glasgefäßes auf.

Zum genauen Einstellen der Magnetnadel biegt man aus Kupferdraht einen feststehenden Zeiger um einen der senkrecht stehenden Schenkel der Kastenspule. Das eine Ende dieses Kupferdrahtes zeigt dabei zur Spitze der Magnetnadel. Die gesamte Anordnung wird in das Glasgefäß eingehängt.

### Experiment

Das Torsionsgalvanometer wird so auf den Tisch gestellt, daß der Spulenkörper der Kastenspule sowie die Magnetnadel die Nord-Süd-Richtung angeben. Der Zeiger des Radiodrehknopfes steht hierbei über der Winkelmarkierung  $0^\circ$ . Die Widerstandsdrähte werden in Reihe zwischen den Isolierstützen ausgespannt. Sie werden über den Schalter und das Torsionsgalvanometer an das Stromversorgungsgerät angeschlossen (Abb. 2.13.2./2).

Am Stromversorgungsgerät stellt man eine Spannung von etwa 2 V ein und verändert diese während der gesamten Messung nicht. Dann schaltet man zunächst einen der drei Widerstandsdrähte in den Stromkreis und schließt den Schalter.

Durch den Stromfluß wird die Magnetnadel des Torsionsgalvanometers ausgelenkt. Man ermittelt die Ablenkung  $X$  der Magnetnadel, indem man den Radiodrehknopf so lange in die der Abstoßung entgegengesetzte Richtung dreht, bis die Magnetnadel wieder in Nord-Süd-Richtung zeigt. Der dabei angezeigte Winkel ist ein Maß für die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes. In drei weiteren Messungen wird durch Widerstandsdrähte der Widerstand im Stromkreis vergrößert und ebenfalls die Ablenkung  $X$  ermittelt. Mit zunehmendem Widerstand wird die Ablenkung  $X$  geringer.

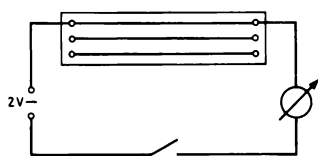


Abb. 2.13.2./2 Schaltplan der experimentellen Anordnung zum Ohmschen Gesetz

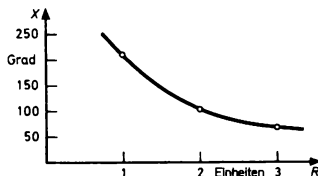


Abb. 2.13.2./3 Auslenkung-Widerstand-Diagramm zum Ohmschen Gesetz

### Beispiel für eine Meßreihe

$R$ in Einheiten	$X$ in Grad	$R \cdot X$ in Einheiten · Grad
1	210	210
2	104	208
3	68	204

Die Auswertung der Meßreihe ergibt, daß bei konstanter Spannung die Auslenkung  $X$  der Magnetnadel umgekehrt proportional zum Widerstand ist (Abb. 2.13.2./3), das Produkt aus  $X$  und  $R$  annähernd konstant ist.

Es gilt:  $X \sim \frac{1}{R}$ , oder in heutiger Schreibweise:  $I \sim \frac{1}{R}$ .

#### Bemerkungen

1. Um möglichst genaue Meßergebnisse zu erzielen, muß die Magnetnadel bei jeder Einstellung völlig zur Ruhe kommen.
2. Bei zu schwacher Auslenkung der Magnetnadel sollte entweder auf die nächste Stufe des Stromversorgungsgerätes geschaltet oder/und die Magnetnadel neu magnetisiert werden.
3. Man achte darauf, daß das verwendete Stromversorgungsgerät einen möglichst kleinen Innenwiderstand hat. Auf die Verwendung eines Thermoelements wurde nicht orientiert, da die Herstellung eines solchen Gerätes mit kleinem Innenwiderstand sehr aufwendig ist.

## 2.14. Magnetische Wirkungen elektrischer Ströme

Nach der Formulierung des Coulombschen Gesetzes nahmen die vielfältigen Bestrebungen der Naturforscher, einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus zu finden, einen starken Aufschwung. Die anziehende bzw. abstoßende Wirkung, welche elektrische Ladungen aufeinander ausüben, wurde mit der entsprechenden Wirkung zwischen den Polen permanenter Magnete verglichen. Die zweifellos vorhandenen Analogien gaben Anlaß zu weitreichenden Spekulationen. So versuchte man, die Wirkung einer offenen galvanischen Spannungsquelle auf eine Magnetnadel festzustellen, und probierte, ob sich eine schwimmende Batterie wie eine Magnetnadel verhielte.

Hans Christian Ørsted (1777 bis 1851), der von den naturphilosophischen Ideen Ritters, Schellings u. a. inspiriert war, sah in Elektrizität, Magnetismus, Wärme und Licht „verschiedene Tätigkeitsformen der allgemeinen Naturkräfte“ und suchte deren Zusammenhang aufzudecken. Von den Vertretern der spekulativen Naturphilosophie hob er sich insofern ab, als für ihn in erster Linie das experimentelle Ergebnis zählte. Um das Wesen der Veränderungen in der Natur erkennen zu können, wollte er die Gegenstände so zusammenbringen, daß ihre Wirkungen faßbarer würden, wollte er „die Natur zwingen, vor seinen Augen zu handeln“.

Nach jahrelangem, zielstrebigem Forschen führte Ørsted das grundlegende Experiment der Elektrodynamik durch und entdeckte den Elektromagnetismus: Er schloß die beiden Pole einer galvanischen Batterie mit einem einfachen Draht kurz und bemerkte die Ablenkung einer Magnetnadel, die sich in unmittelbarer Nähe dieses Drahtes befand.

Am 21. Juli 1820 teilte Ørsted seine bahnbrechenden Erkenntnisse in einer an befreundete Gelehrte und einige europäische Akademien gerichteten, in lateinischer Sprache abgefaßten Flugschrift „*Experimente über die Wirkung des elektrischen Konflikts auf die Magnetnadel*“ mit (Abb. 2.14./1) und löste damit eine wahre Lawine wissen-

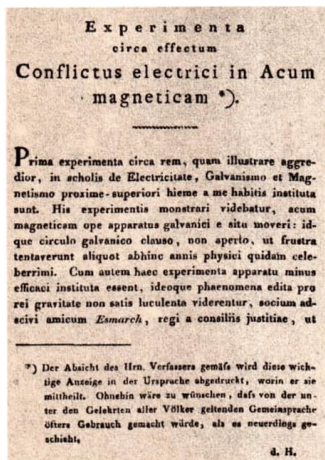


Abb. 2.14/1  
Mitteilung Ørsted's über seine Entdeckung

schaftlicher Forschungen aus. Wissenschaftler in der ganzen Welt begannen sich mit den neuentdeckten elektromagnetischen Phänomenen zu beschäftigen.

Eine aus heutiger Sicht naheliegende, für die Entwicklung der Technik überaus wichtige Erweiterung des Ørsted'schen Grundexperiments wurde schon am 16. September 1820 von Johann Salomon Christoph Schweigger (1779 bis 1857) vorgenommen. Er bemerkte, daß die Wirkung auf die Magnetnadel verstärkt werden kann, wenn man den Leiter zu einer Spule aufwickelt und die Magnetnadel innerhalb der Spule aufstellt. Diese Anordnung, der „Schweigergsche Multiplikator“, markiert den Anfang der galvanometrischen Meßtechnik, die zu einer Fülle neuer Erkenntnisse auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre führte. Gleichzeitig war damit die Grundlage des Elektromagneten mit seinen vielfältigen technischen Anwendungen bei Motoren, Generatoren, Transformatoren und Relais geschaffen.

Dominique Arago (1786 bis 1853) verfolgte die Wiederholung der Experimente Ørsted's in Genf und berichtete darüber auf einer Sitzung der Pariser Akademie der Wissenschaften. André-Marie Ampère (1775 bis 1836) hörte den Vortrag Aragos und begann sich dafür zu interessieren, ob auch zwei elektrische Ströme aufeinander Kräfte ausüben können. Bereits eine Woche später, am 18. September 1820, konnte er der Akademie über erfolgreiche Experimente zur gegenseitigen Wirkung zweier elektrischer Ströme vortragen. Ampère charakterisierte die elektrische Spannung und den elektrischen Strom als „zwei verschiedene Wirkungsarten der elektromotorischen Tätigkeit“, die durch eine präzise Definition unterschieden werden müssen. Er legte die Stromrichtung als die Richtung der „positiven Elektrizität“ fest und formulierte seine bekannte „Schwimmerregel“: „Stellt man sich vor, in Richtung des elektrischen Stromes zu schwimmen und von oben auf die Magnetnadel zu sehen, so wird derjenige Pol der Nadel, der nach Norden zeigt, aus seiner gewöhnlichen Lage nach links hin gedreht.“

Mit diesen Experimenten war ein Prozeß in Gang gesetzt worden, der innerhalb der folgenden sechs Jahre zur vollständigen Ausarbeitung der Elektrodynamik konstanter Ströme führte.

### 2.14.1. Historisches Experiment Ørsted's zur Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel

Ørsted's Entdeckung des Elektromagnetismus wurde von vielen seiner Zeitgenossen als reiner Zufall angesehen, und der Hergang des Geschehens wurde bald von Legenden überwuchert. Ørsted selbst äußerte, daß er von der „Identität der galvanischen und magnetischen Kräfte“ überzeugt war und schon 1813 untersuchen wollte, „ob die Elektrizität irgendeine Wirkung auf den Magneten als solchen hat“. Sieben Jahre später stellte sich der Erfolg ein:

„Der galvanische Apparat, dessen wir uns bedient haben, besteht aus 20 rechteckigen kupfernen Zellen, die jede 12 Zoll (etwa 50 cm) lang, 12 Zoll hoch und  $2\frac{1}{2}$  Zoll breit und jede mit zwei Kupferstreifen versehen ist, welche so geneigt sind, daß sie den Kupferstab tragen können, der die in der Flüssigkeit der benachbarten Zelle schwebende Zinkplatte hält. Das Wasser, womit die Zellen angefüllt wurden, war mit  $\frac{1}{60}$  seines Gewichts Schwefelsäure und mit eben so viel Salpetersäure versetzt, und der in jeder Zelle eingetauchte Teil der Zinkplatte war ein Quadrat von 10 Zoll Seite. Doch können auch kleinere Apparate gebraucht werden, wenn sie nur einen Draht zum Glühen zu bringen vermögen.

Man denke sich die beiden entgegengesetzten Enden des galvanischen Apparates durch einen Metalldraht verbunden. Diesen werde ich der Kürze halber stets den verbindenden Leiter oder den verbindenden Draht nennen; die Wirkung aber, welche in diesem verbindenden Leiter und um denselben her vor sich geht, mit dem Namen elektrischer Konflikt bezeichnen.“

Hier wird ersichtlich, daß der Begriff „elektrischer Konflikt“ inhaltlich nicht mit dem Begriff „elektrischer Strom“ identisch ist. Letzterer wurde erst im September 1820 — also drei Monate nach dem grundlegenden Experiment Ørsted's — von Ampère geprägt.

„Man bringe ein geradeliniges Stück dieses verbindenden Drahtes in horizontaler Lage über eine gewöhnliche, frei sich bewegende Magnetnadel so, daß er ihr parallel sei. Ist alles so eingerichtet, so wird die Magnetnadel in Bewegung kommen, und zwar

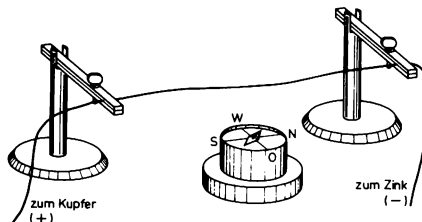


Abb. 2.14.1./1  
Experimentelle Anordnung  
Ørsted's

so, daß sie unter dem vom negativen Ende des galvanischen Apparates herkommenden Teile des verbindenden Drahtes nach Westen zu weicht. Wenn sich der verbindende Draht in einer horizontalen Ebene unter der Magnetnadel befindet, so gehen alle angegebenen Wirkungen nach entgegengesetzter Richtung vor, als wenn er in einer über derselben befindlichen horizontalen Ebene ist, sonst aber auf ganz gleiche Weise.“ (Abb. 2.14.1./1)

## 2.14.2. Schulexperiment zur Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel

1. Flachbatterie (4,5 V)
2. Magnetnadel mit Nadelfuß
3. 2 Isolierstützen
4. Kupferdraht (1000 m lang; 1,2 mm Ø)
5. Schalter
6. Holzquader (etwa 50 mm × 50 mm × 40 mm)

### Methodischer Hinweis

Das Experiment demonstriert sehr überzeugend die Wirkung eines stromdurchflossenen Leiters auf eine Magnetnadel. Durch Analogiebetrachtungen — Wirkungen eines Stabmagneten auf eine Magnetnadel — kann auf das Vorhandensein eines Magnetfeldes um einen stromdurchflossenen Leiter geschlossen werden.

### Experiment

Die experimentelle Anordnung wird entsprechend Abbildung 2.14.2./1 zusammengestellt und der Draht so zwischen den Isolierstützen gespannt, daß er in Nord-Süd-Richtung zeigt. Man stellt die Magnetnadel im Abstand von etwa 20 mm genau unter den Leiter und läßt sie zur Ruhe kommen. Danach schließt man den Stromkreis. Je nach Richtung des Stromes wird die Magnetnadel entsprechend Abbildung 2.14.2./2 abgelenkt.

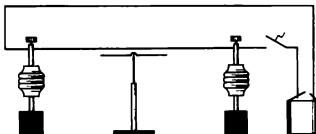


Abb. 2.14.2./1 Experimentelle Anordnung zur Ablenkung einer Magnetnadel im Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

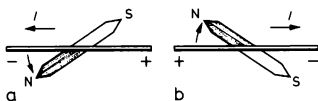


Abb. 2.14.2./2 Abhängigkeit der Ablenkung der Magnetnadel von der Stromrichtung

Die Magnetnadel wird auf den Holzquader gestellt, so daß sie sich etwa 20 mm über dem Leiter befindet. Die Stütze der Magnetnadel wird dabei seitlich am Draht vorbeigeführt. Schließt man den Stromkreis, so schlägt die Magnetnadel entgegen der in Abbildung 2.14.2./2 dargestellten Richtung aus.



*Bemerkungen*

1. Der Stromkreis ist nur solange wie notwendig zu schließen, da sonst die Flachbatterie sehr schnell ihre Energie umsetzt.
2. Die Stärke der Ablenkung der Magnetnadel hängt von der Stromstärke, dem Abstand zwischen Leiter und Magnetnadel und von der verwendeten Magnetnadel ab. Schon bei Stromstärken von 1 A kann die Ablenkung deutlich beobachtet werden.
3. Zur besseren Sichtbarkeit der Ablenkung kann man die Enden der Magnetnadel mit kleinen Papierfährchen versehen.

### 2.14.3. Historisches Experiment Ørstseds zur Wirkung eines Magneten auf eine Stromschleife

Kurze Zeit nach seinem Experiment zur Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel erkannte Ørsted, daß auch dessen Umkehrung möglich sein müßte, und er prüfte die Wirkung eines Magneten auf eine beweglich aufgehängte Stromschleife.

„Da ein Körper einen anderen nicht in Bewegung setzen kann, ohne selbst bewegt zu werden, wenn er beweglich ist, so konnte man leicht voraussehen, daß auch dem galvanischen Bogen von dem Magneten eine Bewegung erteilt werden müßte.“ In Abbildung 2.14.3./1 sind die Originalillustrationen (Fig. 1. und 2.) wiedergegeben. Bei dem von Ørsted erwähnten liquiden Leiter handelt es sich um die bereits bei seinen

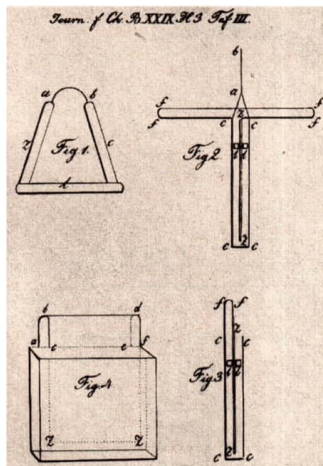


Abb. 2.14.3./1  
Originalillustrationen Ørstseds

früheren Experimenten verwendete Mischung von Schwefelsäure, Salpetersäure und Wasser.

„Es sei Fig. 1. ein galvanischer Bogen, zusammengesetzt aus einem Stück Zink z, einem Stück Kupfer c, einem Metalldraht ab und einem liquiden Leiter l. Ich habe den einfachen galvanischen Apparat verschieden abgeändert, um die Bewegung, welche ihm von dem Magneten erteilt wird, zu untersuchen. Eine dieser Vorrichtungen sieht man in Fig. 2., wo der senkrechte Durchschnitt in der Breite dargestellt ist. cccc ist ein Kasten von Kupfer, von 3 Zoll Höhe, 4 Zoll Länge und  $\frac{1}{2}$  Zoll Breite. zz ist eine Zinkplatte. ll sind die beiden Stücke Kork, wodurch diese Platte in ihrer Richtung erhalten wird. cffffz ist ein Draht von Messing, von wenigstens  $\frac{1}{4}$  Linie Durchmesser. ab ist ebenfalls ein Messingdraht, aber nur so dünn, daß derselbe bloß stark genug ist, den Apparat zu tragen, cac ist ein Faden von Hanf, womit der Metalldraht verbunden ist. Das Gefäß enthält den liquiden Leiter.“

Nachdem Ørsted nochmals die Wirkung der stromdurchflossenen Leiterschleife auf die Magnetnadel erörtert hat, fährt er fort: „Wenn man statt einer beweglichen Nadel einem der Enden ff einen der Pole eines starken Magneten entgegenhält, so wird sich der galvanische Apparat in Bewegung setzen, und sich um die verlängerte Achse ab drehen, gemäß dem angebrachten Pole.“ Mit Bedauern stellt Ørsted fest: „Bis jetzt ist es mir noch nicht gelungen, einen galvanischen Apparat, der sich nach den Polen der Erde richtet, herzustellen. Dazu muß die Vorrichtung unstreitig eine ungemein größere Beweglichkeit haben.“ Heute weiß man, daß die Wirkung des Erdmagnetismus auf die Stromschleife durch Vergrößerung der Fläche hätte erhöht werden können.

#### 2.14.4. Schulexperiment zur Wirkung eines Magneten auf eine Stromschleife

1. Flachbatterie (4,5 V)
2. Kupferdraht (1200 mm lang; 1,8 mm Ø)
3. Stabmagnet
4. Angelschnur (800 mm lang; 0,15 mm Ø)
5. Klebeband
6. 2 Bananenstecker
7. 2 Krokodilklemmen

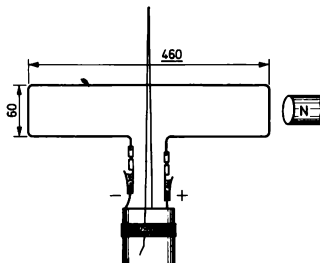


Abb. 2.14.4./1  
Nachweis der Drehung  
einer Stromschleife im Magnetfeld

*Experiment*

Die Isolierung des Kupferdrahts wird an beiden Enden entfernt und die in Abbildung 2.14.4./1 dargestellte Schleife gebogen. An die Enden des Kupferdrahtes schließt man Bananenstecker an, auf die die Krokodilklemmen aufgesteckt werden. Mit Klebeband befestigt man dann die Angelschnur an der Flachbatterie. Die Flachbatterie wird am Stativmaterial aufgehängt und die Stromschleife an den positiven Pol angeschlossen.

Zur Durchführung des Experiments wird das zweite Ende der Stromschleife an die Batterie angeschlossen. Nachdem die experimentelle Anordnung zur Ruhe gekommen ist, nähert man ihr den einen Pol des Stabmagneten in der Ebene der Stromschleife. Die Schleife erfährt dabei ein Drehmoment. Je nach Richtung des elektrischen Stromes und dem Magnetpol dreht sich die Stromschleife entweder im Uhrzeigersinn oder entgegengesetzt.

*Bemerkung*

Vergl. 2.14.2., Bem. Nr. 1.

## 2.14.5. Historisches Experiment Ampères zur Wirkung zweier elektrischer Ströme aufeinander

Nachdem Ampère von den Experimenten Ørstedts erfahren hatte, zog er die Möglichkeit in Betracht, daß auch zwei elektrische Ströme aufeinander Kräfte ausüben. Nach dem damaligen Erkenntnisstand war diese Schlußfolgerung keineswegs so zwingend, wie es heute erscheinen mag, denn obwohl ein Magnet auf ein Weicheisenstück anziehend wirkt, üben zwei Weicheisenstücke keine Kraft aufeinander aus.

Die experimentelle Bestätigung seiner Vermutung gelang Ampère, als er „die Enden zweier Voltascher Batterien mit leitenden Drähten verband und gerade Stücke dieser Drähte zueinander parallel anordnete. Das eine Drahtstück war unbeweglich. Das andere, welches an zwei Spitzen aufgehängt und durch ein Gegengewicht sehr beweglich gemacht worden war, konnte sich dem ersteren nähern oder sich von ihm entfernen, ohne daß die Parallelität der Drahtstücke verloren gegangen wäre. Ließ ich nun durch beide Drähte gleichzeitig einen Strom fließen, so konnte ich beobachten, wie sie sich gegenseitig anzogen, wenn beide Ströme die gleiche Richtung hatten, und wie sie sich abstießen, wenn die Ströme in einander entgegengesetzte Richtungen flossen.“

Ampère wies nach, daß die von ihm beobachteten Effekte nichts mit der aus der Elektrostatik bekannten Anziehung bzw. Abstoßung elektrischer Ladungen gemein haben, und hob dabei drei Aspekte hervor:

1. Die Wirkung hört auf, sobald der Stromkreis unterbrochen wird.
2. Während sich elektrische Ladungen gleicher Art abstoßen, ziehen sich elektrische Ströme gleicher Richtung an.
3. Ist die Anziehung zwischen gleichgerichteten Strömen so groß, daß der bewegliche Leiter mit dem unbeweglichen in Kontakt kommt, dann bleiben die stromdurchflossenen Leiter wie zwei Magnete beständig aneinander haften.

Zu diesen Erscheinungen schreibt Ampère:

„Es handelt sich hier nicht darum, diese neuen Phänomene zu erklären. Die Anziehung bzw. Abstoßung, die zwischen parallelen Strömen stattfindet, je nachdem ob sie in

gleicher oder in entgegengesetzter Richtung fließen, ist eine Tatsache, die sich aus einem einfach zu wiederholenden Experiment ergibt.“

Die von Ampère verwendete Apparatur ist in Abbildung 2.14.5./1 dargestellt. ECDF ist ein Drahtbügel, der durch ein Glasrohr OZ versteift wird. An den Enden E bzw. F des Drahtbügels sind sehr feine Stahlspitzen angelötet worden. Diese Stahlspitzen stehen auf dem Boden der mit Quecksilber gefüllten Stahnapfchen X und Y, die

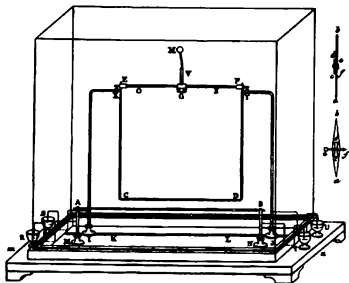


Abb. 2.14.5./1  
Experimentelle Anordnung  
Ampères

ihrerseits an den Metallstäben P und Q befestigt sind. Auf diese Weise wird sowohl eine gute elektrische Verbindung zum beweglichen Leiter als auch dessen Schwingungsfähigkeit gewährleistet. In der Mitte des Glasstabes OZ ist oberhalb der Drehachse ein Gegengewicht H angebracht, um den Schwerpunkt des beweglichen Systems höher legen zu können. Der feste Leiter AB ruht ebenfalls auf Metallstäben (M und N), und zwar derart, daß er zum horizontalen Teil CD des beweglichen Leiters parallel ist und mit ihm in gleicher Höhe liegt. In der Grundplatte des Instrumentes befinden sich Nuten, in denen die Metallstäbe M und N (senkrecht zur Zeichenebene) verschoben werden können. Somit ist es möglich, den seitlichen Abstand der beiden geraden Leiterstücke AB und CD nach Bedarf zu verändern. Da es Ampère für notwendig erachtete, den Einfluß von Luftbewegungen auf den beweglichen Leiter auszuschließen, wurde die gesamte Apparatur mit einem Glaskasten abgedeckt.

Ampère stellte abschließend fest: „Ich hatte zunächst geglaubt, daß der elektrische Strom in den zwei Leitern von zwei verschiedenen Batterien herkommen müßte, aber dies ist keineswegs notwendig. Es genügt, daß die beiden Leiter Teil ein und desselben Kreises sind, denn in einem solchen hat der elektrische Strom überall die gleiche Intensität.“

## 2.14.6. Schulexperimente zur Wirkung zweier elektrischer Ströme aufeinander

1. Kupferdraht (3500 mm lang; 1,4 mm Ø)
2. 2 Freileitungsklemmen (4 mm<sup>2</sup>)
3. Stricknadel

4. Isolierband
5. 2 Kupferbleche (etwa  $40 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ )
6. 4 Isolierstützen
7. Flachbatterie (4,5 V)
8. Schalter

### Methodischer Hinweis

Da die Kraftwirkungen zwischen den beiden Leitern relativ gering sind, ist die Sichtbarkeit für die Schüler begrenzt. Die Anordnung sollte deshalb so aufgebaut werden, daß der gespannte Draht und die Drahtschaukel über einen Tageslichtprojektor geführt und an die Wand projiziert werden. Durch die Projektion der beiden Leiter wird außerdem stärker auf das Wesentliche orientiert.

### Herstellen der Drahtschaukel

Die Herstellung der Drahtschaukel (DS) erfolgt nach Abbildung 2.14.6./1a. Der Quersteg (Q) dient zur Stabilisierung und wird mit Isolierband nichtleitend mit der

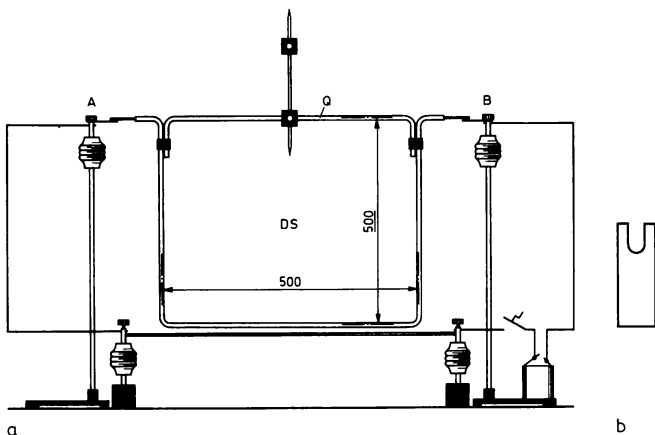


Abb. 2.14.6./1 a) Experimentelle Anordnung zum Nachweis der Kräfte zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern, b) Halterung und Stromzuführung.

Schaukel verbunden. In der Mitte des Quersteiges befestigt man mit Hilfe einer Klemme die Stricknadel. Auf die Stricknadel wird die zweite Klemme aufgeschraubt. Je höher man diese befestigt, um so empfindlicher ist die Anordnung. Aus Kupferblech fertigt man sich noch zwei der in Abbildung 2.14.6./1b dargestellten Halterungen an. Sie dienen gleichzeitig als Stromzuführung und müssen deshalb eine saubere Oberfläche haben.

### Experiment

Die Anordnung wird nach Abbildung 2.14.6./1a aufgebaut. Die Drahtschaukel hängt man mit ihren nichtisolierten Enden auf die beiden Kupferbleche, welche in die Isolierstützen eingeschraubt wurden. Man richtet die Drahtschaukel so ein, daß die beiden parallelen Leiter in gleicher Höhe und etwa 1 mm voneinander entfernt sind. Durch Verstellen der Freileitungsklemme nach oben stellt man dann eine hohe Empfindlichkeit der Drahtschaukel ein. Anschließend wird die Anordnung entsprechend Abbildung 2.14.6./1a geschaltet, so daß der Strom in beiden parallelen Leitern in entgegengesetzter Richtung fließt.

Schließt man den Stromkreis, so beobachtet man eine Abstoßung der Drahtschaukel vom gespannten Draht. Die Abstoßung erfolgt solange, wie der Strom durch die parallelen Leiter fließt.

Der Abstand zwischen der Drahtschaukel und dem gespannten Draht wird auf etwa 10 mm vergrößert. Die beiden Anschlüsse A und B an den Isolierstützen werden vertauscht. Damit ergibt sich gleiche Stromrichtung in beiden parallelen Leitern.

Wird der Stromkreis geschlossen, so wird die Drahtschaukel vom gespannten Leiter angezogen. Öffnet man den Stromkreis, so bewegt sich die Drahtschaukel in ihre stabile Gleichgewichtslage zurück.

### Bemerkung

Um eine möglichst große Stromstärke zu erreichen, sollte eine neue Flachbatterie Verwendung finden. Der Effekt läßt sich durch Verwendung eines Akkumulators oder Stromversorgungsgerätes vergrößern.

## 2.15. Elektromagnetische Induktion

Michael Faraday (1791 bis 1867) hatte sich bereits 1821, also kurze Zeit nach den Experimenten Ørstedes und Ampères, dem Studium der elektromagnetischen Phänomene gewidmet. Seine Bemühungen wurden sogleich von Erfolg gekrönt, denn es gelang ihm als erstem, eine kontinuierliche Bewegung durch Elektromagnetismus herbeizuführen, indem er einen stromführenden Leiter um einen Magnetpol rotieren ließ. Jahre später, als er vom „chemischen Assistenten“ an der Royal Institution zum Direktor des dortigen Laboratoriums avanciert war, wandte er sich diesem Problemkreis erneut zu und entdeckte die elektromagnetische Induktion.

Die aus der Elektrostatik bekannte Influenz elektrischer Ladungen veranlaßte Faraday zu der Erwartung, daß ein Strom in einem benachbarten stromlosen Leiter wiederum einen Strom induzieren müßte. Da er die Wirkung des stationären Stromes im Auge hatte und sich auf diesen konzentrierte, blieb ihm der Erfolg jedoch versagt. Faraday ließ sich nicht entmutigen und hoffte darüber hinaus, „Elektrizität durch gewöhnlichen Magnetismus anzuregen“, da ja umgekehrt auch die strömende Elektrizität Magnetismus verursachte. Dieser Gedanke brachte ihn auf den richtigen Weg, und er gelangte zu einer äußerst wirksamen experimentellen Anordnung, die wir heute als Ringkerntransformator bezeichnen würden. Selbstverständlich zeigte sich auch hiermit, daß ein konstanter Primärstrom in der Sekundärspule keinen Strom induzierte, doch Faraday bemerkte nun die Induktionswirkung im Moment des Ein- und Ausschaltens des Primärstromes.

Da er damit das Wesen der Induktion erkannt hatte, konnte er das Experiment mit einer vereinfachten Anordnung wiederholen: Er wickelte zwei voneinander isolierte Spulen auf eine Papprolle, welche wahlweise mit und ohne Weichenkern benutzt wurde. Faraday demonstrierte dann, daß die Induktion auch eintritt, wenn ein stromführender Leiter auf einen stromlosen Leiter zubewegt oder von ihm wegbewegt wird, und es fiel ihm leicht zu erkennen, daß der gleiche Effekt erzielt werden kann, wenn man permanente Magnete stromlosen Spulen nähert, von diesen wieder entfernt oder durch diese hindurchschiebt. Für jeden speziellen Fall gab Faraday die Richtung des induzierten Stromes an, formulierte aber keine Aussage, die die Allgemeingültigkeit der 1834 von Lenz angegebenen Regel erreichte.

Besonderes Augenmerk hatte Faraday von Anfang an dem von Dominique Arago (1786 bis 1853) beobachteten *Rotationsmagnetismus* gewidmet, der sich z. B. darin äußert, daß eine rotierende Kupferscheibe einen über ihr drehbar aufgehängten Magneten zur Auslenkung oder gar zur Drehung bringt. Er war in der Lage, diese Tatsache durch Induktion vollkommen zu erklären, und nutzte das Prinzip zur Konstruktion des ersten Dynamos, eines Apparates, mit dem es möglich war, durch mechanische Arbeit einen konstanten Strom zu erzeugen.

Viele Jahre nach seinen Induktionsexperimenten vereinigte Faraday deren Resultate mit seinem Konzept der magnetischen Kraftlinien und gelangte zum Induktionsgesetz in der Form: Die Stärke der in einem Leiter induzierten elektromotorischen Kraft ist proportional zur Anzahl der Kraftlinien, die dieser Leiter in der Zeiteinheit schneidet. Er hat es jedoch nicht so explizite formuliert.

Die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion durch Faraday war eine der größten experimentellen Leistungen in der Geschichte der Physik. Ohne theoretische und experimentelle Anhaltspunkte hat Faraday zielgerichtet nach dieser Erscheinung gesucht und ein ganz neues Gebiet der Physik erschlossen. Er hat damit das zweite grundlegende Gesetz der Elektrodynamik gefunden und das Fundament für die Ausarbeitung der elektromagnetischen Feldtheorie gelegt.

Die technische Anwendung der Entdeckungen Faradays hat das Leben der Menschen grundlegend verändert. Auf ihnen basiert die Erzeugung elektrischer Energie in Generatoren, die verlustarme Übertragung durch Transformatoren und die Umwandlung in mechanische Energie durch Elektromotoren. Die Selbstinduktion ermöglicht verlustarme Widerstände im Wechselstromkreis und ist eine wesentliche Komponente im Schwingkreis, der u. a. die Grundlage der gesamten drahtlosen Informationsübertragung darstellt.

## 2.15.1. Historisches Experiment Faradays zur elektromagnetischen Induktion

„Aus einer runden Stange weichen Eisens von  $\frac{7}{8}$  Zoll Dicke wurde ein Ring von sechs Zoll äußerem Durchmesser geschmiedet, und ein neun Zoll langes Stück dieses Ringes mit drei Kupferdrähten, jeder von 24 Fuß Länge und  $\frac{1}{20}$  Zoll Dicke, umwickelt.“ Die Wicklungen, die in Abbildung 2.15.1./1 mit A bezeichnet sind, konnten einzeln benutzt sowie in Reihe oder parallel geschaltet werden. „B bedeutet ein zweites, in gleicher Richtung wie A gewickeltes System von Drahtwindungen, gebildet

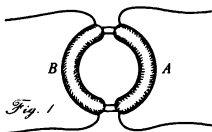


Abb. 2.15.1./1  
Anordnung Faradays zum Nachweis  
der elektromagnetischen Induktion

aus zwei Kupferdrähten von 30 Fuß Länge und geschieden von A an beiden Enden durch eine unbedeckte Strecke Eisen von einem halben Zoll.“

Faraday isolierte die Wicklungen vom Eisenring und untereinander, indem er zwischen die einzelnen Windungen Bindfaden einlegte und jede Lage mit Kattun überzog.

Die zwei Wicklungen von B wurden offenbar parallel geschaltet und „durch Kupferdrähte mit einem drei Fuß vom Ring entfernten Galvanometer verbunden, und die Drähte A, mit ihren Enden zu einer einzigen Schraubenlinie verknüpft, mit einer Batterie von zehn Paaren vier quadratzölliger Platten. Augenblicklich zeigte sich eine Wirkung auf das Galvanometer. Allein obgleich die Batterie geschlossen blieb, war die Wirkung doch nicht dauernd; bald kehrte die Nadel in ihre natürliche Lage zurück. Beim Öffnen der Kette wurde die Nadel indes wieder mächtig abgelenkt, und zwar nach entgegengesetzter Seite wie zuvor.

Die Abänderung des Versuchs in der Art, daß B unbenutzt gelassen, das Galvanometer mit einem der drei Drähte A verbunden und die Batterie durch die vereinten beiden andern Drähte geschlossen wurde, gab ähnliche, nur noch kräftigere Wirkungen.

Geschah die Schließung in dieser oder jener Richtung, so wich auch die Nadel nach der einen oder der andern Seite hin ab. Beim Öffnen der Kette war die Ablenkung immer die umgekehrte von der beim Schließen. Die Ablenkung beim Schließen zeigt immer einen sekundär erregten Strom an, der in Richtung dem der Batterie entgegengesetzt war; beim Öffnen der Kette hatte dagegen der sekundär erregte Strom immer gleiche Richtung mit dem der Batterie.

Kein Öffnen und Schließen der B-Windungen oder irgend eines Teiles des galvanometrischen Bogens hatte einen Einfluß auf die Nadel des Galvanometers. Auch bewirkte die Fortdauer des Voltaschen Stromes keine Ablenkung dieser Nadel.“

## 2.15.2. Schulexperiment zur elektromagnetischen Induktion

1. Spannungsmesser (100 mV —)
2. Weicheisenring mit Wicklungen ⑤, dazu erforderliches Material:
  - a) Stativring aus Eisen (100 mm Ø)
  - b) Kupferdraht, isoliert (25 m; 1 mm Ø)
  - c) selbstklebendes Band
3. Schalter
4. Flachbatterie (4,5 V)

### Methodische Hinweise

1. Das Experiment kann zur Einführung der Induktion eingesetzt werden. Man kann nachweisen, daß elektromagnetische Induktion nur bei Stromänderung erfolgt (Aus- und Einschalten).



2. Mit dem Experiment läßt sich auch das Grundprinzip des Transformators demonstrieren. Durch Parallel- und Reihenschalten der einzelnen Wicklungen können die Gesetzmäßigkeiten untersucht werden.

### *Herstellen des Weicheisenringes mit Wicklungen*

Auf der ersten Hälfte des Weicheisenringes bringt man übereinander drei Wicklungen von etwa 100 Windungen an. Dazu empfiehlt es sich, den Stativring mit dem Stiel an einem stabilen Stativ zu befestigen und ihn zunächst mit einer Lage Band zu umwickeln. Vom Draht wird ein etwa 4 m langes Stück abgeschnitten und zur Hälfte durch den Ring gezogen. Damit man nicht den ganzen Draht bei jeder Windung durch den Ring ziehen muß, wickelt man zunächst — von der Mitte beginnend — die erste Hälfte der Spule mit der halben Länge des Drahtes und danach die zweite Hälfte. Die Enden der Spule werden mit selbstklebendem Band fixiert. Danach wird die zweite Wicklung mit einem etwa 5 m langen Drahtstück darüber aufgebracht, nachdem eine Lage Band zwischengeklebt wurde, analog die dritte.

In gleicher Weise werden auf der anderen Hälfte des Ringes zwei Wicklungen gleicher Windungszahl hergestellt. Zwischen beiden Wicklungssystemen sollte jeweils ein Stück des Eisenringes freibleiben.

### *Experiment 1*

Die experimentelle Anordnung erfolgt nach Abbildung 2.15.2./1. Die drei Wicklungen des Feldstromkreises werden in Reihe, die beiden Induktionswicklungen parallel

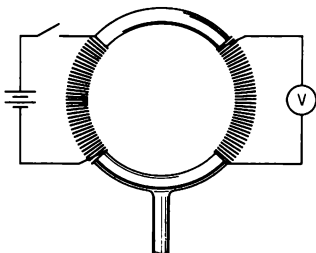


Abb. 2.15.2./1  
Experimentelle Anordnung  
zur elektromagnetischen Induktion

geschaltet. Dabei muß auf gleichen Wicklungssinn der zusammengeschalteten Wicklungen geachtet werden. Der Zeiger des Meßinstrumentes befindet sich in Mittelstellung.

Der Schalter wird eingeschaltet. Der Zeiger des Meßinstrumentes schlägt kurzzeitig aus. Der Schalter wird geöffnet. Es erfolgt ein gleichartiger und gleich großer Ausschlag des Zeigers in der entgegengesetzten Richtung.

Infolge des geschlossenen Eisenkernes durchsetzt der magnetische Fluß der Feldspule weitgehend auch die Induktionsspule. Solange er sich ändert, tritt eine Induktionsspannung auf. Beim Ausschalten (Abnahme des magnetischen Flusses) ist sie entgegengesetzt gerichtet im Vergleich zur Induktionsspannung beim Einschalten (Zunahme des Flusses).

*Experiment 2*

Von den drei übereinanderliegenden Wicklungen werden zwei parallel in den Feldstromkreis geschaltet. Die dritte Wicklung dient als Induktionsspule. Sie wird mit dem Spannungsmesser verbunden. Der Schalter wird geschlossen. Es tritt ein kräftiger Zeigerausschlag als beim Experiment 1 auf. Beim Öffnen des Schalters schlägt der Zeiger ebenso kräftig nach der anderen Seite aus.

Die übereinanderliegenden Wicklungen bewirken, daß der gesamte magnetische Fluß, der von der Feldspule erzeugt wird, auch die Induktionsspule durchsetzt.

*Bemerkungen*

1. Gegenüber gleichartigen Experimenten mit Spulen und geblättern Eisenkernen ist die Induktionsspannung deshalb wesentlich geringer, weil infolge des massiven Eisenkernes erhebliche Wirbelströme auftreten.
2. Zur Vereinfachung kann das erste Wicklungssystem auf zwei Wicklungen, das zweite auf eine Wicklung beschränkt werden.

### 2.15.3. Historisches Experiment Faradays zur Erzeugung eines kontinuierlichen Stromes durch elektromagnetische Induktion

Nachdem Faraday demonstriert hatte, daß man in stromlosen Spulen einen Strom induzieren kann, wenn Magnetstäbe in deren Nähe bewegt werden, hoffte er, „den Versuch des Herrn Arago zu einer neuen Elektrizitätsquelle zu machen“. Dazu bediente er sich eines „magnetischen Magazins“, das sich im Besitz der Royal Society befand. „Dies Magazin besteht aus 450 Magnetstäben, jeder 15 Zoll lang, einen Zoll breit und einen halben Zoll dick, welche in einer Büchse so zusammengestellt sind, daß sie an einem Ende zwei äußere Pole darbietet. Diese Pole ragen 6 Zoll aus der Büchse, sind im Querschnitt zwölf Zoll hoch und drei Zoll breit und stehen neun Zoll voneinander. Um die Pole zu konzentrieren und einander näher zu bringen, wurden zwei Eisen- oder Stahlstäbe, jeder etwa 6 bis 7 Zoll lang, 1 Zoll breit und  $\frac{1}{2}$  Zoll dick, in der Quere auf die Pole gelegt, so daß sie, durch Schnüre am Abgleiten gehindert, einander beliebig genähert werden konnten.“ (Abb. 2.15.3./1)

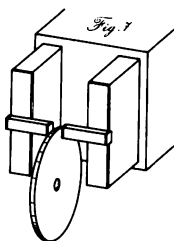


Abb. 2.15.3./1  
links: Anordnung Faradays  
zur Erzeugung  
eines kontinuierlichen  
Induktionsstromes

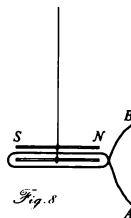


Abb. 2.15.3./2  
rechts: Galvanometer Faradays  
zum Nachweis der  
elektromagnetischen Induktion

„Eine Kupferscheibe, 12 Zoll im Durchmesser und etwa  $\frac{1}{5}$  Zoll dick, wurde auf einer Messingachse befestigt und mittelst dieser in eine Gabel eingesetzt, worin sie vertikal rotieren konnte, während sie zugleich mit ihrem Rand mehr oder weniger tief zwischen die Pole des Magnets hineinragte. Der Rand der Scheibe war wohl amalgamiert, um einen guten, aber beweglichen Berührungspunkt zu erhalten, und ein Teil der Achse war ringsum in ähnlicher Weise vorgerichtet.“

Abbildung 2.15.3/2 zeigt das von Faraday verwendete Galvanometer in einer schematischen Darstellung. Es war „nur von roher Arbeit, doch aber hinreichend empfindlich, und der Draht darin von Kupfer mit Seide besponnen und 16- bis 18mal umgeschlungen. Zwei magnetisierte Nähnadeln wurden, einen halben Zoll voneinander entfernt, in paralleler, aber umgekehrter Lage in einen trocknen Strohalm gesteckt und mittels desselben an ein Fädchen ungesponnener Seide so aufgehängt, daß die untere Nadel zwischen den Windungen und die obere über denselben schwebte. Die letztere Nadel stellte, weil sie etwas stärker als die andere magnetisiert war, das ganze System in die Richtung des magnetischen Meridians.“ Das Meßinstrument wurde mit einer Glasglocke bedeckt und weit entfernt vom großen Permanentmagneten aufgestellt.

Der eine Galvanometerdraht wurde zwei- bis dreimal lose um die Messingachse der Scheibe gelegt, der andere an einem Schleifkontakt befestigt. Dieser bestand aus einem 4 Zoll langen Blei- oder Kupferstäbchen, das an einem Ende konkav ausgehöhlt und amalgamiert war. Der Schleifkontakt wurde von Hand auf den Rand der Scheibe gesetzt, und zwar direkt zwischen den Magnetpolen.

„Bei dieser Anordnung war noch alles ruhig, die Galvanometernadel zeigte keine Ablenkung; allein in dem Augenblick, wo die Scheibe in Drehung versetzt ward, wich die Nadel auch ab, bei schneller Drehung um mehr als  $90^\circ$ . So war es demnach erwiesen, daß durch gewöhnliche Magnete ein anhaltender elektrischer Strom hervorgerufen werden kann. Wurde alles Übrige gleich gelassen, die Scheibe in umgekehrter Richtung gedreht, so wich auch die Nadel, mit gleicher Kraft wie vorhin, nach der entgegengesetzten Seite ab, zum Beweise, daß der entwickelte elektrische Strom jetzt in umgekehrter Richtung wie zuvor ging.“

## 2.15.4. Schalexperiment zur Erzeugung eines kontinuierlichen Stromes durch elektromagnetische Induktion

1. Strommesser (1 mA —)
2. Kupferscheibe Ⓢ (etwa 200 mm Ø; 1,5 mm dick) mit zentrischer Bohrung (Ø 8 mm)
3. Rundstab aus Metall Ⓢ (etwa 150 mm lang; 10 mm Ø) mit M-8-Gewinde
4. 2 Muttern M 8
5. großer Magnet, U-förmig
6. 2 Polschuhe
7. Schwungmaschine mit Handantrieb
8. Kupferdraht, ohne Isolierung (etwa 500 mm lang; 1 mm Ø)

### Methodische Hinweise

1. Mit dem Experiment kann man zeigen, daß durch die gleichförmige Drehbewegung der Kupferscheibe ein elektrischer Strom konstanter Stärke und gleicher Richtung erzeugt wird (Unipolarinduktion).

2. Zur Erklärung der Vorgänge müssen die Schüler Kenntnisse über die Lorentzkraft besitzen.

### Experiment

Die Kupferscheibe wird mittels der Muttern auf dem Rundstab aus Metall festgeschraubt. Den Rundstab befestigt man in der Schwungmaschine. Der Magnet wird so auf einen Stativtisch gestellt, daß sich die Kupferscheibe im Luftspalt zwischen den Polschuhen drehen kann. Die Polschuhe sollen dabei etwa 2 cm vom Rand der Scheibe entfernt sein. Den blanken Kupferdraht schneidet man in zwei Hälften und wickelt die eine Hälfte um den Metallstab. Mittels eines Verbindungsleiters verbindet man den Kupferdraht mit dem einen Anschluß des Strommessers. Die andere Hälfte des Kupferdrahtes wird, wie die Abbildung 2.15.4./1 zeigt, gebogen und ebenfalls mit dem Meßinstrument verbunden.

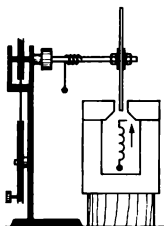


Abb. 2.15.4./1  
Experimentelle Anordnung zur Erzeugung  
eines kontinuierlichen Stromes  
durch elektromagnetische Induktion

Zunächst zeigt man, daß bei Berührung des Randes der Kupferscheibe mit dem losen Ende des Kupferdrahtes das Meßinstrument keinen Ausschlag zeigt. Dann versetzt man die Kupferscheibe in eine gleichförmige Drehbewegung und hält den Kupferdraht wieder an den Rand der Kupferscheibe. Man beobachtet ein Ausschlagen des Zeigers.

Das Experiment wird wiederholt, indem man die Drehrichtung ändert. Man beobachtet jetzt einen entgegengesetzten Ausschlag des Zeigers.

Wird die Kupferscheibe in Rotation versetzt, so bewegen sich die Elektronen in ihr senkrecht zu den Feldlinien des Magnetfeldes. Dabei wirkt auf sie die Lorentzkraft. Je nach Drehrichtung der Kupferscheibe bewegen sich die wanderungsfähigen Elektronen entweder zur Drehachse hin oder von ihr weg. Dadurch tritt zwischen der Achse und dem Rand der Scheibe eine Induktionsspannung auf. Da durch das Meßinstrument der Stromkreis geschlossen ist, fließt ein elektrischer Strom.

### Bemerkung

Die Richtungsänderung des Induktionsstromes kann auch durch Vertauschen der Lage der Pole des Magneten erfolgen. Hierzu wird der Magnet um  $180^\circ$  gedreht.

## 2.15.5. Historisches Experiment Faradays zur Selbstinduktion

Die Untersuchungen, die Faraday zum experimentellen Nachweis der Selbstinduktion führten, waren durch William Jenkin angeregt worden. Dieser hatte eine Spule mit Weicheisenkern an ein galvanisches Element angeschlossen und beim Öffnen des Stromkreises einen kräftigen Schlag gespürt, sobald er die Enden des Drahtes dabei mit beiden Händen anfaßte. Dafür konnte die Batterie selbst nicht verantwortlich sein, denn er hatte keinen Schlag bekommen, wenn zum Schließen des Kreises ein einfacher, kurzer Draht benutzt wurde.

Nach anfänglichen Irrtümern gelangte Faraday 1834/35 zu der Ansicht, daß die von Jenkin beobachteten Effekte mit den Induktionssphänomenen identisch seien und es sich dabei um die Induktionswirkung „von einem Element eines Stromes auf ein anderes Element desselben Stromes“ handelt. Da der Induktionsstrom nur schwer vom Batteriestrom getrennt werden konnte, mußte sich Faraday zunächst auf allgemeine Aussagen beschränken. Mit der in Abbildung 2.15.5./1 skizzierten Anordnung war es ihm aber schließlich doch möglich, den Induktionsstrom direkt nachzuweisen.

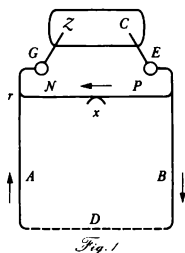


Abb. 2.15.5./1

Schaltplan Faradays zum Nachweis der Selbstinduktion

Faraday verwendete ein Kupfer-Zink-Element, das er, weil es die Quelle der elektromotorischen Kraft darstellt, stets als *Elektromotor* bezeichnete. G und E sind mit Quecksilber gefüllte Näpfchen, von denen eines zur Schließung und Öffnung des Batteriestromkreises diente. „Die zu betrachtenden Wirkungen hängen von dem Leiter ab, der zur Verknüpfung der Zink- und Kupferplatte des Elektromotors angewandt wird.“ Sie zeigten sich am eindrucksvollsten, wenn Faraday bei D einen Elektromagneten, d. h. eine Spule mit Weicheisenkern, anstatt einer gewöhnlichen Spule oder einfacher Drähte einschaltete. N und P sind die *Querdrähte*, welche entweder bei x in unmittelbare Berührung gebracht oder dort an ein recht einfach gebautes Galvanometer bzw. an einen elektrolytischen Apparat angeschlossen wurden.

„Die lehrreichste Reihe von Resultaten ergab sich, wenn bei x ein Galvanometer eingeschaltet wurde. Als bei D ein Elektromagnet angewandt und der Kontakt bei G und E unterhalten wurde, zeigte die Ablenkung der Magnetnadel einen von P nach N, also in Richtung des Pfeiles gehenden Strom an; der Querdraht diente dabei zur Leitung eines Teils der durch den Elektromotor erregten Elektrizität und die Vorrichtung ABD, wie es der Pfeil anzeigt, zur Leitung des andern und bei weitem größeren Teils. Nun wurde die Nadel mittelst Stifte, die an die entgegengesetzten Seiten seiner beiden Enden gehalten wurden, in ihre natürliche Lage, in die, welche sie ohne Einwirkung des Stroms einnahm, zurückgeführt, und darauf die Berührung bei G

oder E unterbrochen; sogleich wich sie stark nach der entgegengesetzten Seite ab, und bewies so, daß der Extrastrom in den Querdrähten eine umgekehrte Richtung hatte, als durch den Pfeil angegeben ist, d. h. als der durch die direkte Aktion des Elektromotors erzeugte Strom.“

Von seinen früheren Untersuchungen her wußte Faraday, daß die Induktionswirkung eines elektrischen Stromes im Moment des Einschaltens von gleicher Stärke ist wie im Moment des Ausschaltens und daß die Richtungen der induzierten Ströme einander entgegengesetzt sind. Folgerichtig versuchte er, die Selbstinduktion auch für den Fall der Schließung des Batteriestromkreises zu demonstrieren.

„Es wurde nun bei x ein Galvanometer eingeschaltet und, während der Kontakt bei G und E unterhalten ward, die Ablenkung der Nadel aufgezeichnet. Die Nadel ward dann, wie früher, nach der einen Richtung hin gehemmt, so daß sie bei Aufhörung des Stroms nicht zurückkehren konnte, sondern in der Lage bleiben mußte, welche ihr der Strom gegeben hatte. Bei Unterbrechung des Kontakts bei G oder E war natürlich keine Wirkung sichtbar; jetzt ward er wieder hergestellt, und augenblicklich wich die Nadel von den Hemmstiften ab, so daß sie also noch weiter aus ihrer natürlichen Lage abgelenkt ward, als es durch den konstanten Strom geschehen war. Durch diesen temporären Überschuß des Stroms in der Querleitung war also die temporäre Verzögerung in dem Bogen ABD nachgewiesen.“

Zusammenfassend stellt Faraday fest: „Der Vorgang unter obigen Umständen besteht also darin, daß die Intensität und Qualität der sich in einem Strom bewegendes Elektrizität zu Anfang und bei Verstärkung des Stromes *kleiner*, bei Aufhebung oder bei Schwächung *größer* sind, als sie sein würden, wenn die in diesen Momenten eintretende Induktionswirkung nicht stattgefunden hätte.“

## 2.15.6. Schulexperiment zur Selbstinduktion

1. U-Kern mit Joch
2. Spule 500 Windungen
3. Gerät zur Herleitung des Induktionsgesetzes
4. große Magnetnadel
5. Fuß mit Lagerspitze
6. Holzquader (etwa 30 mm × 30 mm × 100 mm)
7. Schalter
8. Flachbatterie

### *Methodischer Hinweis*

Da die Parallelschaltung des Nachweisgerätes bereits beim Einschalten einen Ausschlag der Magnetnadel bewirkt, wird das Verständnis der Vorgänge für die Schüler erschwert.

### *Experimentelle Anordnung*

Vom Gerät zur Herleitung des Induktionsgesetzes werden alle Teile bis auf die Helmholtz-Spulen entfernt. Die Magnetnadel stellt man so auf, daß sie sich zwischen den Helmholtz-Spulen befindet. Diese Anordnung dient als Galvanometer. Sie wird so ge-

dreht, daß die Achse der Helmholtz-Spulen in Ost-West-Richtung zeigt. Die Schaltung der Experimentieranordnung erfolgt gemäß Abbildung 2.15.6./1.

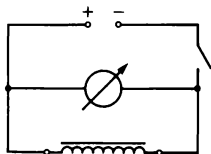


Abb. 2.15.6./1  
Experimentelle Anordnung zur Selbstinduktion

### *Experiment 1: Selbstinduktion beim Einschalten des Stromes*

Der Stromkreis wird geschlossen. Man wartet, bis die Magnetnadel zur Ruhe gekommen ist. Dann arretiert man sie in dieser Lage mittels des Holzquaders in der Weise, daß sie nicht wieder zur Ausgangslage zurückkehren, wohl aber weiter ausschlagen kann.

Der Stromfluß wird unterbrochen. Die Magnetnadel verharrt dabei in ihrer Lage. Nun wird der Strom erneut eingeschaltet. Jetzt schlägt die Magnetnadel aus und kehrt danach wieder in die durch den Holzquader markierte Lage zurück.

Die Gesamtstromstärke in der experimentellen Anordnung wird von den Widerständen der beiden Teilstromkreise und vom Innenwiderstand der Flachbatterie bestimmt. Infolge des Innenwiderstandes der Spannungsquelle bewirkt eine Änderung der Stromstärke in dem einen Teilstromkreis auch eine Stromstärkenänderung in dem anderen. Beim Einschalten ist die Selbstinduktionsspannung der angelegten Spannung entgegengerichtet. Deshalb nimmt die Stromstärke nur allmählich zu. Dadurch wird bewirkt, daß die Stromstärke im zweiten Teilstromkreis abnimmt. Der anfänglich größere Ausschlag der Magnetnadel gegenüber der Lage bei konstanter Stromstärke belegt damit, daß nach dem Einschalten zunächst eine Behinderung des Stromes in der Spule mit Eisenkern erfolgt.

### *Experiment 2: Selbstinduktion beim Ausschalten des Stromes*

Die Magnetnadel wird mittels des Holzquaders in der Weise in ihrer Ruhelage arretiert, daß sie beim Einschalten des Stromes nicht ausschlagen, sich wohl aber in entgegengesetztem Drehsinn bewegen kann.

Der Schalter wird geschlossen. Die Magnetnadel schlägt nicht aus. Danach wird der Schalter wieder geöffnet. Jetzt dreht sich die Magnetnadel in entgegengesetzter Richtung.

Beim Ausschalten ist die Selbstinduktionsspannung der vorher anliegenden Spannung entgegengerichtet.

### *Bemerkung*

Beim Experiment 1 tritt der Effekt nur dann überzeugend auf, wenn der Endausschlag der Magnetnadel wesentlich kleiner als  $90^\circ$  ist.

## 2.16. Hertz'sche Wellen — Drahtlose Telegrafie und Telefonie

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hatte die Entwicklung der Elektrodynamik einen Höhepunkt und einen gewissen Abschluß erreicht. Dazu hatten unter anderem die experimentellen Arbeiten von Hans Christian Ørsted (1777 bis 1851) (→ 2.14.), besonders aber die experimentellen und theoretischen Untersuchungen Michael Faradays (1791 bis 1867) (→ 2.15.) wesentlich beigetragen. Mit Hilfe der Faradayschen Feldvorstellung konnten alle bekannten elektrischen und magnetischen Erscheinungen überzeugend erklärt werden. James Clark Maxwell (1831 bis 1879) unterzog die gewonnenen Erkenntnisse einer gründlichen Analyse und formulierte die grundlegenden Gesetze des elektromagnetischen Feldes in der Sprache der Mathematik.

Der entscheidende Erkenntnisfortschritt der Faraday-Maxwellschen Feldtheorie (Nahwirkungstheorie) bestand in folgendem: Maxwell nahm 1862 hypothetisch an, daß bei zeitlich veränderlichen Strömen durch den Kondensator ein „Verschiebungsstrom“ fließt und so den Leitungsstrom zu einem geschlossenen Strom ergänzt. Auch der Raum zwischen den Kondensatorplatten sollte infolge dieses Verschiebungsstromes von einem magnetischen Feld umgeben sein. Aus dieser kühnen Annahme konnte als bedeutendste Folgerung die Existenz elektromagnetischer Wellen im Vakuum hergeleitet werden, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten (1864/65).

Heinrich Hertz (1857 bis 1894) wurde von seinem akademischen Lehrer Hermann von Helmholtz (1821 bis 1894) auf die noch ausstehende experimentelle Bestätigung bzw. Widerlegung dieser theoretischen Schlußfolgerung aufmerksam gemacht. Die Berliner Akademie schrieb dazu eine Preisaufgabe aus.

In den Jahren 1886 bis 1889 führte Hertz in Karlsruhe systematisch Untersuchungen mit sehr schnellen elektrischen Schwingungen durch, die bei Funkenentladungen von Leidener Flaschen (→ 2.11.) bzw. eines Induktors auftreten. Bei derartigen Experimenten hatte Berend Wilhelm Feddersen (1832 bis 1918) schon 1861 entdeckt, daß der Funkenübergang bei einem Induktor keine einfache, sondern eine oszillatorische, hin- und hergehende Entladung ist. Die von ihm ermittelte Frequenz betrug 1 MHz.

Hertz erreichte eine etwa hundertmal so hohe Frequenz durch die spezielle Gestaltung der experimentellen Anordnung. Mit dieser Anordnung entdeckte er die elektromagnetischen Wellen. Er konnte wesentliche Eigenschaften (geradlinige Ausbreitung, Reflexion, Brechung, Polarisierung und Interferenz) nachweisen und erkannte die Wesensgleichheit von Licht und elektromagnetischen Wellen.

Hertz suchte nicht nach einer Anwendung der von ihm entdeckten elektromagnetischen Wellen zur drahtlosen Nachrichtenübermittlung, obwohl es dafür besonders von seiten der Seeschifffahrt und des Militärwesens ein starkes praktisches Bedürfnis gab. Die erste beabsichtigte Signalübermittlung mit elektromagnetischen Wellen wurde 1879 von David Edward Hughes (1831 bis 1900) vor der Royal Society in London vorgeführt. Der Sender bestand aus einer kleinen Induktionsspule mit Funkenstrecke. Der etwa 450 m entfernte Empfänger enthielt einen Kohärer, der beim Auftreffen von elektromagnetischen Wellen seinen Widerstand änderte. In einem angeschlossenen Telefon konnten beim Funkenüberschlag Geräusche wahrgenommen werden. Hughes konnte die von ihm erzielten Effekte nicht erklären und gilt daher nicht als Entdecker der drahtlosen Telegrafie, aber er ist ein bedeutender Vorläufer.

Der russische Physiker Alexander Stepanowitsch Popow (1859 bis 1906) vermutete sofort nach Bekanntwerden der Hertz'schen Arbeiten, daß die elektromagnetischen Wellen für eine drahtlose Nachrichtenübermittlung geeignet sein müßten. Er ging



zielstrebig daran, ein entsprechendes Gerät aufzubauen. Er verwendete einen Hertzschen Sender. Im Empfänger war als empfindlicher „Wellenanzeiger“ ein Kohärer, den Edouard Branly (1846 bis 1940) nacherfunden und als empfindliches Nachweismittel für schnelle elektrische Schwingungen erkannt hatte, als Kernstück enthalten. Den ersten derartigen Empfänger hatte 1894 Oliver Lodge (1851 bis 1940) konstruiert. Als eine wichtige Neuerung ließ er den nach dem Auftreffen der Hertzschen Wellen fließenden Batteriestrom einen Klöppel betätigen, der auf die Kohärer-Röhre aufschlug. Diese Anordnung schaltete Popow unter Hinzufügung einer Glocke im gleichen Jahr zur Registrierung von entfernten Gewitterentladungen zwischen den Luft- und Erdleiter eines Blitzableiters ein. Um die Reichweite zu vergrößern, verlängerte er den „Luftleiter“, indem er Drähte an Luftballons hängte und diese aufsteigen ließ. Damit war die Antenne erfunden. 1895 konnte Popow der Öffentlichkeit seine Apparatur vorführen und Signale 190 m weit übertragen. 1897 glückte die erste Nachrichtenübermittlung vom Festland auf ein Schiff, die Entfernung betrug bereits 5,5 km. Zwei Jahre später wurden 72 km erreicht.

Der Italiener Guglielmo Marconi (1874 bis 1937) erkannte als erster die praktischen Möglichkeiten, die elektromagnetischen Wellen zur Nachrichtenübermittlung einzusetzen, und verwirklichte sie. Er verwendete zunächst einen Empfänger wie Popow und verbesserte den Sender, indem er die Erdung einführte und stabile Antennenmasten bauen ließ. Unabhängig von Popow konnte er 1895 mit einem Hertzschen Sender und einem Branlyschen Kohärer Signale drahtlos übertragen und 800 m überbrücken. 1897 gelang eine Nachrichtenübertragung vom Land auf ein Schiff (15 km) und 1901 von Europa nach Amerika (3400 km). Marconi ließ sich seine Erfindungen sofort patentieren, gründete eine Gesellschaft und nahm starken Einfluß auf die Entwicklung der Funktechnik.

Etwa 10 Jahre lang waren alle Empfänger mit einem Kohärer ausgestattet; dann setzte sich der Kristalldetektor durch, der auf dem 1874 von Ferdinand Braun (1850 bis 1918) bei Schwefelmetallen entdeckten Gleichrichtereffekt basiert. Der Detektor blieb bis Ende der 20er Jahre in der Funktechnik bedeutsam.

Die drahtlose Telefonie setzte ungedämpfte elektromagnetische Wellen voraus und konnte ab 1902 mit dem von dem Dänen Valdemar Poulsen (1869 bis 1942) entwickelten Lichtbogensender realisiert werden. 1906 gelang eine drahtlose Telefonieübertragung von Berlin nach Nauen (36 km) und 1907 zwischen Dänemark und Berlin (370 km).

Die notwendige Amplitudensteuerung bereitete mit diesen Sendern sehr große Schwierigkeiten.

Die weitere Entwicklung der drahtlosen Telegrafie und Telefonie wurde entscheidend durch das Aufkommen der Verstärkerröhren beeinflusst. Im Zusammenhang mit systematischen Untersuchungen an Glühlampen entdeckte 1884 Thomas Alva Edison (1847 bis 1931) den glühelektrischen Effekt. Im Jahre 1906 stellten der Österreicher Robert von Lieben (1878 bis 1913) und der Amerikaner Lee de Forest (1873 bis 1961) fast gleichzeitig und unabhängig die Verstärkerwirkung der Glühkathodenröhre fest. Die Steuerung des Anodenstromes erfolgte zunächst durch Einwirkung eines magnetischen Feldes, aber bereits ein Jahr später wurde eine 3. Elektrode, die Steuerelektrode, eingeführt, und Forest gab die Audionschaltung an.

An der Weiterentwicklung dieser Röhren arbeiteten mehrere Forscher in verschiedenen Laboratorien, bis schließlich 1914 die erste Hochvakuumröhre vorlag, die die Funktechnik revolutionierte und über 6 Jahrzehnte beherrschte.

Nach der Einführung von Röhrensendern konnte sich das Funktelefon durchsetzen. Die wesentliche Voraussetzung hierfür lieferte 1913 Alexander Meißner (1883 bis 1958) mit einer Rückkopplungsschaltung zur Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwin-

ungen. Der Röhrensender für ungedämpfte Wellen und das rückgekoppelte Audion als Empfänger bestimmten für längere Zeit die Sende- und Empfängertechnik.

Neben dieser Entwicklungslinie ist zu beachten, daß Ferdinand Braun im Jahre 1897 die Katodenstrahlröhre so gestaltete, daß sie als Anzeige- und Meßgerät für schnelle elektrische Vorgänge dienen konnte. Nicht abzusehen war damals, daß damit eine Grundlage für das Fernsehen geschaffen worden war.

### 2.16.1. Historisches Experiment zum Senden und Empfangen Hertzscher Wellen

Die ersten Experimente führte 1887 Heinrich Hertz mit einer Anordnung durch, die er wie folgt beschreibt: „Dem induzierenden Strom (Sender) gab ich die Gestalt einer geraden Linie (Fig. 4). Seine Enden wurden durch die Konduktoren C und C' gebildet. Dieselben hatten einen Abstand von 3 m und waren verbunden durch einen 2 mm dicken Kupferdraht, welcher in seiner Mitte den Entlader des Induktoriums aufnahm. Der induzierte Strom (Empfänger) war ... 80 cm breit, 120 cm lang. Wurde nun die kürzeste Entfernung zwischen beiden Leitern gleich 50 cm gemacht, so waren noch induzierte Funken von 2 mm Länge (an der Funkstrecke M) zu erhalten; wurde die Entfernung größer, so nahm die Funkenlänge schnell ab, doch war noch bei 1,5 m kürzester Entfernung ein regelmäßiger Funkenstrom wahrnehmbar. Man konnte sich ohne Störung des Versuchs zwischen der induzierenden und der induzierten Leitung bewegen.“

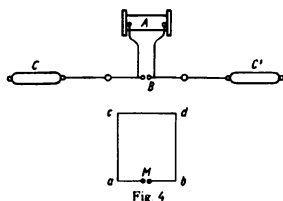


Abb. 2.16.1./1

Anordnung zum Senden und Empfangen  
Hertzscher Wellen

Über die erste Verwendung eines gestreckten Dipols als Empfänger schreibt Hertz: „Es wurde ... parallel dem geradlinigen Draht des vorigen Versuchs in 60 cm Abstand ein zweiter Kupferdraht isoliert ausgespannt. Der letztere Draht war etwas kürzer als der erste, an seinen Enden waren zwei isolierte Kugeln von 10 cm Durchmesser befestigt, in seine Mitte wurde das Funkenmikrometer eingeführt. Wurde nun das Induktorium in Gang gesetzt, so begleitete ein Funkenstrom in der sekundären Leitung den Funkenstrom des Induktoriums.“

Mit dieser Anordnung bestimmte Hertz durch Änderung der Längen  $ac$  und  $bd$  des Empfängers das Resonanzmaximum. Außerdem schätzte er mit der Thomsonschen Formel die Schwingungsdauer des Sendedipols zu  $T = 3,5 \cdot 10^{-8}$  s ab. Hertz spricht bei diesen Experimenten von Induktionswirkungen, die sich in Luft ausbreiten. Im darauffolgenden Jahr ermittelte Hertz als Wellenlänge des Senders 9,6 m. Damit wurde

die abgeschätzte Schwingungsdauer gut bestätigt. Mit einem kreisförmigen Empfänger von 35 cm Radius (Abb. 2.16.1./2) wurden die Schwingungsbäuche und -knoten des elektrischen und magnetischen Feldes ausgemessen, die sich vor einer Zinkblech-Reflektorwand von 4 m Höhe und 2 m Breite ausbildeten (Abb. 2.16.1./3). „Der Hörsaal der Physik, in welchem diese Versuche angestellt wurden, ist nahe an 15 m lang, 14 m breit, 6 m hoch. Aus diesem Raum ließ ich die hängenden Teile der Gasleitungen und die metallenen Kronleuchter entfernen, so daß er nichts enthielt als die hölzernen Tische und Bänke, von denen eine schädliche Wirkung weder zu erwarten war noch sich geltend machte.“ Der Sendedipol war bei diesen Experimenten vertikal aufgestellt.

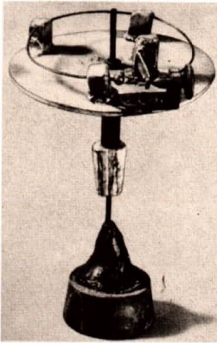


Abb. 2.16.1/2  
Anordnung zum Empfangen  
Hertzscher Wellen

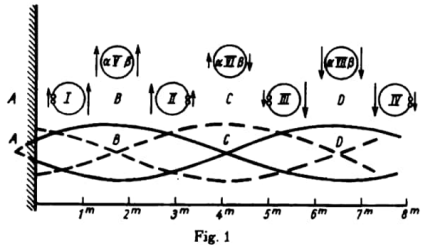


Abb. 2.16.1./3  
Elektrisches und magnetisches Feld vor einer reflektierenden  
Wand

Den Nachweis aller Welleneigenschaften führte Hertz mit bedeutend kürzeren Wellen durch ( $\lambda = 66$  cm). „Der benutzte primäre Leiter wird am einfachsten beschrieben in folgender Weise: Man denke sich einen zylindrischen Messingkörper von 3 cm Durchmesser und 26 cm Länge in der Mitte seiner Länge unterbrochen durch eine Funkenstrecke, deren Pole beiderseits durch Kugelflächen von 2 cm Radius gebildet werden. Die Länge des Leiters wird nahezu der halben Wellenlänge gleich sein.

Es ist wesentlich, daß die Polflächen der Funkenstrecke häufig neu poliert und während der Versuche vor der Belichtung durch gleichzeitige Seitenentladungen sorgfältig geschützt werden, es versagen sonst die Schwingungen. Der Anblick und der Klang der Funken läßt stets erkennen, ob die Funkenstrecke in genügendem Zustand ist. Als Induktorium verwandte ich einen kleinen Funkengeber, dessen stärkste Leistung Funken von 4,5 cm Länge zwischen Spitzen war. Zu den Versuchen wurde dann die Funkenstrecke auf eine Länge von 3 mm zusammengeschoben.“

Als Empfänger verwendete Hertz einen gestreckten Dipol: „Zwei gerade Drahtstücke von 50 cm Länge und 5 mm Durchmesser waren in ein und derselben Geraden so angeordnet, daß die einander zugekehrten Endpunkte einen Abstand von 5 cm hatten. Von diesen Endpunkten führten zwei 15 cm lange Drähte zu einer Funkenstrecke. In diesem Leiter war auf die Wirkung der Resonanz verzichtet.“ Sowohl der Sende- als auch der Empfangsdipol waren in der Brennpunktlinie von Hohlspiegeln als Reflektoren angeord-

net. „Ich wählte als Brennweite 12,5 cm und stellte den Hohlspiegel her, indem ich ein Zinkblech von 2 m Länge, 2 m Breite und 1/2 mm Dicke über einem Holzgestell von genauer Krümmung in die gewünschte Gestalt bog. Die Höhe des Spiegels ergab sich so zu 2 m. Die Breite seiner Öffnung zu 1,2 m, seine Tiefe zu 0,7 m“ (Abb. 2.16.1./4).

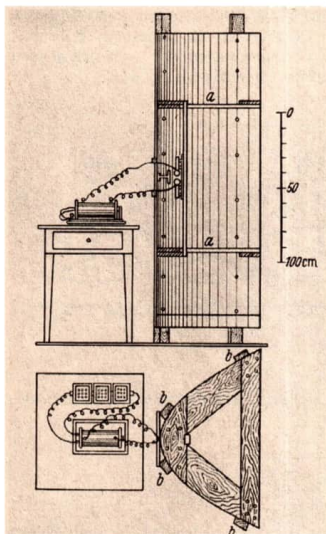


Abb. 2.16.1./4  
Sender von H. Hertz

Mit dieser Anordnung führte Hertz folgende Experimente durch: Erzeugung elektromagnetischer Wellen, geradlinige Ausbreitung von Wellen, Absorption von Wellen, Polarisation, Reflexion und Brechung von Wellen sowie die Erzeugung stehender Wellen durch Reflexion und Interferenz von Wellen.



## 2.16.2. Schulexperiment zum Senden und Empfangen Hertzscher Wellen

1. Funkeninduktor
2. Stromversorgungsgerät (10 V ~)
3. Strommesser ( $\leq 5 \mu\text{A}$  —)
4. Tafeln aus Holz, Pappe, Plast, Metall (1 m  $\times$  1 m)
5. Tafel aus Metall (1,5 m  $\times$  1,5 m)

6. Sendedipol ⑥, dazu erforderliches Material:
- 2 Stativstäbe (100 mm)
  - Plaststreifen (700 mm × 30 mm × 5 mm)
  - 2 Hartpapierstreifen (50 mm × 15 mm × 2 mm)
  - 2 Schrauben mit Muttern und Unterlegscheiben (M 2)
7. Empfangsdipol ⑦, dazu erforderliches Material:
- 2 Stativstäbe (250 mm)
  - Plaststreifen (700 mm × 30 mm × 5 mm)
  - 2 Schrauben mit Muttern und Unterlegscheiben (M 2)
  - Bindfaden (50 cm)
  - Germaniumdiode
8. 4 Drosselspulen ⑧, dazu erforderliches Material:
- 4 m Kupferdraht (1 mm bis 2 mm Ø)
  - 4 Lötösen
  - 2 Zweifachsteckbuchsen

### Herstellen der Drosselspulen und der Dipole

10 Drahtwindungen werden auf einen zylindrischen Körper von etwa 20 mm Durchmesser gewickelt. Die anderen Spulen stellt man in gleicher Weise her. Danach lötet man an das eine Ende jeder Spule eine Lötöse, an das andere Ende eine Steckbuchse und zieht die Spule auf eine Länge von etwa 50 mm aus.

Die Stativstäbe für den Sendedipol werden im Abstand von 15 mm von einem Ende durchbohrt (2,2 mm Ø). Der Abstand der Bohrungen auf dem Plaststab (2,2 mm Ø) beträgt 30 mm. Eine Bohrung wird als Langloch ausgeführt, damit der Abstand zwischen beiden Stativstäben von 0,1 mm bis 0,5 mm variiert werden kann. Unter die beiden Stativstäbe wird Hartpapier geklemmt, so daß zwischen Funkenstrecke und Plaststreifen ein Abstand von etwa 2 mm besteht (Abb. 2.16.2./1). Mit je einer Schraube werden die Dipolstäbe an den Plaststreifen befestigt. Diese Schrauben dienen gleichzeitig zur Befestigung je einer Drosselspule an jedem Stab. Der Empfangsdipol wird analog aufgebaut. Der Abstand zwischen den beiden Dipolstäben wird auf 10 mm vergrößert, und

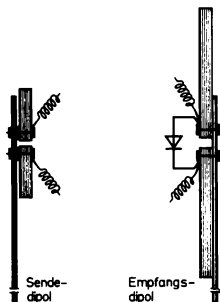


Abb. 2.16.2./1  
Herstellen der Drossel-  
spulen und der Dipole

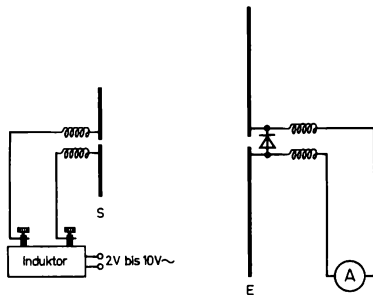


Abb. 2.16.2./2  
Experimentelle Anordnung zum Senden  
und Empfangen Hertzscher Wellen

beide Stäbe werden mit der Germaniumdiode überbrückt. Zur Stabilisierung der Lage werden die Stäbe in der Mitte mit einem dünnen Bindfaden am Plaststreifen befestigt. Dazu sind entsprechende Bohrungen in den Plaststreifen vorzunehmen.

### Experiment 1: Senden und Empfangen Hertzscher Wellen

Der experimentelle Aufbau erfolgt nach Abbildung 2.16.2./2. Beide Dipole werden in vertikaler Lage im Abstand von einigen Metern einander gegenübergestellt. Der Sendedipol wird mit der Sekundärspule des Funkeninduktors verbunden. Der Unterbrecher wird kurzgeschlossen, so daß der Induktor als Hochspannungstransformator wirkt. An die Primärspule des Induktors legt man eine Wechselspannung und erhöht diese, mit 2 V beginnend, bis in der Funkenstrecke Funkenübergänge zu beobachten sind, die von einem leisen Zischen begleitet werden.

Der Strommesser, der mit dem Empfangsdipol verbunden ist, zeigt einen Ausschlag. Durch Verändern der Funkenstrecke wird auf maximalen Ausschlag eingestellt. Solange der Funkeninduktor eingeschaltet ist, zeigt das Meßgerät den Empfang von elektromagnetischen Wellen an.

### Experiment 2: Absorption Hertzscher Wellen

Sender und Empfänger werden parallel, etwa 1 m bis 2 m voneinander entfernt, aufgestellt. Möglichst nahe dem Sender werden zwischen Sender und Empfänger nacheinander Tafeln aus Pappe, Holz, Plast und einem Metall gebracht.

Die Intensität der empfangenen Wellen wird nur beim Metall merklich geringer.

### Experiment 3: Nachweis der Polarisation Hertzscher Wellen

Beide Antennen werden zueinander parallel im Abstand von etwa 2 m aufgestellt. Ein Dipol wird um die horizontale Achse um  $90^\circ$  gedreht (Abb. 2.16.2./3). Der Ausschlag am Strommesser des Empfangsdipols geht zurück.

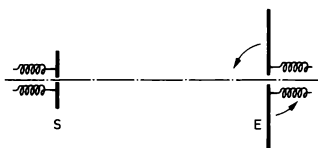


Abb. 2.16.2./3 Experimentelle Anordnung zur Polarisation Hertzscher Wellen

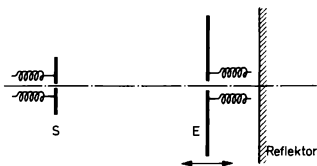


Abb. 2.16.2./4 Experimentelle Anordnung zum Abschätzen der Wellenlänge

### Experiment 4: Abschätzung der Wellenlänge

Der Sender wird im Abstand von etwa 3 m vor einer möglichst großen Metallplatte (mind.  $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ ), die als Reflektor dient, aufgestellt. Es bilden sich durch Überlagerung der auftreffenden und der reflektierten Welle stehende Wellen aus.

Der Empfangsdipol wird parallel zum Sendedipol entsprechend Abbildung 2.16.2./4 zwischen Sendedipol und Reflektorwand gebracht und in Richtung Sendedipol in Schritten von etwa 5 cm bewegt. Die Intensität der empfangenen Wellen wird am Strommesser abgelesen.

Unmittelbar vor der Metalltafel ist die Intensität gering, sie wächst mit zunehmendem Ab-

stand vom Reflektor, durchläuft ein Maximum, um danach wiederum bis zum Erreichen eines Minimums abzunehmen. Der Abstand vom Reflektor zum 1. Minimum entspricht der halben Wellenlänge (etwa 0,5 m).

#### *Bemerkungen*

1. Alle angeführten Experimente liefern deutliche Ergebnisse, wenn der Experimentierraum genügend groß ist. Metallteile in den Wänden, in der Decke und im Fußboden wirken sich wegen der vielen Reflexionen der Wellen an ihnen störend aus. Deshalb ist es auch nicht möglich, beim Experiment 2 eine totale Abschirmung zu erreichen.
2. Vorsicht! Die Zuleitungen zum Sendedipol, die Drosselspulen und der Sendedipol führen Hochspannung. Diese Teile dürfen deshalb im Betrieb nicht berührt werden. Veränderungen im Sendeteil der Experimentieranordnung dürfen nur bei ausgeschaltetem Funkeninduktor vorgenommen werden.
3. Parabolische Reflektoren beim Sende- und beim Empfangsdipol sind nur dann wirksam, wenn ihre Abmessungen groß gegenüber der Wellenlänge sind. Da der Aufwand bei der Anfertigung solcher Reflektoren und die Unhandlichkeit beim Experimentieren sehr groß sind, wird empfohlen, auf Reflektoren zu verzichten.
4. Zwischen Sender und Empfänger kann ein Analysator gebracht werden. Dieser besteht aus einem Holzrahmen (70 cm × 70 cm), der im Abstand von 1 cm bis 2 cm parallel aufgespannte Kupferdrähte besitzt. Sind die Drähte des Analysators parallel zu den Antennen, so werden die Wellen geschwächt. Dreht man den Analysator um 90° um seine horizontale Achse, werden die Wellen ungeschwächt hindurchgelassen.

### **2.16.3. Historische Experimente Popows und Marconis mit Funkempfängern**

Abbildung 2.16.3./1 zeigt den Schaltplan der ersten Empfangsanlage von Popow, die als „Gewittermelder“ diente. Antenne und Erde waren mit M bzw. N, den Leitungszuführungen zu einem Kohärer, verbunden. Der Kohärer bestand aus einem mit feinen Metallspänen gefüllten Röhrchen, in das von beiden Seiten je ein blanker Kupferdraht führte. Er war an eine Batterie angeschlossen. Infolge des hohen Übergangswiderstandes zwischen den Metallspänen war die Stromstärke sehr klein. In diesen primären Stromkreis war ein Relais eingeschaltet, das bei der geringen Stromstärke nicht ansprach. Trafen elektromagnetische Wellen auf die Antenne, so verringerte sich der Widerstand des Kohäriers. Der Anker des Relais wurde angezogen und schloß einen zweiten Stromkreis, in dem sich ein Wagnerscher Hammer befand. Dieser schlug mit einem Klöppel einerseits auf den Kohärer, der zum Schutz vor zu kräftigen Klöppelschlägen mit einem Stück Gummi umgeben war, erschütterte ihn und sorgte so dafür, daß der ursprüngliche Widerstand auftrat, sobald keine elektromagnetischen Wellen ankamen. Andererseits schlug der Klöppel auf eine Glocke und zeigte damit den Empfang elektromagnetischer Wellen an.

Der weiterentwickelte Empfänger in Abbildung 2.16.3./2 besitzt zwischen Antenne und Erde wiederum als „Wellenanzeiger“ einen Kohärer. Gegenüber dem Popowschen „Gewittermelder“ hatte dieser Empfänger im zweiten Stromkreis statt der Klingel einen Telegrafenschreiber, der die zeitliche Lage und Dauer einer atmosphärischen Entladung auf einem Papierstreifen registrierte.

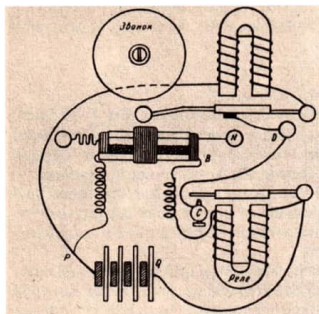


Abb. 2.16.3./1  
Schaltplan der ersten Empfangsanlage Popows

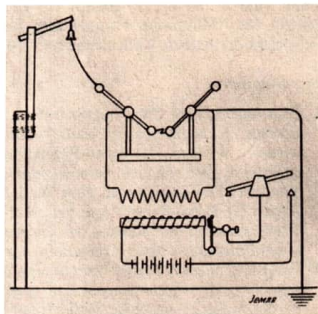


Abb. 2.16.3./2  
Popows weiterentwickelter Sender



## 2.16.4. Schulexperiment zum Funkempfänger

1. Funkeninduktor
2. 2 Stromversorgungsgeräte (10 V —)
3. Schalter
4. Strommesser (6 mA —)
5. Gleitwiderstand (20  $\Omega$ ; 0,25 W)
6. 2 Isolierstiele
7. Kohärer ⑤, dazu erforderliches Material:
  - a) Glasrohr ( $\varnothing$  10 mm; Länge 5 cm)
  - b) Eisenfeilspäne
  - c) 2 Gummistopfen (10 mm  $\varnothing$ )
  - d) Kupferdraht ( $\varnothing$  1 mm; Länge 30 cm)

### Methodische Hinweise

Die *Funkentstörordnung* gestattet nicht, daß man ohne besondere Genehmigung Antennen an Geräte anschließt, mit denen elektromagnetische Wellen erzeugt werden. Das Experiment kann deshalb nur mit einem Hertzschen Sender durchgeführt werden, ohne die Dipolstäbe mit einer Antenne und der Erde zu verbinden.

### Herstellen des Kohäers

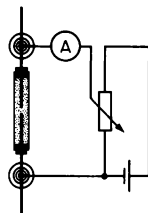
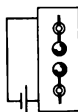
Das Glasröhrchen füllt man zur Hälfte mit trockenen, nicht oxydierten Eisenfeilspänen und verschließt beide Enden mit Gummistopfen, die axial je eine feine Bohrung haben. Durch diese Löcher wird von beiden Seiten je ein blanker Kupferdraht von etwa 15 cm Länge geführt, ohne daß sie im Röhrchen zusammenstoßen (Abb. 2.16.4./1). Die Eisenfeilspäne dürfen das Röhrchen nicht ganz ausfüllen, die Drähte müssen jedoch vollständig in die Späne eintauchen.





Abb. 2.16.4./1  
Aufbau eines Kohärens

Abb. 2.16.4./2  
Anordnung eines Senders  
und eines Empfängers  
mit Kohärer



### Experiment

Als Sender wird ein Funkeninduktor verwendet. Die Funkenstrecke beträgt etwa 1 cm. Im Abstand von etwa 2 m befindet sich ein Kohärer in einem Stromkreis mit einer Stromquelle (etwa 2 V —) und einem Strommesser als Registrierinstrument (Abb. 2.16.4./2). Der Kohärer wird in horizontaler Lage betrieben. Dazu wird er zwischen die Isolierstiele gespannt. Durch kurzzeitige Inbetriebnahme des Induktors macht man den Kohärer leitend ( $R \approx 100 \Omega$ ) und stellt mit einem Spannungsteiler den Strommesser auf Vollausschlag.

Durch Ein- und Ausschalten des Induktors werden Signale unterschiedlicher Länge und in unterschiedlichem Rhythmus gesendet. Der Strommesser im Kohärerstromkreis des Empfängers zeigt durch Ausschlag des Zeigers das Eintreffen von elektromagnetischen Wellen in gleicher Länge und im gleichen Rhythmus, wie sie gesendet werden, an. Um den Kohärerstromkreis zu unterbrechen, wenn keine Wellen eintreffen, ist mit der Hand in regelmäßigen Abständen leicht auf den Experimentiertisch, auf dem der Kohärer steht, zu klopfen.

## 2.16.5. Historisches Experiment zum Edison-Effekt

Thomas Alva Edison versuchte ab 1880, die von ihm entwickelten Glühlampen weiter zu verbessern. Er hatte gefunden, daß sich die Innenseite des Glaskolbens der Lampen im Laufe des Betriebes allmählich mit einem schwarzen Belag aus Kohleteilchen bedeckte, die offenbar vom Kohlefaden der Glühlampe stammten. Dadurch wurden die Wirksamkeit und die Lebensdauer der Glühlampen verkürzt. Bei seinen Untersuchungen entdeckte er, daß auf einer Seite des Glaskolbens ein heller, von Kohleteilchen nicht bedeckter Streifen entstand, der stets parallel zu dem Schenkel des hufeisenförmigen Glühfadens verlief, der mit dem positiven Pol der Gleichstromquelle verbunden war. Er folgerte daher, daß die Kohleteilchen in gerader Linie vom negativen Fadenschlenkel abgestrahlt werden. Er vermutete, daß die Kohleteilchen selbst negativ geladen sind und daß sie durch eine positiv geladene Elektrode abgelenkt oder gesammelt werden können. Im Jahre 1883 setzte er einen Platindraht in die Mitte zwischen die beiden Schenkel des Glühfadens und parallel zu diesen ein, evakuierte die Lampe ( $\approx 10^{-1} \text{ Pa}$ ) und verband die Zusatzelektrode mit dem positiven Pol. (Der Abstand der beiden Schenkel des Glühfadens betrug etwa 1,3 cm.) Zu seiner Verwunderung zeigte ein in die Leitungszuführung zur Zusatzelektrode geschaltetes Galvanometer einen Strom durch den evakuierten Raum der Lampe an, obwohl keine Drahtverbindung existierte. Der Stromfluß verschwand, wenn die Elektro-

de mit dem negativen Pol verbunden wurde. Bei weiteren Experimenten zur Vergrößerung der Stromstärke wurden verschiedene Metalle und unterschiedlich gestaltete Elektroden ausprobiert. Als besonders effektiv erwies sich eine kleine Metallplatte, die zwischen den beiden Schenkeln des Glühfadens angeordnet war, ohne diesen zu berühren. Abbildung 2.16.5./1 zeigt Edison mit der von ihm entwickelten Glühlampe mit Zusatzelektrode.



Abb. 2.16.5./1  
Edison mit der von ihm entwickelten Glühlampe

In seiner Patentschrift von 1883 führt Edison aus: „Ich habe entdeckt, daß, wenn eine leitende Substanz in den Kolben einer Glühlampe eingelegt und die besagte Substanz außerhalb der Lampe mit einem Anschluß, vorzugsweise dem positiven Anschluß der Glühlampe, verbunden wird, ein Teil des Stromes der leuchtenden Lampe durch den so geschaffenen Nebenschluß fließt, der zum Teil aus einer Vakuumstrecke in der Lampe besteht.

Ich stellte fest, daß der fließende Strom proportional zur Glühtemperatur des Leiters oder zur Lichtleistung der Lampe ist.“ Edison hatte damit den glühelektrischen Effekt — ihm zu Ehren *Edison-Effekt* genannt — entdeckt und eine Diode als erstes elektronisches Gerät hergestellt. Den Mechanismus des Effekts konnte er nicht erklären, die Elektronen waren noch nicht bekannt.



## 2.16.6. Schulexperiment zum Edison-Effekt

1. Stromversorgungsgerät (250 V —)
2. Demonstrationslampe für den Edison-Effekt mit Fassung
3. Spannungsquelle für die Lampe
4. Strommesser (10 mA —)
5. Spannungsmesser (300 V —)
6. Widerstand (5 k $\Omega$ ; 0,5 W)

### Experiment

Der Glühfaden der Demonstrationslampe wird mit der Spannungsquelle verbunden. Die Höhe der anzulegenden Spannung richtet sich nach der Nennspannung der Lampe (meist 220 V).

Zwischen Zusatzelektrode (Anode) und einem Anschluß des Glühfadens wird entsprechend dem Schaltplan (Abb. 2.16.6./1) eine Gleichspannung angelegt. Man erhöht die Spannung so weit, bis der Strommesser einen Strom anzeigt.

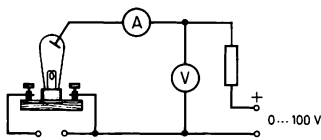


Abb. 2.16.6./1  
Nachweis des glühelektrischen Effekts  
mit einer Edison-Lampe

Die Glühlampe wird ausgeschaltet. Es fließt kein Strom zur Zusatzelektrode. Die Polarität der Spannung zwischen Zusatzelektrode und Glühfaden wird vertauscht. Es fließt ebenfalls kein Strom.  
Aus dem glühenden Draht treten Elektronen aus. Ist der Draht negativ geladen, werden die Elektronen zur Zusatzelektrode hin beschleunigt.

## 2.16.7. Historisches Experiment zum Braunschens Kristalldetektor

Ferdinand Braun entdeckte 1874 die unipolare Leitung, d. h. die Gleichrichterwirkung bei Messungen an Schwefelmetallen. Er berichtete darüber: „Bei einer großen Anzahl natürlicher und künstlicher Schwefelmetalle und in sehr verschiedenen Stücken, sowohl Krystallen von so vollkommener Ausbildung, wie ich überhaupt bekommen konnte, als derben Stücken habe ich gefunden, daß der Widerstand derselben verschieden war mit Richtung, Intensität und Dauer des Stromes. Die Unterschiede betragen bis 30 pCt. (Prozent) des ganzen Wertes.

Der Strom von gewöhnlich einem großen Bunsen'schen Elemente durchfloß einen zickzackförmigen, 0,6 mm dicken Neusilberdraht (von 3,7 S. E. Widerstand), welcher durch sieben auf demselben vertheilte Quecksilbernäpfchen von Kork hindurchgezogen war. Von diesen Quecksilbernäpfchen wurde Zweigstrom abgenommen, welcher das Schwefelmetall und die strommessende Vorrichtung (eine stark dämpfende Wiedemann'sche Bussole mit meist 0,22 S. E. Widerstand) durchfloß. Die Schwierigkeit dieser Versuche liegt zunächst in zuverlässigen Contacts. Ich habe benutzt Quecksilbercontact, stark gegen gepreßte Kupfer-, Platin- und Silberdrähte und endlich bei einem Stück eine bereits vorhandene Fassung mit dicken Neusilberbügeln, welche durch Schrauben gedrückt waren. Diese letztere Art der Fassung hat Hittorf als die beste gefunden.

Ich muß erwähnen, daß ich keine thermoelektrische Erregung oder Polarisierung gefunden habe, welche auch nur entfernt im Stande wäre, die Erscheinung zu erklären.

Bei einer Reihe von natürlichen Schwefelmetallen: Kupferkies, Schwefelkies, Bleiglanz, Fahlerz, bekam ich im Allgemeinen die Erscheinung, daß die Stromintensität verschieden war, je nach der Stromrichtung, daß diese Differenz zunahm mit zunehmender Stromintensität und daß bei Geschlossenhalten des Stromes die Intensität für diejenige Richtung, welche kleineren Widerstand ergab, zunahm, für die entgegengesetzte abnahm.

Ich verzichte darauf hier mehrere Reihen anzuführen und wähle nur Beispiels halber eine (Tab. II), welche an einem prismatischen Stücke von gegossenem Kupferkies gewonnen wurde. Dasselbe war in Neusilber gefaßt und hatte bei ca. 70 mm Länge, 20 mm Breite nur 15 mm Dicke fast 2 S. E. Widerstand.

Die Verschiedenheit der Stromintensität, je nach der Richtung des Stromes habe ich in vielen Versuchen, sowohl mit starken als schwachen elektromotorischen Kräften, mit ersten Ausschlägen als mit constanten Ablenkungen beobachtet und bei sicherer Fassung stets mit demselben qualitativen Resultat: daß bei kleiner Stromintensität die eine Richtung größeren Widerstand bietet, bei wachsender Intensität beide Richtungen sich gleich verhalten und daß sie dann ihre Rolle vertauschen.“

Tabelle II

Elektr. Kraft	Stromrichtung I.		Stromrichtung II.	
	Erster Ausschlag.	Constante Ablenkung.	Erster Ausschlag.	Constante Ablenkung.
—	10,0	7,8	9,0	5,7
—	43,0	32,0	47	38,2
—	61	45 fällt bis 39	63	45 steigt bis 49
—	89	.59	105	85
—	155	115 fällt bis 106	204	163 steigt bis 167
—	—	106	—	166
1 Bunsen <sup>1)</sup>	—	120	—	230

<sup>1)</sup> etwa 2 Volt

Es ist ersichtlich, daß bei größeren Stromstärken der Widerstand in Stromrichtung I größer war als in Richtung II. Eine Deutung dieses Effekts war Braun nicht möglich. Die aufkommende Funktechnik eröffnete dem als Kristalldetektor ausgebildeten HF-Gleichrichter ab 1901 ein breites Anwendungsfeld. Die Gleichrichterwirkung kam zustande, wenn eine Drahtspitze auf einen entsprechenden Kristall, z. B. Bleiglanz (PbS), gedrückt wurde (Abb. 2.16.7./1). Es zeigte sich, daß die

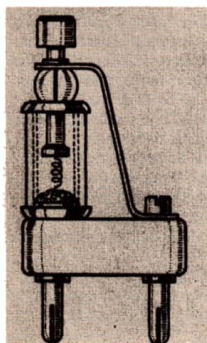


Abb. 2.16.7./1  
Kristalldetektor

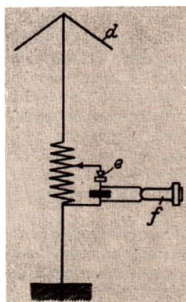


Abb. 2.16.7./2  
Funkempfänger  
mit Kristalldetek-  
tor

Gleichrichtung von hochfrequenten Wechselströmen nur an bestimmten Stellen des Kristalls erfolgte und außerdem vom Druck der Drahtspitze auf den Kristall abhing. Mit einem derartigen Detektor konnten die gedämpften Signale eines Telegrafiesenders und später auch die amplitudenmodulierten ungedämpften Wellen eines Telefoniesenders gleichgerichtet und in einem Kopfhörer abgehört werden (Abb. 2.16.7./2).

## 2.16.8. Schulexperiment zum Braunschen Kristalldetektor

1. Kristalldetektor
2. Stromversorgungsgerät (4 V —)
3. Strommesser (0,3 mA —)
4. Umschalter
5. Widerstand (80  $\Omega$ ; 0,1 W)
6. 2 Widerstände (1 k $\Omega$ ; 0,1 W)

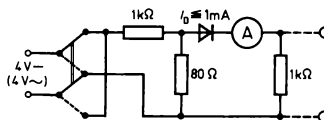


Abb. 2.16.8./1  
Schaltung zum Nachweis  
der Gleichrichtere Wirkung beim Kristalldetektor

### Experiment

Die Schaltung wird nach Abbildung 2.16.8./1 aufgebaut. Der Zeiger des Strommessers wird in Mittelstellung gebracht. Nach Anschluß der Stromquelle wird mit der Drahtspitze im Detektor eine günstige Stelle gesucht, bei der sich die Stromstärke in den beiden entgegengesetzten Richtungen deutlich unterscheidet. Hat man eine für den Gleichrichtereffekt gute Stelle gefunden, wird mit dem Strommesser die Stromstärke in beiden Richtungen gemessen. Man erhält Stromstärken, die sich wie 1 : 3 verhalten (z. B. 40  $\mu$ A und 120  $\mu$ A).

Es ist zu erkennen, daß beim Kristalldetektor der Widerstand von der Stromrichtung in starkem Maße abhängt und daß daher ein Kristalldetektor als Gleichrichter von schwachen Wechselströmen, z. B. als HF-Gleichrichter in der Funktechnik, eingesetzt werden kann.

### Bemerkungen

1. Um den Detektor nicht zu überlasten, sollten die beim Experiment verwendeten Stromstärken 1 mA nicht übersteigen.
2. Das Suchen nach einer Stelle auf dem Detektor mit deutlich ausgeprägten Gleichrichtereigenschaften wird mit einem Katodenstrahloszillografen erleichtert. Dazu muß statt der Gleich- eine Wechsellspannungsquelle verwendet werden. Es gilt dann die in Klammern geschriebene Spannung. Der Oszillograf ist an die in Abbildung 2.16.8./1 gestrichelt gezeichneten Verbindungen anzuschließen. Auf dem Oszillografenschirm ist bei einer günstigen Einstellung des Detektors die typische Kurve der Einweggleichrichtung zu sehen.

## 2.16.9. Historische Experimente zur Verstärkung und Gleichrichtung von HF-Signalen mit einer Triode

Im Jahre 1911 wurde von Robert von Lieben eine Verstärkerröhre entwickelt (Abb. 2.16.9./1). Diese Lieben-Röhre bestand aus einem mit Quecksilberdampf ( $\approx 10^{-3}$  kPa) gefüllten Glaskolben. Er enthielt eine Oxidkatode nach Wehnelt in Form eines zickzackförmigen Glühfadens (Platinband mit Kalziumoxidüberzug), eine wendelförmige Anode und dazwischen eine siebförmige Hilfselektrode, Gitter genannt.

Abbildung 2.16.9./2 zeigt den Schaltplan der vom Telefunkenlabor entwickelten Schaltung zur HF-Verstärkung mit einer Lieben-Röhre. Damit konnte 1912 die 50fache Lautstärke gegenüber dem direkten Empfang erreicht werden. Vom induktiv an die Antenne

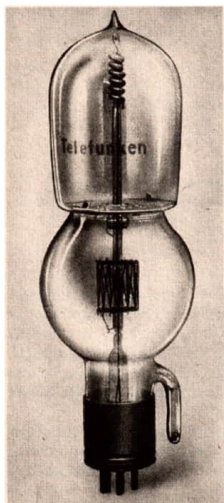


Abb. 2.16.9./1

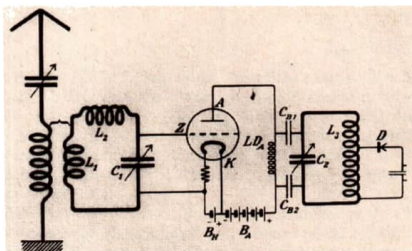


Abb. 2.16.9./2

gekoppelten Schwingkreis wird die HF-Spannung zwischen Katode und Gitter angelegt. An der Drossel im Anodenkreis wird die verstärkte HF-Spannung kapazitiv ausgekoppelt und einem zweiten Schwingkreis zugeführt. Die Gleichrichtung der HF erfolgt mit einem Kristalldetektor. Die NF wird einem Kopfhörer T zugeführt, der mit einem kleinen Kondensator überbrückt ist, um die im gleichgerichteten Signal noch vorhandene HF kurzzuschließen.

Lee de Forrest gab bereits 1907 die *Audionschaltung* an, die lange Zeit die verbreitetste und wirksamste Detektorschaltung mit Röhren war. Mit ihr wurde eine vielmal höhere Empfindlichkeit und damit Lautstärke als mit irgendeinem Kontaktdetektor erreicht (Abb. 2.16.9./3). Die Wirkungsweise der Audionschaltung ist folgende:

Einige Elektronen gelangen beim Betrieb der Röhre von der Katode K auf das Gitter Z und laden es negativ auf (etwa  $-1$  V). Gelangt über den Kondensator  $C_z$  ein HF-Signal auf das Gitter, fließt bei der positiven Halberiode ein Gitterstrom, und der Arbeitspunkt wird weiter ins Negative verschoben, so daß die negativen Halberioden abgeschnitten werden, d. h. das Signal gleichgerichtet wird. Gleichzeitig wird dieses gleichgerichtete Signal in der Röhre verstärkt und über einen NF-Übertrager einem Kopfhörer zugeführt. Der Kondensator  $C_T$  schließt die im demodulierten Signal noch vorhandene HF kurz.

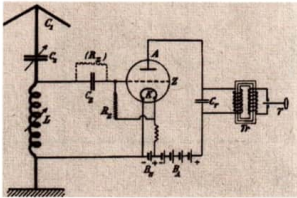


Abb. 2.16.9./3

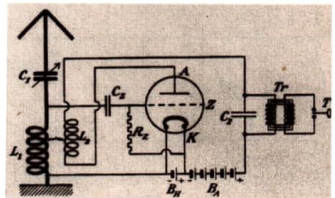


Abb. 2.16.9./4

Im Jahr 1913 wurde von mehreren Forschern (u. a. A. Meißner) durch Einfügen einer Rückkopplung eine weitere Verstärkung des Signals erreicht. Diese *Schwingaudionschaltung* gestattete, durch Eigenerzeugung einer Hilfsfrequenz ein unmoduliertes HF-Signal hörbar zu machen (Abb. 2.16.9./4).



## 2.16.10. Schalexperimente zur Verstärkung und Gleichrichtung von HF-Signalen mit einer Triode

### Zu Experiment 1

1. Stromversorgungsgerät (200 V —; 6,3 V ~)
2. Triode, z. B. EC 92
3. Kopfhörer
4. Katodenstrahlzillograf
5. Germaniumdiode
6. 2 Spulen (150 Wdg.)
7. Kondensator (0,1  $\mu$ F; 250 V)
8. 2 Kondensatoren (100 pF)
9. 2 Kondensatoren (1 nF; 250 V)
10. Drehkondensator (500 pF)
11. Widerstand (0,1 M $\Omega$ ; 0,1 W)
12. Widerstand (200 k $\Omega$ ; 0,1 W)

### Zu Experiment 2

Geräte 1. bis 3., 8., 10., außerdem

13. Kondensator (1 nF)

14. 2 Kondensatoren (0,1  $\mu$ F; 250 V)

15. Widerstand (1 M $\Omega$ ; 0,1 W)

16. Spule (150 Wdg.)

### Zu Experiment 3

Geräte 1. bis 3., 8., 10., 13. bis 16., außerdem

17. Spule (150 Wdg.)

### Experiment 1: HF-Verstärkung

Die Schaltung wird entsprechend Abbildung 2.16.10./1 aufgebaut. Mit dem Drehkondensator wird der Schwingkreis auf einen stark einfallenden Mittelwellensender abgestimmt und mit dem Kopfhörer abgehört.

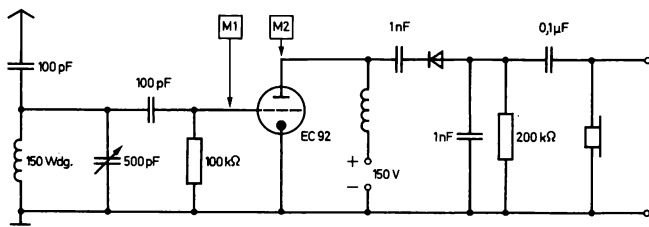


Abb. 2.16.10./1 HF-Verstärkung mit einer Triode

Die HF-Verstärkung wird demonstriert, indem mit dem Katodenstrahloszilloskop die Amplitude des HF-Signals an den Meßpunkten M 1 (Gitter) und M 2 (Anode) vor und nach der Verstärkung gemessen wird.

Es ist zu erkennen, daß mit dem Einsatz einer Röhre als HF-Verstärker das HF-Signal deutlich verstärkt wird. Damit ist es möglich, auch relativ schwach einfallende Sender zu empfangen.

### Experiment 2: Audionschaltung

Die Schaltung wird entsprechend Abbildung 2.16.10./2 aufgebaut. Mit dem Drehkondensator wird ein stark einfallender Mittelwellensender eingestellt und im Kopfhörer gehört. Es ist zu ersehen, daß mit dieser Schaltung die Röhre zwei Funktionen erfüllt: Verstärkung des HF-Signals und Gleichrichtung des HF-Signals.

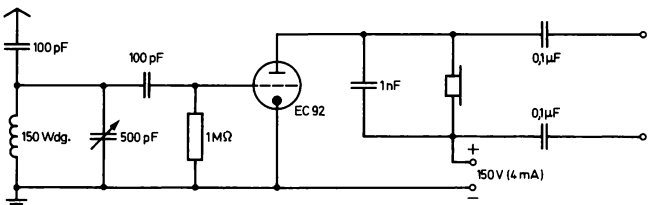


Abb. 2.16.10./2 Audionschaltung mit einer Triode

### Experiment 3: Schwingaudion

In die Anodenleitung wird nach Abbildung 2.16.10./3 eine zweite Spule von 150 Windungen geschaltet und der Schwingkreisspule so weit genähert, daß gerade noch keine Selbsterregung (Pfeifen) einsetzt.



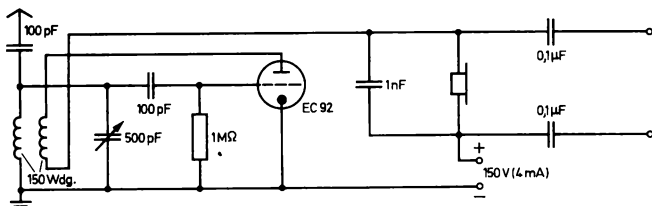


Abb. 2.16.10./3 Schwingaudioschaltung mit einer Triode

Es ist zu erkennen, daß damit eine Erhöhung der Lautstärke (größere Empfindlichkeit) sowie eine größere Abstimmungsschärfe erreicht wird. Durch die größere Empfindlichkeit können auch schwach einfallende Sender empfangen werden, die ohne Rückkopplungsschaltung nicht mehr hörbar sind.

### Bemerkung

Wenn ein NF-Verstärker mit Lautsprecher parallel zum Kopfhörer geschaltet wird, kann der Empfang einfallender Sender einem größeren Zuhörerkreis zugänglich gemacht werden.

## 2.16.11. Historisches Experiment zur Braunschen Röhre

Braun entwickelte 1897 für die Anzeige schneller elektrischer Vorgänge eine Kaltkathodenröhre, die er folgendermaßen beschrieb:

„1. Die im Folgenden beschriebene Methode benutzt die Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen durch magnetische Kräfte. Diese Strahlen wurden in Röhren erzeugt, von deren einer ich die Masse angebe, da mir diese im allgemeinen am günstigsten zu sein scheinen (Fig. 1). K ist die Kathode aus Aluminiumblech, A Anode, C ein Aluminiumdiaphragma (Lochblende); Oeffnung des Loches = 2 mm, D ein mit phosphorescirender Farbe überzogener Glimmerschirm. Die Glaswand E muss möglichst gleichmässig und ohne Knoten, der phosphorescirende Schirm so angebracht sein, dass man durch das Glas und den Glimmer hindurch den von den Kathodenstrahlen hervorgebrachten Fluoreszenzfleck sehen kann. — Für manche Versuche ist es zweckmässig, den Glimmerschirm unter  $45^\circ$  gegen die Rohraxe zu stellen. Es empfiehlt sich, um das Rohr in der Nähe des Diaphragmas Stanniol zu wickeln, welches zu Erde geleitet ist.

Die Kathodenstrahlen wurden erzeugt meist mit einer Influenzmaschine; für viele Versuche genügt auch ein rasch spielender Inductionsapparat. Eine in den Kreis geschaltete variable Funkenstrecke gestattet die je günstigste Entladungsart aufzusuchen.

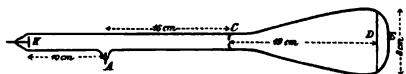


Fig. 1.

Abb. 2.16.11./1 Fig. 1.

Schiebt man an das Rohr in der Nähe des Diaphragmas eine kleine Magnetisierungsspule, welche *Indicator-spule* genannt werden soll, ihre Axe etwa senkrecht zur Rohraxe gestellt, und lässt dieselbe von Strom durchfließen, so wird der Lichtfleck wie bekannt abgelenkt. Ein Wechselstrom versetzt ihn in Schwingungen.

Man wird bei diesem Verfahren sicher frei von Eigenschwingungen des anzeigenden Apparates und voraussichtlich auch von Trägheit. Wenigstens ist anzunehmen, dass letztere sich höchstens in Zeiträumen geltend machen könne, die sich bemessen aus Lichtgeschwindigkeit und linearen Dimensionen des Rohres. Ein sehr großer Vorteil ist ausserdem die gleichmässige Beweglichkeit des Kathodenstrahles nach allen Richtungen einer Ebene.“

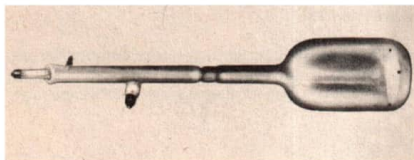


Abb. 2.16.11. 2  
Kaltkathodenröhre von Braun

Die fotografische Aufnahme einer derartigen Röhre zeigt Abbildung 2.16.11. 2. Der Kathodenstrahl wurde magnetisch in vertikaler Richtung von dem zu untersuchenden Wechselstrom abgelenkt. Der Leuchtpunkt auf dem Leuchtschirm bewegte sich im Rhythmus des durch die Ablenkspulen fließenden Wechselstromes. Durch Betrachten in einem Drehspiegel wurde das Signal zeitlich auseinandergezogen. Eines der ersten Oszillografenbilder einer gedämpften elektrischen Schwingung ist in Abbildung 2.16.11. 3 zu sehen.

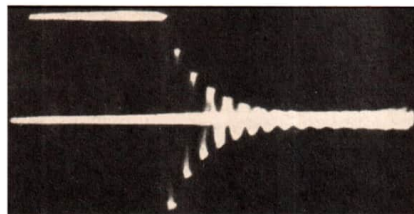


Abb. 2.16.11. 3  
Oszillografenbild

## 2.16.12. Schulexperiment zur Braunschen Röhre

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~ ; 500 V ~ ; 2 V ~ )
2. Kathodenstrahlröhre
3. 2 Spulen (500 Wdg.)
4. Drehwiderstand (25  $\Omega$ ; 0,25 W)
5. Drehspiegel

### Experiment

Durch Anlegen der Heiz- und Anodenspannung, die vom speziellen Röhrentyp abhängt (meist  $6,3\text{ V} \sim$  und etwa  $400\text{ V} \sim$ ), wird die an einem Stativ befestigte Katodenstrahlröhre in Betrieb genommen. Die zur Verfügung stehenden Röhren haben in der Regel eingeschmolzene Ablenkelektroden. Diese sind mit der Anode zu verbinden.

An die beiderseits des Halses der Katodenstrahlröhre angebrachten Spulen (Abb. 2.16.12./1) ist über einen Vorwiderstand von  $25\ \Omega$  eine Wechselspannung von  $2\text{ V}$  zu legen. Auf dem Schirm der Katodenstrahlröhre ist ein vertikaler Strich zu sehen.

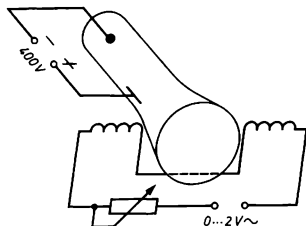


Abb. 2.16.12./1  
Beobachtung des zeitlichen Verlaufs einer Wechselspannung mit der Braunschen Röhre

Mit dem Vorwiderstand wird ein Strich von  $2\text{ cm}$  bis  $3\text{ cm}$  Länge eingestellt. Im rotierenden Drehspiegel ist eine sinusförmige Kurve entsprechend dem zeitlichen Verlauf des durch die Ablenkspulen fließenden Wechselstroms zu beobachten.

### Bemerkung

Sollte der Auftreffpunkt des Katodenstrahls nicht in der Mitte des Leuchtschirms liegen, ist er mit einem Permanentmagnet dorthin zu verschieben und die Lage des Magneten zu fixieren.

## 2.17. Experiment von J. Franck und G. Hertz

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden von vielen Physikern die Vorgänge in Gasentladungsröhren untersucht. Charakteristisch für alle Gasentladungen waren die im Entladungsraum auftretenden Ionen sowie die Leuchterscheinungen. Zur Erklärung beider Phänomene stand nur die Theorie der Stoßionisation von John Sealy Townsend (1868 bis 1957) zur Verfügung. Nach dieser Theorie führen die Elektronen stets unelastische Zusammenstöße mit den Gasmolekülen oder -atomen aus, d. h., sie geben beim Stoß ihre gesamte kinetische Energie an den Stoßpartner ab. Mit dieser Theorie konnte jedoch nicht befriedigend erklärt werden, weshalb bei Edelgasen die Entladung bei relativ hohem Druck und kleinen Feldstärken eintritt. Man mußte annehmen, daß bei Edelgasen entweder abnorm große freie Weglängen auftreten oder die Ionisierungsspannungen sehr klein sind.

Dieses Problem griffen James Franck (1882 bis 1964) und Gustav Hertz (1887 bis 1975) auf. Sie nahmen sich vor, die Townsendsche Theorie zu widerlegen und eine vollkommene kinetische Theorie der Elektronen in Gasen zu entwickeln. Ihre Experimente hatten also nicht die Bestätigung oder Widerlegung eines Atommodells zum Ziel. Bei ih-

ren Experimenten bauten sie besonders auf den Arbeiten von Philipp Lenard (1862 bis 1947) auf, der im Jahre 1903 erstmals die Ionisierungsspannung direkt gemessen hatte, nachdem er und andere festgestellt hatten, daß Elektronen eine bestimmte Mindestgeschwindigkeit haben müssen, um durch Stoß Moleküle zu ionisieren. Es blieb jedoch unklar, ob diese Spannung für alle Atome und Moleküle gleich groß ist.

Klare Vorstellungen vom Aufbau der Atome gab es noch nicht. Ernest Rutherford (1871 bis 1937) veröffentlichte seine Untersuchungen über den Atombau im Jahre 1911, als Franck und Hertz mit ihren Arbeiten begannen. Das Bohrsche Atommodell war ihnen nicht bekannt. Eine wesentliche theoretische Grundlage bildete die bereits vielfach erfolgreich angewendete Plancksche Hypothese der quantenhaften Absorption und Emission von Energie bei atomaren Prozessen, die auch dem Atommodell von Johannes Stark (1874 bis 1957) zugrunde liegt. Stark nahm an, daß das loszulösende Elektron im Molekül eine Eigenfrequenz besitzt, die, mit der Planckschen Konstante multipliziert, die Ionisierungsenergie ergibt, und daß die vom stoßenden Elektron übertragene Energie der kleinste Energiebetrag ist, den das schwingende Elektron aufnehmen kann.

Franck und Hertz untersuchten mit einer verbesserten Experimentiertechnik, welche die Lenardsche an Genauigkeit übertraf, systematisch die Stöße langsamer Elektronen (1 eV bis 10 eV) mit Atomen und konzentrierten sich im wesentlichen auf Edelgase und Metaldämpfe, um die Elektronenaffinität auszuschließen. Sie fanden, daß im Gegensatz zur Townsendschen Theorie die Zusammenstöße niederenergetischer Elektronen mit Atomen nahezu ohne Energieverlust erfolgen, daß es also elastische Stöße sind. Weiterhin zeigten sie, daß die Ionisierungsspannung bei Edelgasen keine besonders niedrigen Werte annimmt und die freien Weglängen der Elektronen ähnliche Werte wie bei anderen Gasen besitzen.

Ihre bedeutsamsten Ergebnisse veröffentlichten sie im Jahre 1914. Sie fanden, daß Elektronen, sobald sie eine kritische Energie von 4,9 eV erreicht haben, diese Energie beim Zusammenstoß mit Quecksilberatomen vollständig abgeben. Sie nahmen im Rahmen des Starkschen Atommodells an, daß dabei die Atome ionisiert werden. Sie sahen den Zusammenhang von quantenhafter Energieübertragung beim Stoß und anschließender Emission eines Lichtquants und konnten dessen Frequenz mit der grundlegenden Gleichung der frühen Quantentheorie  $W = h \cdot \nu$  berechnen. Da eine befriedigende Übereinstimmung mit der bekannten Wellenlänge der Quecksilberresonanzlinie festgestellt wurde, erhielt die Quantentheorie eine wichtige Stütze. Ein Jahr später zeigte Niels Bohr (1885 bis 1962), daß die Experimente von Franck und Hertz mit seinem Atommodell zu erklären sind.

Damit erlangten die Experimente von Franck und Hertz eine große Bedeutung für die Begründung der Atomtheorie. Sie erhärteten die Vorstellung von den diskreten Energieniveaus und den Übergängen zwischen diesen bei Absorption bzw. Emission von Energiequanten.

James Franck und Gustav Hertz erhielten für ihre wissenschaftliche Leistung 1925 den Nobelpreis für Physik.

### 2.17.1. Historisches Elektronenstoßexperiment von Franck und Hertz

Die Experimentieranordnung erläutern Franck und Hertz wie folgt: „Der . . . zur endgültigen Messung der Ionisierungsspannung verwandte Apparat ist in der Fig. 1 dargestellt. D ist ein Platindraht, dessen mittleres Stück dünner ist und durch einen

elektrischen Strom zum Glühen gebracht werden kann. N ist ein feines Platindrahtnetz, welches den Draht D im Abstand von 4 cm zylindrisch umgibt, und G eine zylindrische Platinfolie, welche von N einen Abstand von 1 bis 2 mm hatte. G war durch ein Galvanometer mit der Erde verbunden. Durch in die Oberfläche des Glases eingeschmolzene Ringe aus Platinfolie war verhindert, daß von den spannungsführenden Teilen Ströme über das Glas zum Galvanometer fließen konnten. . . . Alle Zuleitungen waren in das Glas eingeschmolzen.

Während der Messung befand sich der Apparat in einem elektrisch geheizten Paraffinbad. . . . Da sich . . . im unteren Teil des eigentlichen Apparates ein Tropfen Quecksilber befand, so wird der Druck des Quecksilberdampfes nicht wesentlich tiefer als der der Temperatur entsprechende Sättigungsdruck gewesen sein; da die meisten Messungen bei Temperaturen von  $110^{\circ}$  bis  $115^{\circ}$  gemacht wurden, so betrug der Druck des Quecksilberdampfes etwa 1 mm.“

Zur Durchführung des Experiments geben Franck und Hertz an, „. . . daß bei konstanter verzögernder Spannung zwischen N und G der am Galvanometer gemessene Strom in seiner Abhängigkeit von der zwischen D und N angelegten beschleunigenden Spannung gemessen wurde.“

Die Diskussion des experimentellen Ergebnisses erfolgte in besonderer Weise. Sie wurde in Form einer Vermutung über die zu erwartenden Meßergebnisse und deren Deutung vorgenommen: „Solange die beschleunigende Spannung kleiner ist als die verzögernde, ist der Strom Null. Dann wird er ansteigen, bis die beschleunigende Spannung gleich der Ionisierungsspannung geworden ist. In diesem Augenblick werden die Elektronen in der Nähe des Drahtnetzes unelastische Stöße erleiden und dabei ionisieren. Da sie selbst und die bei der Ionisation befreiten Elektronen bis zum Durchtritt durch das Drahtnetz nur noch eine sehr geringe Spannung durchlaufen, so treten sie ohne merkliche Geschwindigkeit durch das Drahtnetz hindurch und sind nicht imstande, gegen das verzögernde Feld anzulaufen. Der Galvanometerstrom wird daher auf Null abfallen, sobald die beschleunigende Spannung größer geworden ist als die Ionisierungsspannung. Steigert man die beschleunigende Spannung weiter, so rückt die Stelle, an der die Elektronen

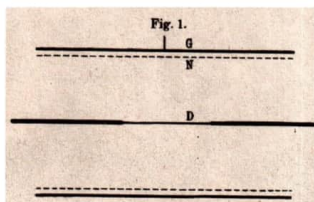


Abb. 2.17.1./1  
Fig. 1.

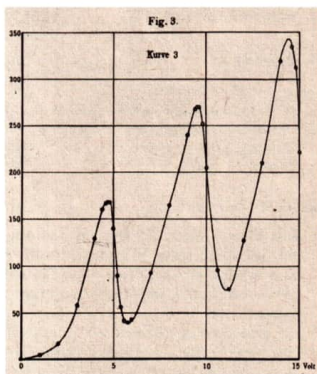


Abb. 2.17.1./2  
Fig. 3.

unelastische Stöße erleiden, vom Drahtnetz nach innen . . . Sobald jedoch die beschleunigende Spannung gleich der doppelten Ionisierungsspannung geworden ist, erleiden die Elektronen in der Nähe des Drahtnetzes zum zweitenmal unelastische Zusammenstöße. Da sie hierbei ihre Energie ganz verlieren, die neugebildeten Elektronen ebenfalls keine merkliche Geschwindigkeit besitzen, so können keine Elektronen mehr gegen das verzögernde Feld anlaufen. Sobald aber die beschleunigende Spannung größer wird als das Doppelte der Ionisierungsspannung, sinkt der Galvanometerstrom wieder auf Null. Da sich dieselbe Erscheinung jedesmal wiederholt, wenn die beschleunigende Spannung gleich einem ganzen Vielfachen der Ionisierungsspannung wird, so haben wir eine Kurve zu erwarten, die Maxima von wachsender Größe besitzt, deren Abstand stets gleich der Ionisierungsspannung ist. . . . Die Maxima sind außerordentlich scharf ausgeprägt und geben daher die Möglichkeit einer sehr genauen Messung der Ionisierungsspannung. Die Werte für den Abstand zweier benachbarter Maxima liegen sämtlich zwischen 4,8 und 5,0 Volt, so daß wir 4,9 Volt als den richtigen Wert für die Ionisierungsspannung des Quecksilberdampfes ansehen können.“ (Fig. 3)

Bis auf die Annahme, daß bei den unelastischen Zusammenstößen die Atome ionisiert werden, ist diese Deutung der experimentellen Ergebnisse auch heute noch gültig.

## 2.17.2. Schulexperiment zum Franck-Hertz-Experiment

### *Zu Variante a*

1. Thyatron mit Fassung (z. B. S 1,3/2 i.V.)
2. Strommesser (1 mA; 1 A)
3. Gleitwiderstand (15  $\Omega$ ; 1 A)
4. Stromversorgungsgerät (6 V — stabilisiert)
5. Stromversorgungsgerät (40 V —; 6,3 V ~)
6. 2 Spannungsmesser (30 V —; 10 V —)
7. Drehwiderstand (1 k $\Omega$ ; 0,5 W)
8. Widerstand (100  $\Omega$ ; 0,25 W)

### *Zu Variante b*

Geräte 1. bis 3., außerdem

9. Stromversorgungsgerät (30 V ~; 6,3 V ~)
10. Demonstrationsszillograf
11. Widerstand (100  $\Omega$ ; 0,25 W)
12. Widerstand (2 M $\Omega$ ; 0,1 W)

### *Methodische Hinweise*

1. Das Franck-Hertz-Experiment kann nicht originalgetreu durchgeführt werden, weil ein Selbstbau einer Franck-Hertz-Röhre mit schulischen Mitteln nicht möglich ist. Es wird deshalb das Prinzip der Stoßanregung in Analogie zum historischen Experiment von Franck und Hertz mit einem Thyatron, das mit einem Edelgas gefüllt ist, demonstriert.
2. Bei beiden vorgeschlagenen Varianten des Experiments erhält man Maxima und Minima, wie sie für das Franck-Hertz-Experiment typisch sind. Eine quantitative Auswertung der Experimente ist nicht zu empfehlen.

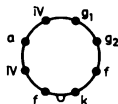
### Variante a: Punktweise Aufnahme des Stromstärke-Spannung-Diagramms

Das Experiment wird mit einem Thyatron vom Typ S 1,3/2 i. V. durchgeführt. Der Sockelschaltplan ist Abbildung 2.17.2./1 zu entnehmen. Die beiden Gitter sind miteinander zu verbinden. Die Experimentieranordnung wird nach Abbildung 2.17.2./2 aufgebaut. Die während des Experiments konstant zu haltende Gegenspannung wird mit dem Widerstand  $R_3$  eingestellt, die Gitterspannung mit dem Stufenschalter des Stromversorgungsgeräts.

Die Katode wird während des Experiments stark unterheizt. Die geeignete Heizstromstärke ist in einem Vorversuch zu ermitteln, da diese von Röhre zu Röhre verschieden ist. Dazu ist die Abhängigkeit der Anodenstromstärke von der am Gitter anliegenden Beschleunigungsspannung bei konstanter Gegenspannung bei unterschiedlichen Werten der Heizstromstärke aufzunehmen. Als geeignete Heizstromstärke wird diejenige gewählt, bei der die Maxima und Minima der Anodenstromstärke am deutlichsten hervortreten. In analoger Weise ist die optimale Gegenspannung zu ermitteln.

Die am Gitter anliegende Beschleunigungsspannung wird stufenweise erhöht und die Anodenstromstärke gemessen. Bei 13 V nimmt die Anodenstromstärke deutlich ab, nachdem diese zuvor kontinuierlich zugenommen hatte. Diese Abnahme der Anodenstromstärke wiederholt sich bei einer Beschleunigungsspannung von 24 V. Das Auftreten des ersten Minimums ist mit einem gut sichtbaren Aufleuchten des Füllgases verbunden.

S1,3/2 IV



f Heizung  
k Katode  
a Anode  
g<sub>1</sub> Gitter 1  
g<sub>2</sub> Gitter 2

Abb. 2.17.2./1  
Sockelschaltplan des Thyatrons S 1,3/2 i. V.

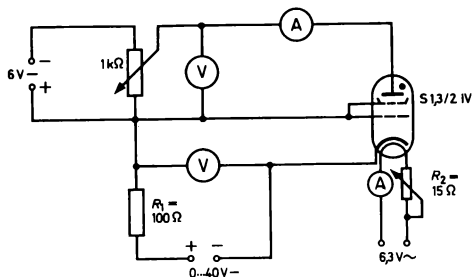


Abb. 2.17.2./2  
Punktweise Aufnahme der Franck-Hertz-Kurve (Schaltplan)

Die gemessenen Werte von Stromstärke und Beschleunigungsspannung werden in einem Diagramm grafisch dargestellt.

*Variante b: Darstellung des Stromstärke-Spannung-Diagramms mit einem Oszillografen*

Das Experiment wird mit dem Thyatron S 1,3/2 i. V. durchgeführt. Das Sockelschaltbild ist Abbildung 2.17.2./1 zu entnehmen. Die beiden Gitter sind miteinander zu verbinden. Die Experimentieranordnung wird nach Abbildung 2.17.2./3 aufgebaut. Die interne Kippspannung des Oszillografen wird abgeschaltet (Schalter auf „X“). Zwischen Katode und Gitter legt man eine Wechselspannung von etwa 30 V an, die auch den X-Platten des Oszillografen zugeführt wird. Die der Anodenstromstärke proportionale Spannung wird am Widerstand  $R$  abgegriffen und den Y-Platten des Oszillografen zugeführt.

Nach Einschalten der Heizspannung und genügender Erwärmung der Katode nach etwa 1 Minute, erscheint auf dem Bildschirm die Stromstärke-Spannung-Kurve. Durch die Schaltung bedingt, erscheint der Kurvenverlauf seitenverkehrt und auf dem Kopf stehend. Die Einstellung der optimalen Heizstromstärke, bei der die Maxima und Minima am deutlichsten hervortreten, erfolgt mit dem Widerstand  $R_2$ . Man erhält den gleichen Kurvenverlauf wie bei der Variante a.

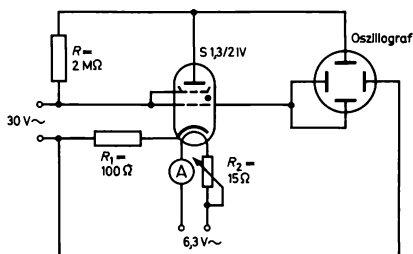


Abb. 2.17.2./3  
Darstellung der Franck-Hertz-Kurve mit dem Katodenstrahl-oszillografen (Schaltplan)

## 2.18. Der äußere lichtelektrische Effekt

Heinrich Hertz (1857 bis 1894) führte im Jahre 1887 Experimente mit Funkenentladungen zur Erzeugung sehr schneller elektrischer Schwingungen durch. Dabei bemerkte er, daß die Länge des Funkens bedeutend kleiner war, wenn er zur besseren Beobachtung die induzierte Funkenstrecke mit einem verdunkelnden Gehäuse überdeckte. Hertz fand, daß die Funken des Senders den Effekt hervorriefen. Er konnte den gleichen Effekt erreichen, wenn er Magnesiumlicht verwendete. Die Ursache war also optischer und nicht elektrischer Natur und ging vom ultravioletten Licht aus, wie spektrale Untersuchungen ergaben.

Diese Entdeckung wurde sofort von Wilhelm Hallwachs (1859 bis 1922), Alexander Grigorjewitsch Stoletow (1839 bis 1896), Julius Elster (1854 bis 1920), Hans Friedrich Geitel (1855 bis 1923) und anderen aufgegriffen. Sie führten unabhängig voneinander systematisch experimentelle Untersuchungen des neuartigen physikalischen Effektes durch.



Wilhelm Hallwachs veröffentlichte 1888 als erster die Ergebnisse seiner experimentellen Untersuchungen des lichtelektrischen Effekts (*Hallwachseffekt*). Er wies nach, daß durch ultraviolettes Licht negativ geladene Metallplatten entladen wurden, positiv geladene Metallplatten hingegen ihre Ladung behielten.

Weder Hallwachs noch die anderen Physiker, die systematisch den Fotoeffekt sowie die Bedingungen, unter denen er auftritt, untersuchten, konnten den Mechanismus der Scheidung der elektrischen Ladungen bei der Bestrahlung von Metallplatten aufklären. Diese Erkenntnis war Philipp Lenard (1862 bis 1947) vorbehalten. Er erkannte, daß bei der Bestrahlung von Metallen mit ultravioletttem Licht Elektronen aus diesen herausgeschlagen werden. Lenard standen bei seinen Experimenten die seit 1859 bei der Untersuchung an Katodenstrahlen von Julius Pflücker (1801 bis 1868), Johann Wilhelm Hittorf (1824 bis 1914), Jean Baptiste Perrin (1870 bis 1942), Joseph John Thomson (1856 bis 1940) und anderen gewonnenen umfangreichen Erkenntnisse und Erfahrungen sowie die experimentelle Technik zur Erzeugung hoher Vakua und zum Nachweis von Elektronen zur Verfügung.

Eine theoretische Erklärung des Fotoeffekts, die Lenard bereits versuchte, bereitete große Schwierigkeiten. Sie war mit dem vorliegenden Stand der physikalischen Theorie nicht möglich. Isaac Newton (1643 bis 1727) hatte Licht als einen Teilchenstrom aufgefaßt und durch seine Autorität die Wellentheorie von Christiaan Huygens (1629 bis 1695) unterdrückt. Anfang des 19. Jahrhunderts setzte sich nach den beeindruckenden Experimenten zur Beugung und Interferenz des Lichts von Thomas Young (1773 bis 1829) sowie von Augustin Jean Fresnel (1788 bis 1827) die Wellentheorie des Lichtes durch (→ 2.21.). Als die Experimente zum lichtelektrischen Effekt durchgeführt wurden, gab es keinen ernsthaften Physiker, der an der Wellennatur des Lichtes gezweifelt hätte. Es war deshalb ein wissenschaftliches Problem ersten Ranges, daß sich der lichtelektrische Effekt nicht auf der gut gesicherten Grundlage der Wellentheorie des Lichtes erklären ließ.

Albert Einstein (1879 bis 1955) löste im Jahre 1905 das Problem durch die schöpferische Anwendung der Planckschen Quantenvorstellung auf Licht. Er nahm an, daß Licht aus diskreten Energiequanten, den Photonen, besteht. Beim Absorptionsprozeß gibt ein Lichtquant seine ganze Energie an ein einziges Elektron ab, so daß es nach Abgabe der Austrittsarbeit als freies Elektron mit einer bestimmten kinetischen Energie in Erscheinung tritt. Diese Erkenntnis stellte eine wesentliche Fundierung der frühen Quantentheorie dar. Licht verhält sich einerseits wie eine Welle (Beugung, Interferenz) und andererseits beim Fotoeffekt wie ein Teilchenstrom. Dieses Welle-Teilchen-Verhalten ist, wie sich in der Folgezeit herausstellte, allen Mikroobjekten eigen.

Die technische Anwendung des Fotoeffektes führte zur Entwicklung der Fotozelle und ermöglichte u. a. die Bildtelegrafie, den Tonfilm, das Fernsehen sowie automatische Zähl- und Überwachungseinrichtungen.

### 2.18.1. Historisches Experiment Hallwachs' zum lichtelektrischen Effekt

Hallwachs hat seine Experimentieranordnung ausführlich beschrieben: „Eine blank geputzte kreisförmige Zn-Platte von etwa 8 cm Durchmesser hing an einem isolierenden Stativ und war durch einen Draht mit einem Goldblattelektroskop in Verbindung gesetzt. Vor der Zinkplatte stand parallel mit ihr ein großer Schirm aus Zinkblech von etwa 70 cm Breite und 60 cm Höhe. In der Mitte desselben befand sich ein Marienglasfenster (Gipsspatfenster), durch welches die Strahlen einer jenseits aufgestellten Siemens'schen Bogenlampe auf die Platte fallen konnten“ (Abb. 2.18.1./1). Das System aus Platte und

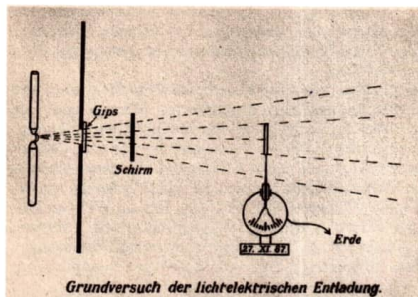


Abb. 2.18.1./1

Goldblättern isolierte gut: während eines Tages nahm die Ablenkung um etwa  $1/4$  ab, während der Dauer eines Versuches um keinen merkbaren Betrag. Auch wenn die Bogenlampe in Gang, das Marienglasfenster aber durch geeignete Substanzen bedeckt war, blieb die Isolation erhalten.

Ladet man die Platte sammt Electroskop, welches letzteres von den Strahlen nicht getroffen werden kann, negativ electrisch, so beginnen, sobald die Lichtstrahlen auf die Platte auftreffen, die Goldblättchen lebhaft zusammenzufallen; bei positiver Ladung tritt ein Zusammenfallen auf den ersten Blick gar nicht, bei genauerer Untersuchung erst nach längerer Zeit in merklichem Betrag ein.“

Über die Geschwindigkeit der Ladungsabnahme berichtet Hallwachs: „Dabei ergab sich z. B., wenn der Abstand der frisch geputzten Zn-Platte vom Lichtbogen 70 cm betrug, bei negativer Ladung in 5 Sekunden eine Abnahme der Divergenz um 70 Proc., nach 10 Sekunden waren die Blättchen ganz zusammengefallen. Bei positiver Ladung erhielt man in 60 Sekunden nur eine Abnahme von 10 Proc.“

Hallwachs untersuchte weiterhin die absorbierende Wirkung verschiedener Medien: „Um die Schwächung der Wirkung beim Durchgang der Lichtstrahlen durch zwischengeschaltete Platten zu untersuchen, wurde an Stelle des Marienglasfensters eine Blende aus Metallblech gesetzt, welche eine quadratische Oeffnung von 4 cm Seite besaß. Die benutzten Platten bedeckten diese Oeffnung vollständig. Der Abstand zwischen dem Bogen und der electrisirten Zinkplatte betrug 100 cm.“ Als gut durchlässige Substanzen erwiesen sich Gipsspat, Bergkristall, Steinsalz und Kalkspat. Zu den stark absorbierenden Substanzen zählten Glas, Metall, Pappe, Papier und Glimmer. Auch bei einigen Flüssigkeiten wurde die Absorption von Licht nachgewiesen.

Weitere Untersuchungen galten der Reflexion und der Brechung des von der Bogenlampe ausgehenden ultravioletten Lichtes.

## 2.18.2. Schulexperiment zum lichtelektrischen Effekt nach Hallwachs

### Experiment

Der Aufbau der Experimentieranordnung erfolgt gemäß Abbildung 2.18.2./1. Die unmittelbar vor der experimentellen Durchführung sorgfältig blank geschmirgelte Zinkplatte wird vertikal an der Isolierstütze befestigt und durch einen Verbindungsleiter mit

1. Elektroskop
2. Zinkplatte
3. Isolierstütze
4. Bandgenerator
5. Bogenlampe mit Gehäuse und Vorschaltgerät
6. undurchsichtiger Schirm
7. Schirmgelpapier

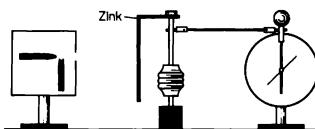


Abb. 2.18.2./1  
Nachweis des lichtelektrischen Effekts  
mit einem Elektroskop

dem Elektroskop verbunden. Es ist zu beachten, daß der Verbindungsleiter möglichst kurz ist und nirgends anliegt. Die Lampe wird im Abstand von etwa 10 cm vor der Zinkplatte aufgestellt, eingeschaltet und zunächst durch einen Schirm abgeblendet. Die Zinkplatte wird negativ geladen, indem das Elektroskop mit dem geriebenen PVC-Stab bestrichen wird. Das Elektroskop zeigt einen Ausschlag, der sich nicht verändert. Danach wird die Abschirmung entfernt, so daß das Licht der Bogenlampe auf die Zinkplatte fällt. Der Ausschlag des Elektroskops geht zurück. Das Experiment wird mit positiver Aufladung der Zinkplatte wiederholt, indem das Elektroskop mit der aufgeladenen großen Kugel des Bandgenerators berührt wird. Der Ausschlag des Elektroskops bleibt bei Bestrahlung der Zinkplatte mit der Bogenlampe unverändert. Aus einer mit ultravioletttem Licht bestrahlten Metallplatte werden Elektronen herausgeschlagen.

#### Bemerkungen

1. Anstelle der Bogenlampe können auch andere Quellen ultravioletten Lichtes Einsatz finden.
2. Sollte der Ausschlag des Elektroskops bereits ohne Bestrahlung der Zinkplatte zurückgehen, so liegt das meist an der zu hohen Luftfeuchtigkeit im Experimentierraum. In diesem Falle erwärmt man die experimentelle Anordnung vorsichtig mit einem Infrarotstrahler.

### 2.18.3. Historische Experimente Lenards zum lichtelektrischen Effekt

Lenard stellte sich das Ziel, den Mechanismus der Ladungstrennung beim Bestrahlen von Metallen mit ultravioletttem Licht sowie die Natur der hierbei beteiligten Ladungsträger aufzuklären. Er schloß durch Vorversuche aus, „daß wägbare materielle Teile des bestrahlten Körpers jene Träger der lichtelektrischen Ladungen seien“, und vermutete, daß Katodenstrahlen, die früher schon bei Gasentladungen als Träger negativer Ladungen erkannt worden waren, diese Träger sind.

Um den lichtelektrischen Effekt von verschiedenen Einflüssen frei zu halten, versuchte er, ihn zu isolieren (Abb. 2.18.3./1). „Ich strebte daher, die Erscheinung zunächst bei Ausschluss der Luft zu studieren . . .“ Seine Experimentieranordnung von 1899 beschreibt er so: „Der benutzte Apparat, ein zu evacuierendes Glasrohr mit eingeschmolzenen Elektroden, ist in Fig. 1 . . . dargestellt. U ist die zu bestrahlende Elektrode, eine Scheibe aus blankem Aluminiumblech von 1,5 cm Radius. Von gleicher Größe und demselben Material ist die zweite, der ersten parallel gestellte Elektrode E, welche stets als mit der Erde verbunden vorausgesetzt wird. Die 5 mm weite Öffnung in der Mitte von E, sowie die beiden überzähligen Elektroden  $\alpha$  und  $\beta$  sind bei den ersten Versuchen noch nicht

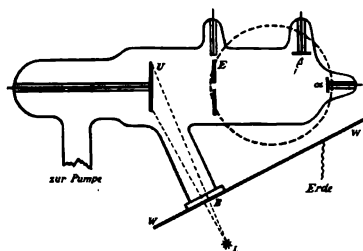


Abb. 2.18.3./1

Fig. 1.

vorhanden. Die Lichtquelle *L* wird für gewöhnlich von der 15 mm langen Funkenstrecke eines grösseren, mit einer Leydener Flasche versehenen Inductoriums gebildet; die Funken springen zwischen Zinkdrähten über, was viel ultraviolettes Licht giebt. Eine Blende *B* aus Stanniol, von 4 mm Weite, verhindert das Licht, andere Teile des Rohrrinneren zu treffen als nur die Fläche der Elektrode *U*. Die Blende setzt sich seitlich fort in Blechwänden, in der Figur bei *WW* angedeutet, welche das Rohr und die zu benutzenden Messinstrumente vor den elektrischen Kräften der Lichtquelle schützen. Der Luftabschluß bei *B* wird durch eine 3 mm dicke Quarzplatte gebildet. Die Lichtquelle bleibt immer weiter als 4 cm von *B* entfernt . . .

Verbinden wir nun *U* mit einem Elektroskope, so fallen dessen Blätter bei negativer Ladung doch augenblicklich zusammen, wenn *U* belichtet wird . . . Positive Ladungen bleiben bestehen oder nehmen äusserst langsam ab. Mit dem Quadrantenelektrometer ist nachzuweisen, dass die ursprünglich ungeladene Elektrode unter dem Einflusse des Lichtes eine positive Ladung annimmt, die bis zu einer Grenze von etwa 2,1 Volt anwächst.“

Durch Einsatz unterschiedlicher Lichtquellen fand Lenard:

„. . . verschiedene Lichtarten ergeben verschiedene Anfangsgeschwindigkeiten (der Elektronen) . . .“ Die Anfangsgeschwindigkeiten konnten aus den Gegenspannungen ermittelt werden, die notwendig waren, damit keine Elektronen von der Elektrode *U* zur Elektrode *E* gelangen konnten. Sie betrugen 2,1 V (Zinkfunken) und bei späteren Messungen

0,97 V für Zinkfunken,  
0,86 V für Zinkbogen und  
1,06 V für Kohlebogen.

Messungen, bei denen die Lichtintensität im Verhältnis 1:1000 variiert wurde, ergaben: „Die Anfangsgeschwindigkeiten sind unabhängig von der Lichtintensität.“

Darüber hinaus erkannte Lenard, daß im Hochvakuum beim lichtelektrischen Effekt negative Ladungen, und zwar nur solche, auftreten. Diese negativen Elektrizitätsquanten, wie Lenard die Elektronen nannte, wurden von ihm näher untersucht und deren spezifische Ladung mit guter Genauigkeit ermittelt.

Zur theoretischen Deutung wendete Lenard die klassische Wellentheorie an. Die Elektronen müßten durch die Absorption von Licht in Schwingungen geraten und sich durch Resonanzbewegung von der Metalplatte lösen; „. . . dass das Licht die Strahlenbildung —

im Inneren des Körpers veranlasse, wo es auch absorbiert wird, derart, dass dort negative Electrizitätsquanten mit bestimmten Anfangsgeschwindigkeiten in fortschreitende Bewegung versetzt werden, sodass sie aus dem Körper herausfahren können. Die Wirkung der äusseren elektrischen Kraft wäre dann, je nach ihrer Richtung, nur Beschleunigung oder Verzögerung der ausgestrahlten Electrizitätsquanten. Verzögernde äussere Kraft — entsprechend positiver Ladung des belichteten Körpers — kann schon ausgestrahlte Quanten wieder zur Rückkehr und so die Ausstrahlung scheinbar zum Stillstand bringen, was auch beobachtet wurde.“

Lenard erkannte aber auch den Widerspruch zwischen Theorie und Experiment. Die Anfangsgeschwindigkeit müßte nach der Theorie mit der Lichtintensität steigen, was aber gerade nicht beobachtet wurde. Lenard vermutete daher, „... dass die Anfangsgeschwindigkeiten der ausgestrahlten Quanten überhaupt nicht der Lichtenergie entstammen, sondern innerhalb der Atome schon vor der Belichtung vorhandenen heftigen Bewegungen, sodass die Resonanzbewegungen nur eine auslösende Rolle spielen“.

Einstein setzte in die von ihm gefundene lichtelektrische Gleichung

$$e \cdot U = h \cdot \nu - P$$

probehalber  $\nu = 1,03 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$  (entsprechend der Grenze des Sonnenspektrums nach dem Ultraviolett hin) und für die Austrittsarbeit  $P = 0$  ein. Damit erhielt er für  $U$  einen Wert von „4,3 Volt, welches Resultat der Größenordnung nach mit den Resultaten des Hrn. Lenard übereinstimmt“.

## 2.18.4. Schalexperimente zum lichtelektrischen Effekt nach Lenard

1. Vakuumfotозelle
2. Bogenlampe mit Gehäuse und Vorschaltgerät
3. Experimentierleuchte mit Glühlampe (6 V/30 W) und Spannungsquelle
4. Kondensator (1  $\mu\text{F}$ ; 1000 V)
5. hochohmiger Spannungsmesser (3 V —)
6. Irisblende
7. Schalter

### Experiment

In einem abgedunkelten Raum wird entsprechend Abbildung 2.18.4./1 die Fotозelle vor der Öffnung der Bogenlampe angeordnet. Die Irisblende zwischen Fotозelle und Bogenlampe sorgt dafür, daß der Lichtstrom nur auf die Katode und nicht auch auf die Anode gelangt. Katode und Anode der Fotозelle sind mit einem Kondensator verbunden.

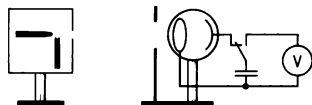


Abb. 2.18.4./1  
Anordnung zur Messung der Energie  
der Fotoelektronen

Fällt Licht in die Fotозelle, fließt so lange ein Fotostrom und lädt den Kondensator auf, bis die dabei entstehende Gegenspannung so groß ist, daß auch die schnellsten Elektronen nicht mehr zur Anode gelangen können. Diese Spannung wird durch Anschalten eines

Spannungsmessers gemessen und mit der nach der Einsteinschen Gleichung abgeschätzten Spannung (2.18.3.) verglichen. Das Experiment wird danach mit der Glühlampe als Lichtquelle wiederholt.

Schließlich wird die Entfernung Lichtquelle — Fotozelle vergrößert und so die Beleuchtungsstärke der Fotokatode verringert. Wiederum wird die Spannung gemessen.

Die Gegenspannung und damit die maximale kinetische Energie der aus der Katode herausgeschlagenen Elektronen hängt von der Art der Lichtquelle, aber nicht von der Beleuchtungsstärke der Katode ab.

## 2.18.5. Historisches Experiment von Lenard zur Abhängigkeit des Fotostroms von der Beleuchtungsstärke

In einer weiteren Reihe von Experimenten, deren Ergebnisse im Jahre 1902 veröffentlicht wurden, untersuchte Lenard mit einer verbesserten Apparatur die Abhängigkeit des Fotostroms von dem auf die Katode auftreffenden Lichtstrom.

„Die Versuchseinrichtung ist in Fig. 1 dargestellt. U ist die zu belichtende Elektrode, eine mit Terpentinruss vollkommen überzogene, kreisförmige Al-Scheibe von 3,4 cm Durchmesser, ihr gegenüber steht die gleichgroße und ebenfalls vollkommen berusste Metallscheibe E, welche eine Einstülpung e (Fig. 1 a) besitzt, so geformt, dass das durch die Blenden BB und gg abgesonderte, schmale Lichtbündel von der Quelle L nach U gelangen kann, ohne E zu streifen . . . Die Platte E ist sich selbst parallel verschiebbar,

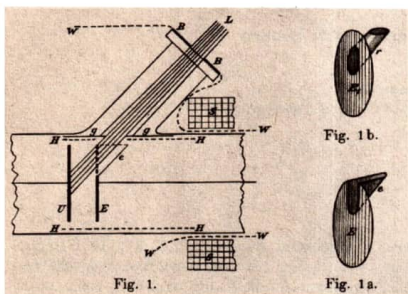


Abb. 2.18.5./1  
Fig. 1.

sodass der Abstand  $\overline{UE}$  verändert werden kann . . . Zwischen U und E wird zu Anfang jedes Versuchs eine messbare Potentialdifferenz hergestellt, was mit Hilfe von Accumulatoren geschah. Die Platte, U oder E, deren Ladungsänderung durch das Licht beobachtet werden sollte, war mit einem Quadrantenelektrometer verbunden.“ WW ist die Abschirmung mittels Stanniolpapier. Die Spule SS verhinderte „das seitliche Entweichen der Quanten an die Glaswände.“ Zum direkten Nachweis der seitlich entweichenden Elektronen diente die berußte Metallhülse HH, die bei späteren Versuchen weggief. Das Vakuum wurde mit Quecksilberluftpumpen hergestellt, die bis zur Wirkungsgrenze betrieben wurden.

Mit dieser Experimentieranordnung erhielt Lenard folgendes Ergebnis: „Die in der Zeiteinheit ausgestrahlte Menge (elektrischer Ladungen) ist der wirkenden Lichtintensität

proportional.“ Die Lichtintensität wurde „durch Abänderung der Entfernung zwischen den Funken (3 mm lange Funken zwischen Zn-Kugeln) und dem Glimmerdiaphragma gg“ im Verhältnis 90:1,4 variiert. Das Elektrometer war an U geschaltet, und aus seinem Ausschlag sowie der Kapazität des Elektrometersystems konnte die entwichene elektrische Ladung ermittelt werden.

### 2.18.6. Schulexperiment zur Abhängigkeit des Fotostroms von der Beleuchtungsstärke nach Lenard

1. Vakuumfotозelle
2. Bogenlampe mit Gehäuse und Vorschaltgerät
3. Irisblende
4. Strommesser (10  $\mu\text{A}$  --)

#### Experiment

Die Fotозelle wird in einem abgedunkelten Raum in einer Entfernung von etwa 20 cm von der Lichtquelle aufgestellt. Mit der unmittelbar vor der Fotозelle angebrachten Irisblende (Abb. 2.18.6./1) wird der Lichtstrom so weit abgeblendet, daß er nur auf die Fotokathode gelangt. Zur Messung des Fotostroms wird der Strommesser mit der Fotозelle verbunden. Der Zeiger des Strommessers schlägt aus.

Der Abstand Lichtquelle — Fotозelle wird vergrößert. Bei Verdoppelung dieses Abstandes nimmt die Stromstärke auf ein Viertel des Anfangswertes ab. Die Stromstärke ist der Beleuchtungsstärke proportional.



Abb. 2.18.6./1  
Anordnung zur Messung des Fotostroms

#### Bemerkungen

1. Das Experiment kann auch in einem beleuchteten Raum durchgeführt werden, wenn man dafür sorgt, daß kein unerwünschtes Streulicht auf die Fotозelle fällt. Das kann durch eine eingepaßte Röhre aus Pappe oder Plast zwischen Lichtquelle und Fotозelle erreicht werden.
2. Als Lichtquelle kann auch eine Experimentierleuchte mit Glühlampe verwendet werden.

## 2.19. Die Lichtgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit, mit der sich das Licht im Vakuum ausbreitet, ist eine der wichtigsten Naturkonstanten. Optik, Elektrodynamik, Kernphysik sowie Relativitätstheorie und Quantenphysik sind an ihrer genauesten Bestimmung interessiert. Ihr Zahlenwert wird mit immer höherer Präzision bestimmt. Das gelingt nur, wenn entweder große Entfernungen für Lichtwege genutzt werden können (astronomische Methode) oder wenn experimentelle Hilfsmittel für sehr kurze Zeitmessungen zur Verfügung stehen (terrestrische Methode).

Die Annahme einer endlichen Lichtgeschwindigkeit war viele Jahrhunderte umstritten. 1676 konnte sie erstmals aus astronomischen Meßwerten von Ole Christensen Römer (1644 bis 1710) errechnet werden. Terrestrische Messungen werden seit 1849 durchgeführt. Armand-Hippolyte Louis Fizeau (1819 bis 1896) und Leon Foucault (1819 bis 1868) bestimmten unabhängig voneinander die Konstante der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft sowie das Verhältnis der Geschwindigkeiten in Luft und im ruhenden Wasser. Fizeau untersuchte außerdem den Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, in dem sich das Licht ausbreitet, auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Gemessen wurden Laufzeiten von Lichtimpulsen, die entweder durch ein schnell laufendes Zahnrad (Fizeau 1849) oder durch einen sehr schnell rotierenden Planspiegel (Foucault 1850 und 1862) entstanden. Fizeau benutzte einen Lichtweg von etwa 18 km, Foucault kam mit nur 4 m bzw. 20 m aus. Die Messungen Fizeaus waren noch mit großen Schwierigkeiten verbunden. Ein Kritiker äußerte sich viele Jahre später: „Es ist interessant, daß der Bericht des Autors über den bemerkenswerten, zum Meilenstein der Physik gewordenen Versuch auf zwei Seiten dargestellt wird und ohne Angabe eines definierten Meßwertes endet.“

Fizeau benutzte später auch die Drehspiegelmethode.

Foucault entwickelte eine Experimentieranordnung für die Messung der Differenz der Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichtes in Luft und Wasser, danach benutzte er sie zur Bestimmung der jeweiligen Lichtgeschwindigkeit. Für das Geschwindigkeitsverhältnis fand er  $c_w/c_L = 3/4$ . Dieses Ergebnis stützte die Wellentheorie des Lichtes und beschleunigte deren Anerkennung.

### 2.19.1. Historisches Experiment Foucaults zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit dem Drehspiegel

Foucault beschreibt in seiner Veröffentlichung aus dem Jahre 1863 die von ihm benutzte Experimentieranordnung in folgender Weise: „Ein Bündel Sonnenlicht, horizontal reflektiert . . . , fällt auf ein mikroskopisches Sehzeichen, bestehend aus einer Reihe lot-rechter Striche, die 0,1 mm voneinander entfernt sind. Dieses Sehzeichen ist bei dem Versuch das eigentliche Grundmaß. Die durch diese Ursprungs-Ebene gegangenen Strahlen fallen, nachdem sie 1 m durchlaufen haben, auf den drehbaren Planspiegel, woran sie eine erste Reflexion erleiden, welche sie auf einen 4 m entfernten Hohlspiegel schickt. Zwischen diesen beiden Spiegeln und möglichst nahe am Planspiegel befindet sich das Objektiv, so wird das Lichtbündel, nachdem es durch das Objekt gegangen ist, ein Bild vom Sehzeichen auf der Oberfläche des ersten Hohlspiegels erzeugen. Von da reflektiert sich das Bündel ein zweites Mal in ziemlich schiefer Richtung, um den drehbaren Spiegel zu vermeiden, von welchem es in gewissem Abstand ein Bild im Raume erzeugt. An dem Ort, an dem dieses Bild entsteht, stellt man einen zweiten Hohlspiegel auf . . . und so fort bis zur Erzeugung eines letzten Bildes vom Sehzeichen an der Oberfläche eines letzten Hohlspiegels von ungerader Ordnungszahl. Ich habe solchergestalt bis zu fünf Spiegel anwenden können, die eine Linie von 20 m Länge verstaten.“

Der letzte dieser Spiegel, getrennt von dem vorletzten, der ihm gegenübersteht, durch einen Abstand von 4 m, der seinem Krümmungshalbmesser gleicht, schickt das Bündel genau in sich selbst zurück. Ist dies geschehen, so ist man gewiß, daß das Bündel durch die ganze Spiegelreihe zurückläuft. Es gelingt, diesen Rückgang der Strahlen zu bestätigen, indem man durch partielle Reflexion an einem unter 45° geneigten Glase einen Teil des Bündels ablenkt und mit einem schwachen Mikroskop untersucht.



In dem Apparat nimmt das reelle zum Mikroskop zurückgesandte Bild, welches vom rücklaufenden, partiell reflektierten Strahl erzeugt wird, gegen das Glas und gegen das Sehzeichen selbst eine bestimmte Lage ein. Diese Lage ist genau die des virtuellen Bildes von dem durch Reflexion in der Ebene des Glases gesehenen Sehzeichens.

Wenn aber der Spiegel rotiert, so ändert das Bild seinen Ort, weil während der Zeit, welche das Licht zur Durchlaufung der zwei Mal gebrochenen Linien zwischen den Hohlspiegeln gebraucht, der Spiegel fortfährt, sich zu drehen, und die Strahlen bei der Rückkehr ihn nicht mehr unter derselben Incidenz treffen, wie im Moment der Ankunft. Daraus folgt, daß das Bild im Sinne der Bewegung verschoben wird und diese Verschiebung mit der Rotationsgeschwindigkeit zunimmt.“

Als rotierenden Spiegel benutzte Foucault ein versilbertes Glas von 14 mm Durchmesser. Es war direkt auf der Welle einer kleinen Turbine angebracht, die, mit Preßluft betrieben, eine Drehzahl von etwa  $400 \text{ s}^{-1}$  erreichte. Mit dieser Experimentieranordnung ermittelte Foucault für die Lichtgeschwindigkeit  $c = 2,98 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 2.19.2. Schulexperiment zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit dem Drehspiegel

1. Drehspiegel zur Lichtgeschwindigkeit
2. Gleitwiderstand ( $1000 \Omega$ ;  $0,6 \text{ A}$ )
3. Oberflächenspiegel
4. Linse ( $f = +5000 \text{ mm}$ )
5. Linse ( $f = +100 \text{ mm}$ )
6. Glasmaßstab
7. verstellbarer Spalt
8. Glasplatte
9. Bogenlampe mit Lampengehäuse, Kondensor und Vorschaltgerät
10. Stimmgabel ( $435 \text{ Hz}$ )

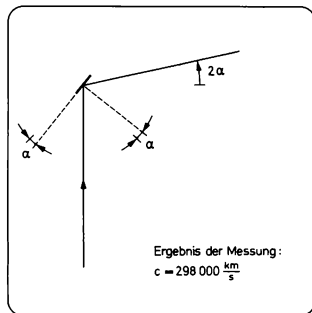
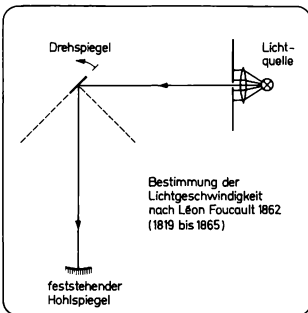


Abb. 2.19.2./1 Grundfolie zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit: Verlauf des Lichtbündels von der Lichtquelle über den Drehspiegel zum feststehenden Hohlspiegel

Abb. 2.19.2./2 Deckfolie zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit: Verlauf des vom feststehenden Spiegel reflektierten Lichtbündels

*Methodischer Hinweis*

Weil die Experimentieranordnung nicht leicht zu überschauen ist, empfiehlt es sich, das Prinzip mittels einer Projektionsfolie für den Overhead-Projektor zu veranschaulichen. Durch die Verwendung einer Grundfolie und einer Deckfolie ist es möglich, den Verlauf des Lichtbündels von der Lichtquelle bis zum feststehenden Spiegel und den Verlauf nach der Reflexion, voneinander getrennt, nacheinander darzustellen. Die Folie kann folgendermaßen gestaltet werden:

Auf der Grundfolie wird der Verlauf des Lichtbündels von der Lichtquelle über den Drehspiegel zum feststehenden Hohlspiegel dargestellt (Abb. 2.19.2./1). An dieser Darstellung muß den Schülern klargemacht werden, daß das vom rotierenden Spiegel reflektierte Licht nur in dieser Stellung des Spiegels den feststehenden trifft und von ihm reflektiert wird.

Der Verlauf des reflektierten Lichtbündels ist andersfarbig auf der Deckfolie gezeichnet. Dabei wird deutlich, daß sich der Drehspiegel in der Zeit, die das Licht für den Hin- und Rückweg brauchte, um den Winkel  $\alpha$  gedreht hat. Das von ihm reflektierte Lichtbündel muß somit eine Auslenkung von  $2\alpha$  erfahren (Abb. 2.19.2./2).

*Experimentelle Anordnung*

Die experimentelle Anordnung wird gemäß Abbildung 2.19.2./3 zusammengestellt. Das parallele Lichtbündel der Bogenlampe fällt durch den engen Spalt S unter einem Winkel von  $45^\circ$  auf die Glasplatte G und danach auf den entsprechend gestellten Drehspiegel D, von dem es durch die Linse L mit der großen Brennweite auf den Oberflächenspiegel O gelangt. Dieser reflektiert es, so daß das Licht auf dem gleichen Wege wieder zurück zur Glasplatte gelangt. Diese reflektiert einen Teil des Lichtes durch den Glasmaßstab M und die Lupe Lu in das Auge des Beobachters.

Bei der Anordnung der Geräte wird darauf geachtet, daß der Abstand SG gleich dem Abstand GM ist. Die Abstände SL und LO werden jeweils zu 10 m (doppelte Brennweite der Linse), der Abstand DL zu 5 m gewählt. Dadurch vereinfachen sich Justierung und Rechnung.

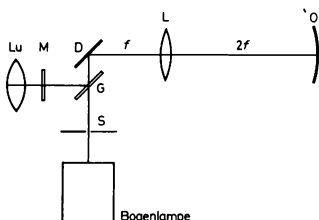


Abb. 2.19.2./3  
Anordnung der Geräte zur Bestimmung  
der Lichtgeschwindigkeit

Der Drehspiegel wird über den Gleitwiderstand mit dem Wechselspannungsnetz verbunden.

*Experiment*

Die Anordnung wird bei ruhendem Drehspiegel justiert und die Lage des hellen Spaltbildes auf dem Maßstab ermittelt. Der Motor wird eingeschaltet und seine Drehzahl so

weit erhöht, daß der von ihm abgegebene Ton mit dem der angeschlagenen Stimmgabel übereinstimmt. Jetzt wird erneut die Lage des Spaltbildes ermittelt. Das Spaltbild ist gegenüber dem bei ruhendem Drehspegel um 2,7 mm verschoben.

### Auswertung

Für die Lichtgeschwindigkeit gilt für die gewählte Anordnung

$$c = \frac{24 f^2 \cdot n \cdot \pi}{d},$$

wobei  $f$  die Brennweite der Linse,  $n$  die Drehzahl und  $d$  die Verschiebung des Spaltbildes ist.

Daraus folgt:

$$c = \frac{24 \cdot 5^2 \text{ m}^2 \cdot 435 \text{ s}^{-1} \cdot 3,14}{0,0027 \text{ m}}$$

$$c = 3,04 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

### Bemerkungen

1. Da der Lichtweg etwas lang ist, empfiehlt es sich, in den Lichtweg zwischen Linse und Oberflächenspiegel einen weiteren Oberflächenspiegel zur nochmaligen Reflexion einzufügen.
2. Um störendes Nebenlicht zu vermeiden, ist es zweckmäßig, zwischen Spalt und Glasplatte einen Bogen schwarzes Papier anzuordnen, in den ein Spalt zum Lichtdurchtritt geschnitten ist.
3. Die schnell aufeinanderfolgende Beobachtung der Verschiebung des Spaltbildes durch alle Schüler wird dadurch möglich, daß der Drehspegel mit dem Gleitwiderstand in Reihe geschaltet wird. Dadurch läuft der Motor zunächst sehr langsam. Parallel zu einem Anschluß und dem Abgriff des Gleitwiderstandes wird ein Schalter gelegt. Durch Schließen dieses Schalters erreicht der Motor die eingestellte Drehzahl. Jeder Schüler kann sich durch Betätigen des Schalters vom Wandern des Spaltbildes überzeugen.

## 2.20. Brechung des Lichtes

Das älteste Experiment zur Lichtbrechung war im 1. Jahrhundert v. u. Z. als Zauberkunststück bekannt; es beschreibt die sogenannte Bildhebung: „Ein auf dem Boden eines Tongefäßes liegender Ring kann, wenn man über den Rand des Gefäßes schaut, nicht mehr gesehen werden. Durch Zugießen von Wasser wird der Ring wieder sichtbar.“ Interpretiert wurde dieser Sachverhalt in der damaligen Zeit als Richtungsänderung des „Sehstrahls“ beim Übergang des Lichtes von Luft in Wasser.

Claudius Ptolemäus (um 90 bis 160) ermittelte erstmals das Zahlenverhältnis der Einfallswinkel und Brechungswinkel beim Übergang Luft—Glas:

Einfallswinkel	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Brechungswinkel	8°	15,5°	22,5°	28°	35°	40,5°	45°	50°

Aber das von ihm vermutete konstante Verhältnis zusammengehöriger Winkel ließ sich auch durch genauere Messungen nicht bestätigen.

Zu Beginn der Epoche der klassischen Physik suchte Johannes Kepler (1571 bis 1630) nach einem mathematisch formulierten Brechungsgesetz. Ihm gelang jedoch nur eine „verallgemeinerte“ Aussage für Einfallswinkel unter  $15^\circ$ . (Beim Übergang des Lichtes von Luft in Glas ermittelte er das Verhältnis Einfallswinkel:Brechungswinkel mit 2:3.)

Aus dieser Beziehung entwickelte Kepler die Gleichung zur Berechnung der Brennweite einer Linse  $1/f = 1/a + 1/b$ , wobei  $f$  die Brennweite,  $a$  die Entfernung des Objektes und  $b$  die des Bildes ist. Außerdem bestimmte er bei seinen experimentellen Arbeiten erstmals den Grenzwinkel der Totalreflexion beim Übergang des Lichtes von Wasser in Luft. Das Brechungsgesetz in der uns heute bekannten mathematischen Form wird Willebrord Snell van Roijen (1591 bis 1626) und René Descartes (1596 bis 1650) zugeschrieben. Welche Experimente Snell van Roijen zur Herleitung des Brechungsgesetzes durchführte, ist nicht bekannt, denn er hat das Ergebnis nur in seinen Vorlesungen bekanntgegeben und dazu nichts veröffentlicht.

Descartes nahm die Ergebnisse in seine Schriften auf, nachdem er eine eigenständige theoretische Bearbeitung vorgenommen hatte. Er versuchte, die Ursache der Brechung durch Anwendung eines Prinzips der Mechanik — der Zerlegung von Kräften — zu erklären, und war dabei zu der Annahme gezwungen, daß das Licht durch ein dichteres Medium mit größerer Leichtigkeit hindurchläuft als durch ein dünneres. Dieser Irrtum wurde erst durch die experimentelle Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in unterschiedlichen Medien (→ 2.19.) widerlegt.

Die Nutzung des Brechungsgesetzes durch Newton bei der Erklärung der Dispersion ist für die damalige Zeit eine besondere Leistung, da sich die experimentell ermittelten Werte für die Brechzahlen der Spektralfarben erst in der zweiten Stelle hinter dem Komma unterscheiden.

Damit waren wichtige Voraussetzungen für die Spektralanalyse geschaffen. Die systematische Untersuchung der Spektren setzte jedoch erst im 19. Jahrhundert ein (→ 2.23.).

### 2.20.1. Historisches Experiment zur Zerlegung weißen Lichtes

Newton schrieb am 6. Februar 1671 an den Präsidenten der Royal Society: „Um das Ihnen kürzlich gegebene Versprechen zu erfüllen, will ich ohne weitere Umstände mitteilen, daß zu Beginn des Jahres 1666 (zu welcher Zeit ich mit Schleifen von Linsengläsern zu tun hatte) ich mir ein dreiwinkliges Prisma besorgte, um damit die bekannten Farberscheinungen zu untersuchen. Und nachdem ich mein Zimmer verdunkelt und ein Loch in meinen Fensterladen gemacht hatte, um eine Menge Sonnenlicht einzulassen, brachte ich hinter der Öffnung mein Prisma an, damit jenes an die gegenüberliegende Wand gebrochen wurde. Es war anfangs recht vernünftig, die lebhaften und kräftigen Farben anzuschauen. Aber als ich sie dann genauer betrachtete, war ich überrascht, daß sie eine längliche Form hatten, während ich nach entsprechenden Gesetzen der Brechung erwartete, daß sie rund wären.“

Aus der nun folgenden systematischen Untersuchung der Spektren ist ein Experiment, als *experimentum crucis* bezeichnet, von besonderer Bedeutung. Newton beschreibt es in seiner „Optik“ als 6. Versuch des Lehrsatzes 2.: „In zwei dünne Bretter bohrte ich in der Mitte jeweils ein rundes Loch mit einem Durchmesser von  $\frac{1}{3}$  Zoll, und in den Fensterladen machte ich ein noch viel größeres Loch mit der Absicht, in mein verdunkeltes Zimmer ein dickes Bündel Sonnenlicht eintreten zu lassen. Hinter dem Fensterladen stellte ich ein Prisma in diesen Strahl, um ihn nach der gegenüberliegenden Wand zu brechen, und dicht hinter dem Prisma befestigte ich eines der Bretter in der Weise, daß die Mitte des gebrochenen Lichtes durch das Loch in dem Brett hindurch-

treten konnte und das restliche Licht von dem Brett aufgefangen wurde. Dann stellte ich ungefähr zwölf Fuß vom ersten Brett entfernt das andere Brett so auf, daß die Mitte des gebrochenen Lichtes, das durch das Loch im ersten Brett hindurchtrat und auf die gegenüberliegende Wand fiel, durch das Loch in diesem zweiten Brett hindurchgehen konnte, während das vom Brett aufgefangene restliche Licht das farbige Spektrum der Sonne darauf zeichnete. Dicht hinter diesem Brett befestigte ich ein anderes Prisma, um das aus dem Loch austretende Licht zu brechen. Dann kehrte ich eilig zum ersten Prisma zurück, und durch langsames Hin- und Herdrehen dieses Prismas um seine Achse erreichte ich, daß sich das auf das zweite Brett fallende Bild aufwärts und abwärts bewegte, so daß alle seine Teile nacheinander durch das Loch in diesem Brett hindurchtreten und auf das dahinterstehende Prisma fallen konnten. Zur gleichen Zeit merkte ich mir die Stelle an der gegenüberliegenden Wand, auf die das Licht nach seiner Brechung im zweiten Prisma fiel, und an Hand des Unterschiedes dieser Orte stellte ich fest, daß das Licht, das im ersten Prisma am stärksten gebrochen wurde und zum blauen Ende des Bildes gelangte, im zweiten Prisma wieder stärker gebrochen wurde als das zum roten Ende des Bildes laufende Licht, was sowohl den ersten als auch den zweiten Satz beweist. Dies geschah, wenn die Achsen der zwei Prismen parallel zueinander oder gegen den Horizont unter einem beliebigen Winkel geneigt waren.“ (Abb. 2.20.1./1).

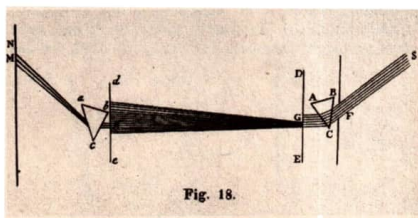


Fig. 18.

Abb. 2.20.1./1  
Experimentieranordnung  
zur Zerlegung des Lichtes

In einem späteren Experiment (II. Teil, Satz III, 10. Vers.) heißt es: „Das Spektrum des Bildes der Sonne falle jetzt auf die über vier Zoll große Linse VR, die etwa sechs Fuß von dem Prisma ABC entfernt und so geformt ist, daß sie das vom Prisma ausgehende divergente farbige Licht konvergent macht und in ihrem Brennpunkt, der ungefähr sechs Fuß von der Linse entfernt ist, wieder vereinigt, wo es dann senkrecht auf ein weißes Blatt Papier DE fällt . . . Das gesamte Licht erscheint nun als ein kleiner weißer Kreis.“ (Abb. 2.20.1./2)

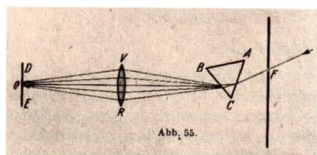


Abb. 55.

Abb. 2.20.1./2  
Experimentieranordnung  
zur Wiedervereinigung zu weißem Licht

## 2.20.2. Schalexperiment zur Zerlegung weißen Lichtes

### Zu Experiment 1

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1. Optikleuchte (12 V; 50 W) | 6. 2 Prismatische                           |
| 2. Lochblende (6 mm Ø)       | 7. optische Bank mit Schwenkarm und Reitern |
| 3. 2 Irisblenden             | 8. 4 große Klemmreiter                      |
| 4. 2 Flintglasprismen (60°)  | 9. kleiner Klemmreiter                      |
| 5. transparenter Schirm      | 10. Stromversorgungsgerät (12 V; 4 A)       |

### Zu Experiment 2

Geräte 1., 2., 5., 7., 9. und 10., außerdem

11. Linse ( $f = +150 \text{ mm}$ )
12. 2 große Klemmreiter
13. Flintglasprisma, 60°
14. Prismatische

### Experiment 1: Spektrale Zerlegung von weißem Licht

Der Aufbau der Experimentieranordnung erfolgt nach Abbildung 2.20.2/1. Vor die Optikleuchte bringt man die Lochblende (6 mm Ø). Unmittelbar hinter der Blende steht ein Flintglasprisma. Die brechende Kante steht senkrecht zur optischen Bank. In das

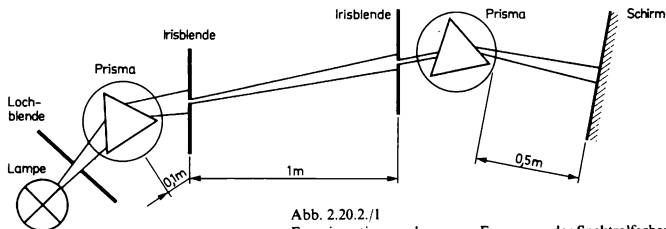


Abb. 2.20.2./1  
Experimentieranordnung zur Erzeugung der Spektralfarben

Bündel des zerlegten weißen Lichtes stellt man eine Irisblende, die so weit geöffnet ist, daß sie jeweils nur eine Spektralfarbe hindurchläßt. Das ausgeblendete monochromatische Lichtbündel fällt in etwa 1 m Abstand auf eine zweite verstellbare Lochblende, die ebenfalls nur einen Teil des Lichtbündels hindurchläßt, das auf das zweite Prisma fällt. Das vom zweiten Prisma gebrochene Lichtbündel trifft den in etwa 0,5 m Entfernung stehenden Schirm. Das Lichtbündel wird im ersten Prisma spektral zerlegt. Im zweiten Prisma erfolgt keine weitere Zerlegung der farbigen Lichtbündel.

### Experiment 2: Wiedervereinigung des spektral zerlegten Lichtes

Der Aufbau der Experimentieranordnung erfolgt nach Abbildung 2.20.2./2. Vor der Optikleuchte befindet sich die Lochblende. Das Prisma wird 10 cm vor der Blende angeordnet. Die brechende Kante des Prismas steht senkrecht zur optischen Bank. Auf dem Schirm erscheint das Spektrum. In das Bündel des zerlegten weißen Lichtes bringt man die Linse, so daß das Prisma gerade in deren einfacher Brennweite steht.

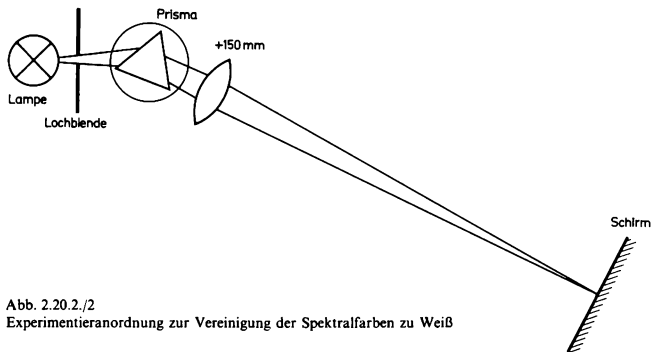


Abb. 2.20.2./2

Experimentieranordnung zur Vereinigung der Spektralfarben zu Weiß

Nun wird der Schirm langsam dem Prisma genähert. In einem bestimmten Abstand entsteht ein farbränderfreies weißes Bild der Lochblende.

#### Bemerkung

Der Raum ist möglichst stark abzudunkeln.

## 2.21. Interferenz des Lichtes

Die Interferenz des Lichtes gestattet sicher, auf dessen Welleneigenschaften zu schließen.

Die erste Hypothese über den Wellencharakter des Lichtes formulierte Francesco Grimaldi (1618 bis 1663). Er verglich die Ausbreitung des Lichtes mit der Wellenausbreitung im Wasser. Grimaldi entdeckte auch die Interferenz von Lichtbündeln, konnte sie aber noch nicht erklären. Nach ihm beobachteten und diskutierten Robert Boyle (1627 bis 1691) und Robert Hooke (1635 bis 1703) sowie Isaac Newton (1643 bis 1727) die Interferenzfarben (Farben dünner Plättchen, Newtonsche Ringe). In seiner „*Micrographia*“ (1666) schreibt Hooke, daß sich die Farben plattenförmiger Körper mit der Änderung der Plattendicke verändern. Die von ihm unter dem Mikroskop beobachteten farbigen konzentrischen Ringe ließen folgende Reihenfolge der Farben erkennen: rot, gelb, grün, blau, violett, dann wieder rot, gelb usw. Farbige Streifen wurden von ihm an Glimmerplättchen, an dünnen Schichten aus verschiedenen Flüssigkeiten, die zwischen zwei Glasplättchen gepreßt wurden, an Seifenblasen und an dünnen Filmen auf Metalloberflächen beobachtet und untersucht.

Hooke vertrat die Ansicht, daß das Licht eine schnelle Schwingungsbewegung mit äußerst kleinen Amplituden sei, die vom leuchtenden Körper ausgeht und sich im Äther in Form sphärischer Wellen wie der Schall in der Luft ausbreitet. (Der Äther war für ihn ein den Raum durchdringendes Medium, — ähnlich der gewöhnlichen Luft, jedoch bedeutend dünner und elastischer —, das das ganze Weltall ausfüllt.) Erst zwölf

Jahre später entwickelte Christiaan Huygens (1629 bis 1695) in seinem „*Traktat über das Licht*“ dazu eine wissenschaftlich begründete Theorie, in der er den geometrischen „Beweis“ für die Reflexion und Brechung des Lichtes führte. Damit gewann er erstmalig quantitative Schlußfolgerungen aus der Annahme der Welleneigenschaften des Lichtes. Huygens forderte aber noch keine Periodizität der Lichtwellen im Äther.

An der Wende zum 19. Jahrhundert veröffentlichte Thomas Young (1773 bis 1829), ein englischer Arzt, der auch Physikvorlesungen am Royal Institution hielt, seine Abhandlung „*Versuche und Probleme bezüglich des Schalls und des Lichtes*“, in der ein Abschnitt die bemerkenswerte Überschrift trug: „*Über die Analogie zwischen dem Schall und dem Licht*“. Youngs Aufmerksamkeit richtete sich besonders auf die Verstärkung und Schwächung des Schalls bei der Überlagerung von Schallwellen. Das von ihm entdeckte Prinzip der Interferenz von Schallwellen übertrug er noch im gleichen Jahr auf das Licht.

In seiner Veröffentlichung „*Über die Theorie des Lichtes und der Farben*“ (1802) schrieb Young: „Wenn zwei Wellenbewegungen, die von verschiedenen Zentren ausgehen, in ihrer Richtung entweder vollständig oder in sehr guter Näherung übereinstimmen, stellt ihre vereinigte Wirkung eine Kombination dar, die zu den beiden Teilwellen gehörigen Bewegungen dar. Da jedes Teilchen des Mediums überall dort, wo die Richtungen übereinstimmen, von jeder Wellenbewegung beeinflusst wird, können letztere nur so fortschreiten, daß sie ihre Bewegungen vereinigen. Die resultierende Bewegung kann dann die Summe oder die Differenz der Einzelbewegungen sein, je nachdem, ob ähnliche oder unähnliche Wellenbewegungen zusammentreffen.“

Young konnte also mit dem Prinzip der Interferenz erklären, warum sich die Lichtwellen bei Überlagerung nicht nur verstärken, sondern sich unter bestimmten Bedingungen auch bis zur vollständigen Auslöschung schwächen können. So entstehen, behauptete er, die schon von Grimaldi beobachteten dunklen und hellen Streifen hinter lichtundurchlässigen Hindernissen, und so kommen die Newtonschen Ringe zustande. Young formulierte auch exakt die notwendigen Bedingungen für die optische Interferenz: Es interferieren nur zwei Anteile „ein und desselben Lichtes“ (Kohärenzbedingung). Schließlich benutzte er das von ihm erkannte Interferenzprinzip zur Erklärung der farbigen Newtonschen Ringe. Die dabei erstmals durchgeführten Messungen der Länge der Lichtwellen ergaben erstaunlich genaue Werte für die Wellenlängen der verschiedenen Spektralbereiche.

Als versierter Experimentator wies Young die Interferenz, die aus der gegenseitigen Durchdringung zweier kohärenter Lichtbündel resultiert, experimentell nach.

Da Young die gewonnenen Ergebnisse nicht ausreichend mathematisch beschreiben konnte, lehnten seine Zeitgenossen seine Theorie als „leere Phantasie“ ab; man bezeichnete sie als „unakzeptabel“, weil sie der Newtonschen Vorstellung vom Wesen des Lichtes entgegengerichtet war. Erst Augustin Jean Fresnel (1788 bis 1828) bewirkte mit seinen Forschungsergebnissen über die Eigenschaften und das Wesen des Lichtes eine Wende in den Ansichten.

Fresnel, der als Bauingenieur an der damals berühmten „Ecole Polytechnique“ eine gründliche Ausbildung in den Naturwissenschaften erhalten hatte, beschäftigte sich in seiner Freizeit aus wissenschaftlichem Interesse auch mit physikalischen Problemen. Ihn interessierten besonders die erst seit wenigen Jahren in Frankreich diskutierten Phänomene der Polarisierung des Lichtes und der Beugung. Unter primitivsten physikalisch-technischen Bedingungen führte er verschiedene Experimente zur Beugung mit erstaunlich hoher Genauigkeit aus. Dabei entdeckte er 1815 die Interferenz des Lichtes, ohne zu wissen, daß schon zehn Jahre zuvor der Engländer Young zu den gleichen Ergebnissen gekommen war.

Fresnel war von Anfang an davon überzeugt, daß sich die bei den Beugungsexperimenten an den Spaltbildern auftretenden Streifen oder „Franzen“ nicht mit der Newtonschen



Emissionstheorie, aber unter Verwendung der Huygensschen Wellentheorie gut erklären lassen. So schuf er in wenigen Jahren eine geschlossene Theorie der Beugung (Zonentheorie), die eine mathematisch begründete Interpretation der Interferenzerscheinungen gibt. Mit verschiedenen Experimenten bestätigte er Schlußfolgerungen aus seiner Theorie. Besonders bekannt wurden die heute seinen Namen tragenden Experimente mit dem *Doppelspiegel* und dem *Biprisma*, mit denen er zeigen konnte, daß nicht nur Lichtbündel, die infolge der Beugung von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt wurden, interferieren können, sondern auch Lichtbündel, die vorher reflektiert oder gebrochen wurden.

Mit der exakten theoretischen Darstellung der Ergebnisse seiner Experimente beteiligte sich Fresnel am Wettbewerb um den „Großen Preis der mathematischen Wissenschaften 1819“, den die Akademie der Wissenschaften ausgeschrieben hatte. In diesem Wettbewerb sollte „das Geheimnis der Beugung“ aufgeklärt werden. Viele Mitglieder der Akademie vertraten die Emissionstheorie und hofften, daß eine Erklärung in diesem Sinne möglich sei und damit die Wellentheorie ad acta gelegt werden könne. Fresnel führte jedoch den Nachweis zugunsten der Wellentheorie, indem er das Interferenzprinzip mit dem Huygensschen Prinzip vereinigte, und bekam den Preis zugesprochen.

Die physikalisch-mathematische Deutung des Phänomens der Interferenz des Lichtes hat wesentlich dazu beigetragen, das Wesen der Naturerscheinung „Licht“ aufzuklären. Auf dem Gebiet der Meßtechnik erlangte die optische Interferenz vielfältige Bedeutung. Die gut beobachtbaren Interferenzerscheinungen ermöglichen es, kleine Längenänderungen sowie kleine Winkel zwischen Flächen zu bestimmen. Auf dem Interferenznachweis beruhen z. B. die Messungen der Lichtwellenlänge, Brechzahlen optischer Gläser und von Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien. Es wurden sehr spezielle Meßmethoden, wie etwa die Interferenzspektroskopie u. ä., entwickelt.

### 2.21.1. Historisches Experiment zu den Newtonschen Ringen

Bei seinen optischen Experimenten stieß Newton zufällig auf die Erscheinung der *Farben dünner Plättchen*, als er zum Nachweis der Totalreflexion zwei Prismen, deren Hypotenusenflächen etwas gekrümmt waren, zusammenlegte. Dabei bemerkte er, daß am Berührungspunkt der beiden Prismen ein Punkt erschien, welcher sogar bei der Einstellung der Prismen auf Totalreflexion durchsichtig blieb, im zurückgeworfenen Licht jedoch stets dunkel erschien.

Zur Untersuchung dieser Erscheinung wählte Newton folgende experimentelle Anordnung: „Ich nahm zwei Objektivgläser — eines davon war eine plankonvexe Linse für ein Vierzehn-Fuß-Teleskop und das andere eine große bikonvexe Linse für ein Teleskop von etwa fünfzig Fuß Länge — und legte auf letztere die erste Linse mit der ebenen Seite nach unten. Daraufhin drückte ich die beiden Linsen langsam zusammen und ließ so die Farben nacheinander in der Mitte der Kreise zum Vorschein kommen. Dann hob ich die obere Linse langsam von der unteren ab und ließ so die Farben nacheinander an derselben Stelle wieder verschwinden . . . Für den Fall, daß die Linsen ganz stark aufeinandergedrückt werden, so daß im Zentrum ein schwarzer Fleck sichtbar wird, ist die Form der farbigen Ringe in Abbildung 4 dargestellt. Dabei bezeichnen a, b, c, d, e; f, g, h, i, k; l, m, n, o, p; q, r; s, t, u, x; y, z in vom Mittelpunkt aus gezählter Reihenfolge die folgenden Farben: Schwarz, Blau, Weiß, Gelb, Rot; Violett, Blau, Grün, Gelb, Rot; Purpur, Blau, Grün, Gelb, Rot; grünliches Blau, blasses Rot; grünliches Blau, rötliches Weiß . . .“ (Abb. 2.21.1./1)

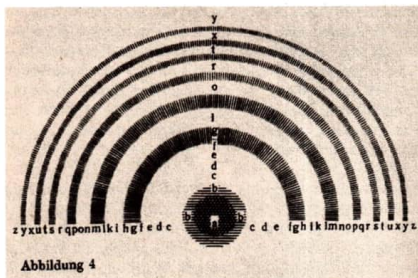


Abbildung 4

Abb. 2.21.1./I

Newton erkannte die unterschiedliche Dicke der Luftschicht als Ursache der Erscheinung und berechnete sie. Eine befriedigende Deutung des Phänomens gelang ihm nicht.

## 2.21.2. Schulexperiment zu den Newtonschen Ringen

### Zu Experiment 1

1. Natriumspektrallampe mit Gehäuse und Vorschaltgerät
2. Mikroskop für Auflicht und/oder Durchlicht
3. Planglasplatte (etwa 30 mm × 30 mm)
4. Linse ohne Fassung ( $f = +250$  mm bis 500 mm;  $\varnothing$  etwa 30 mm)

### Zu Experiment 2

- |                              |                                       |
|------------------------------|---------------------------------------|
| 5. Optikleuchte (12 V; 50 W) | 9. 2 große Klemmreiter                |
| 6. optische Bank (100 cm)    | 10. kleine Klemmreiter                |
| 7. Newtonsches Glas          | 11. Stromversorgungsgerät (12 V; 4 A) |
| 8. transparenter Schirm      |                                       |

### Experiment 1: Betrachtung der Newtonschen Ringe mit einem Auflicht/Durchlicht-Mikroskop

Man bringt die Glasplatte auf den Objektisch und legt darauf die Plankonvexlinse mit der gewölbten Seite. Das senkrecht auffallende monochromatische Lichtbündel durchsetzt die Linse und den Luftkeil zwischen Linse und Glasplatte und wird an der Platte reflektiert. Bei etwa 50facher Vergrößerung durch das Mikroskop können dunkle Interferenzringe beobachtet werden. Die Mitte des Ringsystems ist dunkel.

Man verändert die Anordnung so, daß das Licht von unten einfällt. Jetzt erscheint die Mitte der Newtonschen Ringe hell, und die bisher hellen Ringe sind dunkel.

### Experiment 2: Betrachtung der Newtonschen Ringe mit dem bloßen Auge

Die experimentelle Anordnung wird nach Abbildung 2.21.2./I zusammengestellt. Der transparente Schirm wird rückseitig beleuchtet und dient als ausgedehnte Lichtquelle.

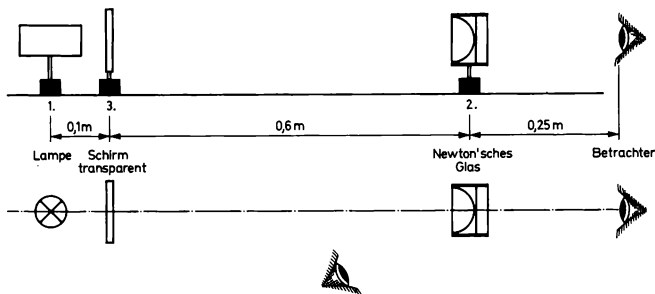


Abb. 2.21.2./1  
Experimentieranordnung zum Experiment 2

Mit den auf die Ringschicht akkommodierten Augen wird das beleuchtete Newtonsche Glas zunächst im reflektierten, dann im durchtretenden Licht beobachtet. Auf dem Newtonschen Glas sind farbige Interferenzringe erkennbar.

#### Bemerkungen

1. Damit beim Experiment 1 genügend Platz für die Linse und den Luftkeil vorhanden ist, verwendet man möglichst kleine Objektivvergrößerungen (3,2- bis 8fach).
2. Wird beim Experiment 2 das Licht der Optikleuchte durch Filter gefärbt, so sind beim Übergang z. B. von Rot zu Blau deutlich die Unterschiede in den Ringdurchmessern zu beobachten.

### 2.21.3 Historisches Experiment zur Interferenz

Zur Überprüfung des Interferenzprinzips im Bereich der Optik ließ Young Sonnenlicht durch eine enge Lochblende gehen, vor der er eine zweite Blende mit zwei nahe beieinander liegenden sehr kleinen Öffnungen anbrachte. „Die zwei Lichtkegel“, schreibt er, „die sich hinter dem undurchlässigen Schirm bilden und sich dank der Beugung verbreitern, überdecken sich teilweise und erzeugen im Überdeckungsbereich eine Serie von aufeinanderfolgenden dunklen und hellen Streifen, statt eine gleichmäßige Vergrößerung der Helligkeit zu ergeben. Wenn das eine Loch verschlossen ist, so verschwinden die Streifen, und es treten lediglich die Beugungsringe von der anderen Öffnung auf. Die Streifen verschwinden auch dann, wenn beide Öffnungen direkt durch Sonnenlicht oder eine künstliche Lichtquelle beleuchtet werden.“ Auch Fresnel beschreibt das Interferenzexperiment von Young. Er ergänzt es aber auf folgende Weise: „Die Streifen sind deutlicher, wenn man in dem Schirm statt der zwei kleinen Löcher zwei parallele Spalte mit einem Abstand von ein oder zwei Millimeter anbringt; durch Verschließen eines der Spalte bringt man die inneren Streifen dann gleichfalls zum Verschwinden, obwohl das von dem anderen Spalt in den Schatten des Zwischenteils gelangende Licht noch sehr gut wahrnehmbar ist.“ Und er ergänzt: „Wir haben immer vorausgesetzt, daß alles bei diesen Experimenten verwendete Licht von demselben Lichtpunkt herrührt; wenn es anders

wäre, wenn die zwei Lichtbündel, die man mischt, nicht von derselben Quelle ausgingen, kämen die soeben besprochenen Effekte nicht mehr zustande.“

## 2.21.4. Schulexperiment zur Interferenz am Doppelspalt

- |                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Optikleuchte (12 V; 50 W)        | 6. optische Bank (150 cm)            |
| 2. verstellbarer Spalt              | 7. 3 große Klemmreiter               |
| 3. Doppelspalt (Spaltbreite 0,2 mm) | 8. kleiner Klemmreiter               |
| 4. transparenter Schirm             | 9. Stromversorgungsgerät (12 V; 4 A) |
| 5. Blende (etwa 100 mm × 100 mm)    |                                      |

### Experiment

Der Aufbau der Young-Fresnelschen Anordnung erfolgt nach Abbildung 2.21.4./1. In geringer Entfernung hinter die Lichtquelle bringt man den etwa 0,1 mm bis 0,2 mm breiten Leuchtschlitz. Den Schirm stellt man in einer Entfernung von 2 m bis 4 m auf, so daß das Lichtbündel auf ihn auftrifft. Etwa 20 cm bis 30 cm hinter dem Spalt ordnet man parallel zum Leuchtschlitz den Doppelspalt an.

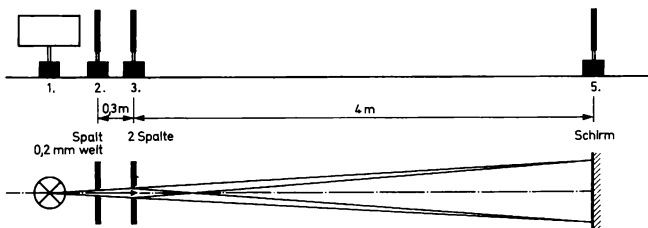


Abb. 2.21.4./1  
Experimentieranordnung zur Beugung am Doppelspalt

Auf dem Schirm erscheint ein System äquidistanter Streifen. Auf beiden Seiten dieses Systems treten außerdem unschärfere Streifen auf.

Einer der Spalte des Doppelspalts wird durch die Blende verschlossen. Die äquidistanten Streifen verschwinden. Nachfolgend wird der andere Spalt verschlossen. Auch dadurch verschwinden die äquidistanten Streifen.

Schließlich wird der verstellbare Spalt allmählich verbreitert. Es tritt eine verwaschene Interferenzfigur auf, die allmählich verschwindet.

### Bemerkung

Zur Durchführung des Experiments ist ein abgedunkelter Raum erforderlich. Die Beobachtungsbedingungen lassen sich durch einen Farbfilter verbessern, der hinreichend einfarbiges Licht erzeugt.

## 2.21.5. Historisches Experiment Fresnels zur Interferenz mit dem Doppelspiegel

Die Abbildung 2.21.5./I zeigt das Schema der von Fresnel benutzten experimentellen Anordnung.

Fresnel gibt folgende Interpretation seines Experimentes:

„Wir können jetzt das Experiment mit den zwei Spiegeln erklären, bei dem man sehr überraschende Effekte der gegenseitigen Beeinflussung von Lichtstrahlen durch die Vereinigung der zwei Bündel erhält, die an den Spiegelflächen regulär reflektieren . . .“

Nachdem man die zwei Spiegel so nebeneinander angeordnet hat, daß ihre Kanten sich vollständig berühren, dreht man sie so weit, daß sie sich fast in derselben Ebene befinden, aber dennoch einen geringfügigen Winkel miteinander bilden, so daß sie gleichzeitig zwei Bilder des Lichtpunktes liefern. Man kann den Winkel nach dem Zwischenraum beurteilen, der die Bilder trennt; dieser Zwischenraum muß klein sein, damit die Streifen genügend breit werden. Aber man muß große Sorgfalt insbesondere darauf verwenden, daß die Spiegel an der Berührungslinie nicht gegeneinander versetzt sind, denn ein Absatz von ein oder zwei hundertstel Millimeter würde in vielen Fällen genügen, um das Auftreten der Streifen zu verhindern . . .

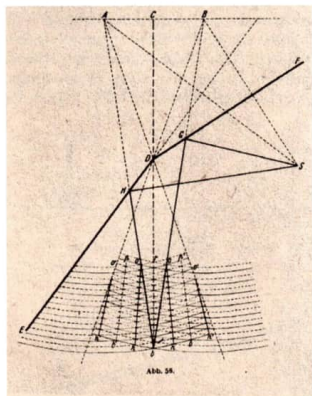


Abb. 2.21.5./I  
Skizze zu den Beziehungen  
beim Fresnelschen Spiegelversuch

Um die Streifen zu finden, muß man ein wenig von den Spiegeln weggehen und die von ihnen reflektierten Strahlen mit einer kurzbrennweitigen Lupe auffangen, hinter die man das Auge hält und die so aufgestellt wurde, daß ihre ganze Fläche beleuchtet wird . . . Diese Streifen stellen eine Reihe von leuchtenden und dunklen Streifen dar, die parallel zueinander sind und gleiche Abstände voneinander haben.“

Zur Bewertung des Experimentes schreibt Fresnel: „Es ist also völlig erwiesen, daß in gewissen Fällen Licht, hinzugefügt zu Licht, Dunkelheit erzeugt. Diese fundamentale Tatsache, die Grimaldi nicht entgangen ist, die jedoch Newton unbekannt gewesen zu sein scheint, ist in jüngster Zeit durch die Experimente von Young hinreichend bewiesen

worden; aber sie wird vielleicht durch das von mir soeben beschriebene Experiment noch besser hervorgehoben, weil die dunklen Streifen, die dieses Experiment liefert, im allgemeinen schwächer sind als die des Beugungsphänomens im eigentlichen Sinne und dabei jeder Gedanke an eine Beugungswirkung, die die Lichtstrahlen an gewissen Stellen aufweiten und an anderen konzentrieren könnte, vermieden wird, da das Phänomen hier durch regulär reflektierte Strahlen erzeugt wird.“

## 2.21.6. Schulexperiment zur Interferenz mit dem Fresnel-Spiegel

- |                              |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Optikleuchte (12 V; 50 W) | 6. optische Bank (150 cm)            |
| 2. Spalt (0,2 mm)            | 7. 4 große Klemmreiter               |
| 3. verstellbarer Spalt       | 8. kleiner Klemmreiter               |
| 4. Fresnel-Spiegel           | 9. Stromversorgungsgerät (12 V; 4 A) |
| 5. transparenter Schirm      |                                      |

### Experiment

Der Beleuchtungsspalt steht unmittelbar vor der Optikleuchte. Etwa 7 cm vor dem Beleuchtungsspalt wird der verstellbare Spalt aufgestellt; 22 cm dahinter befindet sich der Fresnelsche Doppelspiegel so, daß die Stoßkanten der beiden Spiegel parallel zu den Spalten liegen und das Licht streifend auf den Spiegel fällt. Dabei sollen beide Spiegel etwa gleichmäßig beleuchtet werden. Zum Einstellen bringt man etwa 30 cm hinter dem Spiegel den Schirm, so daß er vom reflektierten Licht getroffen wird (Abb. 2.21.6./1).

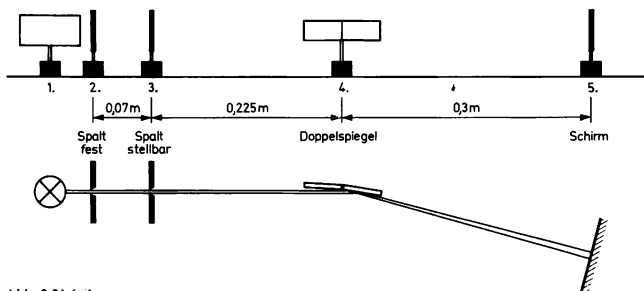


Abb. 2.21.6./1

Experimentieranordnung zum Nachweis der Interferenz mit dem Fresnel-Spiegel

Mit Hilfe der Justiervorrichtung verändert man die Lage des Doppelspiegels so, daß auf dem Schirm zwei dicht beieinanderliegende Lichtstreifen entstehen. Meist sind diese Lichtstreifen von Beugungsstreifen durchzogen, die entweder vom verstellbaren Spalt (0,1 mm) oder von der Stoßkante eines Spiegels herrühren. Beim Nachjustieren neigt und dreht man den Spiegel so lange, bis die beiden Lichtstreifen sich überdecken und eine gleichmäßige Helligkeit und Breite der Lichtstreifen entstanden ist.

Es treten feine, scharfe Interferenzstreifen auf (Abb. 2.21.6./2). Je nach dem Lichtstrom der Lichtquelle kann der Schirm in größere Entfernung vom Doppelspiegel gebracht werden.

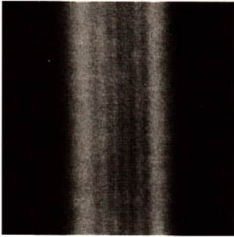


Abb. 2.21.6./2  
Interferenzfigur. erzeugt mit dem Fresnelspiegel

#### *Bemerkung*

Vgl. Bem. zu 2.21.4.

### **2.21.7. Historisches Experiment Fresnels zur Interferenz mit dem Biprisma**

Zu den Fresnelschen Experimenten zum Nachweis der Interferenz ohne nennenswerte Beugung gehört auch das Experiment mit dem Interferenzprisma (Biprisma). Es handelt sich um ein gleichschenkliges, sehr stumpfes Doppelprisma, hinter dem eine spaltförmige Lichtquelle steht. Die Größe des stumpfen Winkels entspricht etwa der Größe des Neigungswinkels der beiden Spiegel des Fresnelschen Doppelspiegels (fast  $180^\circ$ ). Die durch das Doppelprisma entstehenden kohärenten Wellenzüge durchdringen sich in dem ihnen gemeinsamen Gebiet analog dem Doppelspiegelsperiment (Abb. 2.21.7./1). Auf einem in das gemeinsame Wellengebiet gebrachten weißen Schirm treten daher Interferenzstreifen auf.

Fresnel kommentiert dieses Ergebnis so: „Diese gegenseitige Beeinflussung der Lichtstrahlen, die wir soeben durch mehrere Experimente festgestellt haben, wird noch

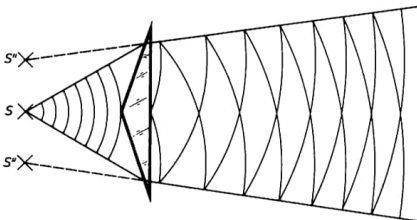


Abb. 2.21.7./1  
Schema des Strahlengangs  
am Interferenzprisma

durch eine große Zahl optischer Phänomene bestätigt, so daß sie jetzt eines der am besten gesicherten Prinzipien der Physik ist. Wir haben zunächst die Tatsachen ausgewählt, die dieses Prinzip von jedem Zweifel befreien . . .“ Und er fügt an späterer Stelle hinzu: „Wenn die zwei Lichtbündel die gleiche Intensität haben, wie in dem soeben beschriebenen Experiment, zeigt sich in der Mitte der dunklen Streifen ein vollständiges Fehlen von Licht, zumindest für die Streifen der ersten, zweiten und sogar der dritten Ordnung, wenn das verwendete Licht genügend homogen ist. Da es aber niemals vollkommen homogen ist, erweist es sich, daß der Helligkeitsunterschied zwischen den dunklen und den leuchtenden Streifen, der bei den ersten Streifen so hervorstechend ist, sich in dem Maße fortschreitend vermindert, in dem man sich vom Zentrum entfernt, und schließlich stets in einem gewissen Abstand verschwindet, das heißt unmerklich wird.“

## 2.21.8. Schulexperiment zur Interferenz mit dem Fresnel-Biprisma

- |                              |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Optikleuchte (12 V; 50 W) | 6. optische Bank (150 cm)            |
| 2. Spalt (0,2 mm)            | 7. 4 große Klemmreiter               |
| 3. verstellbarer Spalt       | 8. kleiner Klemmreiter               |
| 4. Fresnel-Biprisma          | 9. Stromversorgungsgerät (12 V; 4 A) |
| 5. transparenter Schirm      |                                      |

### Experiment

Der Aufbau der experimentellen Anordnung erfolgt nach Abbildung 2.21.8./1. Der Spalt dient als Beleuchtungsspalt. Etwa 30 cm vor dem Beleuchtungsspalt bringt man den verstellbaren Spalt an, vor dem sich in einer Entfernung von 3 cm das Biprisma befindet. Die Kante des Biprismas ist dem Beleuchtungsspalt zugewandt. Während der Justierung befindet sich der Bildschirm etwa 30 cm vor dem Biprisma.

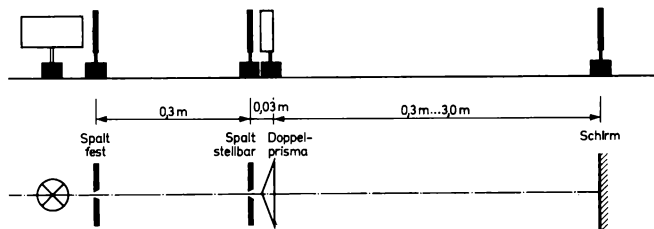


Abb. 2.21.8./1

Experimentieranordnung zum Nachweis der Interferenz mit dem Fresnel-Biprisma

Zunächst wird der verstellbare Spalt (0,05 mm bis 0,1 mm) auf dem Schirm als heller Streifen abgebildet. Dabei ist darauf zu achten, daß die Optikleuchtenwendel und die beiden Spalte zueinander parallel sind. Dann wird das Biprisma so in den Strahlengang geschoben, daß die brechende Kante des Prismas und die Spalte zueinander



parallel sind und das Gebiet beiderseits der Prismakante gleichmäßig ausgeleuchtet ist.

Auf dem Schirm wird ein farbiges Interferenzbild sichtbar, dessen Schärfe durch den verstellbaren Spalt regulierbar ist (Abb. 2.21.8./2). Die Entfernung zwischen Biprisma und Schirm kann in Abhängigkeit vom Lichtstrom der Optikleuchte bis auf mehrere Meter vergrößert werden.

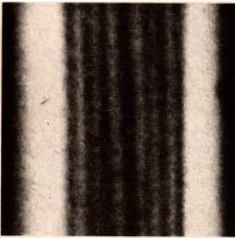


Abb. 2.21.8./2  
Interferenzbild, erzeugt mit dem Fresnel-Biprisma

#### *Bemerkung*

Vgl. Bem. zu 2.21.4.

## 2.22. Polarisation des Lichtes

Die Erkenntnis, daß Licht als *transversale* Wellenerscheinung interpretiert werden kann, wurde durch die Erklärung der chromatischen Polarisation durch Dominique Arago (1786 bis 1853) und Augustin Jean Fresnel (1788 bis 1827) gewonnen. Sie war das Resultat einer zehnjährigen intensiven Forschungsarbeit, die mit der überraschenden Entdeckung der Polarisation des Lichtes durch Reflexion an einer Fensterglasscheibe begann. Polarisationserscheinungen wurden erstmals von Christiaan Huygens (1629 bis 1695) im Zusammenhang mit der „seltsamen Brechung des Kalkspats“ beobachtet, dessen Kristalle zwei verschiedene Lichtbrechungen bewirken, die zur Aufspaltung des Lichtbündels in einen „ordentlichen“ und einen „außerordentlichen Strahl“ führen. Es gelang ihm jedoch nicht, die bei der Doppelbrechung entstehende Polarisation im Rahmen der Wellentheorie zu erklären.

Für Isaac Newton (1643 bis 1727) war das Phänomen der Doppelbrechung einer der Gründe dafür, daß er sich nicht vorbehaltlos dazu entschließen konnte, das Licht als eine Wellenerscheinung im Äther anzusehen.

Die Vertreter der Emissionstheorie erklärten die Veränderungen des Lichtes durch den Kalkspat mit der Annahme besonderer Eigenschaften der „Lichtteilchen“, die denen der Pole von Stabmagneten ähnlich sind. Malus führte dafür die Bezeichnung „Polarisation des Lichtstrahls“ ein.

Als sich 1808 Etienne-Louis Malus (1775 bis 1812) experimentell mit dem Problem der Doppelbrechung am Kalkspat beschäftigte, beobachtete er die Polarisation von Lichtbündeln sowohl durch Reflexion an ebenen Glasscheiben als auch an glatten Wasseroberflächen, wenn das Licht unter einem ganz bestimmten Winkel (etwa  $54^\circ$ ) auf die

spiegelnde Fläche einfällt. Außerdem stellte er fest, daß auch das durch eine planparallele Glasplatte hindurchgehende Licht polarisiert ist, aber nur teilweise. Malus fand, daß der polarisierte Anteil erhöht werden kann, wenn ein Plattensatz verwendet wird.

1811 beschrieb Arago die an Kristallen im polarisierten weißen Licht zu beobachtenden Farberscheinungen (chromatische Polarisation). Er erkannte, daß polarisiertes Licht in zwei Teile aufgespalten werden kann, die Farberscheinungen in den Komplementärfarben hervorrufen, wenn man es nach dem Durchgang durch ein doppelbrechendes Plättchen noch einen doppelbrechenden Analysator passieren läßt. Thomas Young (1773 bis 1829) vermutete eine Analogie zur Farbentstehung bei Newtonschen Ringen, die er mit dem Interferenzprinzip aus der Wellenlehre erklärt hatte. Damit ergaben sich jedoch aus der Sicht der Wellentheorie weitere Fragen: Warum treten die Farben nur auf, wenn die zwei Strahlen aus einem schon polarisierten Strahl hervorgehen? Warum entstehen die Farben nur unter der Bedingung einer zweiten polarisierenden Wirkung nach dem Durchgang durch das Plättchen? Warum entstehen gerade Komplementärfarben?

Die Antwort gab 1819 eine Gemeinschaftsarbeit von Fresnel und Arago. Sie wiesen nach, daß senkrecht zueinander polarisierte Lichtbündel nicht interferieren. Das legt die Annahme nahe, daß es sich beim Licht um transversale Wellenerscheinungen handelt. Diese Auffassung, Licht als ein System von Transversalwellen zu verstehen, fand zunächst keine ungeteilte Zustimmung. Deshalb entschloß sich Fresnel erst 1821 dazu, mit seiner Hypothese an die Öffentlichkeit zu treten.

Damit führte die Untersuchung der Polarisation zu wichtigen Erkenntnissen über das Wesen des Lichtes. Das in verschiedener Weise polarisierte Licht bewirkt unterschiedliche physikalische Effekte, die in Wissenschaft und Technik genutzt werden.

Genannt seien Spannungsoptik, Kristallinterferenz sowie Strukturuntersuchungen bzw. Konzentrationsbestimmungen optisch aktiver Stoffe. Weiterhin ermöglicht die Polarisation bei Filmen das räumliche Sehen.

### 2.22.1. Historisches Experiment zur chromatischen Polarisation

Arago brachte zwischen den Polarisator (Spiegel) und den Analysator (Kalkspat) dünne Gips- bzw. Glimmerplatten. Er ließ senkrecht auf die Oberfläche dieser Kristallplättchen linear-polarisiertes weißes Licht auffallen. Die dabei beobachteten Erscheinungen beschreibt er wie folgt: „Die derselben unterworfenen Strahlen geben zum Beispiel beim Durchgang durch einen isländischen Kalkspat immer zwei Bilder, aber diese sind in allen ihren Punkten lebhaft und gleichmäßig gefärbt. So ist, trotz der Weiße des einfallenden Lichts, der ordentliche Strahlenbündel vollkommen rot, vollkommen orange, gelb, grün, blau, violett, je nach der Seite, von welcher der Hauptschnitt des Kristalls den Strahl durchschneidet; für den außerordentlichen Bündel genügt nicht die Angabe, daß er folgeweise nie dem ordentlichen Strahl gleicht, man muß vielmehr aussprechen, daß er so sehr als möglich sich von demselben unterscheidet, daß also, wenn der eine rot gefärbt erscheint, der andere schön grün ist, und so analog für alle prismatischen Farben.

Wenn die neue Art polarisierter Strahlen von einem durchsichtigen Spiegel zurückgeworfen wird, bemerkt man nicht weniger auffallende Erscheinungen.“

### 2.22.2. Schulexperiment zur chromatischen Polarisation

- |  |  |
|--|--|
| 1. Optikleuchte (12 V; 50 W)                               | 7. optische Bank mit Schwenkarm        |
| 2. Kreisblende (Irisblende)                                | 8. transparenter Schirm                |
| 3. schwarzer Spiegel                                       | 9. 6 große Klemmreiter                 |
| 4. Doppelspat (isländischer Kalkspat)                      | 10. kleiner Klemmreiter                |
| 5. Kristallplättchen (Quarz-, Glimmer- bzw. Gipsplättchen) | 11. 2 Kondensorlinsen ( $f = +120$ mm) |
| 6. Linse ( $f = +100$ mm)                                  | 12. Stromversorgungsgerät (12 V; 4 A)  |

#### Experiment

Der Aufbau der Experimentieranordnung erfolgt nach Abbildung 2.22.2/1.

Mit der Optikleuchte und dem Kondensor wird ein paralleles Lichtbündel erzeugt, das die Kreisblende ( $\varnothing = 5$  mm) durchsetzt und unter dem Einfallswinkel  $55^\circ$  auf den schwar-

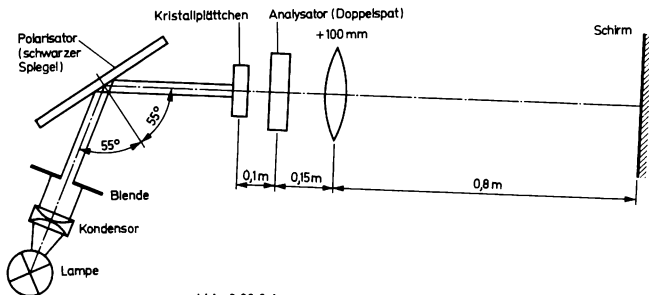


Abb. 2.22.2/1

Experimentieranordnung zur chromatischen Polarisation

zen Spiegel (Polarisator) trifft. Im reflektierten Lichtbündel stehen das Kristallplättchen, der Doppelspat (Analysator) und die Abbildungslinse. Diese Linse bildet das Kristallplättchen auf dem Schirm ab.

Die beiden, den Analysator verlassenden Lichtbündel zeigen auf dem Schirm komplementäre Farben. Kommt es zur Überdeckung beider Bilder, so ist der Überdeckungsbereich weiß.

#### Bemerkung

Anstelle des schwarzen Spiegels kann auch eine auf der Rückseite beruhte planparallele Glasplatte Verwendung finden.

## 2.23. Linienspektren

Linienspektren sind für Physiker und Chemiker ein Fenster, durch das sie in die *atomare Welt* blicken können. Ihre systematische Erforschung begann zu Beginn des 19. Jahrhunderts, als völlig unerwartet eine Vielzahl dunkler Linien im Spektrum der Sonne bemerkt wurden.

Joseph Fraunhofer (1787 bis 1826) beschäftigte sich als Techniker mit dem Bau achromatischer Fernrohre. Dabei stellte er sich drei Aufgaben: Durch sorgfältigste Schmelzprozesse ein schlierenfreies Glas mit durchweg gleichem Brechungsvermögen herzustellen; das jeweilige Brechungsvermögen sicher und genau zu bestimmen und die Krümmungsradien der Linsen genau zu berechnen. Die Lösung der zweiten Aufgabe führte ihn zur Entdeckung der später nach ihm benannten *Fraunhoferschen Linien*. Zunächst bemühte er sich, die „relative Farbzerstreuung“ verschiedener Gläser durch Schleifen der brechenden Winkel von Doppelprismen zu ermitteln. Dieses Verfahren war aber zu ungenau; es mußte die Brechung jeder Farbe in jeder Glasart direkt gemessen werden — „allein im Spektrum haben die verschiedenen Farben keine bestimmten Grenzen“ und „gefärbte Gläser oder Flüssigkeiten, die nur einfaches Licht durchlassen, war ich nicht so glücklich zu finden“, stellte er dazu resignierend fest. „Jedoch“, so fährt er fort, „fand ich bei diesen (farbigen Flammen), wie auch mit Öl- und Talglichte und überhaupt mit dem Lichte des Feuers im Farbenbild zwischen der roten und gelben Farbe einen hellen, scharf begrenzten Streifen, der bei allen genau an demselben Orte ist und in der Folge sehr nützlich wurde . . . Auch in der grünen Farbe findet sich ein ähnlicher Streifen, der jedoch nicht so scharf begrenzt und ungleich schwächer ist.“ Mit diesen festen Linien konnten das Brechungs- und Dispersionsvermögen für verschiedene Glassorten sowie für Wasser als brechendes Medium bestimmt werden. Danach betrachtete Fraunhofer das Spektrum des Sonnenlichtes.

„Ich wollte suchen, ob im Farbenbild von Sonnenlicht ein ähnlich heller Streifen zu sehen sei wie im Farbenbild vom Lampenlicht, und fand anstatt desselben mit dem Fernrohr fast unzählig viele starke und schwache vertikale Linien, die aber dunkler sind als der übrige Teil des Farbenbildes; einige scheinen ganz schwarz zu sein.“

Auch im Licht der Planeten und Fixsterne fanden sich diese Linien. Insgesamt 574 Linien registrierte Fraunhofer. Er bemerkte auch, daß die Lage der gelben Linie im Spektrum des Lampenlichtes und die mit dem Buchstaben D bezeichnete dunkle Linie im Sonnenspektrum zusammenfallen.

John Frederick William Herschel (1792 bis 1871) entdeckte 1827, daß Strontium, Natrium, Kalium und andere Stoffe, verdampft man sie in einer Flamme, farbige Linien im Flammenspektrum hervorrufen. Und Charles Wheatstone (1802 bis 1875) erkannte, daß das Linienspektrum *elektrischer Funken* zwischen verschiedenen Metallen für jedes Metall charakteristisch ist. Auf der Summe dieser experimentellen Ergebnisse aufbauend, gelangten Gustav Kirchhoff (1824 bis 1887) und Robert Wilhelm Bunsen (1811 bis 1899) zur Klärung der Ursachen für die Emissions- und Absorptionsspektren. Sie begründeten damit eine überaus erfolgreiche Forschungsmethode der Physik und Chemie, die zum Nachweis geringster Mengen chemischer Substanzen, zur Entdeckung neuer chemischer Elemente und zur Einsicht in die physikalische und chemische Beschaffenheit der Himmelskörper geführt hat. Besondere Erfolge ermöglicht die spektroskopische Methode, indem sie die Voraussetzung schafft, mittels Serienformeln (Balmer-Serie u. a.) alle Linien des Spektrums zu berechnen, wenn nur ein geringerer Teil experimentell ermittelt werden konnte. In der Erkenntnis der Gesetzmäßigkeiten der Linienspektren liegt ein wichtiger Zugang zur Aufdeckung der Struktur der Atome.

### 2.23.1. Historisches Experiment zu den Fraunhoferschen Linien

Fraunhofer wollte die „Exponenten der Brechungsverhältnisse der verschiedenen farbigen Strahlen noch genauer bestimmen“, als er das bisher benutzte Lampenlicht durch Sonnenlicht ersetzte. Er beschreibt sein Experiment dazu folgendermaßen: „In einem verfinsterten Zimmer ließ ich durch eine schmale Öffnung im Fensterladen, die ungefähr 15 Sekunden (einige Zehntel Millimeter) breit und 36 Minuten hoch war, auf ein Prisma von Flintglas, das auf dem oben beschriebenen Theodolith stand, Sonnenlicht fallen. Das Theodolith war 24 Fuß (etwa 8 Meter) vom Fensterladen entfernt, und der Winkel des Prismas maß ungefähr  $60^\circ$ . Das Prisma stand so vor dem Objektiv des Theodolithfernrohres, daß der Winkel des einfallenden Strahles dem Winkel des gebrochenen Strahles gleich war.“ (Abb. 2.23.1./1)

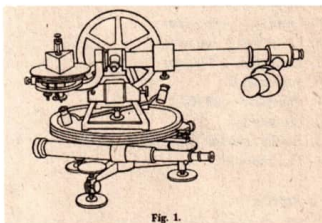


Abb. 2.23.1./1 Fraunhoferscher Spektralapparat: a) Ansicht, b) Schema

Um die vielen, über alle Spektralfarben verteilten, dunklen Linien in allen Farben scharf zu sehen, mußte das Fernrohr auf diese eingestellt werden; mit zunehmender Spaltbreite wurden sie diffuser, aber ihr Abstand blieb, bis sie bei 2,5 mm bis 3 mm Spaltbreite verschwanden; sie traten auch bei Prismen mit unterschiedlich brechenden Winkeln und verschiedenen Glasarten auf. Die Anzahl der sichtbaren Linien erwies sich als um so größer, je größer die *Farbzerstreuung* des Prismas und die Vergrößerung des Fernrohres ist. Fraunhofer schreibt weiter: „Ich habe mich durch viele Versuche und Abänderungen überzeugt, daß diese Linien und Streifen in der Natur des Sonnenlichtes liegen und daß sie nicht durch Beugung, Täuschung usw. entstehen.“ Er nennt auch noch weitere Versuchsbedingungen: „Da die Linien und Streifen im Farbbilde nur eine sehr geringe Breite haben, so ist klar, daß der Apparat große Vollkommenheit haben muß, um allen Abweichungen zu entgehen, welche die Linien undeutlich machen oder ganz zerstreuen könnten. Die Seitenflächen der Prismen müssen daher sehr gut plan sein. Das Glas, welches zu solchen Prismen gebraucht wird, muß ganz frei von Wellen und Streifen sein. . . . Wer nicht im Besitze eines Prismas von vollkommenem Flintglase ist, wähle besser eine stark zerstreuernde Flüssigkeit, z. B. Anisöl, um alle Linien zu sehen; doch muß das prismatische Gefäß sehr vollkommen plane und parallele Seitenflächen haben. Bei allen Prismen müssen die Seitenflächen mit der Grundfläche ziemlich nahe  $90^\circ$  machen; die Grundfläche muß horizontal vor dem Fernrohre liegen, wenn die Achse des Fernrohres horizontal läuft. Die schmale Öffnung, durch welche das Licht einfällt, muß genau vertikal stehen usw.“

## 2.23.2. Schulexperiment zu den Fraunhoferschen Linien

### Zu Variante a

1. Spektralapparat
2. ebener Spiegel mit Stiel
3. transparenter Schirm

### Zu Variante b

Geräte 2. und 3., außerdem

4. optische Bank mit Schwenkarm
5. stellbarer Spalt
6. Linse ( $f = +250 \text{ mm}$ )
7. Linse ( $f = +200 \text{ mm}$ )
8. Linse ( $f = +100 \text{ mm}$ )
9. Linse ( $f = -200 \text{ mm}$ )
10. Hohlspiegel
11. Flintglasprisma ( $60^\circ$ )
12. Prismenstisch
13. Hohlprisma mit Schwefelwasserstoff
14. 7 Klemmreiter

### Variante a

Nach Entfernung des Prismas aus dem Spektralapparat wird das Fernrohr auf *Unendlich* eingestellt. Danach bringt man die Achsen von Kollimatorrohr und Fernrohr parallel zueinander. Der Spalt des Kollimatorrohres wird so weit aus dem Rohr herausgezogen, bis der durch das Fernrohr Blickende diesen scharf erkennt. Das Prisma wird wieder eingesetzt. Nun richtet man das Kollimatorrohr in Richtung der Sonne. Vor dem Spalt ordnet man in Höhe der optischen Achse den Planspiegel drehbar an, so daß der das Sonnenlicht in die optische Achse des Kollimators lenkt. Um Schädigungen des Auges durch zu helles Licht zu vermeiden, wird der Spalt so eng wie möglich eingestellt oder zwischen Spiegel und Spalt der transparente Schirm gestellt. Man beobachtet ein kontinuierliches Spektrum, das von einer Reihe dunkler Linien durchzogen ist.

### Variante b

Der Aufbau der Experimentieranordnung erfolgt nach Abbildung 2.23.2./1. Das Kollimatorteil, bestehend aus dem verstellbaren Parallelschlitz und der Sammellinse ( $f = +250 \text{ mm}$ ), wird auf dem kürzeren Teil der optischen Bank angeordnet. Der Abstand Spalt — Linse beträgt etwa  $250 \text{ mm}$ . Die Linse steht so nahe wie möglich am Prismenstisch. Dieser befindet sich über der Schwenkvorrichtung. Das Fernrohr besteht aus einer Linsenkomination ( $f = +200 \text{ mm}$ ;  $f = -250 \text{ mm}$ ) als Objektiv und der Okularlinse ( $f = +100 \text{ mm}$ ). Am Ende der längeren Schiene der optischen Bank steht der Schirm. Der Abstand Objektiv — Okular wird so gewählt, daß auf dem Schirm ein maximal großes Spektrum entsteht. Das Objektiv steht etwa  $80 \text{ mm}$  vom Prisma entfernt. Das Prisma wird in die Stellung der minimalen Ablenkung gebracht. Damit auf dem Schirm ein lichtstarkes, scharfes Spektrum entstehen kann, muß der Spalt des Kollimators durch den Hohlspiegel gut ausgeleuchtet werden.

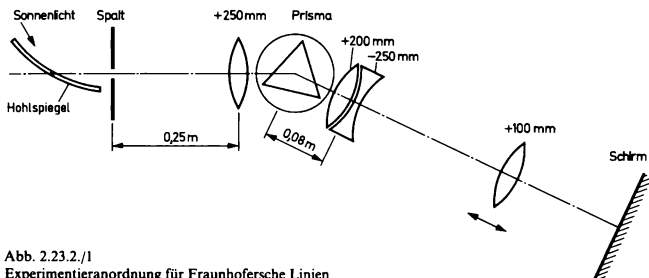


Abb. 2.23.2./1  
Experimentieranordnung für Fraunhofersche Linien

### Bemerkung

Anstelle des Schirmes kann eine subjektive Beobachtung treten. Mit einer Linse ( $f = +50$  mm), die als Lupe genutzt wird, wird das reelle Bild in der Ebene des Schirmes beobachtet.

## 2.23.3. Historisches Experiment zur Umkehr der Natriumlinien

Die experimentelle Spektralanalyse wurde von einem Chemiker, Robert Wilhelm Bunsen, und von einem Physiker, Gustav Kirchhoff, entwickelt. In den Jahren 1860 und 1861 veröffentlichten sie zwei Teile einer Gemeinschaftsarbeit mit dem Titel: „Chemische Analyse durch Spektralbeobachtungen“, in deren beiden Teilen je eine Experimentieranordnung beschrieben ist. Zum Anliegen der Spektralanalyse heißt es: „Es ist bekannt, daß manche Substanzen die Eigenschaft haben, wenn sie in eine Flamme gebracht werden, in dem Spektrum derselben gewisse helle Linien hervortreten zu lassen. Man kann auf diese Linien eine Methode der qualitativen Analyse gründen, welche das Gebiet der chemischen Reaktionen erheblich erweitert und zur Lösung bisher unzugänglicher Probleme führt. . . . Die erwähnten Linien zeigen sich um so deutlicher, je höher die Temperatur und je geringer die eigene Leuchtkraft der Flamme ist.“

Die zweite Experimentieranordnung wird in folgender Weise beschrieben: „Bei der Untersuchung und Messung haben wir uns eines vervollkommenen Apparates bedient, der in allen Fällen beim Gebrauch erhebliche Vorzüge vor dem in unserer ersten Abhandlung beschriebenen darbietet. Außer dem, daß er bequemer zu handhaben ist, hellere und schärfere Bilder gewährt, erlaubt er die Spektren zweier Lichtquellen auf das Schärfste miteinander zu vergleichen und zeigt gleichzeitig mit den Spektren eine leicht übersichtliche, mit Ziffern versehene Skale.“

Der Apparat ist in Figur (6) abgebildet. Auf das obere Ende des gußeisernen Fußes F ist eine Messingplatte geschraubt, die das Flintglasprisma P von  $60^\circ$  brechendem Winkel und das Rohr A trägt, welches an dem dem Prisma zugewendeten Ende durch eine Sammellinse, an dem anderen durch eine Platte verschlossen ist, die mit einem vertikalen Spalt versehen ist. An dem Fuße sind weitere zwei Arme so befestigt, daß sie um eine Achse drehbar sind, von denen der eine das Fernrohr B von achtfacher

Vergrößerung, der andere das Rohr C hält; in dem dem Prisma zugekehrten Ende dieses Rohres befindet sich eine Sammellinse, in dem anderen eine Skale, die durch Reflexion an der vorderen Prismafäche sich dem durch das Fernrohr blickenden Beobachter zeigt . . .

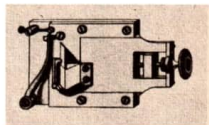
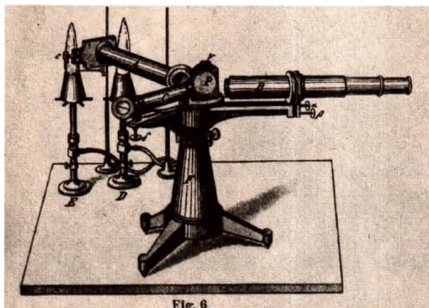


Abb. 2.23.3./1

a) Fig. 6. Spekttralapparat.

b) Spalt (vergrößerter Maßstab)

Von dem Spalt, der in Figur (7) in vergrößertem Maßstab dargestellt ist, ist nur die obere Hälfte frei; die untere ist gedeckt durch ein kleines, gleichseitiges Glasprisma, das durch totale Reflexion die Strahlen der Lichtquelle D durch den Spalt sendet, während die Strahlen der Lichtquelle E frei durch die obere Hälfte desselben treten. Bei dieser Anordnung erblickt der Beobachter von den Spektren der beiden Lichtquellen das eine unmittelbar über dem anderen und urteilt mit Leichtigkeit über die Übereinstimmung oder Verschiedenheit ihrer Linien.“

Kirchhoff gibt in seiner Abhandlung „Über die Fraunhofer'schen Linien“ eine Beschreibung der Versuchsdurchführung: „Fraunhofer hat bemerkt, daß in dem Spektrum einer Kerzenflamme zwei helle Linien auftreten, die mit den beiden dunklen Linien D des Sonnen-Spektrums zusammenfallen. Dieselben hellen Linien erhält man lichtstärker von einer Flamme, in die man Kochsalz gebracht hat. Ich entwarf ein Sonnenspektrum und ließ dabei die Sonnenstrahlen, bevor sie auf den Spalt fielen, durch eine kräftige Kochsalzflamme gehen. War das Sonnenlicht hinreichend gedämpft, so erschienen an Stelle der beiden dunklen Linien D zwei helle Linien; überstieg die Intensität jenes aber eine gewisse Grenze, so zeigten sich die beiden dunklen Linien D in größerer Deutlichkeit, als ohne die Anwesenheit der Kochsalzflamme.“

## 2.23.4. Schulexperiment zur Umkehr der Natriumlinien

1. Spekttralapparat
2. ebener Spiegel mit Stiel
3. Bunsenbrenner mit Schlitzaufsatz und Auflage
4. Optikleuchte (12 V; 50 W)
5. Linse ( $f = + 50 \text{ mm}$ )
6. Kreisblende ( $\varnothing 5 \text{ mm}$ )
7. Kochsalz (5 g)
8. optische Bank (50 cm)
9. 3 große Klemmreiter
10. Stromversorgungsgerät (12 V; 4 A)



### Experiment

Zuerst wird das Prisma vom Spektralapparat entfernt. Danach stellt man das Fernrohr auf einen weit entfernten Gegenstand ein. Nun bringt man das Kollimatorrohr und das Fernrohr mit ihren Achsen in Übereinstimmung. Der Spalt wird soweit aus dem Kollimatorrohr herausgezogen, daß er dem durch das Fernrohr Schauenden deutlich erscheint. Jetzt wird das Prisma wieder eingesetzt. Richtet man nun das Kollimatorrohr auf einen leuchtenden Gegenstand, so sieht man dessen Spektrum in der unteren Hälfte des Fernrohrs, wenn man dieses durch seitliches Schwenken in den Strahlengang des gebrochenen Lichtbündels gebracht hat. Vor das Skalenrohr stellt man die Lampe mit Kondensor und Kreisblende. Das Skalenrohr wird so justiert, daß das die Skale abbildende Lichtbündel an der dem Fernrohr zugewandten Fläche des Prismas reflektiert und im Fernrohr sichtbar wird. Über den ebenen Spiegel wird Sonnenlicht auf den Spalt des Kollimatorrohrs gelenkt. Der Spalt wird so verengt, daß ein deutliches Spektrum der Sonne beobachtet werden kann. Zwischen Spiegel und Spalt stellt man die durch Kochsalz gelb gefärbte Flamme. Bei kräftiger Flamme erscheint die vorher dunkle Linie im gelben Bereich des Sonnenspektrums intensiv gelb, bei starker Sonnenstrahlung tritt sie dagegen noch dunkler auf als ohne Flamme.

## 2.24. Radioaktivität

1895 hatte Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt, daß eine völlig neue Art von Strahlung entsteht, wenn Katodenstrahlen auf die Glaswandung der Vakuumröhre treffen. Nachdem diese Entdeckung bekannt geworden war, suchten viele Physiker nach einem Zusammenhang zwischen Fluoreszenz und X-Strahlen. In kühner Verallgemeinerung formulierte der Präsident der französischen Akademie der Wissenschaften, Henri Poincaré, daß immer dann, wenn Strahlung auf einen mineralischen Stoff trifft, von diesem eine neue Strahlung ausgeht. Angeregt durch diese Aussage, führte Henry Becquerel (1852 bis 1908) Experimente mit verschiedenen Mineralien durch. Als primäre Strahlung benutzte er Sonnenlicht.

„Von allen phosphoreszierenden Materialien schienen Uransalze besonders geeignet für die Untersuchung ... Ich legte Stücken von Urankaliumsulfat auf fotografische Platten, die in schwarzes Papier eingewickelt waren und exponierte sie für einige Stunden mit Licht. Bei der Entwicklung der Platte fand ich, daß das Uransalz Strahlung emittiert hatte ... Unter diesen Bedingungen konnte die Erscheinung als Transformation solarer Energie, ähnlich der Phosphoreszenz, gedeutet werden, aber ich bemerkte bald, daß die Emission unabhängig von einer äußeren Quelle, etwa Licht, Elektrizität oder Wärme war. Wir sahen uns einem spontanen Phänomen völlig neuer Art gegenüber.“

Mit diesen Sätzen leitete Becquerel im Dezember 1903 in seinem Nobelvortrag die Beschreibung seiner Entdeckung und Erforschung der Radioaktivität ein. Er machte seine fundamentale Entdeckung 1896, nachdem er sich vorher mit Fragen der Optik und besonders der Phosphoreszenz beschäftigt hatte. Er war seit 1892 Professor für Physik am naturhistorischen Museum in Paris, und war somit Inhaber einer Professur, die vor ihm sein Großvater und sein Vater und nach ihm sein Sohn innehatten. Noch im Jahre der Entdeckung der „Uranstrahlen“ untersuchte H. Becquerel die weiteren Wirkungen dieser Strahlen. Er stellte ihre Fähigkeit fest, alle Stoffe zu durchdringen und elektrische Körper zu entladen. Er fand, daß unter ihrem Einfluß Gase elektrisch

leitfähig werden und daß das Uran und seine Verbindungen fast unabhängig von der Zeit strahlen.

Erst 1898 widmete sich eine größere Anzahl von Physikern der Erforschung der „*Becquerelstrahlen*“, nachdem zwei weitere strahlende Elemente, nämlich das Thorium durch Carl Schmidt und Marie Curie und das Polonium durch Marie Curie, entdeckt worden waren. 1899 unterschied Ernest Rutherford die Alpha- und die Betastrahlung, 1900 fand Paul Villard die Gammastrahlung.

Ganz wesentliche Erkenntnisse über die Natur der Kernstrahlung gewann man aus der Untersuchung des Verhaltens der Strahlungen im Magnetfeld. Dazu sagte Becquerel in seinem Nobelvortrag: „Gegen Ende des Jahres 1899 beobachteten zuerst Giesel und dann Meyer und von Schweidler, daß die Strahlung aktiver Präparate in einem magnetischen Feld abgelenkt wird. Zur gleichen Zeit beobachtete ich in Unkenntnis dieser Experimente das Gleiche im Falle der Radiumstrahlung.“ Interessant ist hier, daß zunächst untersucht wurde, ob das Magnetfeld das Emissionsvermögen oder die Strahlung selbst beeinflusste. Durch relativ einfache Experimente konnte die erste Möglichkeit ausgeschlossen werden.

Mit der Entdeckung der Radioaktivität wurde ein völlig neues Forschungsgebiet eröffnet, das immer mehr in den Mittelpunkt des Interesses rückte und fast alle Gebiete der Physik und alle anderen Naturwissenschaften und die Medizin beeinflusste. So wurde z. B. dadurch die Richtigkeit der von Joseph John Thomson aufgestellten Hypothese vom korpuskularen Charakter der elektrischen Ladung bestätigt.

Die Forschung nach den Ursachen der Radioaktivität führte zu immer genaueren Vorstellungen vom Aufbau des Atoms. So, wie durch die Untersuchung der optischen Spektren wichtige Erkenntnisse über den Aufbau der Atomhülle gewonnen wurden, führte die Untersuchung der Kernstrahlung zu wichtigen Informationen über den Aufbau der Atomkerne. Aber nicht nur im Mikrokosmos taten sich neue Dimensionen auf. Auch viele Vorgänge im Makrokosmos wurden erklärbar, z. B. der Energiehaushalt der Fixsterne. Tieferes Eindringen in das Wesen der statistischen Gesetze, ganz neue Verfahren der Chemie sowie völlig neue Forschungsmethoden und technische Verfahren wurden möglich. Man denke nur an die Altersbestimmung von Fossilien, die Polymerisation und die Kernumwandlungen.

Die praktische Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse berührte immer weitere Kreise des menschlichen Lebens und versprach unabsehbaren Nutzen. Die endgültige Sicherung des Energiebedarfs und weitreichende medizinische Anwendungen seien als Beispiele genannt. Es ist damit auch in die Hände der Menschen gegeben, selbst über den Fortbestand höherentwickelter Lebewesen auf der Erde zu bestimmen.

### 2.24.1. Historisches Experiment von Becquerel zur Radioaktivität

Im Ergebnis von Untersuchungen zur Phosphoreszenz von Uransalzen machte H. Becquerel zufällig eine Entdeckung, die er so beschrieb: „Unter den durchgeführten Experimenten wurden einige am Mittwoch 26. 2. und Donnerstag 27. 2. vorbereitet. An diesen Tagen zeigte sich die Sonne nur mäßig. Ich hatte die Experimente vorbereitet und bewahrte sie in einem Schubfach auf, wo sich auch die Uransalze befanden. Die Sonne zeigte sich die nächsten Tage nicht und ich entwickelte die Platten am 1. März in der Erwartung, sehr schwache Bilder zu finden. Aber die Umrisse zeigten sich im Gegenteil mit großer Intensität. Ich dachte sofort, daß dies im Dunkeln statt-

gefunden haben müsse und plante folgendes Experiment: Auf den Grund einer dichten Pappschachtel legte ich eine Fotoplatte und auf deren empfindliche Seite ein Stück gewölbtes Uransalz, das die Platte nur an einigen Stellen berührte. Daneben legte ich ein anderes Stück Uransalz, das von der Fotoplatte durch eine Glasplatte getrennt war. Dies alles fand in einem dunklen Zimmer statt. Die Schachtel wurde geschlossen, in einen zweiten Pappkarton und dann in ein Schubfach gelegt. Ich arbeitete weiter mit einem Rahmen, der durch eine Aluminiumplatte bedeckt wurde. Darin lag eine Fotoplatte und außerhalb ein Plättchen aus Uransalz. Das Ganze wurde in einen Pappkarton und in ein Schubfach gelegt.

Nach fünf Stunden wurden die Platten entwickelt und die Umrissse der Salze zeigten sich in schwarz, genau wie in den vorherigen Experimenten und als sie nach Bestrahlung durch Licht phosphoreszierten. Die Wirkung des Salzes, das auf der Glasplatte lag, war ein wenig schwächer, aber die Form des Salzes war gut erkennbar. Schließlich war die Wirkung durch die Aluminiumplatte noch schwächer, aber trotzdem sehr klar.

Es scheint einleuchtend, daß diese Phänomene nicht den Lichtstrahlen zugeordnet werden können, die durch Phosphoreszenz ausgesandt werden, da sie bereits nach  $\frac{1}{100}$  Sekunde so schwach geworden sind, daß man sie nicht mehr nachweisen kann. Eine sich ganz natürlich aufdrängende Hypothese ist: wir nehmen an, daß diese Strahlen, deren Wirkungen eine große Ähnlichkeit mit den Wirkungen der durch die Herren Lenard und Röntgen untersuchten Strahlen haben, unsichtbare Strahlen sind, die durch Phosphoreszenz emittiert werden, wobei die Abstrahlungsdauer unendlich viel größer ist als die Abstrahlungsdauer der Lichtstrahlen, die durch diese Körper ausgesandt werden.“ Weiter schreibt er: „Die Experimente, die ich gegenwärtig verfolge, können, so hoffe ich, einige Klärung über diese neue Art von Phänomenen bringen.“ Bei einem späteren Experiment legte Becquerel eine Metallplakette zwischen Strahler und Fotoplatte. Das Ergebnis zeigt Abbildung 2.24.1./1.

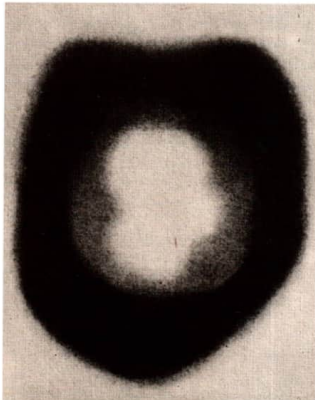


Abb. 2.24.1./1

Radiogramm einer Metallplakette von Becquerel

## 2.24.2. Schulexperiment zur Radioaktivität

1. Radioaktiver Strahler mit Alpha-, Beta- und Gammastrahlung (z. B. Nebelkammerstrahlungsquelle Pb-210)
2. Schwarz-weiß-Negativfilm 20 DIN (24 mm × 36 mm)
3. lichtundurchlässiges Papier
4. lichtdichter Kasten
5. lichtundurchlässiges, schwarzes Tuch (1 m lang; 1 m breit)
6. Entwicklerdose
7. Entwickler
8. Fixiersalz
9. Diaprojektor

### Methodische Hinweise

1. Die Aktivität des Strahlers und die Empfindlichkeit des Filmes sind so aufeinander abgestimmt, daß es möglich ist, das Experiment in einer Unterrichtsstunde durchzuführen.
2. Der entwickelte Film wird den Schülern mit dem Diaprojektor gezeigt.

### Experiment

Vor der Unterrichtsstunde schneidet man in einer Dunkelkammer von einem unbelichteten Film ein etwa 4 cm langes Stück ab und schlägt es so in Papier ein, daß kein Licht eindringen kann.

Zu Beginn der Unterrichtsstunde legt man den radioaktiven Strahler auf den eingewickelten Film und verbindet beide mit einem Gummi, um eine gegenseitige Verschiebung zu vermeiden. Dieses Päckchen legt man in den lichtdichten Kasten. Die Bestrahlungszeit beträgt etwa 20 Minuten. Während dieser Zeit wird das Entwickeln des Filmes vorbereitet. Die Entwicklerdose wird offen unter das schwarze Tuch gestellt. Auch der Deckel liegt griffbereit.

Nach Ablauf der 20 Minuten nimmt man den Strahler von dem Film, entfernt unter dem schwarzen Tuch die Papierhülle, legt den Film in die Entwicklerdose und verschließt diese. Es ist sorgfältig darauf zu achten, daß kein Licht auf den Film fällt. Das Tuch wird entfernt. Der Film wird entsprechend den Vorschriften entwickelt, kurz zwischengewässert und fixiert.

Als Ergebnis sieht man einen schwarzen Fleck auf dem Film. Der Fleck hat die Form des radioaktiven Strahlers. Abbildung 2.24.2./1 zeigt die Kopie einer solchen Aufnahme.

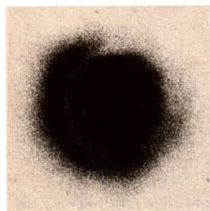


Abb. 2.24.2./1  
Radiogramm eines radioaktiven Strahlers

*Bemerkungen*

1. Steht ein stärkerer Strahler zur Verfügung, genügt eine kürzere Bestrahlungszeit.
2. Man achte darauf, daß zwischen Strahler und Film keine Papierkante liegt.
3. Das Papier zum Einpacken des Filmes sollte nicht zu dick sein, um unnötige Absorption zu vermeiden.

### 2.24.3. Historisches Experiment zur Ablenkung von Betastrahlung im Magnetfeld

Stefan Meyer und Egon R. von Schweidler untersuchten experimentell das Verhalten von Radium und Polonium im magnetischen Feld. Dabei fanden sie, daß „sich die entladende Wirkung des Radiums auf elektrisierte Körper im magnetischen Feld als sehr geschwächt erwies“. So maßen sie z. B. unter Verwendung eines Magnetfeldes von 1,7 Tesla eine Zunahme der Entladungsdauer auf das Sechsfache.

In einem weiteren Bericht schreiben sie dann: „Wir haben in unserer ersten Mitteilung die Frage offengelassen, ob das magnetische Feld auf das Emissionsvermögen von Radium wirkt oder die Strahlen ablenkt. In Übereinstimmung mit einigen uns inzwischen brieflich mitgeteilten Resultaten der Herren Giesel, Elster und Geitel haben wir das letztere nunmehr konstatiert.“ Das darüber entscheidende Experiment beschreiben sie so: „Ein in Papier gewickeltes Radiumbariumchlorid-Präparat erscheint im Dunkeln infolge der Fluoreszenz des Papiers leuchtend. Im magnetischen Feld wird die Intensität des Leuchtens nicht merklich verändert, hingegen verschwindet beim Erregen unseres Feldes die Fluoreszenz auf einem einige Centimeter davor befindlichen Bariumplatincyanur-Schirm vollständig.“

Befestigt man das Präparat unmittelbar auf der Rückseite des Schirmes, so sieht man im Dunkeln einen scharf begrenzten Fleck von den Dimensionen des Präparates, und zwar in unserem Falle ein Rechteck, dessen Längsseiten parallel der Verbindungslinie der Magnetpole liegen. Bringt man nun den Schirm in ein magnetisches Feld, so tritt beim Erregen desselben in der Umgebung eine Aufhellung ein in Form von zwei breiten verwaschenen Streifen, die von dem hell leuchtenden Rechteck durch einen dunklen Zwischenraum getrennt sind (Fig. 2.). Je stärker das Feld, desto schmaler wird der dunkle Raum.

Ein Bleiklotz, der an der Unterseite des Schirmes unter (1) gelegt wird, ändert die Lichterscheinung nicht, unter (2) gebracht, wirft er einen deutlichen Schatten. Es

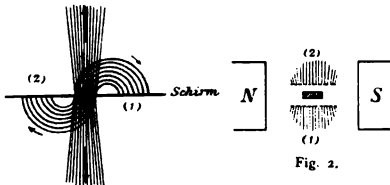


Fig. 1.

Fig. 2.

Abb. 2.24.3./1  
Darstellung der Ablenkung  
der Betastrahlung im Magnetfeld

werden also die durch die beiden Seiten des das Präparat umschließenden Papiercouvertens ursprünglich annähernd senkrecht nach oben und unten austretenden Strahlen im Feld umgebogen (Fig. 1.), und zwar ist der Sinn der Krümmung derselbe wie der eines biegsamen Stromleiters, in dem ein *negativer* Strom im Sinne der Strahlen fließt. Die Strahlen verhalten sich also ganz analog wie Kathodenstrahlen.“ Weitere Untersuchungen bei geänderter Feldrichtung bestätigten die getroffenen Aussagen. Auch die Untersuchung der Strahlung des Poloniums führte zu gleichen Ergebnissen.



## 2.24.4. Schulexperiment zur Ablenkung von Betastrahlung im Magnetfeld

1. Radioaktiver Strahler mit Betastrahlung (z. B. Nebelkammerstrahlungsquelle Pb-210)
2. 2 rechteckige, starke Keramikmagnete (etwa 7 cm lang; etwa 7 cm breit, etwa 1 cm dick)
3. Schwarz-weiß-Negativfilm 27 DIN (24 × 36)
4. lichtundurchlässiges Papier
5. 4 kleine Holzklötzchen (etwa 1 cm lang; etwa 1 cm breit; 0,5 cm dick)
6. Entwicklerdose
7. Entwickler
8. Fixiersalz
9. Diaprojektor

### Methodische Hinweise

1. Die Aktivität des Strahlers und die Empfindlichkeit des Filmes ermöglichen nicht die Durchführung des Experimentes in einer Unterrichtsstunde.
2. Vergl. MH Nr. 2 zu 2.24.2.!

### Experiment

Der experimentelle Aufbau erfolgt gemäß Abbildung 2.24.4./1.

Zwischen die beiden Magnete legt man an die Ecken kleine Holzklötzchen. Der Abstand der Magnete soll möglichst klein sein, aber trotzdem einen möglichst großen Teil der Strahlung in den Zwischenraum gelangen lassen. Die Anziehungskraft der Magnete ist so groß, daß ihre gegenseitige Lage stabil bleibt.

Von einem unbelichteten Film wird in der Dunkelkammer ein etwa 6 cm langes Stück abgeschnitten und lichtdicht in Papier eingepackt. Dieser Filmstreifen wird auf den

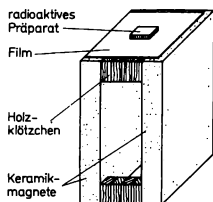


Abb. 2.24.4./1  
Experimenteller Aufbau zur Ablenkung der Betastrahlung im Magnetfeld

Spalt zwischen den Magneten gelegt, und zwar so, daß die Emulsion den Magneten zugewandt ist. Der Strahler wird so über dem Film befestigt, daß die Strahlung durch ihn hindurch in den Spalt zwischen den Magneten gelangt. Die durch das Magnetfeld abgelenkte Betastrahlung soll auf den Film fallen.

Diese Anordnung läßt man etwa 2 Tage stehen, wobei dafür zu sorgen ist, daß keine Verschiebung zwischen Strahler, Film und Magneten möglich ist. Danach wird der Film entwickelt, fixiert und gewässert.

Abbildung 2.24.4./2. zeigt eine mit dieser Anordnung gewonnene Aufnahme. Neben dem dunklen Fleck, der ein Ergebnis der direkten Bestrahlung durch den Strahler ist, sieht man einen grauen Streifen. Dieser zeigt die Wirkung der im Magnetfeld abgelenkten Betastrahlung. Es ist zu erkennen, daß das Energiespektrum kontinuierlich ist, aber keine lineare Intensitätsverteilung hat.

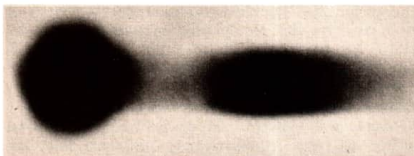


Abb. 2.24.4./2.  
Radiogramm im Magnetfeld  
abgelenkter Betastrahlung

#### *Bemerkungen*

1. Die Papierkanten müssen unbedingt am Rande des Filmes liegen.
2. Vergl. Bem. 1 zu 2.24.2.!

## 2.25. Nachweismethoden für Kernstrahlung

Es ist sicher kein Zufall, daß die Strahlung radioaktiver Stoffe gerade mit der Fotoplatte entdeckt wurde; hatte sich doch die fotografische Methode bereits zum Nachweis der Röntgenstrahlung bewährt.

Auch die längst bekannte Fluoreszenz bestimmter Materialien erwies sich bald als geeigneter Indikator für die „Uranstrahlen“. Und schließlich wurde die Entladung eines Kondensators unter dem Einfluß der Strahlung zu deren Nachweis genutzt.

In der Folge zeigte sich, daß Fortschritte in der Kernphysik vor allem dann erzielt wurden, wenn Nachweisverfahren neu entdeckt oder weiterentwickelt wurden. Zählrohre zur genauen Registrierung aller Strahlenarten, Szintillationszähler für Energiemessungen, Kernspurplatten zur Analyse einzelner Kernreaktionen und Blaskammern zur Untersuchung hochenergetischer Teilchen sind Beispiele dafür. Dabei fällt es nicht schwer, in diesen modernen und teilweise hochkomplizierten Geräten die um die Jahrhundertwende entwickelten einfachen Prinzipien wiederzuerkennen.

Bereits in dem 1913 erschienenen „*Handbuch der Radiologie*“ von Ernest Rutherford (1871 bis 1937) werden 3 Methoden beschrieben, die zur Untersuchung der Strahlung radioaktiver Körper verwendet wurden:

1. Die Wirkung der Strahlung auf eine fotografische Platte,
2. die ionisierende Wirkung der Strahlung auf das umgebende Gas und

3. das Aufleuchten, das von der Strahlung auf einem Schirm von Bariumplatinzyanur, Zinksulfid oder ähnlichen Substanzen erzeugt wird.

1896 beobachtete Henry Becquerel (1852 bis 1908) bei Experimenten zur Fluoreszenz an Uransalzen die Schwärzung einer Fotoplatte. Das war nur durch die Annahme einer neuen Strahlungsart zu erklären (2.24.1.). Da die Technik der Fotoplatten schon gut bekannt war, auch durch die Untersuchung der Röntgenstrahlung, wurden mit diesem Nachweisverfahren sehr bald einige Eigenschaften der neuen Strahlung entdeckt.

Im gleichen Jahr beobachtete Becquerel die ionisierende Wirkung der Kernstrahlung. Er fand, daß die Entladung eines geladenen Elektroskops mit der Strahlung der Uransalze im Zusammenhang stand. Elektroskope, die normalerweise ihre Ladung unverändert über Monate hielten, verloren diese bei Bestrahlung in Stunden oder Minuten. Da die Entladungszeit mit der Stärke der Strahlung korrelierte, konnte man diesen Zusammenhang als weiteres Meßverfahren nutzen. Diese elektrostatische Nachweismethode für Strahlung wurde von vielen Klassikern der Kernphysik angewendet. Genannt seien hier nur Marie Curie (1867 bis 1934) und Pierre Curie (1859 bis 1906) sowie Ernest Rutherford. Erstaunlich sind die Vielfalt und die Genauigkeit der Erkenntnisse, die mit diesen Verfahren erreicht wurden.

Im Jahre 1903 machten Sir William Crookes (1832 bis 1919) und unabhängig davon Julius Elster (1854 bis 1920) und Hans Geitel (1855 bis 1923) die Beobachtung, daß das Lumineszenzlicht von Leuchtstoffen, die einer Alphastrahlung ausgesetzt sind, aus einzelnen Lichtblitzen besteht. Jeder Lichtblitz ist dem Auftreffen eines Alphateilchens zuzuschreiben. Diese Tatsache ist in der Rutherford'schen Schule dazu benutzt worden, eine visuelle Methode zur Zählung einzelner Alphateilchen zu schaffen (*Spinthariskop*). Zwei fundamentale Entdeckungen wurden mit dieser Methode gemacht, allerdings mit persönlichem Risiko, da starker Kaffee und Strychnin zur Sensibilisierung der Augen verwendet wurden: 1908/09 beobachtete Rutherford die Streuung von Alphateilchen um große Winkel, die nur unter der Annahme zu erklären waren, „daß im Inneren des Atoms sehr intensive elektrische oder magnetische Felder vorhanden seien. Für die Berechnung dieser Resultate ergab es sich als notwendig, anzunehmen, daß das Atom aus einem geladenen massiven Kern bestehe, dessen Dimension im Vergleich mit der gewöhnlich angenommenen Größe des Atomdurchmessers sehr klein sind.“ Geradezu sensationell war seine 1919 mit der Szintillationsmethode gemachte Entdeckung der künstlichen Kernumwandlung.

Als „das originellste und wunderbarste Instrument in der Geschichte der Wissenschaft“ bezeichnete Rutherford die 1911 von Charles Wilson (1869 bis 1959) erfundene Nebelkammer. Grundlage dieser Erfindung war die Erkenntnis, daß Staubteilchen als Kondensationskerne für Nebeltröpfchen dienen. Davon ausgehend, fand Wilson 1897, daß Ionen die gleiche Rolle spielen können wie die Staubteilchen. Die Wirkung besteht darin, daß sich entlang der Bahnen der Kernstrahlen Ionenpaare bilden, die unter bestimmten Bedingungen als Kondensationskerne für Nebeltröpfchen dienen. Man beobachtet Spuren, aus denen auf viele Eigenschaften der Strahlung, z. B. Art, Energie und Ladung, geschlossen werden kann.

Die Bedeutung der Kernphysik für die Wissenschaft als auch für die menschliche Gesellschaft ist immer noch im Wachsen begriffen. Das gilt auch für ihre Meßverfahren. Denn überall dort, wo Kernstrahlung eingesetzt wird, sind Kontroll- und Sicherheitsmaßnahmen nötig, die auf entsprechenden Meßverfahren beruhen. Besonders deutlich wird dies bei der Messung und Regelung an Kernreaktoren und in der Dosimetrie bei der Strahlentherapie. Aber auch in anderen Bereichen, z. B. der Röntgen- und Höhenstrahlung, bewähren sich die Kernstrahlungsmeßverfahren. Schließlich sei darauf ver-



wiesen, daß auch in der modernen Astronomie einige dieser Verfahren nützlich sind.

### 2.25.1. Historisches Experiment zum elektrostatischen Strahlungsnachweis

„Ich habe kürzlich beobachtet, daß die unsichtbaren Strahlen die Eigenschaft haben, geladene Körper, die dieser Strahlung ausgesetzt werden, zu entladen.“

Mit diesen Worten beginnt die Mitteilung von H. Becquerel über seine am Uran gemachte Entdeckung, die die Grundlage für viele Strahlungsnachweisverfahren bildet. In dem Artikel über sein Experiment heißt es dann weiter: „Es ist bekannt, daß das Elektroskop von Hurmuzescu (Fig. 1), das gegen äußere Influenz durch eine metallische Hülle und gegen ultraviolette Strahlung durch gelbe Gläser geschützt ist, während vieler

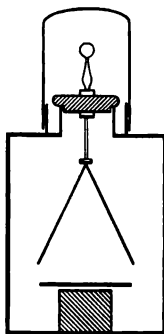


Fig. 1.

Abb. 2.25.1./1

Monate geladen bleibt. Wenn man eines der gelben Gläser des Gehäuses durch ein Aluminiumblech von 0,12 mm Dicke ersetzt und wenn man an dieses Blech von außen ein Scheibchen einer phosphoreszierenden Substanz heftet, kann man beobachten, daß sich die Goldblättchen des Elektroskops nach und nach nähern, was eine langsame Entladung des Apparates anzeigt. Wenn man hinlänglich oft den Abstand der Goldblättchen bei der Wiederannäherung mißt und diese als Funktion der Zeit in Form von Kurven darstellt, so kann man diese Kurven sowohl hinsichtlich der Geschwindigkeit der Entladung für jeden Zeitpunkt als auch hinsichtlich der Dauer der Entladung des Apparates deuten, sofern er jedesmal die gleiche Ladung erhielt.

Ohne daß ich hier alle erhaltenen Zahlen angebe, schließe ich nur, daß unter den beschriebenen Bedingungen eine Ladung, die die Blättchen um 18° spreizt, in



2 Stunden 56 Minuten verschwunden war. Eine wesentlich schnellere Entladung bekommt man, wenn man die strahlenden Substanzen direkt unter den Goldblättchen anbringt, und zwar im Innern des Gehäuses. Ein Scheibchen Uransalz wurde so unter den Goldblättchen angebracht, ... der Abstand zwischen 1 cm und 3 cm variiert. Die Goldblättchen waren um  $12^\circ$  gespreizt, die Dauer der Entladung schwankte zwischen 21 und 25 Minuten bei negativer Ladung und betrug 23 Minuten bei positiver Ladung, bezogen auf eine gleiche Spreizung der Blättchen. Die gleiche Ladung verschwand in 1 Stunde 48 Minuten, wenn das gleiche Scheibchen außerhalb des Aluminiumbleches angebracht wurde.

Es wurde auch zwischen das Uransalzscheibchen und die Goldblättchen ein Aluminiumblech von 2 mm Dicke gebracht. Dann wurde die Entladung viel langsamer. Von dem Moment, wo sich die Goldblättchen  $12^\circ$  spreizten bis zu dem, wo die Spreizung aufgehört hatte, verstrich eine Zeit von 1 Stunde 52 Minuten.

Ich nehme mir vor, die Einzelheiten dieses Phänomens recht bald zu studieren.“



## 2.25.2. Schulexperiment zum elektrostatischen Strahlungsnachweis



### Zu Variante a

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| 1. Wulf-Elektroskop                | 7. transparenter Schirm  |
| 2. 2 Kondensatorplatten            | 8. 2 radioaktive Strahler mit Alphastrahlung<br>(z. B. Nebelkammerstrahlungsquelle Pb-210) |
| 3. 2 Holtzsche Klemmen             | 9. PVC-Reibstab mit Wolltuch   |
| 4. große Optikleuchte (12 V; 50 W) | 10. 4 Klemmreiter  |
| 5. Linse ( $f = +100$ mm)          | 11. Stromversorgungsgerät (12 V; 4 A)  |
| 6. optische Bank (100 cm)          |  |

### Zu Variante b

Geräte 1. bis 11., außerdem

12. Stromversorgungsgerät (400 V —)

### Methodische Hinweise

1. Der Aufbau und die Funktion der Variante a sind einfacher als die der Variante b, der zu beobachtende Effekt ist aber geringer.
2. Der Vorgang bei Variante b hat Ähnlichkeit mit dem Messen des Volumens einer Flüssigkeit über das Zählen von Tropfen.
3. Bei beiden Varianten ist vorher zu zeigen, daß ohne Strahler die bei Bestrahlung erwarteten Erscheinungen nicht auftreten.

### Variante a

Der Aufbau des Experiments geschieht nach Abbildung 2.25.2./1. Von dem geriebenen PVC-Stab bringt man die Ladung auf eine Kondensatorplatte. Das Elektroskop zeigt den Ladungszustand an. Dann läßt man die Alphastrahlung in den Raum zwischen

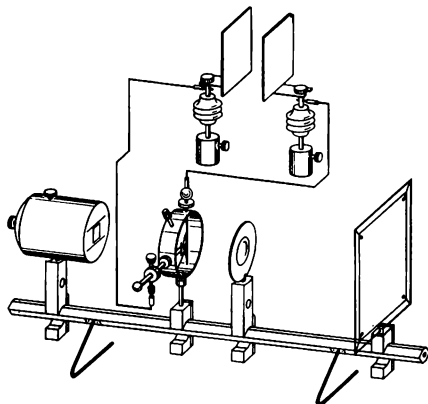


Abb. 2.25.2./1  
Aufbau des Experiments  
zur Entladungsmethode

den Platten eindringen. Die Luft wird ionisiert, und der Kondensator wird langsam entladen. Der Ausschlag des Blättchens im Elektroskop wird geringer.

#### Variante b

Der Aufbau des Experiments geschieht entsprechend der Abbildung 2.25.2./2. Verwendet wird hier das sogenannte *Tropfverfahren*. Wie bei Variante a wird der Raum zwischen den Kondensatorplatten mit dem radioaktiven Strahlern bestrahlt. Man

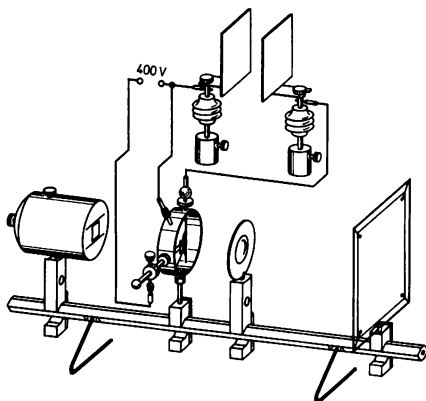


Abb. 2.25.2./2  
Aufbau des Experiments  
zur „Tropfenmethode“

beobachtet im Elektroskop einen wachsenden Ausschlag und schließlich ein Anspringen des Bändchens an die Influenzplatte. Das Bändchen wird entladen und springt zurück. Darauf beginnt der Vorgang von neuem.

#### Bemerkungen

1. Je mehr Strahler benutzt werden, desto schneller entladen sich die Kondensatorplatten. Bei Variante a braucht man mindestens zwei der genannten Strahler, um für die Schüler deutliche Ergebnisse zu erzielen.
2. Die Zeit für einen Zyklus (*Tropfen*) ist in weiten Grenzen — wenige Sekunden bis Minuten — veränderlich. Sie hängt von der Intensität der Strahlung ab. Auch der ursprüngliche Abstand zwischen Bändchen und Influenzplatte hat Einfluß auf die Dauer eines Zyklus.

### 2.25.3. Historisches Experiment zur Szintillationsmethode

„Über die durch die radioaktive Emanation erregte szintillierende Phosphoreszenz der Sidot-Blende“ ist der Titel eines Artikels von Elster und Geitel, der in der Physikalischen Zeitschrift vom 27. 3. 1903 erschien. Dort schreiben die Autoren:

„In einer englischen Tageszeitung wurde vor einigen Tagen ein Bericht über eine am 19. März der Royal Society von Herrn Crookes vorgelegte Abhandlung, betitelt ‚The Emanations of Radium‘ bekanntgegeben, die sich auf die durch die Emanation radioaktiver Substanzen auf einem Schirm von Sidot-Blende erzeugte eigentümliche Art von Phosphoreszenz bezieht. Wir haben die von Crookes beschriebene Erscheinung schon vor einiger Zeit bei Gelegenheit von Versuchen bemerkt, die wir in der Absicht angestellt hatten, mittels der in der Erdbodenluft enthaltenen aktiven Emanation deutliche Phosphoreszenz hervorzurufen und beabsichtigten sie demnächst zu beschreiben.“

Zur Beschreibung des Experimentes heißt es: „Brachten wir in einen etwa  $1\frac{1}{2}$  Kubikmeter großen dunklen Raum, der radioaktive Emanation von Erdbodenluft enthielt, einen isolierten Schirm aus Sidot-Blende, der zuvor mehrere Tage lang im Dunkeln aufbewahrt war und hielten wir diesen etwa 2 Stunden lang auf einem negativen Potential von 2000 Volt, so wurde er leuchtend. Bei genauerer Prüfung des Schirmes im Dunkeln mit ganz ausgeruhtem Auge ergab sich die auffallende Tatsache, daß der Schirm nicht gleichmäßig erhellt war, sondern daß die Lichtintensität der einzelnen Partien der leuchtenden Fläche einem steten Wechsel unterworfen war. Betrachtet man einen in dieser Weise leuchtenden Schirm durch eine Lupe, so bemerkt man, daß das Flimmern des Schirmes durch ein Gewimmel diskreter leuchtender Pünktchen bewirkt wird, von denen jedes nur momentan aufblitzt.“

Bei Betrachtung der leuchtenden Fläche mittels eines Vergrößerungsglases gewinnt man, wie es auch in der Schilderung des Crookeschen Versuches ausgesprochen ist, ganz den Eindruck, als schaue man durch ein Teleskop nach einem Sternhaufen, dessen einzelne Sterne aufblitzen, um sofort wieder in dem schwarzen Hintergrunde zu verschwinden.

Bei Verwendung des ‚Emanationskörpers‘ war das szintillierende Leuchten des Schirmes auch in nicht ganz abgedunkelten Räumen sichtbar und der Anblick, den der Schirm durch eine Lupe gewährte, noch überraschender; auch ließ sich leicht feststellen, daß dies Phosphoreszenzlicht durch Einwirkung des roten Lichtes nicht gelöscht wird.

Legte man den in Papier gehüllten Emanationskörper direkt auf den (unelektrischen) Schirm, so zeigte dieser dieselbe szintillierende Phosphoreszenz.“

In weiteren Experimenten stellte sich heraus, daß jeder einzelne Lichtblitz durch das Auftreffen eines Alphateilchens hervorgerufen wurde. Damit hatte man erstmals die Möglichkeit, die Alphateilchen zu zählen.

## 2.25.4. Schulexperiment zur Szintillationsmethode

1. Lupe
2. Leuchtschirm (z. B. Zinkoxid, mindestens 3 cm × 3 cm)
3. radioaktiver Strahler mit Alphastrahlung (z. B. Nebelkammerstrahlungsquelle Pb-210)
4. dünnes Papier 5 cm × 5 cm

### *Methodischer Hinweis*

Weil eine Beobachtung nur mit der Lupe möglich ist, müssen die Schüler einzeln tätig sein. Der Beobachtungsraum muß völlig abgedunkelt sein, und die notwendige Anpassungszeit des Auges an die Dunkelheit von etwa 10 Minuten ist bei der Planung zu berücksichtigen.

### *Experiment*

Der radioaktive Strahler wird so auf den Leuchtschirm gelegt, daß die Alpha-Strahlung schräg einfällt. Der Raum wird verdunkelt, und man muß warten, bis die Augen adaptiert sind. In der Umgebung des Strahlers ist ein Leuchten des Schirmes zu beobachten. Bei Betrachtung durch die Lupe sieht man neben diesem Fleck einzelne Lichtblitze. Jeder Lichtblitz rührt von einem eingedrungenen Alphateilchen her.

Der radioaktive Strahler wird etwa 1 cm von dem Schirm entfernt. Der Leuchtfleck verschwindet. Man beobachtet nur noch einzelne Lichtblitze.

Um auf Alphastrahlen als Ursache der Szintillationen schließen zu können, bringt man zwischen Strahler und Schirm das dünne Papier. Durch die Absorption verschwinden alle Leuchterscheinungen.

### *Bemerkung*

Als Fertiggerät wird das Spinhartroskop angeboten. Bei dessen Verwendung sind die Anforderungen an die absolute Verdunkelung nicht so hoch. Der insgesamt leuchtende Fleck ist jedoch nicht zu beobachten. Man sieht nur einzelne Lichtblitze.

## 2.25.5. Historisches Experiment zur Wilsonschen Nebelkammer

Wilson beschreibt den Aufbau und die Experimente mit der ersten Nebelkammer, mit der vollständige Alphateilchenspuren sichtbar gemacht werden konnten, so:

„Die wichtigsten Teile des Expansionsapparates sind in Fig. 1. zu sehen. Die zylindrische Nebelkammer A hat einen Durchmesser von 16,5 cm und ist 3,4 cm hoch. Der Deckel, der Boden und die Wände sind aus Glas und auf der Innenseite mit

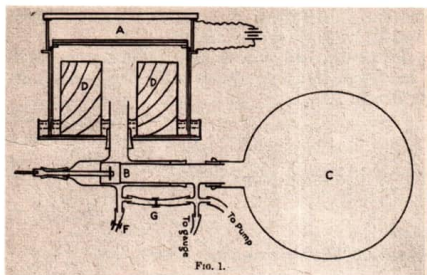


Abb. 2.25.5./1  
Schematischer Aufbau  
der Nebelkammer von Wilson

Gelatine überzogen. Die Gelatine am Boden ist mit wenig chinesischer Tusche geschwärzt. Der ebene Glasboden ist an der Oberseite eines 10 cm hohen und unten offenen dünnwandigen Messingzylinders, dem Kolben, befestigt. Dieser Kolben kann in einem äußeren Messingzylinder gleicher Höhe und mit 16 cm Innendurchmesser, dem Expansionszylinder, frei gleiten. Der Expansionszylinder trägt die Wände der Nebelkammer und ruht auf einer dünnen Schicht von Gummi, die ihrerseits auf einer dicken Messingscheibe liegt. Letztere bildet gleichzeitig den Boden eines flachen Behälters, in dem sich Wasser von ungefähr 2 cm Tiefe befindet. Das Wasser trennt vollständig die Luft in der Nebelkammer von der unter dem Kolben.

Die Expansion wird hervorgerufen durch Öffnen des Ventils B und der damit erreichten Verbindung des Luftraumes unter dem Kolben mit der Vakuumkammer C durch Glasröhren von etwa 2 cm Durchmesser. Infolgedessen senkt sich plötzlich der Boden der Nebelkammer bis zum abrupten Halt beim Berühren der gummibedeckten Grundplatte durch den Kolben. Um das Volumen der bei jeder Expansion durch die Verbindungsröhre strömenden Luft zu verringern, wurde der Holzzylinder D innerhalb des Luftraumes unter dem Kolben angebracht. Das Ventil wird durch das Fallen eines Gewichtes W geöffnet, das seinerseits durch eine Auslösevorrichtung T freigegeben wird (Fig. 3.).“

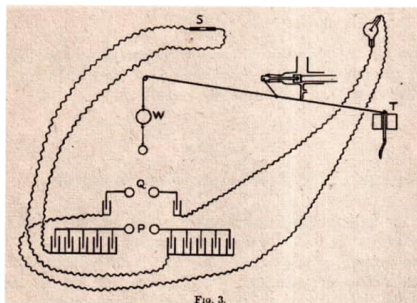


Abb. 2.25.5./2  
Schematische Darstellung  
des Auslösemechanismus

Es wird nun ausführlich beschrieben, wie mittels der Hähne F und G das Expansionsverhältnis festgelegt werden kann. Zur weiteren Montage der Nebelkammer heißt es: „Beim Aufstellen des Apparates wird der Kolben auf die gummibedeckte Grundplatte gestellt und der Expansionszylinder darübergeschoben. Ein Loch an der Seite der Nebelkammer, welches bei diesem Vorgang geöffnet ist, ermöglicht den Austritt der eingeschlossenen Luft. Durch den momentan geöffneten Hahn F wird Luft geblasen, wodurch der Kolben bis zu so einer Höhe gehoben wird, daß die gewünschte Expansion möglich wird. Die Öffnung in der Wand der Nebelkammer wird dann geschlossen und die Menge der eingeschlossenen Luft bleibt während der folgenden Handlungen unverändert.“

Der Aufbau eines nahezu homogenen, vertikalen elektrischen Feldes geschieht über das Anlegen der Pole einer Batterie an einen an den Deckel geklebten Zinnfolienring und an den Boden der Nebelkammer.

Zum Ergebnis des Experiments schreibt Wilson: „Fig. 1 ist eine typische Fotografie des Nebels, den man bei der Expansion erhält, wenn sich eine sehr kleine Menge von Radium, die an der Spitze eines Drahtes angebracht ist, in der Nebelkammer befindet. Eine Potentialdifferenz von 40 Volt wurde zwischen Deckel und Boden angelegt. Ein horizontaler, ungefähr 2 cm hoher Abschnitt der Nebelkammer wurde beleuchtet. Bei der Benutzung dieser Art der Beleuchtung sind die Betastrahlen auf der Fotografie nicht sichtbar. Die schmalen, scharf definierten Strahlen dieser Fotografien sind Nebel, die entlang der Spuren von Alphateilchen, welche nach der Expansion die übersättigte Luft passierten, kondensierten.“ (Abb. 2.25.5, 3)

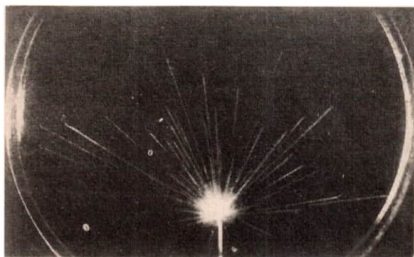


Abb. 2.25.5, 3  
Nebelkammeraufnahme  
von Wilson  
(Fig. 1)



## 2.25.6. Schulexperiment zur Nebelkammer



1. Handluftpumpe mit Teller und Gummipatte
2. Stromversorgungsgerät (400 V )
3. Widerstand (1 M $\Omega$ )
4. Experimentierleuchte mit Glühlampe (6 V; 30 W) und Spannungsquelle
5. Nebelkammer ⑤, dazu erforderliches Material:
  - a) Petrischale ( $\varnothing$  130 mm; 20 mm hoch)
  - b) Kreisscheibe aus Aluminium ( $\varnothing$  120 mm; 1,5 mm dick)
  - c) Kreisscheibe aus schwarzem Velourpapier ( $\varnothing$  120 mm)

- d) Kreisring mit Streifen aus Aluminiumfolie  
( $\varnothing$  außen 125 mm;  $\varnothing$  innen 105 mm; 60 mm  $\times$  20 mm)
- e) Kreisring mit Streifen aus Aluminiumfolie  
( $\varnothing$  außen 100 mm;  $\varnothing$  innen 40 mm; 80 mm  $\times$  20 mm)
- f) 2 Kreisringe aus Filz ( $\varnothing$  außen 120 mm;  $\varnothing$  innen 100 mm; 5 mm dick)
- g) Kreisring aus Gummi ( $\varnothing$  außen 150 mm;  $\varnothing$  innen 100 mm; 2 mm dick)
- h) 2 Meßbuchsen
- i) 2 Plastklemmen (Wäscheklammern) /
- k) 2 Kontaktstreifen aus Aluminiumfolie (10 mm  $\times$  60 mm)
- l) radioaktiver Strahler mit Alphastellung (z. B. Nebelkammerstrahlungsquelle Pb-210)
- m) 10 ml Alkohol-Wasser-Gemisch (1:1)
- n) Alleskleber
- o) Vakuummfett

### Methodischer Hinweis

Um die Nebelspuren einem größeren Personenkreis sichtbar zu machen, wird empfohlen, schräg über der Kammer einen Spiegel anzubringen.

### Experimenteller Aufbau

Die Aluminiumscheibe wird einseitig mit schwarzem Velourpapier beklebt. Auf die andere Seite dieser Scheibe wird mit Alleskleber ein Filzring und darauf der Gummiring geklebt. In die Petrischale klebt man den größeren Ring aus Aluminiumfolie und darauf den anderen Filzring. Die Plastklemmen werden mit einer Bohrung am oberen Schenkel versehen. In diese Bohrung kommen die Meßklemmen, die gleichzeitig zur Befestigung der Kontaktstreifen benutzt werden. Alle Gummiteile werden mit Benzin gereinigt.

Der Zusammenbau erfolgt nach Abbildung 2.25.6./1.

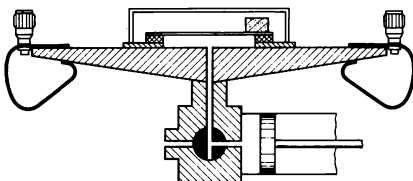


Abb. 2.25.6./1  
Prinzipieller Aufbau  
der Nebelkammer

Auf die leicht gefettete Gummiplatte des Pumpentellers legt man den Kreisring aus Aluminiumfolie. Der beidseitig eingefettete Gummiring (mit Filzring und schwarzer Scheibe) wird darauf gelegt und leicht angedrückt. Auf den Rand der Scheibe wird der radioaktive Strahler gelegt. Die Strahlung soll zur Mitte der Scheibe gerichtet sein. Der Filzring in der Petrischale wird mit dem Wasser-Alkohol-Gemisch getränkt. Nun wird die Petrischale auf den Gummiring gesetzt. Dabei muß der Aluminiumstreifen herausragen, ohne den anderen Streifen zu berühren. Die beiden Plastklemmen werden so am Pumpenteller befestigt, daß sie Kontakt mit den beiden aus der Nebelkammer herausragenden Aluminiumstreifen haben.

Die Leuchte wird neben der Nebelkammer angeordnet. Beleuchtet wird der Raum oberhalb der schwarzen Scheibe. An die Meßbuchsen und damit an die beiden



Aluminiumkreistringe wird zum Absaugen der Ionen über einen Schutzwiderstand die Spannungsquelle (400 V —) angeschlossen.

### *Experiment*

Die Lampe und die Absaugspannung werden eingeschaltet. Dann wird mindestens 10 Sekunden gewartet. Danach wird der Kolben der Luftpumpe schnell herausgezogen.

Während des Evakuierens zeigen sich deutlich Nebelspuren, die etwa 2 bis 3 Sekunden existieren, bevor sie zerfließen. Aus der geschätzten Länge der Spuren kann man Schlüsse auf die Energie der verursachenden Alphastrahlung ziehen.

Der Kolben wird hineingeschoben, und nach 10 Sekunden ist die Kammer wieder betriebsbereit.

### *Bemerkungen*

1. Trotz des einfachen Aufbaus der Kammer ist ihre Funktionssicherheit groß.
2. Tritt beim Evakuieren in der Kammer kein Nebel auf, ist sie undicht. Tritt nur unstrukturierter Nebel auf, ist die Absaugspannung nicht wirksam.

# Quellennachweis

## 1. *Notwendigkeit und Möglichkeiten des Einsatzes historisch bedeutsamer Experimente in der physikalischen Ausbildung*

KISTNER, A.: Physikalische Experimente auf historischer Grundlage. Pädagogisches Archiv 1913, S. 296 bis 307

LANGWIN, P.: Ausgewählte Werke. Moskau: 1949, S. 311

RAMSAUER, C.: Grundversuche der Physik in historischer Darstellung. Berlin — Göttingen — Heidelberg: Springer-Verlag 1953

KAPICA, P. L.: Experiment, Theorie, Praxis. Berlin: Akademie-Verlag, 1984

### 2.1. *Gleichmäßig beschleunigte Bewegung*

GALILEI.: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften. Nr. 11, Leipzig 1890, Nr. 24, Leipzig 1891

HUYGENS, CHRISTIAN: Die Pendeluhr — Horologium oscillatorium. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 192, Leipzig 1913

### 2.2. *Die Gravitationskonstante*

RAMSAUER, C.: Grundversuche der Physik in historischer Darstellung. Berlin — Göttingen — Heidelberg: Springer-Verlag 1953

GRIMSEHL, E.: Lehrbuch der Physik. Leipzig und Berlin: Verlag B. G. Teubner, 1909

ZENNECK, J.: Gravitation. In: Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Band V, Teil 1, 1903

FRIEDRICH, A.: Handbuch der experimentellen Schulphysik — Mechanik der festen Körper. Köln: Aulis Verlag Deubner und Co. KG 1963

### 2.3. *Auftrieb in Flüssigkeiten*

ARCHIMEDES: Über schwimmende Körper. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 213, Leipzig 1925

### 2.4. *Bernoullische Gleichung*

BERNOULLI, DANIEL: Hydrodynamik oder Kommentare über die Kräfte und Bewegungen der Flüssigkeiten. Straßburg 1738, München 1963

2.5. *Druck und Gewichtskraft der Luft*

SCHMIDT, WILHELM: Herons von Alexandria Druckwerke und Automatentheater. Leipzig 1899

GALILEI, G.: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften. Nr. 11, Leipzig 1890

SCHIMANK, HANS: Otto von Guericke's Neue (sogenannte) Magdeburger Versuche über den leeren Raum. Düsseldorf: VDI-Verlag 1968

KAUFFELDT, A.: Otto von Guericke — Philosophisches über den leeren Raum. Berlin: Akademie-Verlag 1968

RAMSAUER, C.: Grundversuche der Physik in historischer Darstellung. Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag 1953

2.6. *Gesetze des idealen Gases*

NEVILLE, R. G.: The discovery of Boyles law. J. chem. education, 39/1962, S. 356ff.

GAY-LUSSAC, J. L.: Untersuchungen über die Ausdehnung der Gasarten und der Dämpfe durch die Wärme. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 44, Leipzig 1894

2.7. *Dampfmaschinen*

BERNAL, J. D.: Die Wissenschaft in der Geschichte. Berlin: 1961

FRIEDT, H.: Zur Geschichte der Dampfmaschine. Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1964

GERLAND, E. und TRAUMÜLLER, F.: Geschichte der physikalischen Experimentierkunst. Leipzig 1899

MATSCHOSS, C.: Die Entwicklung der Dampfmaschine. Berlin 1908

2.8. *Das mechanische Wärmeäquivalent*

JOULE, J. P.: Über das mechanische Äquivalent der Wärme, bestimmt durch die Wärme-Erzeugung bei Reibung von Flüssigkeiten. Annalen der Physik und Chemie. Dritte Reihe. Dreizehnter Band. Leipzig 1848

JOULE, J. P.: Über Materie, lebendige Kraft und Wärme, zitiert nach S. G. Brush. Berlin 1970

RAMSAUER, C.: Grundversuche der Physik in historischer Darstellung. Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag 1953

SCHIMANK, H.: Epoche der Naturforschung. Berlin 1930

2.9. *Kinetische Gastheorie*

MEYER, O. E.: Über die innere Reibung des Gases. Annalen der Physik und Chemie: Leipzig 1873

BROWN, R.: Mikroskopische Beobachtungen über die in Pollen der Pflanzen enthaltenen Partikeln, und über das allgemeine Vorkommen activer Molecüle in organischen und unorganischen Körpern. Annalen der Physik und Chemie: Leipzig 1828

POHL, R. W.: Mechanik, Akustik und Wärmelehre. Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag 1953

**2.10. Die elektrische Elementarladung**

MILLIKAN, R. A.: The elektron. The University of Chicago Press. Chicago (Ill.) 1924

**2.11. Statische Elektrizität**

COULOMB, C. A.: Vier Abhandlungen über die Elektrizität und den Magnetismus. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Band 13, Leipzig 1890

GERLAND, E. und TRAUMÜLLER, F.: Geschichte der physikalischen Experimentierkunst. Leipzig 1899

PRIESTLEY, J.: Geschichte und gegenwärtiger Zustand der Elektrizität nebst eigentümlichen Versuchen. Nach der zweiten vermehrten und verbesserten Ausgabe (1770 erschienen, d. H.) aus dem Englischen übersetzt und mit Anmerkungen begleitet von Johann Georg Krünitz. Berlin und Stralsund 1772

**2.12. Galvanische Spannungsquellen**

GALVANI, A.: Abhandlung über die Kräfte der Electricität bei der Muskelbewegung. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 51, Leipzig 1894

VOLTA, A.: Briefe über die thierische Electricität. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 114, Leipzig 1900

VOLTA, A.: Galvanismus und Entdeckung des Säulenapparates. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 118, Leipzig 1900

**2.13. Ohmsches Gesetz**

OHM, G. S.: Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contactelektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaischen Apparates und des Schweigger'schen Multipliers. In: Gesammelte Abhandlungen (Herausgegeben von E. Lommel), S. 14ff. Leipzig: Verlag J. A. Barth 1892

**2.14. Magnetische Wirkungen elektrischer Ströme**

OERSTEDT, H. CHR.: Experimenta circa effectum conflictus electrici acum magneticam. In: Journal für Chemie und Physik, 29/1820, S. 25—281

OERSTEDT, H. CHR.: Versuche über die Wirkung des elektrischen Conflicts auf die Magnetnadel. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 63, Leipzig 1895

OERSTEDT, H. CHR.: Neuere electro-magnetische Versuche. In: Journal für Chemie und Physik, 29/1820, S. 364—369

AMPÈRE, A.-M.: Sur les effets des courans électriques. In: Annales de Chimie et de Physique, 15/1820, S. 59—76

TRICKER, R. A. R.: Frühe Elektrodynamik. Berlin: Akademie Verlag 1974

**2.15. Elektromagnetische Induktion**

FARADAY, M.: Experimental-Untersuchungen über Elektrizität, 1. und 9. Reihe. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 81 und 126, Leipzig 1896 und 1901

TRICKER, R. A. R.: Die Beiträge von Faraday und Maxwell zur Elektrodynamik. Berlin: Akademie Verlag 1974

2.16. *Hertz'sche Wellen — Drahtlose Telegrafie und Telefonie*

- HERTZ, HEINRICH: Über sehr schnelle elektrische Schwingungen. In: Wiedemanns Annalen 31/1887, S. 421  
 HERTZ, HEINRICH: Über elektrodynamische Wellen im Luftraum und deren Reflektion. In: Wiedemanns Annalen, 34/1888, S. 610  
 HERTZ, HEINRICH: Über Strahlen elektrischer Kraft. In: Wiedemanns Annalen, 36/1888, S. 769  
 FRAUNBERGER, FRITZ: Vom Kompaß bis zum Elektron. Köln 1970  
 SPASSKIJ, B. I.: Geschichte der Physik. Moskau 1964  
 ZENNECK, J. und RUKOP, H.: Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie. Stuttgart 1925  
 JOSEPHSON, MATTHEW: Thomas Alva Edison. Icking und München 1959  
 BRAUN, FERDINAND: Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle. In: Annalen der Physik und Chemie, 153/1874, S. 556—563  
 NESPER, E.: Handbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie. Berlin 1921  
 SHEREBZOW, I. P.: Rundfunktechnik. Leipzig 1954  
 BRAUN, FERDINAND: Über ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme. In: Annalen der Physik und Chemie, 136/1897, S. 522—559  
 KURYLO, FRIEDRICH: Ferdinand Braun — Leben und Wirken des Erfinders der Braunschen Röhre — Nobelpreisträger 1909. München 1965

2.17. *Experiment von J. Franck und G. Hertz*

- FRANCK, J. und HERTZ, G.: Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben. In: Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 16/1914  
 R. ERB, W. KUHN und J. SEIBERT: Bohrsches Atommodell und Franck-Hertz-Versuch. In: Praxis der Naturwissenschaften-Physik 34 (1985) Heft 6, S. 10 bis 12

2.18. *Der äußere lichtelektrische Effekt*

- HALLWACHS, W.: Über den Einfluß des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper. In: Wiedemanns Annalen, 33/1888, S. 301—312  
 HALLWACHS, W.: Die Lichtelektrizität. In: Handbuch der Radiologie, Band III b. Leipzig 1916  
 LENARD, P.: Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolette Licht. In: Annalen der Physik 2/1900, S. 359—375  
 LENARD, P.: Über die lichtelektrische Wirkung. In: Annalen der Physik 8/1902, S. 149—198  
 EINSTEIN, A.: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: Annalen der Physik, 17/1905

2.19. *Die Lichtgeschwindigkeit*

- RODITSCHEW, W. I. und FRANKFURT, U. I.: Die Schöpfer der physikalischen Optik. Berlin 1977  
 HOPPE, E.: Geschichte der Optik. Leipzig 1926  
 FOUCAULT, L.: Experimentelle Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes; Beschreibung des Apparates. In: Annalen der Physik und Chemie, 4. Reihe, Band CXVIII, 1863

- RAMSAUER, C.: Grundversuche der Physik in historischer Darstellung. Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag 1953  
 LADENBURG, R.: Handbuch der Experimentellen Physik, Bd. XVIII, 1928  
 FRIEDRICH, A.: Handbuch der experimentellen Schulphysik, Optik. Köln: Aulis Verlag Deubner und Co. KG 1963

2.20. *Brechung des Lichtes*

- Sir Isaac Newton's Optik. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, N. 96, Leipzig 1898  
 ROSENBERGER, F.: Isaac Newton und seine physikalischen Prinzipien, Leipzig 1895  
 RODITSCHIEW, W. I. und FRANKFURT, U. I.: Die Schöpfer der physikalischen Optik. Berlin 1977  
 LAUE, M.: Geschichte der Physik. Bonn 1950

2.21. *Interferenz des Lichtes*

- Sir Isaac Newton's Optik. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 96 u. 97, Leipzig 1898  
 FRESNEL, A.: Abhandlungen über die Beugung des Lichtes. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 215, Leipzig 1926  
 RODITSCHIEW, W. I. und FRANKFURT, U. I.: Die Schöpfer der physikalischen Optik. Berlin 1977  
 FRESNEL, AUGUSTIN: De la lumière, Librairie Armand Colin, Paris 1914  
 RAMSAUER, CARL: Grundversuche der Physik in historischer Darstellung. Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag 1953

2.22. *Polarisation des Lichtes*

- Franz Arago's sämtliche Werke, Herausgeber: W. G. Hankel, Bd. I Leipzig 1854  
 HOPPE, E.: Geschichte der Optik. Leipzig 1926  
 RODITSCHIEW, W. I. und FRANKFURT, U. I.: Die Schöpfer der physikalischen Optik. Berlin 1977

2.23. *Linienpektren*

- FRAUNHOFER, J.: Bestimmung des Brechungs- und Farbzerstreuungsvermögens verschiedener Glasarten. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 150. Leipzig 1905  
 KIRCHHOFF, G.: Abhandlungen über Emission und Absorption. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 100. Leipzig 1898  
 RYDBERG, J. R.: Untersuchungen über die Beschaffenheit der Emissionsspektren der Chemischen Elemente. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften. Nr. 196. Leipzig 1922  
 KIRCHHOFF, G. und BUNSEN, R.: Chemische Analyse durch Spektralbeobachtungen. Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 72. Leipzig 1895

2.24. *Radioaktivität*

- BECQUEREL, H.: Über unsichtbare Strahlen, die durch phosphoreszierende Körper ausgesandt werden. Compt.rend. 122/1896, S. 501 ff.

MEYER St. und v. SCHWEIDLER, E. R.: Über das Verhalten von Radium und Polonium im magnetischen Felde. Physikalische Zeitschrift 1/1899, S. 113—114

2.25. *Nachweismethoden der Kernstrahlung*

RUTHERFORD, E.: Handbuch der Radiologie. Leipzig 1913

FENYVES, HAIMAN: Physik, Grundlagen der Kernstrahlungsmessung. Budapest 1965

BECQUEREL, H.: Emission neuer Strahlen durch metallisches Uranium. Compt. rend. 122/1896, S. 560

ELSTER, T. und GEITEL, H.: Über die durch radioaktive Emanation erregte szintillierende Phosphoreszenz der Sidot-Blende. Physikalische Zeitschrift 1903, S. 439 ff.

WILSON, C. T. R.: Über einen Expansionsapparat zur Sichtbarmachung der Spuren ionisierender Teilchen in Gasen und einige durch seinen Gebrauch erhaltene Ergebnisse. Proc. Roy. Soc. 1912 A, 87, S. 277 ff.

AECHTNER, G.: Eine einfache Expansionsnebelkammer aus Aufbauteilen. Mathematik und Physik in der Schule, H. 9 1959, S. 487 ff.

# Register

- Ablenkung im Magnetfeld 216  
Absorption 225  
Absorptionsspektren 208  
Abstoßung, elektrische 106, 118  
Aerostatik 42  
Alphastrahlung 214  
Altersbestimmung 214  
AMPÈRE, A.-M. 17, 138, 143, 146  
Analysator 206  
Antenne 157  
Anziehung, elektrische 106, 118  
Apparat, hydropneumatischer 55  
ARAGO, D. 138, 147, 150, 205  
ARCHIMEDES 35  
ARISTOTELES 21  
Astronomie 220  
Äther 195, 205  
Atom 214  
-hülle 214, 220  
-kern 214, 220  
-theorie 176  
Audionschaltung 157, 172  
Auftrieb 35  
-, dynamischer 38  
-, in Flüssigkeiten 17, 35  
Auftriebskraft 38, 101  
Ausdehnungskoeffizient der Gase 63, 71  
Austrittsarbeit 185  
Avogadro-Konstante 100
- Balmer-Serie 208  
Bandgenerator 107  
Becher-Apparat 128  
BECQUEREL, H. 213, 220  
Becquerelstrahlen 214  
BEIGHTON, H. 82  
Beleuchtungsstärke 186  
Bennetsches Elektrometer 126  
BERNOULLI, D. 18, 38, 93  
BERNOULLI, J. 18, 38  
Bernoullische Gleichung 17, 38  
Berührungsspannung 125, 127  
Betastrahlung 214  
Beugung 196, 199, 209  
Bewegung, gleichmäßig beschleunigte 21, 23, 25  
Bildhebung 191  
Bildtelegrafie 181  
Biprisma 197, 203  
BLACK, J. 74  
Blasenammer 219  
BOHR, N. 176  
Boltzmann-Konstante 94
- BOYLE, R. 63, 66, 195  
Boylesches Gesetz 64, 66  
BRANLY, E. 157  
BRAUN, F. 157, 167, 173  
Braunsche Röhre 173  
Brechung 156, 191, 196  
Brechungsgesetz 192  
BROWN, R. 94, 98  
Brownsche Bewegung 94, 99  
BUNSEN, R. W. 125, 208, 211
- CARISLE, A. 125  
CAVENDISH, H. 30, 32  
CLAUSIUS, R. 93  
COULOMB, C. A. 107  
Coulombsches Gesetz 118, 137  
CROOKES, W. 220, 224  
CURIE, M. 214, 220  
CURIE, P. 220
- DALTON, J. 63  
Dampfmaschine 13, 72  
-, atmosphärische 44, 73, 81, 87  
-, doppelt wirkende 75  
-, einfach wirkende 75, 86  
Dampfpumpe 73, 76  
Dampfzylinder, Papinscher 83  
DAVY, H. 125  
DESCARTES, R. 192  
Dichte der Erde 33  
Dispersion 192  
Doppelbrechung 205  
Doppelprisma 203, 208  
Doppelscheibenmaschine 107  
Doppelspalt 200  
Doppelspiegel 197, 200  
Dosimetrie 220  
Drehspiegelmethode 188  
Drehwaage 31, 33  
Druck 38, 40, 42  
- in Gasen 64  
-, statischer 39, 31  
DUFAY, C. 106  
DULONG, P. L. 63  
Dynamik 21  
Dynamo 147
- Ebene, geneigte 23, 25  
EDISON, T. A. 157, 165  
Edison-Effekt 157, 165  
Effekt, äußerer lichtelektrischer 18, 180, 183, 185  
-, glühelektrischer 157, 165



- EINSTEIN, A. 94, 181  
 elektrischer Strom, magnetische Wirkung 17, 19  
 Elektrisieren von Wasser 112  
 Elektrisiermaschine 107, 110, 122  
 Elektrizität, statische 106  
 Elektrodynamik 147, 187  
 Elektromagnetismus 17, 137  
 Elektromotor 17, 147, 153  
 Elektronenstoßexperiment 175  
 Elektrophor 107, 116  
 Elektroskop 117, 220  
 Elektrostatik 107  
 Elementarladung, elektrische 100  
 Elemente, galvanische 125  
 ELSTER, J. 180, 220, 224  
 Emissionsspektren 208  
 Emissionstheorie 196, 205, 208  
 Empfangsdipol 158  
 Energie der Fotoelektronen 18  
 Energiequanten 176  
 Entladungsmethode 223  
 Erdung 157  
 Experiment Cavendishs 31  
 — Galileis 23  
 — Guericques 51  
 — Huygens' 27  
 — Torricellis 49  
  
 Fallbeschleunigung 30  
 Fall, freier 21, 27  
 Fallgesetze 23  
 FARADAY, M. 18, 100, 146, 156  
 Farben dünner Plättchen 195, 197  
 Farbzerstreuung 208  
 FEDDERSEN, B. W. 156  
 Feld, elektrisches 107  
 Feldtheorie, elektromagnetische 147  
 Fernrohr 208  
 Fernsehen 158, 181  
 Feuermaschine 73, 86  
 Feuerspritze 44  
 FIZEAU, A.-H. L. 188  
 Flammenspektrum 208  
 Fluoreszenz 219  
 FOREST, L. D. 157  
 Fotoeffekt 180  
 Fotoplatte 215, 219  
 Fotostrom 186  
 Fotozelle 181  
 FOUCAULT, L. 188  
 FRANCK, J. 175  
 Franck-Hertz-Röhre 179  
 FRANKLIN, B. 100  
 Franklinsche Tafel 107, 113, 116  
 FRAUNHOFER, J. 208  
 Fraunhofersche Linien 18, 208  
  
 FRESNEL, A. J. 180, 196, 205  
 Fresnel-Biprisma 204  
 Fresnel-Spiegel 202  
 Fresnelscher Spiegelversuch 201  
 Funktelefon 157  
  
 GALILEI, G. 21, 27, 43  
 Galileische Fallrinne 27  
 GALVANI, L. 122  
 Galvanische Spannungsquellen 19  
 Galvanometer 148, 150, 165  
 Gas, ideales 63  
 —, Ausdehnungskoeffizient 63, 71  
 — —, Gesetz 63  
 Gastheorie, kinetische 93  
 GAY-LUSSAC, L. J. 63, 69  
 Gay-Lussacsches Gesetz 69  
 GEITEL, H. F. 180, 220, 224  
 Geschwindigkeit 22, 40  
 Gesetz von der Erhaltung der Energie 17, 38, 89  
 — von Gay-Lussac 69  
 — des idealen Gases 63  
 —, statistisches 214  
 Gewichtskraft 36, 42, 46  
 — der Luft 54, 57  
 Gewichtsverlust 36  
 Gewittermelder 163  
 GILBERTS, W. 106  
 Glaskugelmachine 106  
 Glasscheibenmaschine 107  
 Gleichrichtereffekt 157, 168  
 Glühkatodenröhre 157, 170  
 Gravitations-Drehwaage 33  
 Gravitationsgesetz 30, 33  
 Gravitationskonstante 30  
 GRAY, S. 106  
 Grenzwinkel 192  
 GRIMALDI, F. 195, 201  
 GROVE, W. 125  
 GUERICKE, O. v. 43, 63  
  
 HALLWACHS, W. 180  
 Hallwachseffekt 180  
 Harzkuchen 116  
 Heber 42, 57  
 —, selbstanlaufender 44  
 HELMHOLTZ, H. v. 89, 156  
 Helmholtz-Spule 154  
 HERON 42, 44, 46  
 Heron Äolipile 72  
 HERSCHEL, J. F. W. 208  
 HERTZ, G. 175  
 HERTZ, H. 17, 156, 180  
 Hertzsche Wellen 13  
 —, Abschätzung der Wellenlänge 162  
 —, Absorption 162

- , Empfangen 160, 162
- , Polarisation 162
- , Senden 160, 162
- , Welleneigenschaften 159
- Himmelsmechanik 21
- HITTORF, J. W. 180
- Hockvakuumröhre 157
- Höhenstrahlung 220
- HOOKE, R. 63, 195
- horror vacui 42, 49, 63
- HUGHES, D. E. 156
- HUYGENS, C. 23, 27, 180, 196, 205
- Huygensches Prinzip 197
- Hydraulica 38
- Hydraulik 38
- Hydrodynamica 39
- Hydrostatik 35
- Hypothese 18, 24
  
- Induktion, elektromagnetische 13, 17, 146, 148
- Induktionsstrom, kontinuierlicher 150
- Induktor 156
- Influenz 107, 146
- Informationsübertragung 147
- Interferenz 156, 195
- Interferenzexperiment 197
- Interferenzspektroskopie 197
- Interferenzstreifen 203
- Ionisierungsspannung 176
- Isolator 106
  
- JENKIN, W. 153
- JOULE, J. P. 89, 93
- Joulesche Experimentieranordnung 89
  
- Kalkspat 205
- Kapillarmethode 94
- Kapselheber 43, 46
- Katodenstrahlen 173, 180, 213
- Katodenstrahlröhre 158
- Kavitation 38
- KEPLER, J. 30, 192
- Keplersche Gesetze 30
- Kernphysik 187
- Kernreaktor 220
- Kernspurplatte 219
- Kernstrahlung 214
- , fluoreszierende Wirkung 220
- , ionisierende Wirkung 219
- , Nachweismethoden 219
- , Schwärzung einer Fotoplate 219
- Kernumwandlung 214, 220
- Kinematik 21
- KIRCHHOFF, G. 208, 211
- KLEIST, E. J. v. 112
  
- Kohärenz 195
- Kohärenzbedingung 196
- Kohärer 156, 163
- Kolbenmaschine 61
- Komplementärfarbe 206
- Kondensationskerne 220
- Kondensator 86, 107
- Konduktor 109
- Konflikt, elektrischer 137
- Körper, geriebene 106
- Kräfte zwischen elektrischen Strömen 138, 143
- Kraft, lebendige 89
- Kraftlinien, magnetische 147
- Kraftmaschinen 17
- Kristalldetektor 157, 167, 169
- Kristalldetektor, Braunscher 167, 169
- Kristallinterferenz 206
- KRÖNIG, A. K. 93
- Kupfer-Zink-Element 125, 132
  
- Leidener Flasche 19, 107, 112, 123, 156
- Leiter 106
- , 1. Klasse 124
- , 2. Klasse 124
- LENARD, P. 176, 180, 183, 185
- LENZ, H. F. E. 147
- Licht, Ausbreitungsgeschwindigkeit 187
- , Brechung 191
- , Interferenz 195, 199
- , Polarisation 196, 205
- , Reflexion 188, 196, 205, 212
- , Wellenlänge 197
- , Wellennatur 181
- , Welleneigenschaften 18, 196
- , Wellentheorie 197
- , Wiedervereinigung 194
- , Zerlegung 182, 193
- Lichtblitze 224
- Lichtbündel 194, 197, 200, 205, 213
- Lichtgeschwindigkeit 156, 187, 197
- Lichtpunkt 199
- Lichtquant 176, 181
- Lichtteilchen 205
- LIEBEN, R. v. 157, 170
- Linienpektrum 17, 208
- LODGE, O. 157
- Lorentzkraft 152
- Luft, Gewichtskraft 54, 57
- , Schwere 56
- , Wägung 56
- Luftdruck 17, 19, 42, 44, 46, 49, 54, 57, 61, 79, 83
- , Wirkungen 59, 61
- Luftpumpe 44
- Lumineszenzlicht 220

- Magdeburger Halbkugeln 59, 61  
 Magnetfeld 214  
 — eines stromdurchflossenen Leiters 18  
 Magnetrnadel 137, 140  
 MAGNUS, H. G. 64  
 MALUS, E.-L. 205, 208  
 MARCONI, G. 157, 163  
 MARIOTTE, E. 63  
 Maschine, atmosphärische 61, 83  
 MAXWELL, J. C. 156  
 MAYER, J. R. 89  
 Medium 192  
 MEISSNER, A. 157  
 Methode, fotografische 216, 219  
 MEYER, O. E. 94  
 MEYER, S. 214, 217  
 MICHELL, J. 30  
 Micrographia 195  
 Mikroskop 188, 195, 198  
 MILLIKAN, R. A. 101  
 Millikan-Gerät 106  
 MUSSCHENBROEK, P. v. 112  
  
 Nachrichtenübermittlung, drahtlose 156  
 Nahwirkungstheorie 156  
 Natriumlinie 211  
 Nebelkammer 220, 225  
 Nebelspuren 228  
 NEWCOMEN, T. 73, 82  
 Newcomen-Maschine 73, 75, 82, 86  
 NEWTON, I. 30, 180, 192, 195, 198, 201, 205  
 Newtonsche Emissionstheorie 196  
 Newtonsche Ringe 195, 198, 206  
 NICHOLSON, W. 125  
  
 OHM, G. S. 132  
 Ohmsches Gesetz 131  
 Optik 187  
 Ordnungszahl 188  
 ØRSTED, H. C. 17, 137, 139, 141, 146, 156  
 Ørstedexperiment 17  
 OSTWALD, W. 64  
  
 PAPIN, D. 73, 76, 78  
 Papinsche Dampfpumpe 77, 80  
 Papinscher Dampfzylinder 83  
 Parallelogrammführung 75  
 PERRIN, J. B. 180  
 PETIT, A.-T. 63  
 PFLÜCKER, J. 180  
 PHILON 42, 44, 46  
 Phosphoreszenz 213  
 Photon 181  
 Plancksche Hypothese 176  
 Planetenradgetriebe 75  
 Pneumatika 42, 44  
  
 POHL, R. W. 94  
 Polarisation 125, 132, 156, 205  
 —, chromatische 18, 206  
 Polarisator 206  
 Polymerisation 214  
 POPOW, A. S. 156, 163  
 POULSEN, V. 157  
 PRIESTLEY, J. 108  
 Prisma 192, 209, 213  
 Propeller 35, 38  
 PTOLEMÄUS, C. 191  
 Pumpe 42, 72, 75  
  
 Quantenphysik 187  
 Quantentheorie 176  
  
 Radioaktivität 213  
 Radiogramm 215, 219  
 Radium 104  
 Reflexion 156, 188, 196, 205, 212  
 REGNAULT, H. V. 64  
 Reibungselektrizität 108  
 Reibung des Wassers 91  
 Reibung von Gasen, innere 94  
 Relativitätstheorie 187  
 Rezipient 52, 60  
 RICCI, M. A. 43  
 RICHARZ, F. 31  
 Ringkerntransformator 146  
 Röhre sender 157  
 RÖMER, O. C. 187  
 RÖNTGEN, W. C. 213  
 Röntgenröhre 104  
 Röntgenstrahlung 219  
 Rotationsmagnetismus 147  
 Rückkopplung 171  
 Rückkopplungsschaltung 157  
 RUDBERG, F. 64  
 RUMFORD, B. 90  
 RUTHERFORD, E. 176, 214, 219  
  
 Saugpumpe 43  
 SAVERY, T. 72, 76  
 Saverys Dampfpumpe 78, 82  
 Schiefer Turm zu Pisa 22  
 Schiffsschraube 35, 38  
 SCHMIDT, C. 214  
 Schöpfwerk 72  
 SCHWEDLER, E. v. 214  
 SCHWEIGGER, J. S. C. 138  
 Schweiggerscher Multiplikator 138  
 Schweredruck 50, 57, 79  
 — in Flüssigkeiten 79  
 Schwerkraft 101  
 Schwimmerregel 138  
 Schwingaudionschaltung 171

- Schwingungen, elektrische 156  
 Sehstrahl 191  
 Sekundenpendel 18  
 Selbstinduktion 153  
 Sendedipol 158  
 Sicherung des Ausgangsniveaus 17  
 SNELL VAN ROIJEN, W. 192  
 Spaltbild 196  
 Spannungsoptik 206  
 Spannungsquellen, galvanische 19, 122  
 Spannungsreihe 125  
 Spektralanalyse 192, 211  
 Spektralapparat 209, 213  
 Spektralfarbe 192, 208  
 Spektren 192, 208, 210  
 —, Arten 19  
 spezifische Wärmekapazität 89  
 Spiegel, schwarzer 207  
 Spinthariskop 220  
 Spule 138  
 STARK, J. 176  
 Statik 21, 35  
 Steuerelektrode 157  
 Stokessche Reibungskraft 101  
 STOLETOW, A. G. 180  
 STONEY, G. J. 100  
 Stoßanregung 178  
 Strahl, außerordentlicher 205  
 —, ordentlicher 205  
 Strahlentherapie 220  
 Strahlungsnachweis, elektrostatischer 221  
 Strohhalmelktrometer 126  
 Strom, elektrischer 139  
 Stromschleife 141  
 Strömung 38  
 Strömungsgeschwindigkeit 39  
 Strömungswiderstand der Luft 22  
 Systematisierung 18  
 Szintillationsmethode 224  
 Szintillationszähler 219
- Telefonie, drahtlose 19, 157  
 Telegrafenschreiber 163  
 Telegrafie, drahtlose 19, 157  
 Teilcheneigenschaften von Licht 18  
 Thermodynamik 72, 94  
 Theodolith 209  
 THOMSON, J. J. 180, 214  
 Tonfilm 181  
 TORRICELLI, E. 43, 49, 63  
 Torricellische Röhre 50  
 Torsionsgalvanometer 132, 136  
 Torsionsmikrometer 118  
 Torsionswaage 118  
 Totalreflexion 192, 197, 212  
 TOWNSEND, J. S. 175
- Townsendsche Theorie 175  
 TOWNELEY, R. 63  
 Tragfläche 38  
 Transformator 147  
 Tropfenmethode 100, 223
- Überraschungsexperiment 18, 46  
 Umkehr der Natriumlinien 211  
 Unipolarinduktion 151  
 Uranstrahlen 213
- Vakuum 42  
 —, Erzeugung 53  
 —, Nachweis 51, 53  
 Verstärkerröhren 157  
 VIVIANI, V. 43  
 VOLTA, A. 116  
 Voltasche Experimente 17  
 Voltasche Säule 125, 128  
 Vorbildwirkung der großen Physiker 15
- Wärmeäquivalent, mechanisches 17, 89  
 Wärmebewegung 94  
 Wärmekapazität, spezifische 89  
 Wärmekraftmaschinen 18, 94  
 Wärmeübertragung 94  
 Wasserbarometer 56, 58  
 Wasserdruck 39  
 Wasserhaltungsmaschinen 82  
 Wasserhammer 54  
 Wasserräder 72, 75  
 WATT, J. 74  
 Wattsche Dampfmaschine 74, 86  
 Wechselstromkreis 147  
 Weglänge der Moleküle, mittlere freie 94  
 Weinautomat 44, 47  
 Wellen, elektromagnetische 156  
 Wellenlänge 158  
 Welle-Teilchen-Verhalten 181  
 Weltsystem, kopernikanisches 44  
 WHEATSTONE, C. 208  
 WILKINSON, J. 125  
 WILSON, C. 220  
 Wilsonsche Nebelkammer 220, 225  
 Wirkungen des Luftdrucks 59, 61  
 Wirkung, ionisierende 219  
 —, magnetische 17, 137  
 Wirkung zweier elektrischer Ströme aufeinander 143  
 Wulf-Elektroskop 127, 222
- X-Strahlen 213
- YOUNG, T. 180, 190, 206
- Zählrohr 219  
 Zersetzung, elektrolytische 100

