



Physik

FOS/BOS Technik Bayern Jahrgangsstufe 13

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer Straße 23 42781 · Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 80314

Autoren des Buches „Physik – FOS/BOS Technik Bayern Jahrgangsstufe 13“:

Dr. Dieter Schlögl	Oberschleißheim
Julia Gronauer	Ingolstadt
Dr. Jochen Trenner	Regensburg
Harald Vogel	Inning a. Ammersee

Lektorat: Josef Dillinger

Bildentwürfe: Die Autoren

Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlages Europa-Lehrmittel, Ostfildern

1. Auflage 2023

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-7585-8031-4

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fülle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2023 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Typework Layoutsatz & Grafik GmbH, 86167 Augsburg

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, Radevormwald

Umschlagfoto: © francescodemarco – © juanjo – © Dabarti – alle stock.adobe.com

Druck: LD Medienhaus GmbH & Co. KG, 44149 Dortmund, www.ld-medienhaus.de

Vorwort

Mit diesem Buch liegt nun der dritte Band der Physikbücher des Europa-Verlags für die Bayerischen Beruflichen Oberschulen (FOS und BOS) vor. Damit werden mit dieser Buchreihe alle Lerninhalte des im Schuljahr 2017/2018 neu eingeführten LehrplanPLUS abgedeckt. Da der Lehrplan der FOS und der BOS in der 13. Jahrgangsstufe identisch sind, ist dieses Buch für beide Schulformen gleichermaßen geeignet.

Das Buch ist so gestaltet, dass es sowohl als Ergänzung zum regulären Unterricht als auch im Rahmen eines Flipped-Classroom-Konzepts verwendet werden kann. Die Manuskriptvorlagen einzelner Kapitel dieses Buches wurden im Schuljahr 2020/2021 bereits auf beide genannte Weisen eingesetzt.

Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, alle Informationen so aufzubereiten, dass Schüler sich alle Lerninhalte mit diesem Buch selbstständig erarbeiten können. Die einzelnen Unterkapitel bauen inhaltlich und logisch aufeinander auf und „logische Sprünge“ werden vermieden. Treten Fachbegriffe das erste Mal auf, so werden sie **fett** gedruckt und im gleichen Absatz erklärt. Am Ende eines jeden Kapitels stehen zur Übung und Vertiefung geeignete Aufgaben in orangefarbenen Kästen mit dem Symbol  zur Verfügung. Violettfarbige Kästen enthalten Beispielrechnungen zum jeweiligen Kapitel und sind mit dem Symbol  gekennzeichnet. Das können entweder Aufgabenbeispiele sein oder Anwendungsbeispiele für die in diesem Kapitel beschriebenen Lerninhalte. Wichtige Formeln und Merksätze sind türkis eingerahmt. Zusatzinformationen sind in blauen Kästen zusammengefasst und mit dem Symbol  gekennzeichnet. Abschnitte, die über die Lerninhalte des Lehrplans hinausgehen sind mit dem Wort „Exkurs“ beschriftet und grau hinterlegt. Interessiert man sich lediglich für prüfungsrelevante Lerninhalte, so kann man diese Exkurse getrost überspringen.

An einigen Stellen wurde innerhalb der einzelnen Lernbereiche eine andere Reihenfolge der Lerninhalte gewählt als die im Lehrplan vorgeschlagene, da das Buch aus Sicht der Autoren dadurch für die Schüler besser verständlich wird. Eine Sonderstellung nimmt dabei das Thema der Elektron-Positron-Paarbildung ein. Dieses wird im Lehrplan sowohl im Lernbereich „Quanten- und Atomphysik“ als auch im Lernbereich „Kernphysik“ erwähnt. Den Autoren erschien es günstiger, das Thema erst bei der Kernphysik zu behandeln, da die Schüler dann bereits mit dem Phänomen der Umwandlung einzelner Teilchen ineinander bzw. der Entstehung neuer Teilchen vertraut sind und auch wissen, dass man bei diesen Prozessen die Energiebilanzen berücksichtigen muss.

Wir wünschen Ihnen viel Freude und einen erfolgreichen Einsatz dieses Buchs.

München, Frühjahr 2023
Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Geladene Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern7

1.1	Kräfte auf elektrische Ladungen	9
1.1.1	Elektrische Feldkraft	11
1.1.2	Das Magnetfeld und die Lorentz-Kraft	13
1.1.3	Kräfte im E- und B-Feld	16
1.2	Relativistische Effekte	22
1.2.1	Geschwindigkeitsabhängige Masse	22
1.2.2	Vakuumlichtgeschwindigkeit als Grenzggeschwindigkeit	24
1.2.3	Äquivalenz von Masse und Energie	24
1.2.4	Hochenergiephysik	27
1.3	Aufgaben	29
1.3.1	Aufgaben zu den Kräften auf elektrische Ladungen	29
1.3.2	Aufgaben zu relativistischen Effekten	37

Elektromagnetische Schwingungen und Wellen.41

2.1	Der elektrische Schwingkreis	41
2.1.1	Idealer Schwingkreis	43
2.1.2	Realer Schwingkreis	46
2.1.3	Erzwungene Schwingung	46
2.1.4	Induktive Kopplung	46
2.1.5	Rückkopplung	50
2.1.6	Der offene Schwingkreis	51
2.2	Der Hertz'sche Dipol ($\frac{\lambda}{2}$ Dipol)	52
2.2.1	Dipolstrahlung – elektromagnetische Wellen	54
2.2.2	Empfang elektromagnetischer Wellen	57
2.3	Eigenschaften elektromagnetischer Wellen	58
2.3.1	Polarisation	59
2.3.2	Reflexion	61
2.3.3	Brechung	64
2.3.4	Beugung	64
2.3.5	Interferenz	65
2.4	Licht als elektromagnetische Welle	70
2.4.1	Polarisation	70
2.4.2	Einfachspalt	71
2.4.3	Doppelspalt	73
2.4.4	Mehrfachspalt und Gitter	75
2.5	Das elektromagnetische Spektrum	79
2.5.1	Technische Nutzung	79
2.5.2	Spektroskopie	81

2.6 Risiken im Umgang mit (nicht ionisierender) elektromagnetischer Strahlung und Sicherheitsmaßnahmen	84
--	----

Quanten- und Atomphysik89

3.1 Einführung	89
3.2 Zentrale Wesenszüge der Quantenphysik	90
3.2.1 Unteilbarkeit	90
3.2.2 Interferenzfähigkeit	90
3.2.3 Stochastisches Verhalten	90
3.2.4 Unbestimmtheit	91
3.3 Teilcheneigenschaften elektromagnetischer Wellen	92
3.3.1 Äußerer Fotoeffekt und Photonenpostulat.	94
3.3.2 Compton-Effekt und Photonenimpuls	99
3.3.3 Doppelspaltversuch mit Einzelphotonen und Heisenberg'sche Unschärferelation	104
3.4 Welleneigenschaften von Teilchen.	109
3.4.1 Hypothese von de Broglie – Materiewellen	109
3.4.2 Davisson-Germer-Experiment und Bragg-Reflexion	112
3.4.3 Experiment von George Paget Thomson.	115
3.4.4 Nachweis der Welleneigenschaften anderer Teilchen	118
3.4.5 Doppelspaltversuch mit Elektronen: Jönsson-Versuch – „Das schönste Experiment aller Zeiten“.	119
3.4.6 Doppelspaltversuche mit anderen Teilchen	121
3.4.7 Doppelspaltversuch mit Einzelelektronen	123
3.5 Die quantenmechanische Zustandsfunktion ψ	127
3.5.1 Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Zustandsfunktion	129
3.5.2 Normierungsbedingung	136
3.5.3 Superpositionsprinzip	138
3.5.4 Die zeitunabhängige Schrödingergleichung	144
3.5.5 Kollaps der Zustandsfunktion	160
3.6 Historische Atommodelle	179
3.6.1 Rutherford'sches Atommodell	179
3.6.2 Das Bohr'sche Atommodell	183
3.7 Das Orbitalmodell	192
3.7.1 Das Wasserstoffatom	193
3.7.2 Atome höherer Ordnungszahl	202
3.7.3 Resonanzfluoreszenz und Resonanzabsorption	206
3.7.4 Franck-Hertz-Versuch	209
3.8 Röntgenstrahlung	213
3.8.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung in einer Röntgenröhre	214
3.8.2 Bragg'sche Drehkristallmethode	217
3.8.3 Gesetz von Moseley	219

Kernphysik223

4.1	Aufbau der Materie.	223
4.1.1	Grundlagen	223
4.1.2	Streuexperimente	225
4.1.3	Kernbausteine und Isotope.	231
4.1.4	Das Potentialtopfmodell des Kerns	231
4.2	Bindungsenergie des Atoms und des Atomkerns	233
4.3	Kernzerfälle	238
4.3.1	Zerfallsarten und ihre Eigenschaften	239
4.3.2	Nuklidkarte und Zerfallsreihen	245
4.3.3	Nachweisgeräte	248
4.3.4	Energiebilanz der Kernzerfälle	251
4.4	Zerfallsgesetz und Aktivität.	257
4.4.1	Das Zerfallsgesetz	257
4.4.2	Die Aktivität einer Strahlungsquelle	261
4.5	Wechselwirkung von radioaktiver Strahlung mit Materie	265
4.5.1	Absorption radioaktiver Strahlung	265
4.5.2	Wechselwirkungsprozesse von Teilchen mit Materie.	269
4.5.3	Strahlenschutz und Dosimetrie	271
4.6	Kernspaltung und Kernfusion	275
4.6.1	Einfache Kernreaktionen und freie Neutronen	275
4.6.2	Kernspaltung	277
4.6.3	Kernfusion	281
4.7	Anwendung in der Medizin	287
4.7.1	Diagnostische Verfahren	287
4.7.2	Therapeutische Verfahren	289

Lösungen293

5.1	Lösungen zu Kapitel 1: Geladene Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern.	293
5.2	Lösungen zu Kapitel 2: Elektromagnetische Schwingungen und Wellen	318
5.3	Lösungen zu Kapitel 3: Quanten- und Atomphysik	337
5.4	Lösungen zu Kapitel 4: Kernphysik	413

Sachwortverzeichnis454

Bildquellenverzeichnis.....459



1

Geladene Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern

„Wie soll man Elektrizität erklären, wenn man noch nichts von Atomen und kleineren Strukturen weiß?“

Ein Rückblick bis zum Jahr 1600: Der englische Arzt und Naturforscher William Gilbert¹ fand beim Studium antiker Schriften, dass schon Thales von Milet² Kenntnis von der Anziehung geriebenen Bernsteins hatte. Gilbert stellte fest, dass **elektrische Anziehung** (von geriebenem Bernstein) und **magnetische Anziehung** (von Magneteisensteinen) zwei verschiedene Phänomene sind.



Abb. 1 Geriebener Bernstein zieht Wollfussel an.



Abb. 2 Magneteisenstein zieht Eisenfeilspäne an.

In den darauffolgenden vier Jahrhunderten entwickelte sich die Naturlehre umfassend weiter, die heute als klassische Physik bezeichnet wird.

Man fand heraus, dass **elektrische Ladung** in zwei „Arten“ vorkommt, die sich unterschiedlich verhalten, nämlich anziehend oder abstoßend.

¹ William Gilbert (1544 – 1603), englischer Arzt und Physiker

² Thales von Milet (ca. 624 – 544 v. Chr.), griechischer Naturphilosoph, Mathematiker und Astronom

Ladungen konnte man durch Reiben von bestimmten Materialien (Harz oder Glas) „erzeugen“, es wurden Elektrysiermaschinen erfunden und in der höfischen Gesellschaft wurden damit Kabinettstücke vorgeführt. An eine sinnvolle technische Nutzung, wie sie heute gängig ist, war damals noch nicht zu denken.

Erst 1751 prägte Benjamin Franklin³ den Begriff **Ladung**, die er als positiv oder negativ bezeichnete.

Die Messung der **Kräfte** zwischen zwei geladenen Körpern gelang Charles Coulomb⁴ im Jahr 1785.

Magnetismus war anfänglich nur bei Magneteisensteinen beobachtbar, die Funktionsweise des Kompasses beruht darauf.

Die Erfindung der **Batterie** um 1800 durch Alessandro Volta⁵ war zunächst nur für die Forschung interessant, weil es dadurch möglich war, stärkere Ströme fließen zu lassen.

Dass sich eine Kompassnadel in der Nähe eines elektrischen Leiters bei Stromfluss bewegt, entdeckte Hans Christian Oersted⁶ im Jahr 1820.

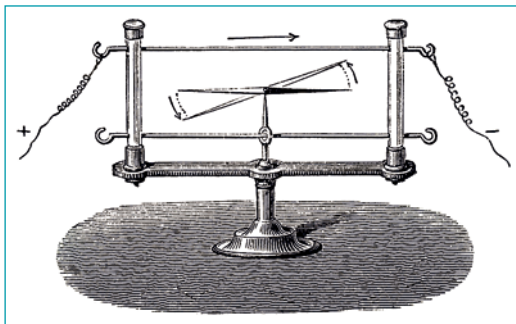


Abb. 1 Kompassnadel dreht sich unter einem Stromleiter

Diese Beobachtung lieferte den **Zusammenhang** zwischen **Elektrizität** und **Magnetismus**, welche bislang nur als einzelne Phänomene betrachtet wurden.

Dadurch inspiriert begann André Ampère⁷ im gleichen Jahr seine Untersuchungen über Ströme. Er erklärte auch unter anderem die Begriffe **elektrische Spannung** und **elektrischer Strom** und setzte die (technische) **Stromrichtung** „von + nach –“ fest.

In England befasste sich Michael Faraday⁸ mit den neuen Erkenntnissen von Oersted und Ampère, dabei fand er den Zusammenhang zwischen elektrischer Ladung und Stoffumsatz bei elektrochemischen Reaktionen – bekannt als **Faraday'sche Gesetze**.

Auf der Suche nach den kleinsten Teilchen der Elektrizität experimentierte man in der Mitte des 19. Jahrhunderts mit elektrischen Vorgängen in verdünnten Gasen und fand Leuchterscheinungen in Gasentladungsröhren.

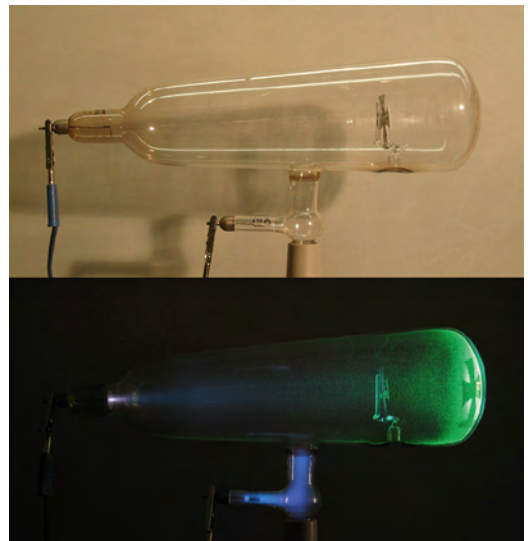


Abb. 2 Kathodenstrahlen (links)

Dabei entdeckte man, dass sich aus einer erhitzten Kathode eine „Art elektrischer Strahlung“ geradlinig ausbreitete, die man **Kathodenstrahlen** nannte.

3 Benjamin Franklin (1706 – 1790), amerikanischer Schriftsteller, Naturwissenschaftler und Politiker

4 Charles Coulomb (1736 – 1806), französischer Physiker

5 Alessandro Volta (1745 – 1827), italienischer Physiker

6 Hans Christian Oersted (1777 – 1851), dänischer Physiker und Chemiker

7 André-Marie Ampère (1775 – 1836), französischer Mathematiker und Physiker

8 Michael Faraday (1791 – 1867), englischer Naturforscher (Physik und Chemie)

Im Jahr 1897 gelang Joseph John Thomson⁹ bei der Untersuchung von Kathodenstrahlen der experimentelle Nachweis für die Existenz des Elektrons.

Kathodenstrahlen bestehen aus elektrisch geladenen Teilchen, den Elektronen. Sie sind kleiner als Atome und sind in ihnen enthalten.

Darauf aufbauend entwickelte Thomson sein **Atommodell**, auch „Rosinenkuchen-Modell“ genannt (siehe Kap. 3.6.2): Atome sind positiv geladene Kugeln, in denen die sehr kleinen und leichten Elektronen eingebettet seien wie Rosinen in einem Kuchenteig.

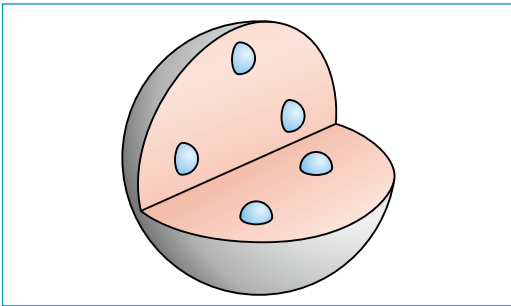


Abb. 1 Atommodell nach Thomson

Damit konnte man elektrochemische Reaktionen und das Verhalten von Kathodenstrahlen erklären. Dieses Atommodell war aber nur von kurzer Dauer, da Ernest Rutherford¹⁰ mit seinen Streuversuchen die Kern-Hülle-Struktur des Atoms entdeckte (siehe Kapitel 3.6.1).

Thomson konnte mit seinen Versuchen mit den Kathodenstrahlen das Verhältnis aus Ladung und Masse eines Elektrons ermitteln, die **spezifische Ladung**:

$$\frac{e}{m} = 1,7588 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Zeitgleich entwickelte Ferdinand Braun¹¹ die **Kathodenstrahlröhre** (nach ihm auch **Braun'sche Röhre** genannt), in der durch **Glühemission** Elektronen freigesetzt werden und durch ein elektrisches Längsfeld ein **Elektronenstrahl** (Kathodenstrahl) erzeugt wird.

Mit Hilfe elektrischer oder magnetischer Felder kann der Elektronenstrahl in Horizontal- und Vertikalrichtung abgelenkt werden. Ein Bild wird sichtbar, wenn der Elektronenstrahl beim Auftreffen auf eine an der Innenseite der Röhre angebrachte Leuchtschicht trifft.

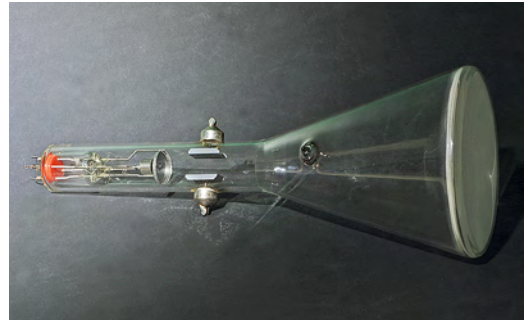


Abb. 2 Elektronenstrahlröhre

Die bekannteste Anwendung war die Bildröhre in Fernsehgeräten, Monitoren und Oszilloskopen, bei denen sie inzwischen weitgehend durch LED bzw. OLED abgelöst wurde.

Um die Vorgänge in einer Elektronenstrahlröhre verstehen zu können, werden hier noch einmal die Grundlagen dazu dargestellt:

1.1 Kräfte auf elektrische Ladungen

Das elektrische Feld ist ein physikalisches Feld, das durch die **Coulombkraft** $\vec{F}_{el}$ auf elektrische Ladungen wirkt. Als Vektorfeld beschreibt es über die räumliche Verteilung der **elektrischen Feldstärke** $\vec{E}$ die Stärke und Richtung dieser Kraft für jeden Raumpunkt.

Das **elektrische Feld** ist der Raum, in dem auf geladene Körper eine Kraft wirkt, die **elektrische Feldkraft** $\vec{F}_{el}$.

9 Joseph John Thomson (1856–1940), britischer Physiker, Nobelpreis für Physik 1906

10 Ernest Rutherford (1871–1937), neuseeländischer Physiker, Nobelpreis für Chemie 1908

11 Ferdinand Braun (1850–1918), deutscher Physiker, Lehrer, Nobelpreis für Physik 1909

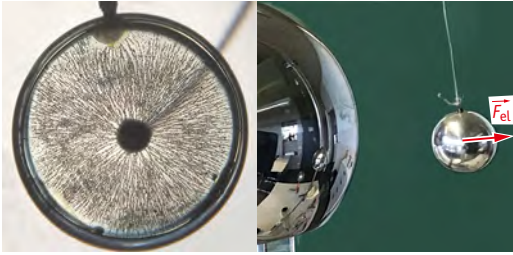


Abb. 1 Elektrisches Feld und Kraft auf einen geladenen Körper

Die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ ist definiert als Quotient aus der Feldkraft $\vec{F}_{el}$ und der Ladungsmenge q der Ladung, auf welche die Feldkraft wirkt

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q} \quad \text{bzw.} \quad E = \frac{F_{el}}{q}$$

Für die **Kraft** auf einen geladenen Körper in einem **homogenen elektrischen Feld** gilt:

$$\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E} \quad F_{el} = q \cdot E$$



Abb. 2 homogenes elektrisches Feld

Dadurch, dass $F_{el} \sim U$ gilt, ergeben sich weitreichende Anwendungsmöglichkeiten. So zum Beispiel die Ablenkung eines Elektronenstrahls im von Ferdinand Braun entwickelten Oszilloskop.

Bei der Bildröhre eines Fernsehapparats erfolgt die Ablenkung über Magnetfelder.

Bestimmte Tintenstrahldrucker erzeugen einen kontinuierlichen Tröpfchenstrahl, der elektrisch aufgeladene Tintentröpfchen enthält und horizontal über das Papier geführt wird. Ein Ablenkplattenpaar lenkt bei Bedarf Tröpfchen in einen Auffangbehälter, solange eine Spannung angelegt ist. Durch An- und Abschalten der Spannung kann dann das Beschreiben des Papiers verhindert oder ermöglicht werden.

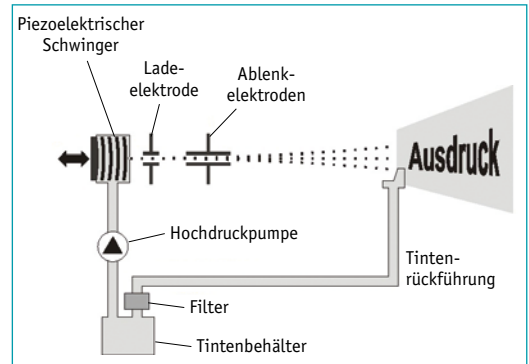


Abb. 3 Ablenkung geladener Teilchen (Tintentröpfchen)

Am Beispiel einer Braun'schen Röhre wird die Wirkung elektrischer Felder auf anfänglich „ruhende“ und bewegte Elektronen im Elektronenstrahl dargestellt.

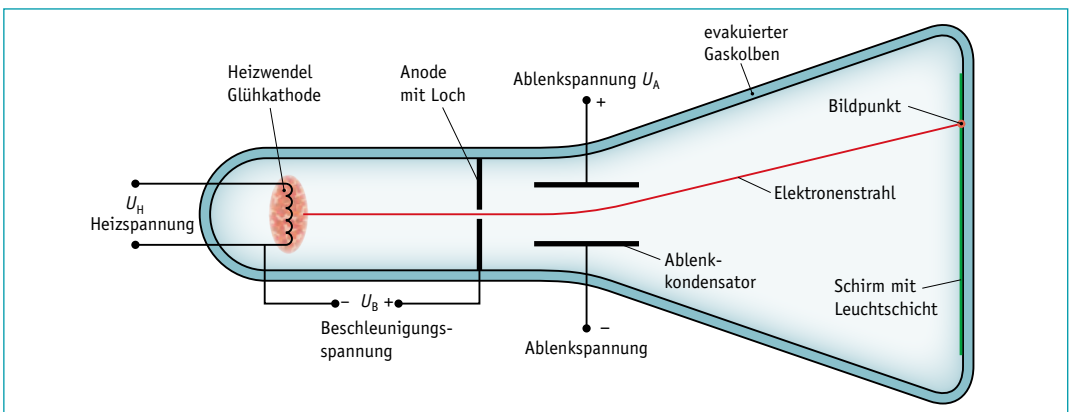


Abb. 4 Braun'sche Röhre

1.1.1 Elektrische Feldkraft

Dargestellt ist der Aufbau einer **Braun'schen Röhre**:

Elektrisches Längsfeld

In einem evakuierten Glaskolben werden in der Heizwendel durch **Glühemission** Elektronen freigesetzt, die im elektrischen Längsfeld $\vec{E}_L$ zwischen Glühkathode und Lochanode durch die Beschleunigungsspannung U_B beschleunigt (und durch einen Wehnelt-Zylinder) zu einem Elektronenstrahl gebündelt werden.

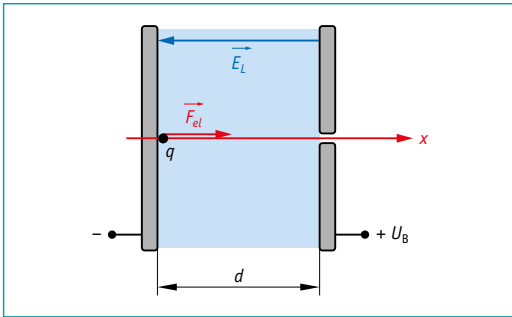


Abb. 1 Elektrisches Längsfeld $\vec{E}_L$

$$F_{\text{res}} = F_{\text{el}}$$

$$m \cdot a_x = |q| \cdot E_L = |q| \cdot \frac{U_B}{d}$$

$$a_x = \frac{|q| \cdot U_B}{m \cdot d}$$

Für den Betrag der Geschwindigkeit am Ende der geradlinigen Beschleunigungsstrecke $x = d$ gilt:

$$v^2 = 2 \cdot a_x \cdot x \text{ (wird anschließend als } v_0 \text{ bezeichnet)}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot a_x \cdot d}$$

$$= \sqrt{2 \cdot \frac{|q| \cdot U_B}{m \cdot d} \cdot d}$$

$$= \sqrt{2 \cdot \frac{|q|}{m} \cdot U_B}$$

Solange die spezifische Ladung $\frac{q}{m}$ eines beschleunigten Teilchens konstant ist, hängt der Betrag der Endgeschwindigkeit nur von der durchlaufenen Spannung U_B ab.

Elektrisches Querfeld

Nach dem Passieren der Lochanode tritt der Elektronenstrahl mittig in das homogene Feld $\vec{E}_Q$ zwischen den Ablenkplatten ein, dessen Feldlinien quer zur Bewegungsrichtung verlaufen. Dort erfahren die Elektronen die elektrische Feldkraft, welche sie beschleunigt und damit ablenkt.

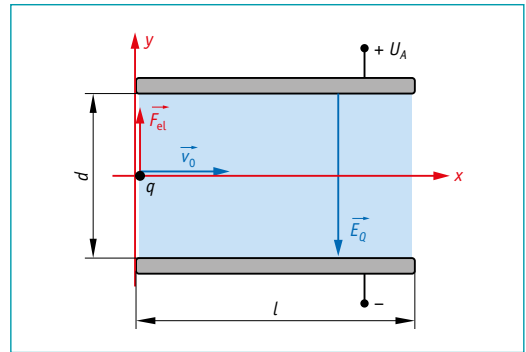


Abb. 2 Elektrisches Querfeld $\vec{E}_Q$

$$F_{\text{res}} = F_{\text{el}}$$

$$m \cdot a_y = |q| \cdot E_Q = |q| \cdot \frac{U_A}{d}$$

$$a_y = \frac{|q| \cdot U_A}{m \cdot d}$$

Da nun die Richtungen der Anfangsgeschwindigkeit $\vec{v}_0$ und die der Beschleunigung nicht mehr parallel sind, muss in einem 2-dim. x-y-Koordinatensystem gerechnet werden. Analog zum Problem „waagrechter Wurf“ ergibt sich hier eine Ablenkung auf einer **Parabelbahn**.

Ein weiteres, um 90° gedrehtes Plattenpaar ermöglicht eine Ablenkung in z-Richtung.



Braun'sche Röhre → Seite 29

Aufgabe zu Aufbau, Funktionsweise, Gleichung der Bahnkurve uvm.

Zwar hat J.J. Thomson das Elektron „entdeckt“ und das Verhältnis aus Ladung und Masse bestimmen können, aber die einzelnen Werte von Ladung und Masse blieben unbestimmt. Daher waren viele Wissenschaftler mit der Suche nach der Ladungsmenge eines Elektrons beschäftigt.

Am erfolgreichsten war Robert Millikan¹², der 1910 mit präzisen Messungen mit dem nach ihm benannten Versuch eine kleinste Ladungsmenge bestimmte.

Bestimmung der Elementarladung

Millikan verwendete Öltröpfchen, die mit Hilfe eines Zerstäubers in einen luftdicht abgeschirmten

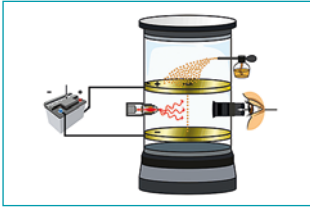


Abb. 1 Versuchsaufbau nach Millikan

Kondensator eingeblasen wurden. Durch Reibung im Zerstäuber wurden dabei einige Tröpfchen aufgeladen und zwar unterschiedlich

bezüglich der Ladungsmenge und des Vorzeichens. Mit einem Mikroskop beobachtete er einzelne Tröpfchen: ohne E-Feld konnte er die Masse, mit E-Feld konnte die Ladung des Tröpfchens im Schwebezustand ermittelt werden.

Bei der Beobachtung von **vielen Öltröpfchen** ergab sich beim Auftragen in einem Diagramm folgendes Bild:

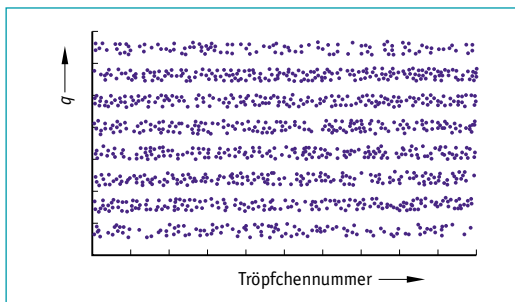


Abb. 2 Ladungen der verschiedenen Öltröpfchen

Es stellte sich heraus, dass die Ladungsmenge der Tröpfchen nur in bestimmten (diskreten) Werten vorkam, aber die Unterschiede immer ein Vielfaches einer kleinsten Ladungsmenge waren – der **Elementarladung e**.

$$e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Freie Teilchen wie z.B. Elektronen, Protonen oder α -Teilchen tragen ein ganzzahliges (positives oder negatives) Vielfaches der Elementarladung.



Millikanversuch → Seite 30

Aufgabe zu Aufbau, Herleitung und Auswertung

Die **Ladung eines Elektrons** beträgt genau eine Elementarladung:

$$q_e = -1e = -1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Ein Proton besitzt die gleich positive Ladungsmenge:

$$q_p = +1e$$

Die Quarks des Standardmodells (siehe Kapitel 4.1.1) besitzen zwar Ladungen von $\pm \frac{1}{3} \cdot e$ oder $\pm \frac{2}{3} \cdot e$, kommen aber nicht als freie Teilchen vor.

Mit dem Ergebnis der spezifischen Ladung e/m eines Elektrons und seiner Ladung $| -e |$ konnte man die (Ruhe)-**Masse eines Elektrons** bestimmen:

$$m_0 = \frac{e}{e/m} = \frac{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$



Elektronvolt – Joule → Seite 32

Aufgabe zum Umrechnen der Energieeinheit

¹² Robert Millikan (1868–1953), US-amerikanischer Physiker, Nobelpreis für Physik 1923

1.1.2 Das Magnetfeld und die Lorentz¹³-Kraft

Ein **Magnetfeld** ist der Raum, in dem auf ferromagnetische Stoffe und stromdurchflossene Leiter eine Kraft wirkt, die **magnetische Feldkraft** $\vec{F}_{\text{magn}}$.

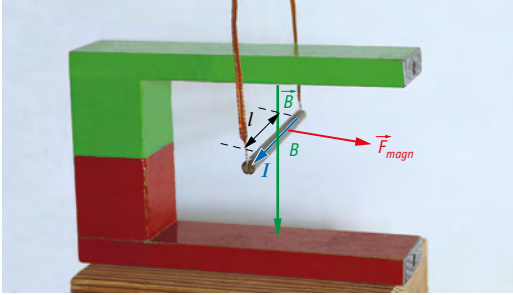


Abb. 1 Kraft auf Leiterschaukel

Der ganze vom Strom I durchflossene Leiter mit der im Magnetfeld $\vec{B}$ befindlichen Leiterlänge l erfährt die magnetische Kraft $\vec{F}_{\text{magn}}$.

$$\vec{F}_{\text{magn}} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

bzw. mit $\vec{l} \perp \vec{B}$ folgt

Mikroskopische Betrachtung:

$$F_{\text{Leiter}} = I \cdot l \cdot B$$

Der Betrag B der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ ist definiert als Quotient aus der Feldkraft $\vec{F}_{\text{magn}}$ und dem Produkt aus Leiterlänge l im Magnetfeld und der Stromstärke I .

$$B = \frac{F_{\text{magn}}}{I \cdot l}$$

$$[B] = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1 \text{ T (Tesla)}$$

Bislang wurde in der 12. Jahrgangsstufe nur die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter behandelt. Was ist die Ursache dafür? Wodurch unterscheidet sich ein stromdurchflossener Leiter von einem Leiter, durch den kein Strom fließt?

Makroskopische Betrachtung:

Stromfluss bedeutet, dass sich die freibeweglichen Elektronen mit $q = -e$ im Leiter mit der Driftgeschwin-

digkeit $\vec{v}$ entgegen der elektrischen Feldrichtung im Leiter bewegen.

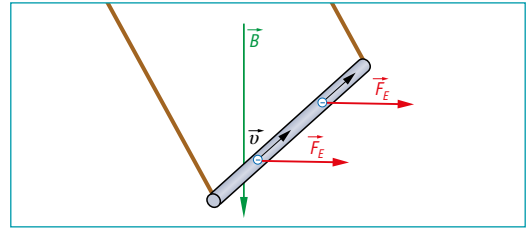


Abb. 2 Kraft auf Leiterschaukel – makroskopisch betrachtet

$$\begin{aligned} F_{\text{Leiter}} &= I \cdot l \cdot B = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot l \cdot B \\ &= \frac{N \cdot e}{\Delta t} \cdot l \cdot B = N \cdot e \cdot \frac{l}{\Delta t} \cdot B \\ &= N \cdot e \cdot v \cdot B = N \cdot F_E \\ &\quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{F_{\text{Elektron}}} \end{aligned}$$

Daraus folgt, **ein** bewegtes Elektron erfährt die Kraft $F_E = e \cdot v \cdot B$

Allgemein gilt:

Bewegte Ladungsträger erfahren in einem Magnetfeld die **Lorentz-Kraft**.

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Dabei bilden die Vektoren $\vec{v}$, $\vec{B}$ und $\vec{F}_L$ für eine **positive Ladung q ein Rechts-System**.

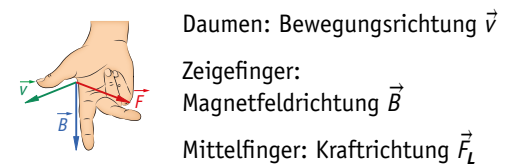


Abb. 3 Drei-Finger-Regel der rechten Hand

Wenn die Ladung q negativ ist (wie z. B. bei Elektronen), ist die Orientierung der Kraft entgegengesetzt, also „dreht man den Mittelfinger um“ oder nimmt dann die linke Hand.

¹³ Hendrik Lorentz (1853–1928), niederländischer Physiker

Dass die Lorentz-Kraft $\vec{F}$ immer senkrecht zur Geschwindigkeit $\vec{v}$ und zur magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ steht, kann man mit einem interessanten Versuchsaufbau zeigen:

Fadenstrahlröhre

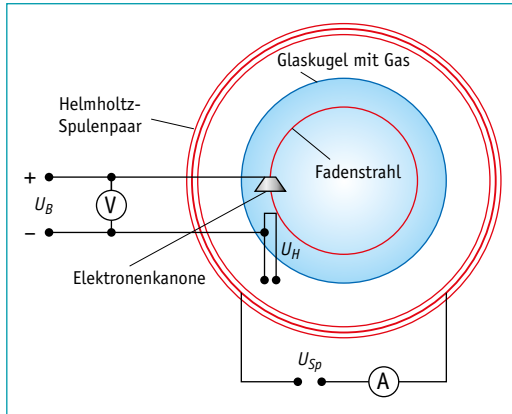


Abb. 1 Fadenstrahlröhre – Prinzipskizze

In einer nahezu evakuierten Röhre (Gasmoleküle in sehr geringer Konzentration) befindet sich eine **Elektronenkanone**, die einen dünnen Elektronenstrahl erzeugt. Durch Zusammenstöße der bewegten Elektronen mit den Gasmolekülen werden diese auf ein höheres Energieniveau gebracht, beim Rücksprung in den Grundzustand senden sie jeweils ein Photon aus (siehe 3.7.3).



Abb. 2 Fadenstrahl (ohne Magnetfeld)

Ein Helmholtz¹⁴-Spulenpaar erzeugt im Innenbereich ein nahezu homogenes Magnetfeld und erlaubt im Gegensatz zu einer langgestreckten Spule gute Sicht auf die Röhre.

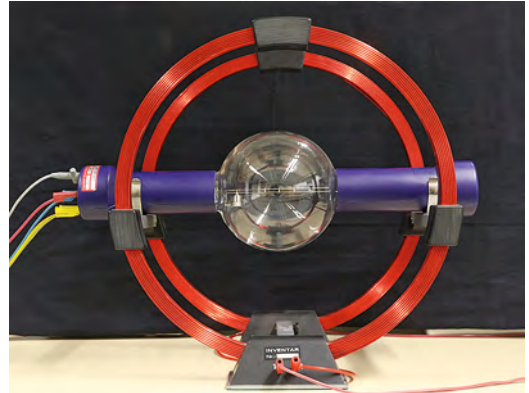


Abb. 3 Röhre mit Helmholtzspulenpaar

Werden die Elektronen senkrecht zur Feldrichtung des Magnetfeldes eingeschossen, so erfahren sie die Lorentz-Kraft, welche sie auf eine Kreisbahn zwingen.

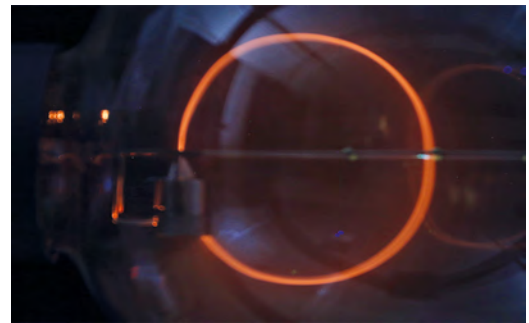


Abb. 4 Elektronen auf der Kreisbahn

Für den Radius der Kreisbahn gilt folgender Ansatz; da die Lorentz-Kraft die für die Kreisbahn notwendige Zentripetalkraft ist:

$$F_L = F_z \quad q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B}$$

Der Bahnradius r hängt vom Betrag B der magnetischen Flussdichte und vom Betrag v der Einschussgeschwindigkeit ab, diese wiederum von der Beschleunigungsspannung U_B . Wenn man das in vorige Formel einfügt, gilt für die spezifische Ladung eines Elektrons:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{r^2 \cdot B^2}$$

¹⁴ Herrmann von Helmholtz (1821–1894), deutscher Physiologe und Physiker

Dazu muss man die Spannung U_B , den Betrag B der magnetischen Flussdichte sowie den Radius r der Kreisbahn messen.

Die Röhre ist drehbar gelagert, so dass man mit diesem Aufbau die Einschussrichtung der Elektronen relativ zur Richtung des Magnetfeldes verändern kann.

Dabei entstehen anstelle einer Kreisbahn auch andere Bahnformen im Magnetfeld:

Gerade im
Magnetfeld



Abb. 1 Gerade

Schraubenlinie



Abb. 2 Schraubenlinie

Strahlumkehr
(magnetische
Flasche)



Abb. 3 Strahlumkehr

Während die beiden ersten Bahnformen sich mit einem geänderten Einschusswinkel erklären lassen, entsteht die komplizierte Bahnform durch einen zusätzlichen starken Magneten, der von außen an die Röhre gehalten wird und so das bislang homogene Feld in der Röhre mit einem inhomogenen Magnetfeld überlagert.



Fadenstrahlröhre → Seite 32

Aufgabe zu Herleitungen und Berechnungen

In diesem inhomogenen Magnetfeld, vergleichbar mit dem Erdmagnetfeld in der Nähe der magnetischen Pole der Erde, kann es zu einer Strahlumkehr kommen, d. h. der Elektronenstrahl ändert seine Orientierung.

Polarlicht



Abb. 4 Polarlicht

Bei hoher Sonnenaktivität werden große Mengen von geladenen Teilchen mit hoher Geschwindigkeit von der Sonnenoberfläche ausgestoßen und erreichen als Sonnenwind auch die Erde. Durch das Magnetfeld der Erde werden diese Teilchen auf Schraubenlinien entlang der magnetischen Feldlinien in Richtung der magnetischen Pole abgelenkt.

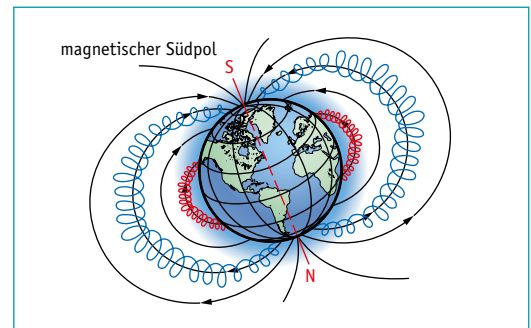


Abb. 5 Feldlinien mit Elektronen (blau) und Protonen (rot)

In den Polregionen ist das Magnetfeld extrem inhomogen, so dass die Elektronen entweder in ihrer Bewegungsrichtung umgedreht werden und sich zum anderen Magnetpol bewegen oder in die äußeren Schichten der Atmosphäre eindringen.



Abb. 1 Polarlicht von der ISS aus beobachtet

Dort regen sie durch Stöße Atome an, wobei diese beim Rücksprung in den Grundzustand Licht ausstrahlen: Sauerstoff bewirkt grünes und rotes, Stickstoff violette Licht.

Magnetische Linse

Bewegen sich geladene Teilchen wie Elektronen in inhomogenen Magnetfeldern, so erfahren sie ebenso die Lorentz-Kraft, die aber eine andere Wirkung auf einen Elektronenstrahl entfaltet: Die Wirkung einer **magnetischen Linse**.

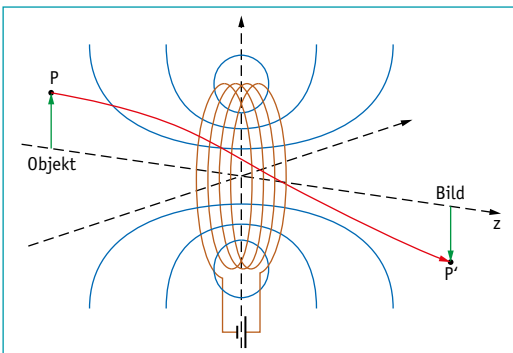


Abb. 2 magnetische Linse

Das Loch in der Anode der Elektronenkanone entspricht einem Bildpunkt P, von dem divergente Lichtstrahlen ausgehen. Nach dem Durchgang durch die Spule, die in der Modellvorstellung einer Sammellinse entspricht, werden die Elektronenstrahlen wieder auf einen Punkt P' fokussiert. In der Strahlenoptik werden entsprechend alle Lichtstrahlen von einem Punkt P auf einen Bildpunkt P' abgebildet. Die Bahnen der Elektronen dorthin sind jedoch keine Geraden, sondern komplexe Kurvenbahnen.

Dieses Prinzip findet seine Anwendung im Elektronenmikroskop (siehe 3.4.6).

1.1.3 Kräfte im E- und B-Feld

Viele physikalische Mess- und Analysegeräte für geladene Teilchen beruhen auf der Kombination von elektrischen und magnetischen Feldern. Durch eine geeignete Anordnung eines E-Feldes und eines B-Feldes erreicht man, dass auf bewegte geladene Teilchen sowohl die elektrische Kraft $F_{el} = q \cdot E$ als auch die Lorentzkraft $F_L = q \cdot v \cdot B$ wirken.

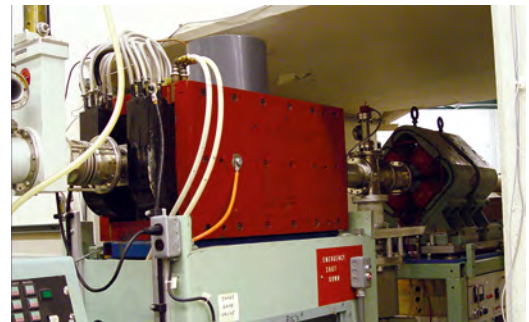


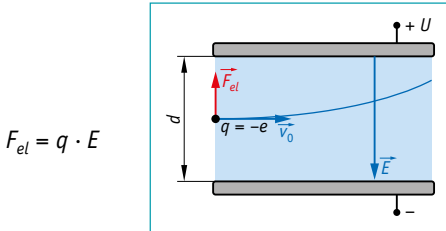
Abb. 3 Geschwindigkeitsfilter

So werden im Geschwindigkeitsfilter geladene Teilchen mit einer **ganz bestimmten Geschwindigkeit** in beiden Feldern **nicht abgelenkt**, alle anderen schon.

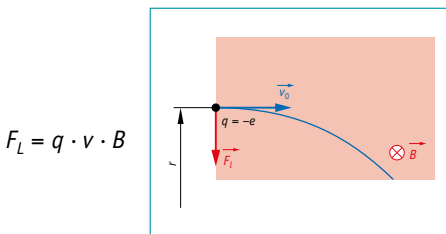
So können aus einem Strahl von verschiedenen schnellen Teilchen die mit einer bestimmten Geschwindigkeit herausgefiltert oder deren Geschwindigkeit ermittelt werden.

Geschwindigkeitsfilter nach Wien¹⁵

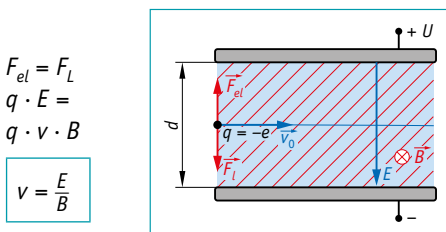
Eingeschossene Elektronen erfahren im homogenen E-Feld durch die elektrische Kraft F_{el} eine Ablenkung nach oben auf einer parabelförmigen Bahn.

**Abb. 1** Elektron im E-Feld

In einem homogenen Magnetfeld werden diese Elektronen durch die Lorentz-Kraft nach unten auf einen Kreisbogen abgelenkt.

**Abb. 2** Elektron im B-Feld

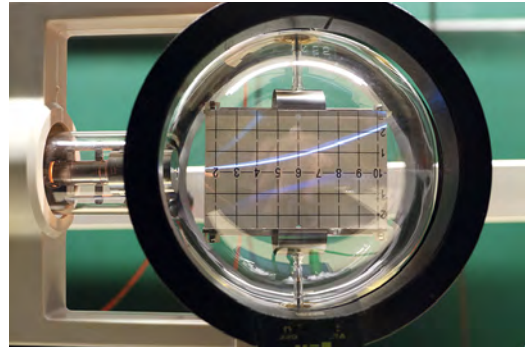
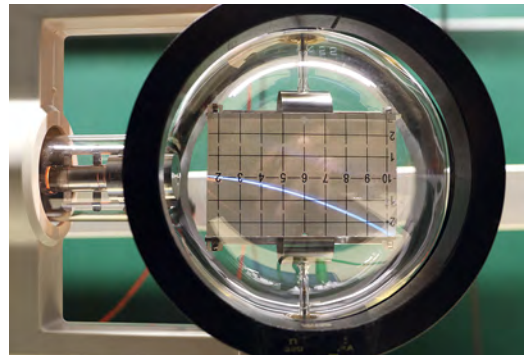
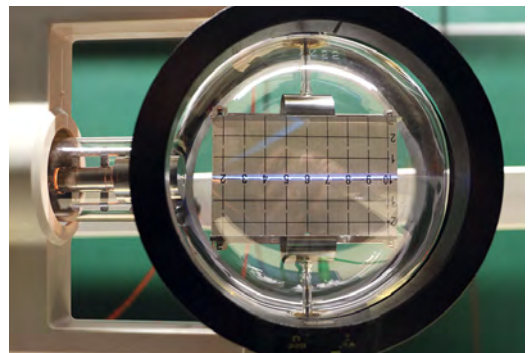
Werden E- und B-Feld senkrecht zueinander überlagert, so können sich die beiden Feldkräfte gegenseitig in ihrer Wirkung aufheben. Dadurch bewegen sich Elektronen mit einer bestimmten Geschwindigkeit geradlinig.

**Abb. 3** Elektron im E- und B-Feld

Elektronen (oder andere zu untersuchende Teilchen) mit einer anderen Geschwindigkeit werden entweder nach oben oder unten abgelenkt und können eine danach angebrachte Blende nicht passieren.

**Wien-Filter → Seite 33**

Aufgabe zur Funktionsweise, Geschwindigkeit ...

**Abb. 4** Ablenkung im E-Feld (Parabelbahn)**Abb. 5** Ablenkung im B-Feld (Kreisbogen!)**Abb. 6** Keine Ablenkung im E- und B-Feld (Gerade)

¹⁵ Wilhelm Wien (1864 – 1928), deutscher Physiker, Nobelpreis für Physik 1911

Eine gute Möglichkeit, sich online und interaktiv mit den Versuchen auseinander zu setzen, bietet die Ludwig-Maximilian-Universität München an:
<https://virtuelle-experimente.de/index.php>



Abb. 1 Ausschnitt aus einer Internetseite der LMU

Massenspektrometer

Nachdem J.J. Thomson die Natur der (negativen) Kathodenstrahlen enthüllt hatte, wandte er sich Anfang des 20. Jahrhunderts den „positiven Strahlen“ zu. Dazu benutzte er elektrische und magnetische Felder zur Ablenkung und erfasste die Strahlen auf fotografischen Platten.

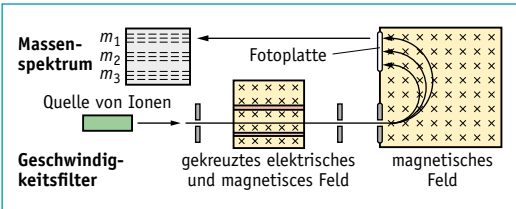


Abb. 2 Massenspektrometer – schematischer Aufbau

In einer Ionenquelle wird ein Strahl von geladenen Teilchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erzeugt. Den Geschwindigkeitsfilter können nur Ionen mit einer genau bestimmten Geschwindigkeit passieren und gelangen danach in ein Magnetfeld, wo sie auf einer Halbkreisbahn mit Radius r in Abhängigkeit von ihrer spezifischen Ladung q/m abgelenkt und danach registriert werden.

Francis Aston¹⁶, ein Assistent Thomsons, lieferte entscheidende Verbesserungen im Aufbau: Die Teilchen wurden zunächst ionisiert (wenn nötig, mussten sie zuvor noch in den gasförmigen Zustand gebracht, d. h. verdampft werden). Danach wurden sie in einem elektrischen Längsfeld beschleunigt, fokussiert und traten dann als Ionenstrahl in den eigentlichen Messaufbau ein. Wegen der unterschiedlichen Massen hatten die Teilchen im Ionenstrahl unterschiedliche Geschwindigkeiten. In einem weiteren elektrischen Feld wird der Strahl dabei aufgefächert. Im anschließenden passenden, homogenen Magnetfeld trafen alle Ionen mit gleicher spezifischer Ladung trotz unterschiedlicher Geschwindigkeiten auf denselben Punkt am Detektor.

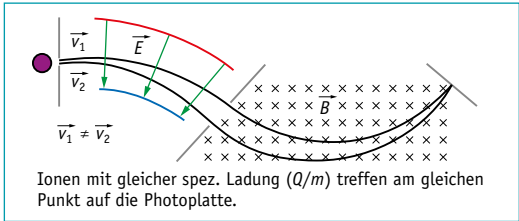


Abb. 3 Massenspektrometer nach Aston – Prinzipskizze

¹⁶ Francis Aston (1877 – 1945), britischer Physiker und Chemiker, Nobelpreis für Chemie 1922

In Anlagen wie diesen wurden die Isotope der verschiedenen Elemente gefunden (siehe 4.1.3).

In den letzten Jahrzehnten entwickelte sich die Massenspektrometrie zu einer grundlegenden Technik der Chemiker zur Identifizierung und Charakterisierung von Molekülen.



Massenspektrometer → Seite 34

Aufgabe zu Herleitungen und Berechnungen

Beschleuniger

Eine Anlage, in der elektrisch geladene Teilchen (z. B. Elementarteilchen, Atomkerne, ionisierte Atome oder Moleküle) in einem Vakuum durch elektrische Felder auf große Geschwindigkeiten beschleunigt werden, nennt man **Teilchenbeschleuniger**. Grundsätzlich lassen sich geladene Teilchen **nur im elektrischen Feld auf höhere Geschwindigkeitswerte beschleunigen**.

Die ersten Beschleuniger – dazu kann man auch Elektronenstrahlröhren zählen – arbeiteten mit einer Gleichspannung, welche die Endgeschwindigkeit der geladenen Teilchen bestimmte (siehe elektrisches Längsfeld auf Seite 11). Aber durch eine hohe Spannung kann es auch in Vakuum zum Durchschlag (Funkenbildung) kommen, daher waren der Endgeschwindigkeit Grenzen gesetzt.

Also entwickelte man Beschleuniger, bei denen eine geringere Spannung **mehrfach** durchlaufen wurde. Dies wurde mit röhrenförmigen Elektroden, die entlang einer Achse angeordnet waren, verwirklicht, daher hat sich die Bezeichnung **Linearbeschleuniger** durchgesetzt.

Der Teilchenstrahl musste durch röhrenförmige Elektroden laufen, zwischen denen eine hochfrequente Wechselspannung angelegt war

Da die beschleunigten Teilchen nur im Zwischenraum zwischen den Elektroden (Röhren) beschleunigt wurden, mussten sie sich in der Zeitspanne der Um-

polung in einem feldfreien Raum bewegen. Durch die Zunahme der Geschwindigkeit der Teilchen musste auch die Länge der Röhren zunehmen – in Abstimmung mit der Frequenz der anliegenden Wechselspannung.

Der Vorteil der geringeren Spannung wurde durch die enorme Länge des Beschleunigers erkauft.



Abb. 1 Luftbild des Linear-Beschleunigers in Stanford

Beim weltgrößten Linearbeschleuniger SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) in Kalifornien musste die ganze Anordnung von 3 km Länge evakuiert werden – eine große technische Herausforderung in der Mitte des 20. Jahrhunderts.

Elektronen-Linearbeschleuniger geringerer Energie werden vor allem zur Erzeugung von Röntgenstrahlung eingesetzt, etwa in der medizinischen Strahlentherapie zur Tumorbekämpfung (siehe 4.7).

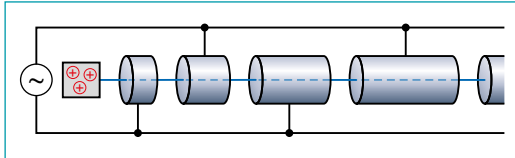


Abb. 2 Medizinischer Elektronen-Linearbeschleuniger

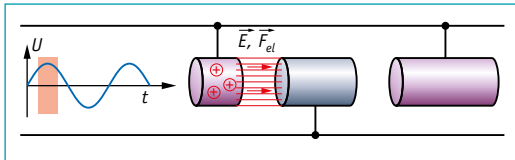
Auch bei der Durchstrahlungsprüfung von Frachtcontainern oder bei der Strahlensterilisation (siehe 2.5.1) von Lebensmitteln kommen sie zur Verwendung.

Linearbeschleuniger

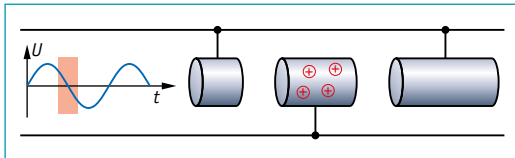
In einer Elektronenkanone bzw. Ionenquelle wird ein dünner Elektronen- bzw. Teilchenstrahl erzeugt, der durch die sogenannten Driftröhren geschickt wird. Die ganze Anordnung befindet sich im Hochvakuum.



Wenn die zwischen den Röhren anliegende, hochfrequente Wechselspannung ein Maximum erreicht hat, werden die geladenen Teilchen im Spalt zwischen den Röhren beschleunigt.



Wenn die Spannung gegen Null geht und umgepolt wird, bewegen sich die Teilchen innerhalb einer Röhre im feldfreien Raum mit konstanter Geschwindigkeit weiter und erreichen dann den nächsten Spalt.



Die Wechselspannung ist nun umgepolt, so dass sich der Vorgang im nächsten Spalt wiederholen kann.

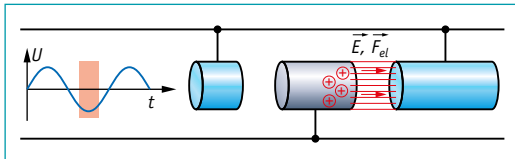


Abb. 1 Prinzip der Beschleunigung

Bei jedem Durchlauf eines Spaltes nimmt die kinetische Energie der Teilchen zu.



Linearbeschleuniger → Seite 35

Aufgabe zu Herleitungen und Berechnungen

Zur selben Zeit entwickelte man ein anderes Konzept eines Teilchenbeschleunigers: Anstelle von Röhren, in den sich die Teilchen gleichförmig bewegen, während die Spannung umgepolt wird, werden sie in metallischen Hohlkörpern, den so genannten Duanden, durch ein gleichzeitig wirkendes Magnetfeld auf Halbkreisbahnen abgelenkt und durchlaufen dann wieder das umgedrehte E-Feld, sogenannte **Kreisbeschleuniger**.

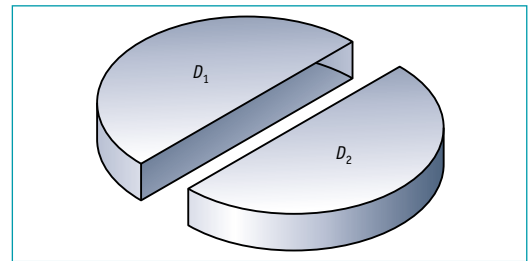


Abb. 2 Duanden (Dees)

Diese Art von Beschleuniger nennt man **Zyklotron**, das erste funktionsfähige stellte Ernest Lawrence¹⁷ im Jahr 1930 mit einem Durchmesser 12,5 cm vor. Es folgten noch größere und noch schwerere Anlagen.



Abb. 3 Im Inneren eines Zyklotrons

Das weltweit größte Zyklotron befindet sich im RI-KEN-Labor in Japan. Das **SRC** (Superconducting Ring Cyclotron) hat einen Durchmesser von 19 m und ein Gesamtgewicht 8.300 t.

¹⁷ Ernest Lawrence (1901 – 1958), US-amerikanischer Physiker, Nobelpreis für Physik 1939