Physikalische Schulversuche

11

Aufbau der Stoffe

Physikalische Schulversuche

Elfter Teil

Aufbau der Stoffe

Herausgegeben von Hans-Joachim Wilke

3. Auflage

Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1982

Verfaßt von

Dr. Hans-Joachim Wilke (1.0.*, 1.1. bis 1.3., 2.0.*, 2.1. und 2.2., 3.0*, 3.1. bis 3.3., 4.0.*, 4.1. bis 4.3., 5.0.*, 5.1. bis 5.3., 9.4., Anhang*)
Dr. Wolfgang Regenstein (6.1. bis 6.6., 7.1.3., 7.2. bis 7.7., 8.1. und 8.2., Anhang*)
Dr. Heinz Jöricke † (1.0.*, 2.0.*, 3.0.*, 4.0.*, 5.0.*, 6.0., 7.0., 7.1.1., 7.1.2., 8.0., 9.0. bis 9.3.)

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

Redaktion: Willi Wörstenfeld

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1978
3. durchgesehene Auflage
Lizenz Nr. 203 · 1000/82 (DN 022149—3)
LSV 0645
Einband: Manfred Behrendt
Zeichnungen: Waltraud Schmidt
Typografie: Atelier vwv
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", 5820 Bad Langensalza
Schrift: 9/10 Extended Monotype
Redaktionsschluß: 15. 1. 1982
Bestell-Nr. 706979 3
DDR 9,70

Inhalt

Einleitung 11

1. Die atomistische Struktur der Stoffe 15

1.0. **Methodische Bemerkungen** 15

1.1. **Teilbarkeit der Stoffe** 17

1.1.1. Mechanisches Zerkleinern von Zucker 17
1.1.2. Lösen von Zucker in Wasser 17
1.1.3. Grobe Abschätzung der Molekülmasse durch Verdünnen einer Fluoreszeinlösung . 18
1.1.4. Verdunsten von Äther 19
1.1.5. Nachweis der begrenzten Teilbarkeit mit dem Ölfleckversuch 20

1.2. **Brownsche Bewegung — Diffusion** 21

1.2.1. Nachweis der Brownschen Bewegung in Wasser 21
1.2.2. Nachweis der Brownschen Bewegung in Luft 22
1.2.3. Demonstration der Brownschen Bewegung der Rotation 23
1.2.4. Nachweis der thermischen Bewegung in Flüssigkeiten 25
1.2.5. Nachweis der Thermodiffusion mit dem Modelltrennrohr 26
1.2.6. Nachweis der Thermodiffusion mit einem selbstgebauten Trennrohr 27
1.2.7. Trennung von Luft und Bromdampf mit einem selbstgebauten Thermodiffusionstrennrohr 29

1.3. **Modellexperimente zur atomistischen Struktur fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe** 30

1.3.1. Modellmäßige Veranschaulichung einiger Vorgänge in Kristallen 30
1.3.2. Modellexperimente zur Brownschen Bewegung und zur Diffusion mit einem Schüttelapparat 31
1.3.3. Modellversuch zur Brownschen Bewegung in Gasen 33
1.3.4. Experimente mit einem Flüssigkeitsmodell 34
1.3.5. Modellmäßige Veranschaulichung der Brownschen Bewegung und der Diffusion in Gasen 37
1.3.6. Modellexperimente zur thermischen Bewegung in Gasen mit einem Luftkissenaufsatz zum Tageslichtschreibprojektor 39
1.3.7. Modell eines Feldelektronenmikroskops 42

2. Kern und Elektron als Hauptbestandteile des Atoms 44

2.0. **Methodische Bemerkungen** 44

2.1. **Ladungsträger in festen Stoffen, Flüssigkeiten und Gasen** 46

2.1.1. Nachweis der Hall-Spannung 46
2.1.2. Nachweis der Ionenleitung des Glases 48
2.1.3. Nachweis der Ionenwanderung in Flüssigkeiten 49
2.1.4. Bestimmung der Ionengeschwindigkeit in Flüssigkeiten 51
2.1.5. Zünd- und Löschspannung einer Glimmlampe 53
2.1.6. Untersuchung der Leitungsvorgänge in Luft bei vermindertem Druck 54

2.2. **Modellexperimente zur Streuung geladener Teilchen an Atomkernen** 56

2.2.1. Modellmäßige Nachbildung der Streuung eines Alphateilchens am Atomkern . . . 56
2.2.2. Modellexperiment zur Streuung von Mikroteilchen beim Durchgang durch eine Metallfolie 58

3. Einige wichtige atomare und allgemeine Konstanten 60

3.0. **Methodische Bemerkungen** 60

3.1. **Moleküldurchmesser, Atomdurchmesser und Loschmidtsche Konstante** 61

3.1.1. Abschätzung des Moleküldurchmessers, des Atomdurchmessers und der Loschmidtschen Konstanten mit dem Ölfleckversuch (Verdünnungsmethode) 61
3.1.2. Abschätzung des Moleküldurchmessers mit dem Ölfleckversuch (Tauchmethode) . . 65

3.2. **Spezifische Ladung des Elektrons** 67

3.2.1. Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons mit dem Fadenstrahlrohr (im transversalen Magnetfeld) 67
3.2.2. Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons mit der Katodenstrahlröhre (im transversalen Magnetfeld) 72
3.2.3. Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons mit der Katodenstrahlröhre (im longitudinalen Magnetfeld) 77
3.2.4. Abschätzung der spezifischen Ladung des Elektrons mit einer Elektronenröhre . . 81

3.3. **Elementarladung und Faradaysche Konstante** 84

3.3.1. Modellversuch zur Bestimmung der Elementarladung nach dem Schwebeverfahren . 84
3.3.2. Nachweis der Existenz kleinster elektrischer Ladungen 85
3.3.3. Bestimmung der elektrischen Elementarladung nach Millikan 89
3.3.4. Bestimmung der Faradayschen Konstanten mit dem Hofmannschen Wasserzersetzungsgerät 91

4. Atombau und Spektren 93

4.0. **Methodische Bemerkungen** 93

4.1. **Linienspektren des Wasserstoffs und der Edelgase** 95

4.1.1. Objektive Demonstration der Linienspektren des Wasserstoffs und der Edelgase . . 95
4.1.2. Untersuchung des Wasserstoffspektrums 97

4.2. **Linienspektren von Metalldämpfen** 99

4.2.1. Demonstration der Linienspektren von Metalldämpfen mit dem Lichtbogen 99
4.2.2. Demonstration der Linienspektren von Natrium- und Quecksilberdampf 103
4.2.3. Demonstration des sichtbaren und des ultravioletten Teils des Quecksilberspektrums 104
4.2.4. Verbreiterung der Linien des Quecksilberspektrums bei steigendem Dampfdruck . . 107

4.3. **Anregung und Ionisation von Atomen durch Elektronenstoß** 109

4.3.1. Durchführung des Franck-Hertz-Versuches mit einem edelgasgefüllten Thyratron . 109
4.3.2. Sichtbarmachen der Franck-Hertz-Kurve mit dem Katodenstrahloszillografen . . 111
4.3.3. Demonstration der Anregung von Atomen mit der Perrinschen Röhre 112

5. Wechselwirkung Licht-Stoff 114

5.0. **Methodische Bemerkungen** 114

5.1. **Der äußere lichtelektrische Effekt** 115

5.1.1. Nachweis des äußeren lichtelektrischen Effektes mit dem Elektrometer 115
5.1.2. Nachweis des äußeren lichtelektrischen Effektes mit dem Wulf-Elektroskop 116

5.2. **Plancksches Wirkungsquantum** 118

5.2.1. Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mittels Fotozelle, Kondensator und Röhrenvoltmeter 118
5.2.2. Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit der Gegenfeldmethode . . . 121

5.3. **Optische Anregung von Atomen** 123

5.3.1. Nachweis der Fluoreszenz mit einer Leuchtstofflampe 123
5.3.2. Nachweis der Fluoreszenz von festen und flüssigen Stoffen 124
5.3.3. Nachweis des Stokesschen Gesetzes mit einem Filtersatz 125
5.3.4. Nachweis des Stokesschen Gesetzes mittels spektral zerlegten Lichtes 126
5.3.5. Demonstration der Resonanzfluoreszenz von Natriumdampf 127
5.3.6. Demonstration der Umkehr der Natriumlinie mittels gefärbter Flamme 129
5.3.7. Demonstration der Umkehr der Natriumlinie mittels präparierter Glühlampe . . . 130

6. Detektoren zum Nachweis der Kernstrahlung 132

6.0. **Methodische Bemerkungen** 132

6.1. **Fotoemulsion** 135

6.1.1. Herstellen eines Autoradiogrammes 135
6.1.2. Äquidensiten eines Autoradiogrammes 136
6.1.3. Herstellen verschiedener Radiogramme 138

6.2. **Nebelkammer** 139

6.2.1. Nachweis von Alphateilchen mit der Expansionsnebelkammer 139
6.2.2. Nachweis von Alpha- und Betastrahlen sowie des Nulleffektes mit der Diffusionsnebelkammer 141

6.3. **Ionisationskammer** 144

6.3.1. Prinzip der Ionisationskammer 144
6.3.2. Messung des Ionisationsstromes 144

6.4. **Geiger-Müller-Zählrohr** 147

6.4.1. Aufnahme der Kennlinie eines Geiger-Müller-Zählrohres 147
6.4.2. Messungen im Bereich der beschränkten Proportionalität eines Zählrohres VA-Z-320 149
6.4.3. Oszillografischer Nachweis der Kernstrahlung 150
6.4.4. Tot- und Auflösungszeit eines Geiger-Müller-Zählrohres 152

6.5. **Szintillationszähler** 153

6.5.1. Prinzip des Szintillationszählers 153
6.5.2. Spektrale Empfindlichkeit eines Fotosekundärelektronenvervielfachers 155
6.5.3. Kennlinie eines Szintillationszählers 156
6.5.4. Vergleich der Gammastrahlungsempfindlichkeit des Szintillationszählers mit der des Zählrohres 158

6.6. **Halbleiterdetektor** 158

6.6.1. *I-U*-Sperrkennlinie eines Halbleiterdetektors 158
6.6.2. Bestimmung der Sperrschichtdicke eines Halbleiterdetektors 159

7. Eigenschaften der Strahlenarten 162

7.0. **Methodische Bemerkungen** 162

7.1. **Demonstration von Häufigkeitsverteilungen** 165

7.1.1. Trefferverteilung mit dem Wurfgerät 165
7.1.2. Verteilungen am Galtonschen Nagelbrett 165
7.1.3. Experimentelle Bestimmung der Gaußverteilung durch Zählrohrmessungen 168

7.2. **Halbwertszeit** 170

7.2.1. Halbwertszeit von ^{220}Rn (Thoron) 170

7.3. **Aktivität** 173

7.3.1. Relative Aktivitätsbestimmung 173
7.3.2. Absolute Aktivitätsbestimmung mit Hilfe von Koinzidenzen 174

7.4. **Kernreaktionen** 177

7.4.1. Modellversuch zu Kernreaktionen 177

7.5. **Eigenschaften der Alphastrahlen** 178

7.5.1. Alphaspektroskopie 178
7.5.2. Absorption der Alphastrahlen 182

7.6. **Eigenschaften der Betastrahlen** 184

7.6.1. Betaspektroskopie mit magnetischem Spektrometer 184
7.6.2. Betaspektroskopie mit Szintillationszähler 188
7.6.3. Betaabsorption 189

7.6.4. Selbstabsorption 191
7.6.5. Ablenkung von Positronen- und Elektronenstrahlen im Magnetfeld 192
7.6.6. Betarückstreuung 193

7.7. **Eigenschaften der Gammastrahlen** 196

7.7.1. Gammaspektroskopie 196
7.7.2. Gammaabsorption 198
7.7.3. Reichweite der Gammastrahlen 200
7.7.4. Streuung der Gammastrahlen 201

8. Anwendungen von Radionukliden 202

8.0. **Methodische Bemerkungen** 202

8.1. **Dosimetrie und Strahlenschutz** 203

8.1.1. Aktivität und Exposition 203
8.1.2. Isodosen 204
8.1.3. Radioaktivität der Atmosphäre 205
8.1.4. Aufsuchen von radioaktiven Kontaminationen 207

8.2. **Anwendungen von Radionukliden in der Technik** 207

8.2.1. Dickenmessung 207
8.2.2. Defektoskopie 208
8.2.3. Inhalts- und Packkontrolle 209
8.2.4. Füllstandsmessungen 209
8.2.5. Volumenbestimmung 210

9. Wellen- und Teilcheneigenschaften von Mikroobjekten 211

9.0. **Methodische Bemerkungen** 211

9.1. **Vergleich von Teilchen- und Wellenbewegung** 215

9.1.1. Doppelspaltexperiment mit Teilchen 215
9.1.2. Doppelspaltexperiment mit Wellen 217

9.2. **Demonstration des Teilchenaspekts bei kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung** . 218

9.2.1. Nachweis von Strahlungsquanten mit dem Zählrohr 218
9.2.2. Änderung der Zählrate durch Blenden 219
9.2.3. Koinzidenzmessungen 220

9.3. **Welle-Teilchen-Verhalten des Lichts** 221

9.3.1. Interferenz und Photonenhäufigkeit 221
9.3.2. Polarisation und Photonenhäufigkeit 224

9.4. **Beugung von Röntgenstrahlen** 225

9.4.1. Das Laue-Verfahren 225
9.4.2. Das Debye-Scherrer-Verfahren 227

Anhang 231

Hinweise zum Umgang mit radioaktiven Strahlungsquellen, Röntgenröhren und Quellen ultravioletten Lichts 231
Register 234

Einleitung

1. Der 11. Teil der „Physikalischen Schulversuche" enthält Experimente, die zu wichtigen Aussagen über die Struktur der Stoffe führen. Zunächst werden Versuche aus mehreren Bereichen der Physik beschrieben, die die atomistische Struktur der Stoffe belegen. Ihnen folgen Experimente zur Atomhülle. Dabei wird auch auf die Bestimmung wichtiger Konstanten eingegangen. Der Beschreibung von Experimenten zur Kernphysik und zur Anwendung von Radionukliden folgen abschließend Versuche zum Welle-Teilchen-Verhalten der Mikroobjekte.
   Das Buch enthält neben altbewährten Experimenten viele Neuentwicklungen. Bezüglich der Kapitel 6, 7 und 8 dankt der Autor den Herren Prof. Dr. habil. H. Melcher und Dr. M. Gläser für zahlreiche Anregungen.
2. Das Buch orientiert in erster Linie auf die experimentelle Arbeit und setzt deshalb physikalische Kenntnisse bezüglich der Experimente bei seinen Lesern voraus. Da sich jedoch bei vielen Schulexperimenten eine bestimmte, oft einseitige Auswertung eingebürgert hat, wird an vielen Stellen auf wichtige, aus den Versuchen folgende Aussagen hingewiesen. Dadurch sollen Anregungen gegeben werden, wie eine in bezug auf die Erklärung der Struktur der Stoffe erforderliche spezifische Auswertung erfolgen kann. Nur an wenigen Stellen wird kurz auf besonders wichtig erscheinende physikalische Grundlagen der Experimente verwiesen.
3. Jedes Kapitel wird durch methodische Bemerkungen eingeleitet. Sie geben in erster Linie für die Auswertung der Versuche Hinweise allgemeiner Art, enthalten aber auch Informationen zur Auswahl und Durchführung der Experimente. Sie erheben keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit, orientieren aber auf bestimmte methodische Wege. Oftmals werden die Experimente im Unterricht primär mit einem anderen als dem hier angegebenen Ziel durchgeführt werden. Da es aber ein Grundanliegen des Physikunterrichtes ist, den Schülern Kenntnisse über die Struktur der Stoffe zu vermitteln, sollte der Lehrer zumindest auf die diesbezügliche Aussagekraft der Experimente hinweisen.
4. Das Buch enthält alle, für die allgemeinbildende polytechnische Oberschule notwendigen Versuche, bietet aber wesentlich mehr Experimente als im Unterricht durchgeführt werden können. Viele Versuche sind als Anregung für Arbeitsgemeinschaften gedacht. Im Sinne einer weitgehend geschlossenen Darstellung aller wichtigen Versuche zur Struktur der Stoffe war es erforderlich, auch einige, bereits in anderen Teilen beschriebene Experimente aufzunehmen. In den

meisten Fällen unterscheiden sie sich von den dort beschriebenen in der speziellen Art der Durchführung bzw. Auswertung. Wichtigstes Auswahlkriterium für die Experimente war die Frage, ob entsprechende Unterrichtsmittel für ihre Durchführung in den Schulen vorhanden sind. Darüber hinaus werden leicht beschaffbare technische Geräte für die Experimente genutzt. Selbstbaubeschreibungen wurden in der Regel nur dann aufgenommen, wenn es sich um einfache Geräte handelt oder wenn der Aufwand für die Herstellung in einem vertretbaren Verhältnis zu den Einsatzmöglichkeiten des Unterrichtsmittels steht.

5. Alle gerätetechnischen Angaben, die sich auf die angebotenen Unterrichtsmittel beziehen, erfolgen so präzise wie möglich. Dennoch sind alle angegebenen Daten nur als Richtwerte zu verstehen. Die Versuchsanordnungen sind auch dann funktionstüchtig, wenn z. B. anstelle eines angegebenen Widerstandes von 25 Ohm ein solcher von 30 Ohm verwendet wird oder statt eines Kondensators der Kapazität 0,25 μF ein Kondensator mit der Kapazität 0,5 μF. Die Beispiele sollen dem Lehrer nicht nur Hinweise für eine mögliche Auswertung geben. Sie enthalten gleichzeitig Informationen bezüglich der erreichbaren Meßgenauigkeit und der auftretenden Abweichungen. Aussagen über mögliche Fehlerquellen enthalten die methodischen Hinweise bzw. Bemerkungen. Die angegebenen Meßwerte stellen reale, bezüglich der jeweiligen Versuchsanordnung aber weitgehend optimale Ergebnisse dar.
6. Folgende weitere Hinweise sollen die Arbeit mit dem Buch erleichtern:
   - Jede Versuchsbeschreibung ist in sich abgeschlossen und numeriert. Die erste Ziffer der Versuchsnummer gibt das Kapitel, die zweite den Abschnitt und die dritte die Versuchsbeschreibung an.
   - Jede Versuchsbeschreibung beginnt mit einer Stückliste der verwendeten Geräte. Dabei sind experimentelle Hilfsmittel, die überall vorhanden sind und in verschiedenen Formen Einsatz finden können, wie z. B. Stativmaterial, nicht aufgeführt.
   - Sind als Spannungsquellen Stromversorgungsgeräte vorgesehen, so erfolgt in der Regel die Angabe der Höchstspannungen (gegebenenfalls auch Höchststromstärken). Zu ihrer Bereitstellung ist unter Umständen die gleichzeitige Benutzung mehrerer Stromversorgungsgeräte erforderlich, da entweder die erforderlichen Spannungen verschiedenen Gerätetypen entnommen werden müssen oder eine Reihenschaltung zweier Geräte zur Realisierung der Spannung notwendig ist.
   - Die Versuchsbeschreibungen sind in der Regel so angelegt, daß sie mit Demonstrationsgeräten verschiedener Ausführungen, oftmals auch mit Schülerexperimentiergeräten, durchgeführt werden können. Bei einer Reihe von Versuchen ergibt sich aber zwangsläufig die Benutzung eines bestimmten Gerätes. Aber auch in diesen Fällen sind die Beschreibungen so gehalten, daß sie auf ähnliche Geräte übertragen werden können. Die jeweiligen Daten und Betriebsvorschriften müssen dann den Bedienungsanleitungen entnommen werden.
   - Das in der Versuchsüberschrift in eckigen Klammern beigefügte Zeichen [SE] bringt zum Ausdruck, daß der Versuch als Schülerexperiment im Unterricht geeignet ist.
   - Das hinter einem Gerät stehende Zeichen Ⓢ bedeutet, daß das Gerät zur Selbstherstellung empfohlen wird. Dadurch ist es möglich, die Versuche mit industriell gefertigten Unterrichtsmitteln durch Varianten zu ergänzen. Die

Selbstbauhinweise stellen außerdem Anregungen für die Tätigkeit in Arbeitsgemeinschaften dar.

- Alle Abmessungen in den Zeichnungen sind in Millimetern angegeben.
- Die in die Versuchsbeschreibungen eingefügten „Methodischen Hinweise" beziehen sich auf den jeweiligen Versuch. Sie sollen die Auswahl der Experimente erleichtern und zu ihrer methodisch effektiven Gestaltung beitragen oder auf besondere erzieherische Potenzen der Experimente hinweisen.
- Bei Hinweisen auf andere Versuche des Buches wird der Versuchs-Nummer das Zeichen V vorangesetzt, z. B.: V 2.2.1. Bei Hinweisen auf „Methodische Bemerkungen" ist das Zeichen MB unter Beifügung der Nummer des Abschnittes, z. B. MB 1.0.3., angegeben. Auf „Methodische Hinweise" verweist das Zeichen MH, z. B. vgl. MH Nr. 4 V 3.2.1., auf „Bemerkungen" das Zeichen Bem., z. B. vgl. Bem. 1 V 1.3.4.!
- Bei einigen Experimenten weisen Marken in der Überschrift auf besondere Gefahrenquellen hin. Genannt seien: radioaktive Strahlung, Röntgenstrahlung, ultraviolettes Licht, Hochspannung und verschiedene Chemikalien. Hinweise zum Umgang mit radioaktiven Stoffen, Röntgenröhren und ultraviolettem Licht werden im Anhang gegeben. Bezüglich aller Gefahrenquellen sei auf die Einhaltung der „Richtlinie für den Arbeits- und Brandschutz im naturwissenschaftlichen Unterricht und in der außerunterrichtlichen Arbeit auf dem Gebiet der Naturwissenschaften vom 25. Mai 1967" (mit Kommentar erschienen bei Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1974) hingewiesen.

1. Die atomistische Struktur der Stoffe

1.0. Methodische Bemerkungen

1.0.0. Die atomistische Struktur der Stoffe ist von so großer Bedeutung, daß der Aufbau der Stoffe aus Teilchen bereits sehr früh Gegenstand der Behandlung im Physikunterricht ist. Die dabei getroffenen Aussagen werden im weiteren Verlauf des Unterrichts wiederholt belegt, präzisiert und erweitert. Sie stellen wichtige Voraussetzungen vor allem für den Chemie- und Biologieunterricht dar und werden auch in diesen Unterrichtsfächern wiederholt benutzt, vertieft und verallgemeinert. Es ist deshalb erforderlich, die atomistische Struktur der Stoffe mit einfachen Experimenten zu belegen. Die diesbezüglichen Versuche (z. B. zur Brownschen Bewegung und zur Diffusion) gehören z. T. infolge der Bedeutung ihrer Ergebnisse bei aller Einfachheit des Aufbaues und der Durchführung zu den Grundversuchen der Physik.
Außer den in diesem Kapitel beschriebenen Experimenten belegen u. a. Versuche des 6. Kapitels die diskontinuierliche Struktur der Stoffe. Besonders überzeugend ist das Experiment mit dem Spinthariskop (V 6.5.1.).
Bei der Untersuchung der Struktur der Stoffe und der Erklärung ihrer Eigenschaften sind Modelle und Modellversuche von besonderer Bedeutung. Das ist u. a. auch dadurch bedingt, daß infolge der Besonderheiten der Mikrophysik alle diesbezüglichen Vorstellungen der Schüler ohnehin Modellcharakter tragen.

1.0.1. Eine wichtige Rolle bei der Behandlung der atomistischen Struktur der Stoffe im Anfangsunterricht spielen die Experimente zur Teilbarkeit. Hierbei ist besonders das Verdünnen von Lösungen anzuführen, das eine erste begründete Vorstellung von der Kleinheit der Moleküle vermittelt.
Die Betrachtungen zur Teilbarkeit der Stoffe werden zu einem sinnvollen Abschluß geführt, wenn man den Schülern die Grenzen der Teilbarkeit vor Augen führt. Hierzu ist der im V 1.1.5. beschriebene Ölfleckversuch geeignet, der gleichzeitig die Abschätzung des Molekül- und des Atomdurchmessers gestattet (vgl. V 3.1.1. und 3.1.2.).

1.0.2. Die Beobachtung der Brownschen Bewegung legt die Annahme nahe, daß die Stoffe aus einzelnen Teilchen bestehen, die sich bewegen. Das Experiment sollte unbedingt durchgeführt werden, weil es die Schüler stark beeindruckt. Die relativ komplizierte Deutung der beobachteten Erscheinung macht eine sorgfältige Vorbereitung der Schüler auf das Experiment, eine genaue Formulierung des Beobachtungsauftrages und eine Auswertung unter straffer Führung des Lehrers erforderlich. Die Experimente zur Diffusion sind in der Durchführung besonders einfach. Sie deuten jedoch nicht so unmittelbar wie die Versuche zur Brownschen

Bewegung auf die Existenz und Bewegung kleinster Teilchen hin. Ist aber den Schülern das Teilchenmodell bekannt, so vermögen sie die Erscheinung der Diffusion mit seiner Hilfe leicht zu erklären. Bezüglich experimenteller Möglichkeiten zur Demonstration der Diffusion sei auf den Abschnitt 3.4. in „Physikalische Schulversuche, Teile 3/4/5 (Mechanik der Flüssigkeiten und Gase)" verwiesen.

1.0.3. Bei der Brownschen Bewegung entziehen sich die Teilchen, die diese verursachen, infolge ihrer Kleinheit der Beobachtung. Die unregelmäßige Bewegung der sichtbaren Partikel legt lediglich nahe, anzunehmen, daß Teilchen kleiner als die Partikel existieren, die infolge ihrer großen, aber unterschiedlichen Geschwindigkeit die Brownsche Bewegung der größeren Partikel hervorrufen. Die Modellexperimente zur Brownschen Bewegung sind methodisch besonders wertvoll, weil sie diesen vermuteten Vorgang nachbilden und daher u. a. belegen, daß ein derartiger Prozeß prinzipiell möglich ist. Weiterhin begegnet den Schülern hierbei das gleiche Erscheinungsbild wie bei der Beobachtung der Brownschen Bewegung. Sie können aber am Modell gleichzeitig die Bewegung der Teilchen sehen, die ihnen beim Realversuch verborgen bleibt.
Auch im Falle der Diffusion trägt das Modellexperiment einen gewissen Bestätigungscharakter. Es zeigt, daß unter der Annahme von Teilchen und deren Bewegung die im Realversuch beobachtete Durchmischung tatsächlich auftritt. Die Vielzahl der beschriebenen Modelle ermöglicht es, zu jedem Realversuch zur Brownschen Bewegung und zur Diffusion einen geeigneten Modellversuch auszuwählen.
Der Nachteil der Modellexperimente zur Brownschen Bewegung besteht in erster Linie darin, daß sich Masse und Geschwindigkeit der Modellteilchen und -partikel nur wenig voneinander unterscheiden. Das legt für die Schüler den falschen Schluß nahe, daß die Geschwindigkeit der Moleküle auch nicht wesentlich höher ist als die bei der Brownschen Bewegung beobachtete. Der Lehrer muß dem durch Verdeutlichung der Größenverhältnisse zwischen Molekül und Partikel entgegenwirken.
Ein weiterer Nachteil fast aller beschriebenen Anordnungen besteht darin, daß es sich um zweidimensionale Modelle handelt. Wenn der Lehrer die Schüler ausdrücklich auf diesen Mangel hinweist, genügen allerdings die zwei Dimensionen vollauf, um das Wesentliche zu demonstrieren.
Bei allen Modellversuchen ist die Geschwindigkeit der Modellteilchen immer noch relativ hoch. Die Beobachtung der Bewegung der einzelnen Modellteilchen und der verursachten Wirkung macht von Modell zu Modell unterschiedlich große Schwierigkeiten. Es empfiehlt sich, parallel zum Experiment und zum Modellexperiment noch die Manipermhafttafel zu Hilfe zu nehmen, die Teilchen bzw. Partikel als Applikationen zu gestalten, die Geschwindigkeiten in Betrag und Richtung durch Pfeile zu markieren und dann schrittweise die Bewegung nachzubilden.
Zu den überzeugendsten Experimenten bzgl. der Teilchenstruktur der Stoffe gehören die mit dem Feldelektronenmikroskop. Das unter V 1.3.7. angegebene Modellexperiment erreicht jedoch bei weitem nicht die mögliche Bildqualität, läßt aber deutlich eine Struktur erkennen.

1.1. Teilbarkeit der Stoffe

1.1.1. Mechanisches Zerkleinern von Zucker

1. Schlagmühle 2. Zucker (50 g), grobkörnig 3. Filterpapier

Methodische Hinweise

1. Dieses einfache Experiment ist besonders für den Anfangsunterricht geeignet. Es zeigt, daß beim mechanischen Zerkleinern wesentliche Eigenschaften der Stoffe erhalten bleiben.
2. Das Ergebnis des Experimentes läßt sich mit dem Teilchenmodell erklären. Aus dem Versuch folgt jedoch nicht zwingend, daß die Stoffe aus Teilchen bestehen.
3. Der Versuch kann als Vorversuch zu V 1.1.2. durchgeführt werden.

Versuch

Die Zuckerkristalle werden mit bloßem Auge betrachtet und bezüglich ihres Geschmackes untersucht. Danach bringt man den Zucker bis auf einen kleinen Rest in die Schlagmühle und schaltet das Gerät für etwa 5 Sekunden ein. Aus der Schlagmühle wird eine Probe entnommen und auf ein Blatt Filterpapier geschüttet. Beim Vergleichen mit dem Rest des Zuckers, der noch in der ursprünglichen Form vorliegt, fällt auf, daß die Zuckerkörnchen kleiner geworden sind, sich aber bezüglich ihres Geschmackes nicht verändert haben. Nun wird die Schlagmühle abermals und für eine längere Zeit eingeschaltet.
Obwohl der Zucker danach staubfein zerkleinert ist, ist sein Geschmack unverändert geblieben.

Bemerkungen

1. Das Experiment kann auch als Schülerversuch durchgeführt werden. Zur Zerkleinerung des Zuckers findet dann ein Mörser Verwendung.
2. Neben dem Orientieren auf den Geschmack ist es auch möglich, auf die unveränderte Löslichkeit in Wasser hinzuweisen.

1.1.2. Lösen von Zucker in Wasser

1. Staubzucker (25 g)
2. Becherglas (500 ml)
3. destilliertes Wasser (500 ml)
4. Rührstab
5. Schülermikroskop
6. Mikroprojektor zum Schülermikroskop mit Transformator
7. Mikroskopierglas mit Deckgläschen

Methodische Hinweise

1. Das Experiment sollte in engem Zusammenhang mit dem unter V 1.1.1. beschriebenen gesehen werden. Es gestattet die Weiterführung der dort skizzierten Gedankenführung.
2. Vergleiche MH Nr. 2 V 1.1.1.!

Versuch

Eine Prise Staubzucker wird auf das Mikroskopiergläschen gebracht. Durch Betrachten mit dem unbewaffneten Auge gelingt es nicht, nähere Aussagen über die Struktur zu machen. Nun wird das Mikroskop zu Hilfe genommen. Nach Auflegen des Deckglases wird das Bild an die Decke des Zimmers projiziert.
Der Staubzucker erweist sich als aus einzelnen kleinen Zuckerkörnchen bestehend. Nachfolgend schüttet man den Zucker in das mit destilliertem Wasser gefüllte Becherglas. Durch Umrühren mit dem Glasstab wird der Lösungsvorgang beschleunigt. Von der Lösung bringt man einen Tropfen auf das Mikroskopierglas und betrachtet das projizierte Bild. Es lassen sich keine Zuckerkörnchen mehr feststellen.
Durch Überprüfung des Geschmackes der Zuckerlösung findet man, daß der Zucker nach wie vor vorhanden ist. Er hat sich im Wasser verteilt. Das legt die Annahme nahe, daß Wasser kein dicht zusammenhängender Stoff ist. Wasser und Zucker könnten aus vielen sehr kleinen, unter dem Mikroskop nicht sichtbaren Teilchen bestehen, die sich beim Lösen vermischen.

Bemerkungen

1. Anstelle von Zucker können auch einige Körnchen Kaliumpermanganat im Wasser gelöst werden. Dabei läßt sich das Verteilen des Kaliumpermanganats im Wasser besonders gut verfolgen.
2. Bei der Durchführung als Schülerversuch erfolgt subjektive Beobachtung im Mikroskop.
3. Zur Deutung des experimentellen Ergebnisses empfiehlt es sich, einen einfachen Modellversuch durchzuführen. Zu diesem Zwecke wird ein kleineres Becherglas zur Hälfte mit Stahlkugeln gefüllt, die die Teilchen des Wassers darstellen sollen. Nachfolgend werden etwa 50 andersfarbige Kugeln (z. B. aus Glas) hinzugesetzt. Sie sollen 50 Zuckerteilchen entsprechen, die in ihrer Gesamtheit ein Zuckerkörnchen darstellen. Nach Verschließen der Öffnung des Bechergläses mit der Handfläche wird es mehrmals gekippt und nachfolgend aufgerichtet. Dabei verteilen sich die Zuckerteilchen zwischen den Wasserteilchen.

1.1.3. Grobe Abschätzung der Molekülmasse durch Verdünnen einer Fluoreszeinlösung

1. Fluoreszein (1 g)
2. Natronlauge (5 ml)
3. Äthanol (Spiritus, 50 ml)
4. Präzisionswaage mit Wägesatz
5. 3 Bechergläser (2000 ml)
6. Meßzylinder (1000 ml)
7. Rührstab
8. Meßpipette oder
   Kolbenprober mit Milliliter-Teilung
9. Linse ($f = +100$ mm)
10. Kleinbildwerfer

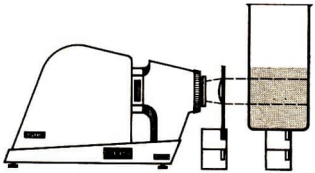


Abb. 1.1.3./1
Nachweis der Fluoreszenz einer stark verdünnten Fluoreszeinlösung

Methodische Hinweise

1. Dieses einfache Experiment gestattet es, die Schüler an die atomaren Größenordnungen heranzuführen. Die Verdünnung der gefärbten Lösung erfolgt dabei lediglich soweit, daß noch die anschauliche optische Kontrolle im Demonstrationsversuch möglich ist. Dadurch liegt die ermittelte Masse noch um Größenordnungen über der Masse des Fluoreszeinmoleküls.
2. Vergleiche MB 1.0.1. und MH Nr. 2 V 1.1.1.!

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.1.3./1. Die Linse erzeugt ein paralleles Lichtbündel, das die Flüssigkeit im Becherglas durchsetzt. Die Beobachtung erfolgt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts im teilweise abgedunkelten Raum.
In das 1. Becherglas wird 1 g Fluoreszein gebracht und zunächst in Alkohol durch kräftiges Rühren gelöst. Danach füllt man unter Hinzugabe einiger Kubikzentimeter Natronlauge so weit mit Wasser auf, daß sich im Becherglas 1000 cm^3 Flüssigkeit befinden. Das 1. Becherglas enthält 1 g Fluoreszein. Die Flüssigkeit zeigt eine starke Fluoreszenz.
Nun bringt man 1 cm^3 der Lösung in das 2. Becherglas, das mit 999 cm^3 abgestandenem Wasser gefüllt ist, und stellt es in das Lichtbündel. Im 2. Becherglas befinden sich 10^{-3} g Fluoreszein. Die Flüssigkeit fluoresziert längs des Lichtbündels.
Mit der gut ausgespülten Pipette wird 1 cm^3 der Lösung aus dem 2. Becherglas in das 3. Becherglas gebracht, in dem sich ebenfalls 999 cm^3 Wasser befinden. Nach dem Umrühren zeigt sich auch hier noch die grüne Fluoreszenz im Bereich des Lichtbündels. Im 3. Becherglas befinden sich 10^{-6} g Fluoreszein.
Aus dem gleichmäßigen Leuchten der gesamten bestrahlten Flüssigkeitsmenge kann man schlußfolgern, daß sich in jedem Kubikmillimeter mindestens ein Fluoreszeinmolekül befinden muß. Da sich in jedem Kubikzentimeter der Lösung 10^{-9} g Fluoreszein und in jedem Kubikmillimeter 10^{-12} g befinden, ergibt sich, daß die Masse eines Fluoreszeinmoleküls in jedem Falle kleiner als 10^{-12} g sein muß.

1.1.4. Verdunsten von Äther

1. Äther (5 ml)
2. Uhrglas (15 cm ∅)
3. durchsichtiges Lineal
4. Tageslichtschreibprojektor

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH Nr. 2 V 1.1.1.!

Versuch

Uhrglas und Lineal werden auf den Schreibprojektor gelegt und auf einer Projektionswand scharf abgebildet. Danach gießt man 5 ml Äther in das Uhrglas. Das Plastlineal ermöglicht eine erste Abschätzung des Durchmessers der Flüssigkeit.

Nachfolgend beobachtet man den Äther bezüglich der Veränderung seines Volumens.
Nach einigen Minuten ist der Äther vollständig verdunstet. Im ganzen Raum nimmt man Äthergeruch wahr.
Das Ergebnis des Experimentes läßt sich leicht deuten, wenn man annimmt, daß Luft und Äther aus Teilchen bestehen. Die Ätherteilchen entfernen sich von der Flüssigkeit und vermischen sich mit den Luftteilchen.

Bemerkung

Anstelle von Äther kann auch ein anderer, leicht verdunstender und geruchsstarker Stoff Verwendung finden.

1.1.5. Nachweis der begrenzten Teilbarkeit mit dem Ölfleckversuch

1. Flache Glasschale Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Glasscheibe (30 cm × 30 cm)
   b) 4 Glas- oder Plaststreifen (2 cm breit; 25 cm lang)
   c) Silikonkautschuk
2. Tageslichtschreibprojektor
3. dünner Metalldraht (0,1 mm ··· 0,2 mm ∅)
4. durchsichtiges Lineal
5. Uhrglas (5 cm ∅)
6. Speiseöl (1 ml)
7. Bärlappsporen oder Schwefelpulver (fettfrei)
8. destilliertes Wasser (1000 ml)

Methodische Hinweise

1. Das Experiment zeigt mit einfachen Mitteln, daß der Teilbarkeit von Stoffen Grenzen gesetzt sind. Die Feststellung, daß der Flächeninhalt des Ölfleckes proportional der Ölmenge wächst (Versuch 1) und daß es nicht gelingt, die Fläche bei konstanter Ölmenge beliebig zu vergrößern (Versuch 2), sind nur dadurch sinnvoll zu deuten, daß man annimmt, es handelt sich um eine monomolekulare Schicht.
2. In einem engen Zusammenhang zum Ölfleckversuch steht das Verfahren, bei hohem Wellengang vom Schiff aus geringe Ölmengen auf die Wasseroberfläche zu bringen. Die Ölschicht vermindert die Höhe der Wellen.

Vorarbeiten

Die Glasstreifen werden mittels Silikonkautschuk so auf die Glasplatte aufgeklebt, daß sie die Seitenwände einer flachen Schale bilden (Abb. 1.1.5./1). Durch sorgfältiges Auswaschen mit Seifenlösung entfernt man alle Fettreste.

Abb. 1.1.5./1 Flache Glaswanne mit Ölfleck auf der Wasseroberfläche

Versuch 1

Die Glasschale wird auf den Schreibprojektor gestellt und 1 cm hoch mit destilliertem Wasser gefüllt. Danach bestäubt man das Wasser gleichmäßig und möglichst dünn mit Bärlappsporen oder fettfreiem Schwefelpulver. Man taucht den dünnen Metalldraht zunächst 1 mm tief in das Öl im Uhrglas ein und bringt das haftende Öl durch kurzzeitiges Berühren mit dem Wasser in die Mitte der durchsichtigen Schale. Das Öl breitet sich zu einem kreisförmigen Fleck auf der Wasseroberfläche aus und drängt dabei die Bärlappsporen zur Seite, so daß die vom Öl bedeckte Fläche sichtbar wird. Der Versuch wird wiederholt. Es tritt ein gleichgroßer Ölfleck auf. Danach vergrößert man die aufgebrachte Ölmenge durch wiederholtes Eintauchen des jeweils zuvor ins Öl gehaltenen Metalldrahtes. Der Flächeninhalt des Kreises wächst in gleichem Maße wie die aufgebrachte Ölmenge.

Versuch 2

Es wird das fettfreie Ende des Plastlineals in den Ölfleck getaucht und versucht, durch vorsichtiges Bewegen die Fläche des Ölfleckes zu vergrößern. Es gelingt zwar, die Lage der Begrenzungsfläche zu verändern, jedoch führt das nur zu Formänderungen des Ölfleckes, bei denen der Flächeninhalt des Fleckes unverändert bleibt. Der grobe Vergleich zwischen dem Tropfen am Draht und dem Fleck auf dem Wasser macht deutlich, daß sich das Öl in einer sehr dünnen Schicht auf der Wasseroberfläche ausgebreitet hat.

Bemerkungen

1. Vergleiche MB 1.0.1.!
2. Während der Ausbreitung der Ölschicht auf dem Wasser treten kurzzeitig die durch Interferenz an dünnen Schichten entstehenden Farben auf. Zu diesem Zeitpunkt liegt die Dicke der Schicht in der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes.
3. Um einen scharf begrenzten Fleck zu erhalten, ist es notwendig, die Bärlappsporen erst kurz vor dem Versuch auf die Wasseroberfläche zu stäuben. Der aufzustäubende Stoff sollte vorher mittels Benzin entfettet werden. Geschieht dies nicht, so können sich um die Partikel winzige Ölflecke bilden, an die sich das aufgetropfte Öl anschließt und sich je nach zufälliger Lage dieser Ölflecke unregelmäßig auf der Wasseroberfläche ausbreitet.
4. Der Versuch ist als Schülerexperiment geeignet. Da hierbei die Projektion entfällt, kann statt der durchsichtigen Schale z. B. eine Fotoschale Verwendung finden.

1.2. Brownsche Bewegung — Diffusion

1.2.1. Nachweis der Brownschen Bewegung in Wasser [SE]

1. Mikroskop (500-fache Vergrößerung)
2. Objektträger (Mikroskopierglas) mit Deckglas
3. Latex (1 ml) weiß oder farbig
4. Glasstab
5. kleiner Pinsel

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 1.0.2. und 1.0.3.!

2. Das Experiment kann auch als Überraschungsversuch Einsatz finden, weil es geeignet ist, das Interesse der Schüler für die weitere Untersuchung der Struktur der Stoffe zu wecken.
3. Das Experiment ermöglicht die Beobachtung der Brownschen Bewegung in der Projektion. Das setzt entweder einen leistungsfähigen Mikroprojektor oder eine sehr sorgfältige Justierung der Versuchsanordnung voraus.

Versuch

Auf das Mikroskopierglas bringt man mit dem Glasstab einen Wassertropfen. Mit der Pinselspitze wird eine sehr kleine Menge Latex in das Wasser gebracht, so daß eine schwache Färbung entsteht. Nach Auflegen des Deckglases beobachtet man das gefärbte Wasser unter dem Mikroskop. Dazu wird das Objektiv zunächst bis dicht über das Deckglas gesenkt und nachfolgend bei gleichzeitiger Beobachtung langsam nach oben geführt. Die kleinen Kautschukpartikel zeigen eine lebhafte, unregelmäßige Bewegung.

Bemerkung

Die Qualität des beobachteten Effektes hängt in entscheidendem Maße von der richtigen Größe und Konzentration der Partikel ab. Sollte das Experiment nicht zum gewünschten Erfolg führen, benutze man eine andere Substanz. Anstelle von Latex können auch schwarze Tusche und Aquarellfarben Verwendung finden. Sie sind in jedem Falle stark zu verdünnen, eignen sich aber in der Regel weniger gut.

1.2.2. Nachweis der Brownschen Bewegung in Luft [SE]

1. Rauchkammer
2. Mikroskop (50-fache Vergrößerung)
3. große Optikleuchte (12 V; 50 W)
4. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~ ; 4 A)
5. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
6. Glasküvette (8 cm × 8 cm × 3 cm)
7. Rauch (z. B. Tabakrauch)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 1.0.2. und 1.0.3.!
2. Vergleiche MH Nr. 2 V 1.2.1.!
3. Der Versuch erfordert gegenüber der Demonstration der Brownschen Bewegung in Flüssigkeiten eine wesentlich geringere Vergrößerung und bereitet bei sorgfältig vorgenommener Beleuchtung keinerlei Schwierigkeiten. Da außerdem infolge der Dunkelfeldbeleuchtung die Partikelchen, die Brownsche Bewegung zeigen, gleich groß erscheinen, ist dieses Experiment für die subjektive Betrachtung besonders geeignet. Eine Projektion ist nicht möglich.

Versuch

Die Rauchkammer besteht aus zwei Hohlzylindern. Durch gegenseitiges Verdrehen öffnet man die Einblasöffnung. Das Einbringen des Rauches erfolgt am einfachsten dadurch, daß der vordere Teil eines frisch angezündeten Zündholzes für kurze Zeit in die Öffnung der Rauchkammer gesteckt wird. Danach wird der äußere Zylinder so gedreht, daß seine seitliche Öffnung vor der Sammellinse liegt,

die im inneren Zylinder angebracht ist. Die Beleuchtung erfolgt gemäß Abbildung 1.2.2./1. Der Sammelpunkt der Lichtstrahlen muß dicht unter der Deckplatte liegen. Bei hochgestelltem Objektiv kann man sich davon überzeugen. Dieser Einstellung ist besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Im Bereich des Sammelpunktes erfolgt die Beobachtung. Dazu wird das Objektiv dicht über die glasverschlossene Öffnung der Rauchkammer gebracht.

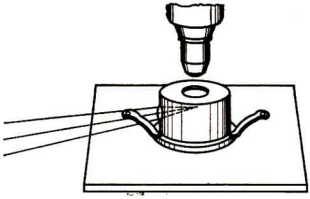


Abb. 1.2.2./1 Beleuchtung der Rauchkammer

Die Rauchkörperchen werden infolge der Dunkelfeldbeleuchtung als helle Pünktchen auf dunklem Untergrund sichtbar. Sie zeigen eine lebhafte, unregelmäßige Bewegung.

Bemerkungen

1. Als Rauchkammer ist jede durchsichtige Glasküvette oder Plastschachtel von quaderförmiger oder zylindrischer Form geeignet. Ihr Boden wird mit mattschwarzem Papier ausgelegt. Die Lage der Kondensorlinse muß dann allerdings so verändert werden, daß bei seitlichem Lichteintritt der Sammelpunkt der Strahlen unter dem Objektiv liegt. Bodenplatte und Deckfläche sollen in diesem Bereich nicht vom Licht getroffen werden.
2. Es ist auch möglich, eine beliebige andere Schachtel analog zur Rauchkammer mit zwei Öffnungen zu versehen, die mit glasklarer Plastfolie verschlossen werden. Das Einblasen des Rauches erfolgt durch eine kleine Bohrung, die man danach zuklebt.

1.2.3. Demonstration der Brownschen Bewegung der Rotation

1. Optische Bank (50 cm)
2. große Optikleuchte (12 V; 50 W)
3. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
4. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
5. Prismentisch
6. 4 Klemmreiter
7. Glasküvette mit Wasser (8 cm × 8 cm × 3 cm)
8. Glasküvette (10 cm × 15 cm × 25 cm) oder pneumatische Wanne
9. Glasplatte zum Abdecken der Küvette
10. glitzerndes Aluminium-, Zink- oder Messingpulver

Methodische Hinweise

1. Der Versuch hat den Vorteil, daß er bei einem geringen experimentellen Aufwand keinerlei komplizierte Justierungsarbeiten erfordert. Er funktioniert sicher und gestattet die Demonstration der Brownschen Bewegung für einen größeren Zuschauerkreis. Sein Nachteil besteht darin, daß es sich nicht um die Brownsche Bewegung der Translation, sondern um die Brownsche Bewegung der Rotation handelt.
2. Vergleiche MB 1.0.2. und 1.0.3.!
3. Vergleiche MH Nr. 2 V 1.2.1.!

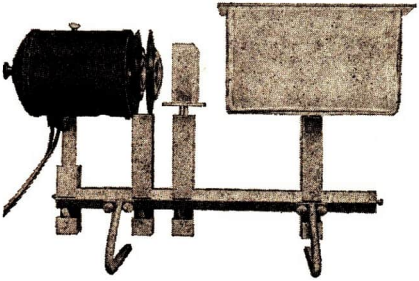


Abb. 1.2.3./1
Beobachtung
der Brownschen Bewegung
von Metallflittern in Luft

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.2.3./1. In die große Glasküvette wird eine Messerspitze vom glitzernden Metallpulver gebracht und mittels eines Stücks Pappe in der Luft verwirbelt. Danach deckt man sie mit der Glasplatte sorgfältig ab. Nach dem Einschalten der Lampe stellt man den Abstand zwischen Leuchte und Doppelkondensor so ein, daß im Bereich der großen Glasküvette ein möglichst eng begrenztes Lichtbündel auftritt.

Zunächst blitzen die vom Licht getroffenen Metallflitter infolge der noch nicht abgeklungenen Strömungen lebhaft auf. Nun schaltet man die Leuchte für 10 Minuten aus. Danach erfolgt eine erneute Beobachtung im abgedunkelten Raum senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes aus einer Entfernung von 1 m bis 2 m.

Trotz der Tatsache, daß nun alle Luftbewegungen in der großen Glasküvette abgeklungen sind und infolge der mit Wasser gefüllten Küvette eine Erwärmung durch das einfallende Licht nur sehr langsam einsetzt, beobachtet man kein gleichmäßiges Leuchten der noch in der Luft schwebenden Metallflitter. Sie blitzen wiederholt und unregelmäßig auf. Das kann nur so gedeutet werden, daß sie unregelmäßige Drehbewegungen ausführen. Infolge des langen Lichtweges zwischen dem Metallpartikelchen und dem Beobachter bewirkt bereits die Drehung um einen sehr kleinen Winkel, daß das Licht nicht mehr in das Auge des Beobachters gelangt.

Die unregelmäßigen Drehbewegungen werden dadurch verursacht, daß das flache Metallgebilde zu verschiedenen Zeiten an den verschiedenen Stellen von unterschiedlich vielen und unterschiedlich schnellen Luftteilchen getroffen wird.
Nach weiteren 10 Minuten wird die Lampe erneut eingeschaltet. Jetzt befinden sich nur noch sehr wenige Metallflitter im Lichtkegel. Sie blitzen schwächer, aber wesentlich häufiger auf. Es handelt sich hierbei um besonders kleine Körperchen, da alle größeren inzwischen zu Boden gesunken sind. Ihre geringe Masse bewirkt eine besonders intensive Brownsche Bewegung.

Bemerkungen

1. Eine Deutung des experimentellen Ergebnisses als Folge von noch auftretenden Strömungen scheidet aus. Tatsächlich noch vorhandene Restströmungen verlaufen mit einer so geringen Geschwindigkeit, daß keine Turbulenzen auftreten können. Bewegungen in den

Grenzschichten würden Rotationen mit etwa konstanter Drehfrequenz bedingen. Die Lichtblitze eines Körperchens müßten dann in regelmäßiger Folge erscheinen.

2. Die Entfernung, aus der der Effekt noch beobachtbar ist, hängt wesentlich von der Beleuchtungsstärke ab. Eine Steigerung läßt sich durch Erhöhen der Glühlampenspannung auf 15 V erreichen. Es kann auch eine Quecksilberdampfhöchstdrucklampe eingesetzt werden. Besonders einfach gestaltet sich der Versuchsaufbau, wenn ein lichtstarker Kleinbildwerfer verwendet wird, vor dem außer der mit Wasser gefüllten Küvette eine Sammellinse aufgestellt wird.
3. Die Anordnung ist auch dazu geeignet, die Brownsche Bewegung der Rotation in einer Flüssigkeit zu demonstrieren. Zu diesem Zwecke wird bei unverändertem Versuchsaufbau die pneumatische Wanne mit destilliertem Wasser gefüllt. Nach Einbringen des Metallpulvers wird es durch Umrühren im Wasser aufgeschlämmt. Es vergeht allerdings etwa eine halbe Stunde, bis alle größeren Körperchen zu Boden gesunken sind und die Brownsche Bewegung in der beschriebenen Weise beobachtbar wird.

1.2.4. Nachweis der thermischen Bewegung in Flüssigkeiten

1. Tageslichtschreibprojektor
2. Linse ($f = +50$ mm)
3. Uhrglas (120 mm ∅)
4. Schwefelkohlenstoff (5 ml)
5. Schwefelpulver (1 g)
6. Glasstab

Methodischer Hinweis

Die beobachtete Erscheinung ist ein Beleg für die thermische Bewegung der Moleküle. Sie stellt aber nicht die Brownsche Bewegung im herkömmlichen Sinne dar.

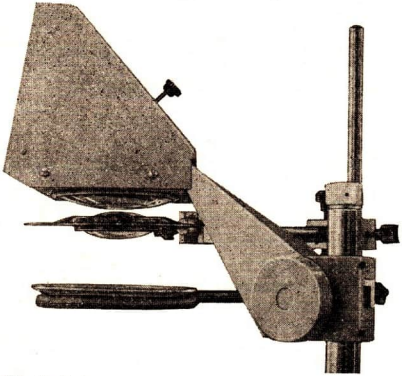


Abb. 1.2.4./1
Projektion der Schwefelkristalle in einer Schwefel-Schwefelkohlenstoff-Lösung

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.2.4./1. Das Objektiv des Tageslichtschreibprojektors ist weit nach oben gestellt. Einige Zentimeter unter ihm befindet sich die Sammellinse. Darunter liegt auf einem Kochring das Uhrglas. Zunächst legt man zum Justieren einen kleinen flachen Gegenstand (z. B. eine Briefklammer) in die Mitte des Uhrglases, schaltet den Projektor ein und bildet den Gegenstand durch Verändern der Höhe der Sammellinse scharf ab. Danach bringt man eine Messerspitze Schwefelpulver in das Uhrglas und fügt 2 ml Schwefelkohlenstoff hinzu. Durch Rühren mit dem Glasstab erreicht man, daß sich das Schwefelpulver schnell löst.

Infolge des lebhaften Verdunstens des Schwefelkohlenstoffs scheidet sich der gelöste Schwefel in Form kleiner Kristalle wieder aus. Diese bewegen sich in der Flüssigkeit lebhaft hin und her. Durch geringfügiges Verändern der Lage des Objektivs erreicht man, daß die Bewegung der kleinen Kristalle in der Projektion an der Zimmerdecke beobachtet werden kann.

Es empfiehlt sich, die Flüssigkeit hin und wieder mit dem Glasstab durchzurühren, wodurch u. a. die abgelagerten Kristalle zum größten Teil aus dem Gesichtsfeld verschwinden. Jeweils nach wenigen Sekunden sind die Strömungen abgeklungen, und es kann die Bewegung der kleinen Kristalle in der Flüssigkeit wieder gut beobachtet werden.

Die Bewegung der kleinen Schwefelkristalle läßt sich damit erklären, daß sich die Schwefelteilchen beim Kristallisieren bevorzugt an bestimmten Stellen anlagern. Letztlich bewirkt dann die thermische Bewegung der Teilchen die lebhafte Bewegung der Schwefelkristalle. Damit wird belegt, daß die Flüssigkeiten aus Teilchen bestehen, die sich bewegen. Sie deutet noch stärker als die Brownsche Bewegung darauf hin, daß es sich dabei um eine sehr heftige Bewegung der Teilchen handelt.

Bemerkungen

1. Das Experiment sollte vor dem Abzug oder bei geöffnetem Fenster durchgeführt werden.
2. Zur Wiederholung des Experimentes ist es erforderlich, das Uhrglas durch kräftiges Auswischen mit einem trockenen Lappen zu reinigen.

1.2.5. Nachweis der Thermodiffusion mit dem Modelltrennrohr

1. Modelltrennrohr 2. Stromversorgungsgerät (20 V —; 4 A)

Methodische Hinweise

1. Das Gerät dient zur Demonstration des Thermodiffusionseffektes, der bei der Trennung gasförmiger Isotopengemische Anwendung findet. Von einem in der Praxis benutzten Isotopentrennrohr unterscheidet es sich im wesentlichen durch seine geringere Länge und die Füllung mit zwei Gasen, deren Molekülmassen sich erheblich voneinander unterscheiden. Es sollten vor allem der im Prinzip gleiche Aufbau und die gleiche Wirkungsweise des Modelltrennrohres und des Isotopentrennrohres herausgearbeitet werden.
2. Der Nachweis der Trennung erfolgt auf indirektem Wege unter Ausnutzung des unterschiedlichen Wärmeleitvermögens der Gase.
3. Im Modelltrennrohr lernt der Schüler eines der wichtigsten Verfahren der Isotopentrennung kennen.
4. Die Erscheinung der Thermodiffusion ist ein Beleg für den Aufbau der Stoffe aus Teilchen.

Versuch

Das Modelltrennrohr wird vertikal an einem Stativ befestigt. Den im Rohr ausgespannten Heizdraht verbindet man mit dem Stromversorgungsgerät und erhöht im abgedunkelten Raum die Spannung so weit, daß er schwach glüht.

Zunächst leuchtet der Draht in der gesamten Länge gleichmäßig hell. Nach einigen Minuten sendet sein oberer Teil kein sichtbares Licht mehr aus, während sein unterer heller als zuvor glüht.
Danach wird das Rohr um 180 Grad gedreht. Dadurch befindet sich zunächst der leuchtende Teil des Metalldrahtes oben. Nach einigen Minuten glüht wiederum nur der untere Teil des Drahtes.
Im Rohr vollziehen sich folgende Prozesse: Die leichten Wasserstoffmoleküle diffundieren bevorzugt in das Gebiet höherer Temperatur (Rohrachse), während die schwereren Kohlendioxidmoleküle in den Bereich der kalten Rohrwandung diffundieren. Das in der Nähe des Metalldrahtes erwärmte Gas steigt in der Rohrachse nach oben, während es an der kalten Rohrwandung nach unten sinkt. Infolge dieser Konvektion gelangt Wasserstoff in den oberen Teil des Rohres, während Kohlendioxid im unteren Teil angereichert wird. Die bessere Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs führt dazu, daß der Heizdraht im oberen Teil kälter ist als im unteren.

Bemerkung

Ein Nachteil des Modelltrennrohres besteht darin, daß es mit einer bestimmten Gasmischung gefüllt ist. Es kann deshalb nicht demonstriert werden, was geschieht, wenn sich nur Teilchen eines Gases im Rohr befinden.

1.2.6. Nachweis der Thermodiffusion mit einem selbstgebauten Trennrohr

1. Modelltrennrohr Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Glasrohr (1,5 m lang; 3 cm ∅)
   b) 2 doppelt durchbohrte Stopfen, zum Glasrohr passend
   c) 2 Meßklemmen
   d) 2 kurze Glasröhren, in die Bohrungen passend
   e) 2 dünne Gummischläuche, auf die Glasröhren passend
   f) 2 Hakenkörper (je 50 g)
   g) Widerstandsdraht (0,2 mm bis 0,3 mm ∅; 2 m lang) als Hiezdraht
   h) Kupferdraht (0,3 mm ∅; 25 cm lang) als Zuleitung
2. Erlenmeyerkolben (250 ml)
3. Gleitwiderstand (100 Ω; 3 A)
4. Stadtgas

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 1.2.5.!
2. Der Vorzug des selbstgebauten Trennrohres besteht darin, daß es mit verschiedenen Gasen gefüllt werden kann. Damit wird der Nachweis erbracht, daß der Trenneffekt nur dann auftritt, wenn es sich um Gasgemische mit Teilchen unterschiedlicher Masse handelt.

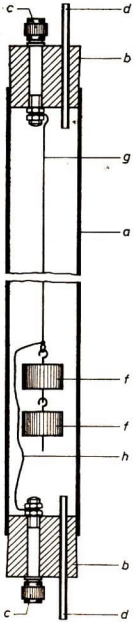


Abb. 1.2.6./1 Selbsthergestelltes Thermodiffusionstrennrohr zur Trennung der Hauptbestandteile von Stadtgas

Herstellen des Gerätes

In die am weitesten zur Mitte zu gelegene Bohrung der Gummistopfen werden lange Meßklemmen (c) geschraubt. An einer Meßklemme wird der Widerstandsdraht (g) angebracht. Am freien Ende befestigt man die beiden Wägestücke und den Kupferdraht (h) und führt diese von oben in das Glasrohr ein. Der aus dem unteren Ende des Rohres herausragende Kupferdraht wird mit der Meßklemme im zweiten Stopfen verbunden (Abb. 1.2.6./1.). In die zweiten Bohrungen der Stopfen werden die kurzen Glasröhren (d) hineingesteckt. Sie dienen zum Anbringen der Gummischläuche (e) für den Gasanschluß.

Versuch

Das Trennrohr wird vertikal an einem Stativ angebracht. Der Schlauch, der zur oberen Öffnung des Trennrohres führt, wird mit dem Hahn der Stadtgasleitung verbunden. Den anderen führt man bis auf den Boden des Erlmeyerkolbens, der einige Zentimeter hoch mit Wasser gefüllt ist. Die Anschlüsse des Heizdrahtes werden über den Gleitwiderstand mit dem Netz verbunden. Infolge der Erwärmung steigen im Erlmeyerkolben Gasblasen auf. Ist das nicht der Fall, so muß die undichte Stelle aufgespürt und beseitigt werden. Die Stromstärke wird soweit vergrößert, daß im abgedunkelten Raum das Glühen des Heizdrahtes gut zu erkennen ist. Auch nach einigen Minuten glüht der Draht noch in seiner gesamten Länge gleich hell. Danach wird der Schlauch aus dem Erlenmeyerkolben herausgezogen und der Stromkreis unterbrochen. Hat sich das Rohr abgekühlt, so wird der Schlauch wieder in den Erlenmeyerkolben gebracht und der Gashahn geöffnet. Tritt aus dem Kolben Stadtgas aus, so wird der Hahn geschlossen und die Anordnung mit dem Netz verbunden. Zunächst glüht der Draht wieder in seiner gesamten Länge gleich hell. Aber bereits nach einer Minute erscheint er im unteren Teil des Rohres merklich heller als im oberen. Nach einigen Minuten leuchtet der untere Teil des Drahtes wesentlich stärker als vorher, der obere Teil leuchtet nicht mehr.

Luft besteht hauptsächlich aus Stickstoff und Sauerstoff. Die Masse der Sauerstoffmoleküle unterscheidet sich von der der Stickstoffmoleküle nur unwesentlich. Im oberen Teil des Rohres tritt deshalb im ersten Versuchsteil nur eine geringe Anreicherung von Stickstoff infolge der Thermodiffusion auf. Da sich außerdem das Wärmeleitvermögen von Sauerstoff und Stickstoff kaum unterscheiden, ist kein Trenneffekt zu beobachten.

Stadtgas hingegen besteht neben einigen anderen Komponenten aus Wasserstoff. Infolge der Thermodiffusion wird er im oberen Teil des Trennrohres angereichert (vgl. V 1.2.5.).

Netzspannung

Giftige Dämpfe

1.2.7. Trennung von Luft und Bromdampf mit einem selbstgebauten Thermodiffusionstrennrohr

1. Modelltrennrohr Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Glasrohr (140 cm lang; 2,5 cm ∅)
   b) Glasrohr (150 cm lang; 0,3 cm ∅)
   c) 2 durchbohrte Stopfen, zu den Glasrohren passend
   d) Heizwendel (220 V; 750 W)
2. Gleitwiderstand (100 Ω; 3 A)
3. 2 Isolatoren
4. Brom (5 ml)

Methodische Hinweise

1. Der Vorzug der Experimentieranordnung besteht darin, daß die Trennung des Bromdampf-Luft-Gemisches infolge der Thermodiffusion direkt beobachtet werden kann.
2. Vergleiche MH Nr. 1, 3 und 4 V 1.2.5.!

Herstellen des Trennrohres

Das dünne Glasrohr wird mittels der Stopfen koaxial im dicken angebracht. Danach befestigt man die Rohre vertikal an einem Stativ. Die Heizwendel wird gestreckt, durch das innere Glasrohr hindurchgeführt und oben und unten an einem Isolator angeschraubt (Abb. 1.2.7./1).

Versuch

Nach Anheben des oberen Stopfens läßt man durch leichtes Neigen der geöffneten Bromflasche so lange Bromdampf in das dicke Glasrohr einströmen, bis eine dunkelbraune Färbung auftritt. Danach wird das Rohr gut verschlossen. Die Heizwendel verbindet man über den Gleitwiderstand mit dem Wechselspannungsnetz und erhöht die Stromstärke so weit, daß die Heizwendel glüht. Die Beobachtung des Versuchsablaufes erfolgt vor einem hellen Hintergrund. Nach einigen Minuten ist die Anreicherung des Broms im unteren Teil des Glasrohres deutlich zu erkennen.
Infolge ihrer größeren Masse sind die Bromteilchen in die Bereiche tieferer Temperatur (Wandung des dicken Glasrohres) diffundiert, die Luftteilchen in den Bereich der Rohrachse. Die Wärmeströmung im Rohr hat die Luftmoleküle nach oben geführt, die Brommoleküle in den unteren Teil des Glasrohres.

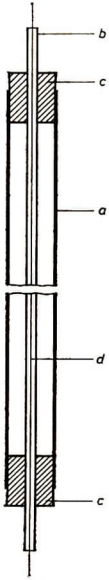


Abb. 1.2.7./1 Selbsthergestelltes Thermodiffusionstrennrohr zur Trennung eines Bromdampf-Luft-Gemisches

Bemerkung

Brom ist giftig und stark ätzend. Das Füllen des Rohres sollte daher unter Wahrung der notwendigen Sicherheitsvorkehrungen unter dem Abzug oder im Freien erfolgen. Das Abdichten des Rohres kann mit Silikonkautschuk erfolgen. Nach der Versuchsdurchführung sollte der Bromdampf aus dem Rohr entfernt werden.

1.3. Modellexperimente zur atomistischen Struktur fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe

1.3.1. Modellmäßige Veranschaulichung einiger Vorgänge in Kristallen

1. Kristallgittermodell ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Piacrylplatte (25 cm × 25 cm × 1 cm)
   b) 98 zylinderförmige Keramikmagnete (20 mm ∅; 6 mm hoch)
   c) 49 Messingscheiben (20 mm ∅; 0,3 mm dick)
   d) Stahldraht (7 m lang; 0,8 mm ∅)
   e) Lötzinn
   f) Alleskleber
2. Tageslichtschreibprojektor

Methodischer Hinweis

Das Gerät stellt ein zweidimensionales, dynamisches Modell eines Kristallgitters dar. Infolge der geringen Dämpfung bewegen sich die einzelnen Gitterbausteine nach einmaligem Anstoßen für längere Zeit und ermöglichen dadurch eine gute Beobachtung aller interessierenden Effekte.

Herstellen des Gerätes

Die Piacrylplatte wird mit 49 Bohrungen von 0,8 mm ∅ jeweils im Abstand von 35 mm versehen (Abb. 1.3.1./1). In jedes Bohrloch steckt man einen Stahldraht von 13 cm Länge. An ihre oberen Enden wird je eine Messingscheibe (c) angelötet. Auf sie klebt man übereinander je 2 keramische Magnete (b) so, daß nur gleichartige Pole an der Oberseite liegen (Abb. 1.3.1./2).

Versuch 1: Demonstration der thermischen Bewegung

Das Kristallgittermodell wird so an einem Stativ befestigt, daß die Magnete dicht über der Schreibfläche des Projektors hängen (Abb. 1.3.1./3). Einige Magnete

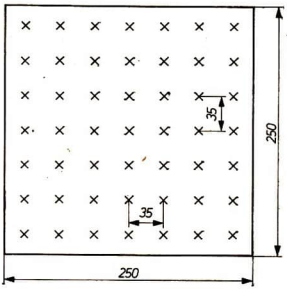


Abb. 1.3.1./1
Anordnung der Bohrungen beim Kristallgittermodell

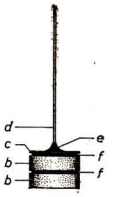


Abb. 1.3.1./2
Befestigen der Magnete an den Stahldrähten

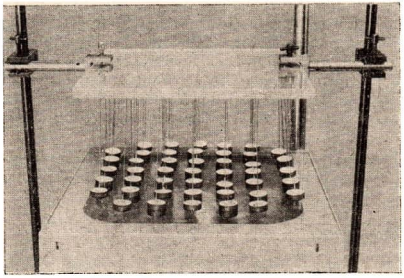


Abb. 1.3.1./3
Kristallgittermodell
auf dem Schreibprojektor

werden wiederholt leicht angestoßen. Zunächst beobachtet man die Gesamtheit aller Modellteilchen, danach verfolgt man die Bewegung eines Modellteilchens. Alle Modellteilchen führen unregelmäßige Bewegungen um ihre Ruhelage aus. Die kinetischen Energien der einzelnen Modellteilchen sind dabei verschieden und verändern sich ständig.

Versuch 2: Demonstration der Wärmeleitung

Ein Magnet an der Ecke des Gerätes wird kurzzeitig nacheinander mehrmals angestoßen. Er überträgt seine Energie so auf die übrigen Modellteilchen, daß nach wenigen Sekunden alle im zeitlichen Mittel die gleiche Energie besitzen.

Bemerkungen

1. Die Anordnung der Bohrungen in der Piacrylplatte kann je nach dem zu veranschaulichenden Gittertyp variiert werden. In Analogie zu Gitterbausteinen unterschiedlicher Masse können Keramikmagnete verschiedener Durchmesser Verwendung finden.
2. An Stelle der Piacrylplatte kann auch eine undurchsichtige Plastplatte benutzt werden. Statt des Schreibprojektors findet dann ein um 45 Grad geneigter, über dem Modell angebrachter Spiegel Verwendung.

1.3.2. Modellexperimente zur Brownschen Bewegung und zur Diffusion mit einem Schüttelapparat

1. Gerät für kinetische Gastheorie
2. Universal-Experimentiermotor
3. Korkkugel (2,5 cm ∅) Ⓢ
4. Schaumgummiunterlage (30 cm × 30 cm × 1 cm)

Methodische Hinweise

1. Das Gerät gestattet die Durchführung verschiedenartiger Modellexperimente zur kinetischen Wärmetheorie. Besonders überzeugend lassen sich die ungeordnete Bewegung der Moleküle und die Brownsche Bewegung im gasförmigen Aggregatzustand demonstrieren. Weniger geeignet ist das Gerät für die Durch-

führung von Modellexperimenten zur Diffusion. Für die modellmäßige Nachbildung der Vorgänge in Flüssigkeiten erfolgt die Durchmischung zu schnell, so daß keine Beobachtung bei laufendem Motor möglich ist. Der Versuch zur Diffusion durch eine semipermeable Wand weist den Nachteil auf, daß sich die Modellteilchen, die diese Wand durchdrungen haben, kaum noch bewegen. Da es außerdem im allgemeinen nicht möglich ist, für Realversuche mit Gasen eine semipermeable Wand bereitzustellen, wird auf eine Beschreibung dieses Versuches verzichtet.

2. Das im Versuch 1 beschriebene Modellexperiment steht in engem Zusammenhang mit V 1.2.2. Es sollte bei der diesbezüglichen Arbeit mit dem Teilchenmodell den ihm gebührenden Platz einnehmen (vgl. MB 1.0.3.).

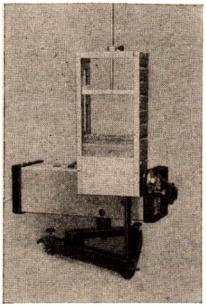


Abb. 1.3.2./1
Modell
zur kinetischen Gastheorie

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.3.2./1. Um unerwünschte Schwingungen zu verhindern und die auftretenden Geräusche zu dämpfen, wird der Stativfuß auf die Schaumgummiunterlage gestellt. Die für das jeweilige Modellexperiment benötigten Kugeln werden nach Abnehmen des Deckels in die Kammer geschüttet. Zu ihrem Entfernen aus dem Gerät dient die Fangmulde. Die Erregerfrequenz der schwingenden Bodenplatte wird dazu auf einen so niedrigen Wert eingestellt, daß sich die Kugeln im Kammerraum etwa 5 cm hoch vom Kammerboden abheben. Sie springen dann in die eingeführte Fangmulde. Die Trennung von Kugeln unterschiedlichen Durchmessers erfolgt mit dem Sortiersieb. Stahl- und Glaskugeln lassen sich mit Hilfe des magnetischen Schiebers leicht trennen.

Versuch 1: Modellversuch zur Brownschen Bewegung in einem Gas

In die Kammer werden 400 Stahlkugeln (4 mm Durchmesser) gebracht. Nach Einschalten des Motors erhöht man die Frequenz so weit, daß einzelne Kugeln bis in die Höhe des Deckels gelangen. Die Modellteilchen führen eine ungeordnete Bewegung aus, wie sie für die Atome und Moleküle im gasförmigen Aggregatzustand typisch ist. Danach bringt man zusätzlich die Korkkugel in die Kammer. Die Stahlkugeln versetzen die größere Korkkugel durch Stöße in unregelmäßige Bewegung. Sie entspricht der Brownschen Bewegung der Rauchkörperchen. Die Geschwindigkeit der Korkkugel liegt weit unter der der Stahlkugeln.

Versuch 2: Modellversuch zur Diffusion in Flüssigkeiten

In die Kammer werden 800 Stahlkugeln (4 mm Durchmesser) und danach 800 Glaskugeln (4 mm Durchmesser) gebracht, so daß beide in zwei Schichten übereinanderliegen. Stahlkugeln und Glaskugeln sollen die Teilchen zweier verschiedener mischbarer Flüssigkeiten darstellen. Die Motorfrequenz soll so eingestellt sein, daß sich jeweils benachbarte Kugeln gerade voneinander trennen. Nach 2 Sekunden wird der Motor wieder ausgeschaltet. Die Lage der Kugeln wird betrachtet.

Es zeigt sich, daß einige Stahlkugeln in den Bereich der Glaskugeln eingedrungen sind und umgekehrt einige Glaskugeln in die Schicht der Stahlkugeln. Nun wird der Motor wiederum für 2 Sekunden in Bewegung gesetzt. Danach erfolgt erneut eine Betrachtung der Lage der Kugeln usw.
Infolge der thermischen Bewegung tritt eine Durchmischung der Teilchen beider Flüssigkeiten auf, obwohl die untere Modellflüssigkeit eine größere Dichte besitzt.

Bemerkungen

1. Zur Verbesserung der Sichtbarkeit empfiehlt sich beim Versuch 1 die Anwendung des Schattenwurfs mit einer möglichst punktförmigen Lichtquelle.
2. Zur modellmäßigen Nachbildung der Brownschen Bewegung können anstelle der Korkkugeln auch die Holz- und Glaskugeln von 12 mm Durchmesser Verwendung finden, die zum Gerät gehören. Die Beobachtung wird jedoch durch ihre zu große Geschwindigkeit erschwert.
3. Die Durchmischung der Kugeln erfolgt beim Versuch 2 nicht vollständig. Der Gewichtsunterschied zwischen den Glas- und den Stahlkugeln ist zu groß. Es empfiehlt sich deshalb, Glaskugeln verschiedenen Durchmessers oder verschiedener Farbe oder verschiedenartige Metallkugeln zu verwenden.
4. Durch Variieren der Motorfrequenz kann der Einfluß der Temperatur gezeigt werden. Mit zunehmender Motorfrequenz (ansteigender Temperatur) wird die Brownsche Bewegung heftiger bzw. nimmt die Diffusionsgeschwindigkeit zu.

1.3.3. Modellversuch zur Brownschen Bewegung in Gasen

1. Modell zur Demonstration der Brownschen Bewegung
2. Tageslichtschreibprojektor

Methodische Hinweise

1. Das Gerät zeichnet sich durch große Einfachheit bez. des erforderlichen Versuchsaufbaus und der Versuchsdurchführung aus.
2. Das Modellexperiment sollte in engem Zusammenhang mit V 1.2.2. gesehen werden (vgl. MB 1.0.3.).

Versuchsaufbau

Das Modell wird an einem Stativ horizontal über der Schreibfläche des Projektors befestigt (Abb. 1.3.3./1). Der Abstand sollte gerade so groß gewählt werden, daß

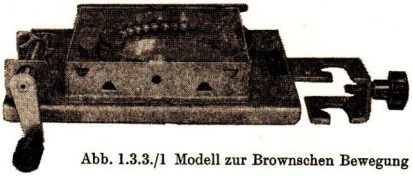


Abb. 1.3.3./1 Modell zur Brownschen Bewegung in Gasen

die Kurbel ohne Behinderung gedreht werden kann. Sie bewegt einen Schlagbolzen, der die ringförmige Feder, in deren Innenraum sich mehrere Stahlkugeln und ein zylinderförmiger Körper befinden, wiederholt in Schwingungen versetzt.

Versuch 1

Beim Drehen der Kurbel werden die Vorgänge in der Projektion beobachtet. Die schwingende Feder versetzt die Kugeln in heftige Bewegung. Die Kugeln treffen wiederholt auf den zylinderförmigen Körper, der sich dadurch unregelmäßig bewegt. Die Stahlkugeln stellen die Moleküle in einem Gas dar, der zylindrische Körper z. B. das Rauchkörperchen. Die Bewegung der Gasmoleküle verursacht eine unregelmäßige Bewegung der Rauchpartikel.

Versuch 2

Das Schutzgehäuse aus Plast wird abgeschraubt. Durch seitliches leichtes Berühren der Feder werden ihre Schwingungen gedämpft. Drückt man immer stärker gegen die Feder, so nimmt mit zunehmender Dämpfung die Geschwindigkeit der Stahlkugeln ab. Je geringer ihre Geschwindigkeit ist, um so weniger bewegt sich der zylinderförmige Körper.
Die Verringerung der Geschwindigkeit der Stahlkugeln entspricht im Modell der Abkühlung des Gases. Bei geringeren Temperaturen ist die Brownsche Bewegung weniger heftig.

1.3.4. Experimente mit einem Flüssigkeitsmodell

1. Flüssigkeitsmodell ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) 2 Glasplatten (30 cm × 40 cm)
   b) Plaststreifen (25 cm × 3 cm × 0,6 cm)
   c) 80 zylinderförmige Manipermmagnete (2 cm ∅; 0,6 cm hoch)
   d) 3 Pappstreifen (40 cm × 2 cm × 0,1 cm)
   e) Alleskleber
   f) Klebeband
   g) Holzstab
2. 3 U-Kerne, geblättert
3. 6 Spulen (750 Wdg.)
4. I-Kern, geblättert
5. Spule (125 Wdg.)
6. Blattfeder mit Schaft und Buchse
7. Kontaktschraubenträger mit Schraube
8. Klemmenstange
9. Kondensator (10 μF)
10. Plastplatte (5 cm × 4cm × 0,6 cm)
11. 2 Stromversorgungsgeräte (20 V —; 4 A)

Methodische Hinweise

1. Bei diesem Modell bewegen sich die Modellteilchen mit erheblich geringeren Geschwindigkeiten als bei den in V 1.3.2. und 1.3.3. beschriebenen Modellen. Es gestattet eine wesentlich bessere Beobachtung der Vorgänge, die zur Brownschen Bewegung und zur Diffusion führen.
2. Die Kräfteverhältnisse zwischen den Teilchen werden durch die Magnete besser wiedergegeben als durch die Stahlkugeln.

3. Infolge der magnetischen Beschleunigung werden in jedem Falle primär nur die Magnete (Modellteilchen) in Bewegung gesetzt. Das Modellkörperchen gerät erst durch die Modellteilchen in Bewegung.
4. Die Modellexperimente stehen in engem Zusammenhang mit den Versuchen zur Brownschen Bewegung (V 1.2.1. und 1.2.3.) und zur Diffusion in Flüssigkeiten. Beim Einsatz dieser Versuche im Unterricht sind sie bei der Vorhersage bzw. Erklärung der Erscheinungen mit dem Teilchenmodell von großem methodischem Wert.

Herstellen des Flüssigkeitsmodells

Nach Abbildung 1.3.4./1 werden drei Seiten einer Glasplatte (a) mit Magneten (c) beklebt, wobei der Abstand zwischen zwei nebeneinanderliegenden Magneten 1 cm betragen soll. Danach befestigt man mit Klebstoff auf jeder der drei Magnetreihen einen Pappstreifen (d). Die kreisförmigen Oberflächen der übrigen Magnete werden

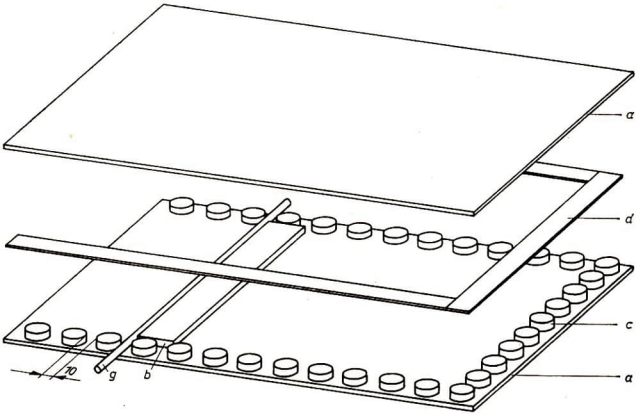


Abb. 1.3.4./1 Herstellen eines Flüssigkeitsmodells

mit feinem Schmirgelpapier geglättet. Bei der Hälfte dieser Magnete beklebt man den gleichen magnetischen Pol mit glattem, weißem Papier. Nun werden diese Magnete vorsichtig auf die Glasplatte gelegt, so daß gleiche Pole nach oben zeigen. Danach wird die zweite Glasplatte (a) aufgelegt und mit Klebeband befestigt. Von der offenen Seite her wird der Plaststreifen (b) so in die Anordnung eingeführt, daß er diese Seite verschließt. Durch weiteres Hineindrücken wird der Abstand zwischen jeweils zwei benachbarten nicht festgeklebten Magneten auf 2 cm verringert. Die Befestigung des Plaststreifens kann in dieser Lage durch Einführen des Holzstabes (g) durch die Zwischenräume der aufgeklebten Magnete erfolgen.

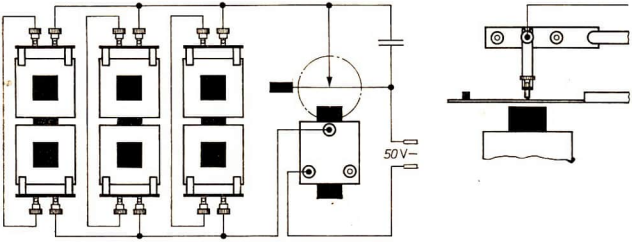


Abb. 1.3.4./2 Schaltplan zur magnetischen Erregung der Modellteilchen

Versuchsanordnung

Gemäß Abbildung 1.3.4./2 werden die 3 mit den 6 Spulen zu je 750 Windungen versehenen U-Kerne nebeneinander aufgestellt. Beim Zusammenschalten der Spulen ist darauf zu achten, daß immer gleiche magnetische Pole nach oben zeigen. Auf diese Elektromagnete wird das Flüssigkeitsmodell gelegt. Ein aus Spule, I-Kern und Blattfeder zusammengestellter Wagnerscher Hammer bewirkt, daß die Spulen der Elektromagnete jeweils nur kurzzeitig von Strom durchflossen werden. Durch Belasten der Blattfeder (z. B. mit einer Wäscheklammer) wird eine Frequenz von einigen Hertz eingestellt.

Versuch 1: Modellversuch zur Diffusion

Nach Anlegen der Spannung wird der Unterbrecher angestoßen. Die Modellteilchen führen eine unregelmäßige Bewegung aus. Einzelne schwarze Teilchen gelangen in den Bereich der weißen und umgekehrt. Nach etwa einer Minute liegt eine völlige Durchmischung vor. Die Abbildungen 1.3.4./3a bis c zeigen drei Phasen dieses Vorganges.

Im Modell stellen die weiß beklebten Keramikmagnete die Teilchen der einen Flüssigkeit dar, die nicht beklebten die Teilchen der anderen. Die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen verursacht eine allmähliche Durchmischung beider Flüssigkeiten.

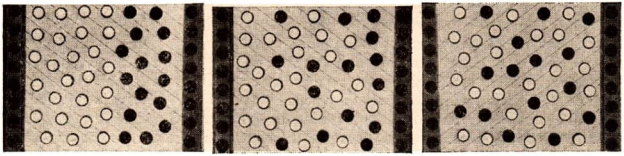


Abb. 1.3.4./3 Nachbildung der Diffusion mit dem Flüssigkeitsmodell: links: Lage der Teilchen zu Versuchsbeginn, mitte: Lage der Teilchen nach 10 s, rechts: Lage der Teilchen nach 20 s

Versuch 2: Modellversuch zur Brownschen Bewegung

Zusätzlich zu den Magneten wird in die Mitte des Modells eine beliebig geformte Plastplatte (10) gebracht (Abb. 1.3.4./4). Die unregelmäßige Bewegung der Modellteilchen nach dem Einschalten des Stromes verursacht Lage- und Ortsveränderungen dieser Platte.
Im Modell stellen die Manipermmagnete die Flüssigkeitsteilchen dar, die Platte z. B. ein Latexkörperchen. Die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen verursacht eine unregelmäßige Bewegung des Latexkörperchens.

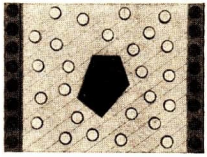


Abb. 1.3.4./4
Modell zur Brownschen Bewegung in Flüssigkeiten

Bemerkungen

1. Die Größe der Modellteilchen gestattet eine gute Beobachtung aller Vorgänge von den Plätzen der Schüler aus. Dazu ist es lediglich erforderlich, über dem Modell einen um 45 Grad geneigten Spiegel (30 cm × 40 cm) anzubringen.
2. Werden bei den Versuchen 1 und 2 jeweils zwei Teilversuche mit unterschiedlicher Spannung durchgeführt, so kann damit der Einfluß der Temperatur auf die Prozesse demonstriert werden. Bei geringerer Geschwindigkeit der Modellteilchen (geringerer Temperatur des Stoffes) vollzieht sich die Diffusion langsamer, und es tritt eine weniger heftige Brownsche Bewegung auf als bei größeren Geschwindigkeiten.
3. Statt der 3 angegebenen U-Kerne mit Spulen kann das Experiment auch bereits mit 2 Kernen durchgeführt werden.

1.3.5. Modellmäßige Veranschaulichung der Brownschen Bewegung und der Diffusion in Gasen

1. 2 U-Kerne, geblättert
2. 4 Spulen (750 Wdg.)
3. I-Kern, geblättert
4. Spule (125 Wdg.)
5. Blattfeder mit Schaft und Buchse
6. Kontaktschraubenträger mit Schraube
7. Klemmenstange
8. Kondensator (10 µF)
9. Glasschale (20 cm ∅)
10. 20 Stahlkugeln (6 mm ∅)
11. 20 Stahlkugeln (8 mm ∅)
12. Holzstäbchen (einige Zentimeter lang)
13. 2 Stromversorgungsgeräte (20 V —; 4 A)

Methodische Hinweise

1. Das vorliegende Modell unterscheidet sich gegenüber dem im V 1.3.2. beschriebenen dadurch, daß die Bewegung der Stahlkugeln in der horizontalen Ebene erfolgt. Das ermöglicht eine geringere Geschwindigkeit der Modellteilchen und dadurch eine bessere Beobachtbarkeit ihrer Bewegung. Außerdem wirkt sich die Tatsache, daß keine der Richtungen gegenüber anderen ausgezeichnet ist, positiv aus.
2. Vergleiche MH Nr. 3 V 1.3.4.!
3. Die Modellexperimente stehen in enger Beziehung zu V 1.2.2. und 1.2.3. und sollten im Zusammenhang mit diesen im Unterricht durchgeführt werden (vgl. MB 1.0.3.).

Versuchsaufbau

Der Aufbau der Versuchsanordnung erfolgt wie im V 1.3.4. Die Schaltung der Spulen mit 750 Windungen wird lediglich so verändert, daß jeweils ungleiche magnetische Pole nebeneinander liegen. Auf die Magnetpole stellt man die Glasschale.

Versuch 1: Modellversuch zur Brownschen Bewegung

In die Glasschale bringt man 20 Stahlkugeln von 8 mm Durchmesser. Nach dem Anlegen der Spannung wird die Blattfeder angestoßen. Die Stahlkugeln treffen in ungeordneter Bewegung aufeinander und auf die Gefäßwand. Sie simulieren die Bewegung der Moleküle in einem Gas. Nun legt man das Holzstäbchen in die Schale. Es stellt im Modell das Rauch- bzw. Aluminiumkörperchen dar. Infolge der Stöße der Stahlkugeln bewegt es sich unregelmäßig, aber mit geringerer Geschwindigkeit als die Kugeln.

Versuch 2: Modellversuch zur Diffusion durch eine Trennwand

Aus dünner Pappe wird ein 3 cm breiter Streifen geschnitten (Abb. 1.3.5./1). Er soll das Glasgefäß in zwei gleich große Teile trennen. Hierzu werden seine Enden umgeknickt und an der Gefäßwand mit Briefklammern befestigt. Zuvor werden in seine Unterseite 3 quadratische Öffnungen von je reichlich 8 mm Kantenlänge ge-

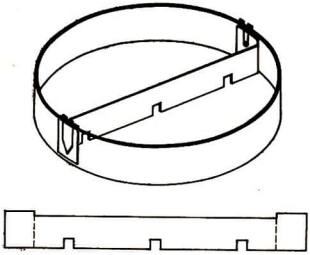


Abb. 1.3.5./1
Modell einer porösen Trennwand

schnitten. In eine Hälfte der Schale bringt man 20 Kugeln von 6 mm Durchmesser, in die andere 20 Kugeln von 8 mm Durchmesser. Der Unterbrecher wird für einige Sekunden in Bewegung gesetzt und dabei die Bewegung der Kugeln beobachtet. Die Kugeln stoßen u. a. auf die Trennwand und durchdringen diese hin und wieder. Ein Auszählen ergibt, daß zunächst mehr kleine Kugeln in die Hälfte der großen gelangt sind als umgekehrt. Danach setzt man den Unterbrecher erneut in Bewegung, zählt wieder aus usw. Nach einiger Zeit befinden sich in beiden Hälften etwa gleich viele kleine und große Kugeln.
Beide Kugelsorten sollen im Modell die unterschiedlich großen Moleküle zweier Gase darstellen. Bei der Diffusion durch eine poröse Wand führt die höhere Diffusionsgeschwindigkeit des einen Gases zunächst zu einem Druckanstieg, der sich nachfolgend allmählich wieder ausgleicht.

Bemerkungen

1. Vergleiche Bem. 1 V 1.3.4.!
2. Das Modell ist auch für die Durchführung von Experimenten zur mittleren freien Weglänge, zur Temperaturerhöhung bei Energiezufuhr, zur Druckerhöhung und zur Ausdehnung bei Erwärmung geeignet.
3. Sollten nicht zwei U-Kerne mit Spulen zur Verfügung stehen, kann man die Versuche auch mit einem Elektromagneten durchführen. Dabei empfiehlt es sich jedoch, die beiden Spulen mit 750 Windungen parallel zu schalten und den Durchmesser der Glasschale nicht größer als 15 cm zu wählen.

1.3.6. Modellexperimente zur thermischen Bewegung in Gasen mit einem Luftkissenaufsatz zum Tageslichtschreibprojektor

1. Luftkissenaufsatz zum Tageslichtschreibprojektor Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) 2 Piacrylplatten (34 cm × 38 cm)
   b) 4 Plaststreifen (34 cm × 2 cm × 1 cm)
   c) Plastrohr (3 cm ∅; 5 cm lang)
   d) Silikonkautschuk
2. Schwebekörper Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   e) 8 Plastscheiben (2,5 cm ∅; 0,1 cm dick)
   f) Plastscheibe (4,5 cm ∅; 0,1 cm dick)
   g) 11 zylinderförmige Keramikmagnete (2 cm ∅; 0,6 cm hoch)
   h) Alleskleber
3. Modellgefäß Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   i) 50 zylinderförmige Manipermmagnete (2 cm ∅; 0,6 cm hoch)
   j) 4 Pappstreifen (27 cm × 2 cm × 0,2 cm)
   k) Alleskleber
4. Tageslichtschreibprojektor
5. Staubsauger mit kurzem Gummischlauch

Methodische Hinweise

1. Die nahezu reibungsfreie Bewegung der Gleitkörper ermöglicht kleine Geschwindigkeiten. Sie gestattet eine gute Beobachtung aller Bewegungsvorgänge.
2. Die Modellexperimente stehen in enger Beziehung zu den Versuchen zur Brownschen Bewegung (V 1.2.2.) und zur Diffusion und sollten in diesem Zusammenhang bei der Arbeit mit dem Teilchenmodell herangezogen werden (vgl. MB 1.0.3.).

Herstellen des Luftkissenaufsatzes und der Schwebekörper

Die eine Piacrylplatte (a) wird an den in Abbildung 1.3.6./1 markierten Stellen durchbohrt. Für die ersten acht Millimeter jedes Loches wählt man einen Durchmesser von 1,5 mm, die restlichen zwei Millimeter werden auf 0,5 mm aufgebohrt. Der Durchmesser der Bohrung in der zweiten Platte (a) beträgt 3 cm. Die 4 Distanzstreifen (b) werden mittels Silikonkautschuk auf die 2. Platte geklebt, so daß sie

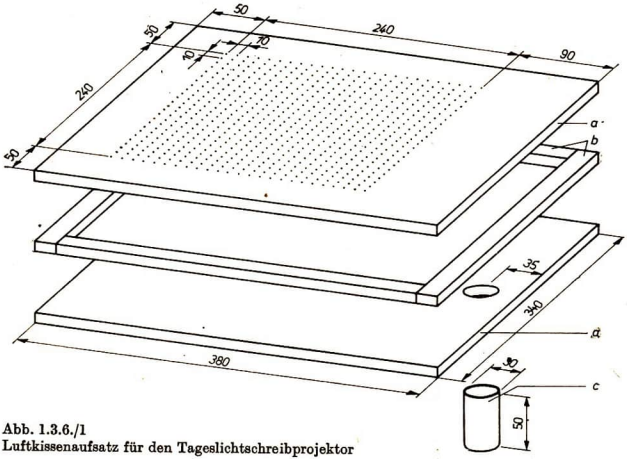


Abb. 1.3.6./1
Luftkissenaufsatz für den Tageslichtschreibprojektor

sowohl gegen diese Platte als auch gegeneinander gut abgedichtet sind. Nachfolgend klebt man die andere Piacrylplatte auf und das Plastrohr (c) in die große Bohrung ein.
Als Schwebekörper dienen dünne, ebene Plastscheiben, in deren Mitte ein Magnet aufgeklebt wird. Die Scheiben sollen 2 verschiedene Formen besitzen oder z. T. durchsichtig sein. Auf der großen Scheibe (f) werden gleichmäßig verteilt 3 Manipermmagnete angebracht.

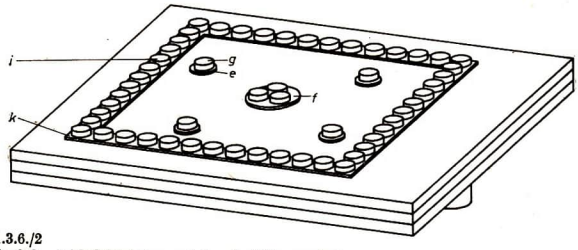


Abb. 1.3.6./2
Modellgefäß mit Modellteilchen auf dem Luftkissenaufsatz

Die 4 Pappstreifen (j) klebt man zu einem Rahmen zusammen und befestigt auf ihnen dicht nebeneinander die keramischen Magnete (i), so daß in allen Fällen der gleiche Pol zur Unterlage zeigt (Abb. 1.3.6./2).

Versuchsaufbau

Der Schreibprojektor wird auf einen stabilen Stativtisch gestellt und mittels der Stellschrauben in den Stativfüßen waagerecht ausgerichtet. Nach Abheben der Schreibplatte wird die Halterungssäule mit dem Objektiv abgeschraubt. Man befestigt sie so an einem Stativ, daß sich das Objektiv einige Zentimeter über der ursprünglichen Lage befindet. Nach Aufsetzen der Schreibplatte wird der Luftkissenaufsatz auf den Projektor gelegt und mittels des Schlauchstückes der Druckstutzen des Staubsaugers an den Aufsatz angeschlossen.

Versuch 1: Modellversuch zur thermischen Bewegung der Moleküle in einem Gas

Nach Einschalten des Projektors und des Staubsaugers bringt man zunächst einen Schwebekörper auf den Luftkissenaufsatz und stößt ihn leicht an. Infolge der abstoßenden Kräfte wird er in der Nähe der Pappstreifen mit den Magneten ähnlich wie beim elastischen Stoß reflektiert, bewegt sich zur gegenüberliegenden Begrenzung usw. Er beschreibt etwa den Weg eines Gasmoleküls in einem Gefäß bei sehr geringem Druck. Nachfolgend wird die Anzahl der Schwebekörper erhöht. Ihre Bewegung gibt modellmäßig die thermische Bewegung der Moleküle in einem Gas wieder.

Versuch 2: Modellversuch zur Brownschen Bewegung in einem Gas

In die Mitte des Luftkissenaufsatzes wird der große Schwebekörper gelegt. Er soll im Modell die Partikel darstellen, die die Brownsche Bewegung zeigt. Zunächst bewegt er sich nicht. Nun werden nachfolgend die Schwebekörper auf den Aufsatz gebracht und in langsame Bewegung versetzt. Infolge der Stöße überträgt sich ihre Energie teilweise auf den großen Körper, dessen Geschwindigkeit sich dadurch in Betrag und Richtung dauernd ändert.

Versuch 3: Modellversuch zur Diffusion

Auf zwei gegenüberliegende Seiten des Luftkissenaufsatzes werden je 4 gleichartige Schwebekörper gebracht. Beide Arten sollen die Moleküle je eines Gases darstellen. Nun stößt man einige der Schwebekörper leicht an. Nach wenigen Sekunden hat sich analog zur Diffusion eine Durchmischung vollzogen.

Bemerkung

Die Gefäßwand kann im Modell auch durch einen dünnen Stahldraht (Saite) nachgebildet werden. Er wird rahmenartig einige Millimeter über dem Luftkissenaufsatz ausgespannt. Als Schwebekörper können dann kreisförmige Plastscheiben von 1,0 cm Dicke und 2,5 cm Durchmesser Verwendung finden, deren Seitenflächen schwach nach außen gewölbt sind.

1.3.7. Modell eines Feldelektronenmikroskops

1. Mehrere Glühlampen (220 V; 25 W)
2. Lampenfassung
3. Holtzsche Klemme
4. Metalldraht (25 cm lang; 3 mm ∅)
5. Funkeninduktor
6. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V —; 4 A)
7. schwarzes Tuch (30 cm × 30 cm)

Methodische Hinweise

1. Das Modell enthält alle wesentlichen Teile des Feldelektronenmikroskops, läßt seine prinzipielle Wirkungsweise erkennen und ermöglicht die Beobachtung des entstehenden Bildes. Es kann sowohl nach der Beschreibung des Aufbaues und der Wirkungsweise des Feldelektronenmikroskops im Modellexperiment eingesetzt werden als auch als Überraschungsexperiment, das die Frage aufwirft, wie die Bilder zustande kommen und was sie zeigen.
2. Vergleiche MB 1.0.3.!

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.3.7./1. Der aus dem Draht gebogene Ring von 5 cm Durchmesser soll fest auf dem Glaskolben der Glühlampe aufliegen. Der Drahtring wird mit einem Pol des Funkeninduktors verbunden, eine der beiden Zuleitungen der Glühlampe mit dem anderen Pol. Danach setzt man den Funkeninduktor in Betrieb. Im abgedunkelten Raum werden auf dem Glaskolben Fluoreszenzerscheinungen sichtbar. Es treten mehrere, unterschiedlich große und helle Flecke auf. Man wählt eine solche Glühlampe aus, bei der ein Leuchtfleck mit einem Durchmesser von mehr als 1 cm auftritt. Dieser Leuchtfleck zeigt deutliche Strukturen (Abb. 1.3.7./2).
Nach genauem Betrachten des Fleckes wird die Glühlampe mit einem dunklen Tuch abgedeckt und für einige Sekunden mit dem 220-Volt-Wechselspannungsnetz verbunden. Danach erfolgt ein erneutes Betrachten des Leuchtfleckes. Das Bild hat sich verändert.
Die Fluoreszenzerscheinungen kommen dadurch zustande, daß die Haltedrähte der Wendel zu Spitzen auslaufen, die dem Glaskolben zugekehrt sind. Infolge der hohen

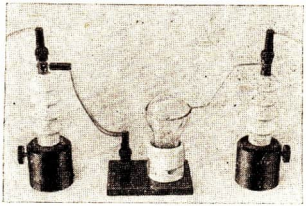


Abb. 1.3.7./1 Glühlampe mit Drahtring als Modell eines Feldelektronenmikroskops

Abb. 1.3.7./2 Fluoreszenzbild auf dem Glaskolben

elektrischen Feldstärke treten aus den Spitzen Elektronen aus. Sie werden durch das elektrische Feld beschleunigt und treffen auf den Glaskolben, den sie zur Fluoreszenz anregen.
Da die Kristallflächen der Spitzen gegeneinander geneigt sind, erreichen die aus den verschiedenen Flächen austretenden Elektronen die Glaswand an verschiedenen Stellen. Außerdem treten u. a. infolge der unterschiedlichen Krümmung der Oberfläche und der absorbierten Gasreste nicht aus allen Stellen gleich viele Elektronen aus, so daß die Glaswand an den verschiedenen Stellen unterschiedlich stark fluoresziert. Es entsteht somit ein stark vergrößertes „Bild" des auf der Spitze befindlichen Stoffes. Starke Erwärmung (hervorgerufen durch das Einschalten der Glühlampe) bedingt vor allem bezüglich der absorbierten Gasreste Veränderungen der Oberfläche.

Bemerkungen

1. Die Abweichungen des Modells vom Feldelektronenmikroskop bestehen vor allem in der schlechten Qualität der Spitzen, in dem geringen Abstand zwischen Spitzen und Glaskolben und dem ungenügenden Unterdruck. Sie bewirken kleinere Bilder geringerer Auflösung, die durch Gasablagerungen auf den Spitzen unkontrollierbar verändert sind. Der fehlende Fluoreszenzschirm bedingt wesentlich lichtschwächere Bilder.
2. Zur Erzielung eines optimalen Bildes empfiehlt es sich, die Zuleitungen versuchsweise zu vertauschen. Das bessere Bild entsteht dann, wenn zur Zeit der Höchstspannung der negative Pol an der Spitze liegt.

2. Kern und Elektron als Hauptbestandteile des Atoms

2.0. Methodische Bemerkungen

2.0.0. Die Experimente zu den Leitungsvorgängen in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen führen bei einer sorgfältigen Auswertung zu einer Vielzahl von Aussagen bezüglich der Struktur der Stoffe. Bei der Auswertung ist der Vergleich der Ergebnisse, die bei der Untersuchung der Leitungsvorgänge in allen Aggregatzuständen gewonnen werden, von großer Bedeutung. Er führt zu neuen Erkenntnissen und trägt zur Systematisierung des Wissens der Schüler bei.

Folgende Beispiele seien genannt:

Aus dem mechanischen und thermischen Verhalten ist den Schülern bekannt, daß sowohl in festen als auch in flüssigen Stoffen die Teilchen dicht gepackt sind. Dennoch tritt beim Hall-Effekt (vgl. V 2.1.1.) eine wesentlich größere Ladungsträgergeschwindigkeit bzw. -beweglichkeit auf als bei elektrolytisch leitenden Flüssigkeiten (vgl. V 2.1.4.). Das führt zu Vermutungen über Art und Größe der beteiligten Ladungsträger, die durch weitere experimentelle Fakten präzisiert werden. So belegen der glühelektrische und der äußere lichtelektrische Effekt ebenso die Elektronenleitung in Metallen wie die Tatsache, daß beim Fließen eines Stromes in Metallen kein Stofftransport auftritt. Der Stofftransport bei der Elektrolyse bestätigt dagegen, daß es sich hier um Ladungsträger mit einer größeren Masse handelt.

Die Experimente zur Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten zeigen, daß hier Ladungsträger beider Polaritäten zum Stromfluß beitragen. Die verschiedenartigen Leuchterscheinungen bei Gasentladungen vor Katode und Anode legen die Annahme nahe, daß der gleiche Sachverhalt auch bei Gasen vorliegt. Diese Folgerung wird durch die Erscheinung der Katoden- und Kanalstrahlen gestützt.

Neben einigen Versuchen aus der Elektrostatik führen die Experimente zu den Leitungsvorgängen zum Ergebnis, daß die Atome aus positiven und negativen Partikeln bestehen. Das legt zwei mögliche Strukturen nahe: Entweder liegen die positiven und negativen Teilchen infolge ihrer elektrostatischen Anziehung dicht beieinander oder sie befinden sich auf Grund ihrer besonderen Energiezustände in größerem Abstand voneinander. Die Lenardschen Streuversuche zeigen, daß der größte Teil des Atoms nur schwach auf die Elektronenbewegung einwirkt, also anscheinend leer ist. Das Ergebnis der Streuversuche führte zu modellmäßigen Vorstellungen vom Aufbau des Atoms, die der zweiten Variante entsprechen. Die Streuexperimente mit Alphateilchen belegen dieses Ergebnis. Aus dem Ablenkungswinkel kann man ermitteln, wie nahe ein bestimmtes Alphateilchen dem Atomkern gekommen ist, wenn die Geschwindigkeit des Teilchens bekannt ist.

2.0.1. Der Hall-Effekt steht in engem Zusammenhang mit der Erscheinung der elektromagnetischen Induktion. Die Ladungsträger im Innern des Festkörpers erfahren infolge der Lorentzkraft senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung und senkrecht zur Richtung der magnetischen Induktion eine Ablenkung. Die dadurch bedingte unterschiedliche Ladungsträgerkonzentration wird als Hall-Spannung nachgewiesen. Der analoge Vorgang vollzieht sich in einem MHD-Generator. In diesem Zusammenhang läßt sich der Hall-Effekt gut in das Wissen der Schüler einordnen.
Einen Einblick in die Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten geben in erster Linie die Experimente zur Ionenwanderung (V 2.1.3.) und zur Elektrolyse (vgl. V 3.3.4.). Dabei zeichnen sich die Versuche zur Ionenwanderung besonders durch ihre Einfachheit und die direkte Beobachtungsmöglichkeit aus. Sie ermöglichen es, die interessierenden Zusammenhänge in überzeugender Weise zu demonstrieren und qualitativ und quantitativ zu untersuchen. Weitere Experimente zu den Leitungsvorgängen in Flüssigkeiten sind im 9. Teil der Physikalischen Schulversuche beschrieben.
Die Versuche zu den Leitungsvorgängen in Gasen sind so ausgewählt, daß dabei das Strom-Spannungsverhalten des gesamten gasförmigen Leiters im Vordergrund steht. Sondenmessungen und eine genaue Untersuchung der Art und der Lage der Leuchterscheinungen ermöglichen eine Fülle weiterer Aussagen, die zu einem großen Teil mit schulmäßigen Mitteln gewonnen werden können. Einfache Experimente zu den Leitungsvorgängen in Gasen sind im 9. Teil der Physikalischen Schulversuche beschrieben. Die Versuche V 2.1.5. und 2.1.6. führen zu dem Ergebnis, daß gasförmige Stoffe unter normalen Bedingungen im wesentlichen aus neutralen Atomen bzw. Molekülen bestehen. Bei kleinen Spannungen bzw. großen Drücken bewirken die wenigen im Gas vorhandenen Ladungsträger einen so geringen Strom, daß er nicht nachweisbar ist. Diese Ladungsträger werden zwar im elektrischen Feld beschleunigt, sie stoßen jedoch wiederholt mit Molekülen zusammen, denen sie ihre Energie teilweise übertragen. Erst bei höheren Spannungen bzw. geringeren Drücken erreichen sie zwischen zwei Stößen so große Geschwindigkeiten, daß das getroffene Molekül in ein positives Ion und ein oder mehrere Elektronen zerfällt.
2.0.2. Die Durchführung der Lenardschen Streuversuche setzt sehr schnelle Elektronen voraus und bereitet aus diesem Grunde mit schulmäßigen Mitteln noch Schwierigkeiten.
Für die Rutherfordschen Streuversuche ist der experimentelle Aufwand relativ hoch. Aus diesen Gründen wird auf Versuche orientiert, die die Vorgänge bei der Streuung modellmäßig nachbilden.
Das im V 2.2.1. beschriebene Modell gestattet infolge der geringen Geschwindigkeit der Modellteilchen eine genaue Beobachtung der Vorgänge bei der Streuung eines geladenen Teilchens am Kern. Diesem Vorzug steht der Nachteil gegenüber, daß es das Wesentliche der Streuversuche, die Verwendung sehr vieler Mikroteilchen, um aus der Gesamtheit der Streuvorgänge Aussagen zu treffen, nicht genügend deutlich werden läßt. Es legt sogar den falschen Schluß nahe, daß die Bewegung eines Mikroteilchens genau vorherzusagen oder zu verfolgen sei. Demgegenüber tritt in dem unter V 2.2.2. beschriebenen Modellexperiment das Prinzip der Streuversuche deutlich hervor.
Die Tatsache, daß in den Modellen die Größenverhältnisse nicht richtig wiedergegeben werden, ist von untergeordneter Bedeutung. Alle Anordnungen sind so gewählt, daß die große räumliche Ausdehnung der Modellteilchen ihre Bewegungsmöglichkeiten nicht behindert.

Die Schüler sollten unbedingt darauf hingewiesen werden, daß die Kräfte zwischen den Elementarteilchen und dem Atomkern durch magnetische Kräfte nachgebildet werden und daß es sich um zweidimensionale Modelle der in drei Dimensionen ablaufenden Streuprozesse handelt.

2.1. Ladungsträger in festen Stoffen, Flüssigkeiten und Gasen

2.1.1. Nachweis der Hall-Spannung

Zu Versuch 1

1. Hall-Generator Ⓢ,
   dazu erforderliches Material:
   a) Plastplatte (10 cm × 6 cm × 0,2 cm)
   b) 2 Messingbleche
   (3 cm × 2 cm × 0,1 cm)
   c) 2 Kontaktfedern eines Relais
   d) 4 Meßbuchsen
   e) Wismut (100 g)
   f) Glasplatte
   g) Bunsenbrenner
   h) Stadtgas
2. U-Kern, geblättert
3. 2 I-Kerne, geblättert
4. 2 Spulen (750 Wdg.)
5. 2 Stromversorgungsgeräte
   (20 V —; 4 A)
6. Akkumulator (6 V)
7. Demonstrationsspannungsmesser
   (100 mV —)
8. Demonstrationsstrommesser (5 A —)
9. Gleitwiderstand (10 Ω; 5 A)

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 9., außerdem

10. Gleitwiderstand (3500 Ω; 0,3 A)
11. Meßverstärker zum Spannungsmesser oder Spiegelgalvanometer
12. Kupfer- oder Aluminiumfolie (0,02 mm dick)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 2.0.1.!
2. Der Hall-Effekt gestattet es, die Konzentration der frei beweglichen Ladungsträger in den verschiedenen festen Stoffen, ihre Beweglichkeit und ihre Geschwindigkeit zu bestimmen. Ist B die magnetische Induktion, die die Metallfolie senkrecht durchsetzt, s die wirksame Breite der Metallfolie und $\bar{v}$ die mittlere Geschwindigkeit der Ladungsträger, so gilt für die Hall-Spannung

   $$U = s \cdot \bar{v} \cdot B\,.$$

   Unter sonst gleichen Bedingungen ist die Hall-Spannung um so größer, je weniger frei bewegliche Ladungsträger sich in der Volumeneinheit befinden.
3. Die Schüler sollten darauf hingewiesen werden, daß der Hall-Effekt von besonderer Bedeutung für die Untersuchung der Leitungsmechanismen in Halbleitern ist.

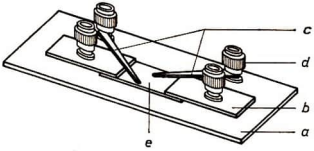


Abb. 2.1.1./1
Selbsthergestellte Wismutfolie mit Kontakten

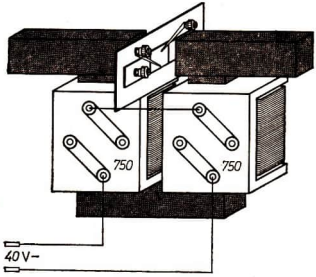


Abb. 2.1.1./2
Anordnung der Wismutfolie
im Feld des Elektromagneten

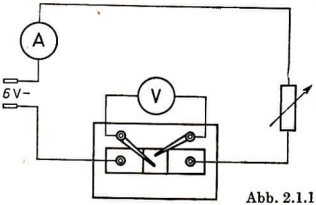


Abb. 2.1.1./3 Nachweis des Hall-Effektes (Schaltplan)

Herstellung des Hall-Generators

Ein Wismutstab wird 30 cm über die Glasplatte gehalten und kräftig mit dem Bunsenbrenner erhitzt. Dabei sollen möglichst große Tropfen auf verschiedene Stellen der Glasplatte fallen. Nach dem Breitlaufen erstarren sie. Aus einer solchen, an allen Stellen gleich dicken Folie, wird mit einer Schere ein 2,5 cm langer und 2,0 cm breiter Wismutstreifen geschnitten. Er wird gemäß Abbildung 2.1.1./1 auf der Plastplatte (a) zwischen je 2 Messingblechen (b) festgeklemmt. Das geschieht durch Festschrauben der beiden Meßbuchsen, die gleichzeitig der Stromzufuhr dienen. Wegen der erforderlichen großen Stromstärke ist auf gute Kontaktierung zu achten. Zum Abgreifen der Hall-Spannung finden zwei Kontaktfedern eines zerlegten Kontaktes von einem größeren Relais Verwendung. Die beiden Kontaktfedern werden mit den Meßbuchsen festgeklemmt. Eine der beiden soll seitlich um einige Millimeter verschiebbar sein.

Versuch 1

Aus dem U-Kern, den beiden Spulen und den I-Kernen wird nach Abbildung 2.1.1./2 ein starker Elektromagnet zusammengestellt. Dann befestigt man den Hall-Generator so an einem Stativ, daß sich der mittlere Teil der Wismutfolie an der Stelle der größten magnetischen Feldstärke befindet und senkrecht von ihr durchsetzt wird. Die beiden Buchsen zum Abnehmen der Hall-Spannung verbindet man nach Abbildung 2.1.1./3 mit dem Spannungsmesser, dessen Zeiger in Mittellage gebracht wurde. Entsprechend der Abbildung wird der Hall-Generator mit dem Akkumulator verbunden und die Stromstärke auf 5 A eingestellt. Nun verschiebt man den beweglichen Kontakt des Hall-Generators so weit seitlich, daß der Spannungsmesser keine Spannung mehr anzeigt. Danach schaltet man den Strom für den Elektro-

magneten ein. Nach dem Induktionsspannungsstoß zeigt der Spannungsmesser eine konstante Spannung an. Bei einer 0,1 mm dicken Wismutfolie und einer Stromstärke von 5 A liegt sie bei 5 mV.
Aufeinanderfolgend wird der Richtungssinn des Generatorstromes und der magnetischen Feldstärke geändert. In jedem Fall ändert sich die Polarität der Hall-Spannung. Eine Veränderung des Richtungssinns der Ladungsträgerbewegung oder der magnetischen Feldstärke bedingt auch eine Änderung des Richtungssinns der Lorentzkraft.
Danach wird die Generatorstromstärke bei konstantem Magnetfeld und schließlich die Stromstärke in den Feldspulen bei unveränderter Generatorstromstärke verringert. In beiden Fällen nimmt die Hall-Spannung ab.

Versuch 2

Dem Spannungsmesser wird ein Meßverstärker vorgeschaltet oder er wird gegen ein Spiegelgalvanometer ausgetauscht. Bei konstanter magnetischer Feldstärke erhöht man die Generatorstromstärke — mit kleinen Werten beginnend — soweit, daß der Spannungsmesser die für den Meßbereich höchstmögliche Spannung anzeigt. Danach wird die Wismutfolie gegen eine Folie aus Kupfer oder Aluminium ausgetauscht. Trotz der wesentlich dünneren Folie zeigt der Spannungsmesser keine Spannung an. Nun wird die Generatorstromstärke und gegebenenfalls auch die Stromstärke des Elektromagneten so weit vergrößert, daß eine Hall-Spannung angezeigt wird. Der viel größere spezifische Widerstand des Wismuts gegenüber Aluminium und Kupfer ist also u. a. darauf zurückzuführen, daß das Wismut je Volumeneinheit viel weniger freibewegliche Ladungsträger als diese Metalle besitzt.

Bemerkungen

1. Für wissenschaftliche Zwecke werden Hall-Sonden auf Halbleiterbasis gefertigt, die sich sehr gut für die Demonstration des Hall-Effektes eignen. Bei den im Experiment verwendeten magnetischen Feldstärken liegen die Hall-Spannungen bei viel kleineren als im Experiment benutzten Generatorströmen in der Größenordnung von 10 mV.
2. Hall-Sonden sind sehr gut für das Ausmessen von Magnetfeldern geeignet. Die jeweiligen Daten können dem Beiblatt entnommen werden, oder es erfolgt eine Eichung in einem bekannten Magnetfeld. Zu diesem Zwecke wird die Sonde in eine langgestreckte Spule (vgl. V 3.2.3.) gebracht, durch die man kurzzeitig einen Gleichstrom möglichst großer Stärke schickt. Aus der Stromstärke und den Spulendaten läßt sich die magnetische Induktion errechnen. Da die Hall-Spannung der magnetischen Induktion direkt proportional ist, ist die Eichkurve eine Gerade, die durch den Koordinatenursprung und den ermittelten Meßpunkt geht.

Hochspannung

2.1.2. Nachweis der Ionenleitung des Glases

1. Glühlampe mit Klarglaskolben (220 V; 25 W)
2. Fassung für die Glühlampe
3. Stromversorgungsgerät (400 V —; 0,1 A)
4. Gleitwiderstand (3500 Ω; 0,3 A)
5. Demonstrationsstrommesser (50 mA —)
6. Eisenschale (10 cm ∅)
7. Bunsenbrenner
8. Natriumnitrat (250 g)
9. Stadtgas

Methodischer Hinweis

Das Experiment zeigt, daß im Glas, das bei Zimmertemperatur ein guter Isolator ist, bei höheren Temperaturen Ionenleitung auftritt. Das Ergebnis, daß mit dem allmählichen Weicherwerden des Glases auch die Beweglichkeit der Ionen zunimmt, belegt, daß es sich beim Glas um eine unterkühlte Flüssigkeit handelt.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.1.2./1. Die Glühlampe wird so am Stativ befestigt, daß ihr Glaskolben 1 cm tief in das geschmolzene Natriumnitrat, das sich in der Eisenschale befindet, eintaucht. Die Temperatur der Schmelze soll dicht über dem Schmelzpunkt des Salzes liegen. Zwischen Eisenschale und Glühlampe wird eine Gleichspannung von 220 V gelegt. Der Strommesser zeigt keinen Stromfluß an. Nun wird die Glühlampe ans Wechselspannungsnetz angeschlossen. Jetzt fließt ein Strom durch die Schmelze. Die Temperatur der Schmelze wird erhöht. Die Stromstärke nimmt zu. Durch Verändern der Spannung und des Widerstandes, gegebenenfalls auch der Temperatur der Schmelze, wird eine Stromstärke von 10 mA eingestellt.

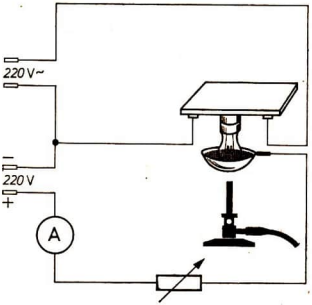


Abb. 2.1.2./1
Nachweis der Ionenleitung des Glases (Schaltplan)

Nach wenigen Minuten überziehen sich die kältesten Teile im Innern der Glühlampe zunächst mit einem graubraunen, später metallisch glänzenden Belag von Natrium. Die Natriumionen der Schmelze sind unter dem Einfluß des elektrischen Feldes durch die Glaswandung der Glühlampe gewandert, haben die durch den glühelektrischen Effekt aus der Wendel ausgetretenen Elektronen aufgenommen und sich als metallisches Natrium am Glas niedergeschlagen.

Bemerkung

Die Glühlampe, in die auf diese Weise Natrium eingebracht wurde, ist sehr gut für die Durchführung einer Reihe weiterer Experimente geeignet (vgl. V 5.3.5. und 5.3.7.).

2.1.3. Nachweis der Ionenwanderung in Flüssigkeiten

1. U-Rohr aus Glas
2. 2 Kohle-Elektroden
3. 2 Isolatoren
4. Stromversorgungsgerät (30 V –; 1 A)
5. Gelatine (5 g)
6. Kaliumnitrat (10 g)
7. Kaliumpermanganat (1 g)
8. Kupfersulfat (1 g)

Methodische Hinweise

1. Das Experiment zeigt in überzeugender Weise, daß der elektrische Strom in Flüssigkeiten mit der Bewegung von Ionen verbunden ist. Die Tatsache, daß die Teilchen bei Polwechsel ihre Richtung ändern, weist darauf hin, daß sie unterschiedliche elektrische Ladungen tragen. Außerdem wird deutlich, daß die Geschwindigkeit der Ladungsträger relativ gering ist und von der Art der Teilchen abhängt.
2. Vergleiche MB 2.0.1.!

Versuch

In 100 ml Wasser werden 10 g Kaliumnitrat gelöst. Man erwärmt die Lösung und gibt die in kaltem Wasser vorgequollene Gelatine hinzu. Hat sie sich gelöst, so gießt man die noch warme Lösung in das U-Rohr. Sie kühlt sich darin ab und geliert. Nach Abbildung 2.1.3./1 wird sie auf der einen Seite mit einer verdünnten Kupfersulfatlösung, auf der anderen Seite mit einer verdünnten Kaliumpermanganatlösung überschichtet, in die die Kohle-Elektroden eintauchen. Legt man an die Elektroden eine Gleichspannung, so treten die blaue und die violette Färbung mit sehr kleiner und unterschiedlicher Geschwindigkeit in die Gelatineschicht hinein. Vertauscht man die Pole der angelegten Spannung, so zieht sich die Färbung wieder zur Ausgangslage hin zurück.

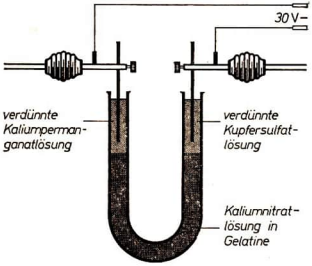


Abb. 2.1.3./1
Nachweis der Ionenwanderung in Flüssigkeiten

Die blaue Färbung wird durch die positiven Kupfer-Ionen, die violette Färbung durch die negativen Permanganat-Ionen hervorgerufen. Je nach der Polarität der angelegten Spannung bewegen sich diese Ionen in die Gelatineschicht hinein oder wieder zurück.

Bemerkungen

1. Infolge des Stromflusses erwärmt sich der Elektrolyt. Das kann bei schlechter Qualität der Gelatine zur Folge haben, daß sie weich wird. In diesem Falle empfiehlt sich ein Kühlen des U-Rohres vor oder auch während der Versuchsdurchführung durch Eintauchen in eine pneumatische Wanne mit kaltem Wasser.
2. Eine Projektion der Vorgänge mit dem Tageslichtschreibprojektor ist möglich. Zweckmäßigerweise wird er dazu mit den notwendigen Zusatzteilen liegend betrieben, so daß das U-Rohr in vertikaler Lage bleiben kann. Eine Verbesserung des Projektionsbildes wird dadurch möglich, daß man an Stelle des U-Rohres eine flache Glasküvette benutzt. Mittels eines schmalen Glasstreifens, der nicht ganz bis zum Boden reicht, teilt man die Küvette unvollständig in zwei gleich große Kammern. Er wird mit Silikonkautschuk an den Wänden der Küvette befestigt.
3. Der Versuch ist auch als Schülerexperiment geeignet.

2.1.4. Bestimmung der Ionengeschwindigkeit in Flüssigkeiten

Zu Variante a

1. Flache Glaskammer Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Glasplatte (20 cm × 10 cm)
   b) Glasplatte (10 cm × 2 cm)
   c) 2 Kupferbleche (2 cm × 3 cm × 0,1 cm)
2. Stromversorgungsgerät (400 V —; 0,1 A)
3. Tageslichtschreibprojektor
4. Kaliumnitrat (1 g)
5. Kaliumpermanganat (1 g)
6. durchsichtiges Lineal
7. Stoppuhr

Zu Variante b

Geräte 2. bis 7., außerdem

8. Gerät zur Erzeugung des elektrischen Feldes

Methodische Hinweise

1. Bei den Experimenten zur Abschätzung der Ionengeschwindigkeit empfiehlt es sich, Spannungen zwischen 100 V und 400 V zu wählen, für quantitative Untersuchungen (Schülerexperimente) sollten die Spannungen zwischen 20 V und 40 V liegen. Die Wanderungsgeschwindigkeit hängt von der elektrischen Feldstärke, von der Masse der Ionen und der Temperatur der Flüssigkeit ab. Oft verändern auch angelagerte Wassermoleküle die Beweglichkeit der Ionen.
2. Vergleiche MB 2.0.1.!

Variante a

Versuchsaufbau

Die große Glasplatte (a) wird auf die Schreibfläche des Projektors gelegt, die beiden Kupferelektroden (c) halten die aufgelegte kleine Glasplatte (b) in einer Distanz von 1 mm (Abb. 2.1.4./1). Das Kaliumnitrat wird in 100 ml Wasser gelöst. Einen

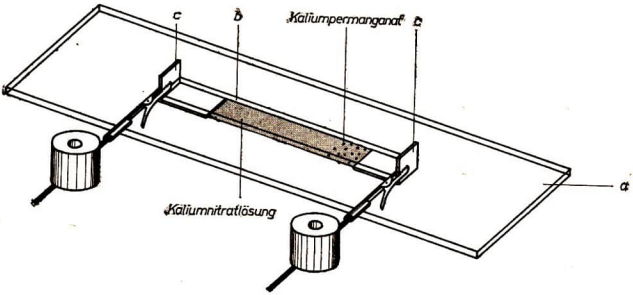


Abb. 2.1.4./1 Flache Küvette zur Bestimmung der Ionengeschwindigkeit in Flüssigkeiten

Teil dieser Lösung bringt man in den Raum zwischen Grund- und Deckplatte. Dicht vor die Katode werden einige kleine Körnchen Kaliumpermanganat oder einige Tropfen konzentrierte Kaliumpermanganatlösung gebracht. Die Befestigung der Leitungen an den Elektroden (c) kann mittels Krokodilklemmen erfolgen. Durch Aufstellen von Tonnenfüßen auf die Zuführungsdrähte sichert man die Elektroden gegen seitliches Verrutschen.

Versuch 1

An die Elektroden wird eine Spannung von mindestens 100 V gelegt. Die durch die Permanganat-Ionen verursachte Färbung bewegt sich mit geringer Geschwindigkeit zur Anode. Vertauscht man die Pole, so wandert sie wieder zurück.

Versuch 2

Parallel zur kleinen Deckplatte wird das durchsichtige Lineal gelegt, so daß sich die Längenteilung unmittelbar neben der Deckplatte befindet. Nach Markieren der Anfangslage der Trennschicht zwischen gefärbter und ungefärbter Flüssigkeit mit Faserstift wird an die Elektroden eine Spannung von 30 V gelegt. Nach 5 Minuten wird die neue Lage der Grenzschicht markiert. Aus dem zurückgelegten Weg und der Zeit erhält man die Geschwindigkeit der Ionen. Bei einer Feldstärke von 3 V cm^{-1} liegt sie für Permanganat-Ionen bei etwa 1 cm min^{-1}.

Variante b

Dicht über der Schreibplatte des Projektors wird die Platte für die auswechselbaren Elektrodenpaare des Gerätes zur Erzeugung des elektrischen Feldes an einem Stativ befestigt. Dabei finden die beiden langen, schmalen Elektroden, die zur Demonstration des homogenen Feldes gedacht sind, Verwendung. Das Gerät füllt man 1 mm hoch mit verdünnter Kaliumnitratlösung. Der weitere Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung erfolgen gemäß Variante a.

Bemerkungen

1. Das Experiment gestattet die Bestimmung der Ionenbeweglichkeit. Dazu werden außerdem die angelegte Spannung U und der Abstand zwischen den Elektroden s gemessen. Der Quotient aus beiden ist die elektrische Feldstärke E:

$$E = \frac{U}{s}.$$

Die Ionenbeweglichkeit b ist der Quotient aus der mittleren Ionengeschwindigkeit $\bar{v}$ und der Feldstärke E:

$$b = \frac{\bar{v}}{E},$$

$$b = \frac{\bar{v} \cdot s}{U}.$$

2. In Vereinfachung der in der Variante a angegebenen Anordnung genügt es, einen 3 cm breiten und 10 cm langen Fließpapierstreifen mit verdünnter Kaliumnitratlösung zu tränken und auf die Mitte der Schreibplatte des Projektors zu legen. Die Elektroden werden durch Krokodilklemmen gebildet, die man an den Enden des Streifens längs der schmalen Seiten befestigt. Mittels eines größeren Kaliumpermanganatkörnchens wird durch mehr-

maliges Hin- und Herbewegen ein violetter Strich gezeichnet, der parallel zu den Elektroden verläuft. Die Wanderung des Striches, hervorgerufen durch die angelegte Spannung, wird beobachtet.

3. Um den Unterschied der Wanderungsgeschwindigkeiten verschiedener Ionenarten zu zeigen, legt man bei Variante a oder in der unter Bem. 2. angegebenen vereinfachten Anordnung je 1 Kristall Kaliumpermanganat, Kaliumbichromat und Kupfersulfat in die Mitte, nebeneinander in einem Abstand von 1 cm.
4. Das Experiment ist sehr gut als Schülerexperiment geeignet. Da hierbei die Projektion entfällt, kann die Kammer aus beliebigem Plast hergestellt werden. Die Spannung wird zwischen 20 V und 40 V gewählt.

2.1.5. Zünd- und Löschspannung einer Glimmlampe

1. Demonstrationsglimmlampe ohne Vorwiderstand mit Fassung
2. Gleitwiderstand (300 Ω; 1 A)
3. Schichtwiderstand (50 kΩ)
4. Demonstrationsoszillograf
5. Spannungsprüfer

Methodische Hinweise

1. Das Experiment ist dazu geeignet, erste Aussagen über die Leitungsvorgänge in Gasen und damit über die Struktur der Gasmoleküle zu machen.
2. Vergleiche MB 2.0.1.!

Versuch

Gemäß Abbildung 2.1.5./1 wird an die Elektroden der Glimmlampe eine einstellbare Wechselspannung gelegt. Zur Strombegrenzung dient der Schichtwiderstand von 50 kΩ. Beim Verbinden der Glimmlampe mit dem Y-Eingang des Oszillografen ist darauf zu achten, daß die Erdungsbuchse des Oszillografen (bzw. die Abschirmung der Zuleitung) mit dem Nulleiter des Wechselspannungsnetzes verbunden wird (Vorsicht! Feststellen mit dem Spannungsprüfer!). Die Y-Ablenkung wird auf 25 V cm^{-1} eingestellt, die Kippfrequenz auf 50 Hz. Durch Verschieben des Spannungsteilerabgriffes vergrößert man allmählich die Spannung an der Glimmlampe.

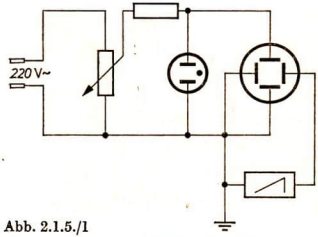


Abb. 2.1.5./1
Demonstration des Spannungsverlaufes an einer mit Wechselspannung betriebenen Glimmlampe (Schaltplan)

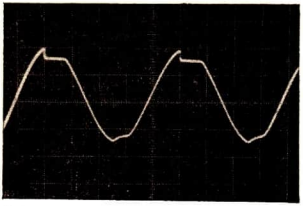


Abb. 2.1.5./2
Spannungsverlauf an einer mit Wechselspannung betriebenen Glimmlampe

Sie leuchtet zunächst nicht, auf dem Oszillografenschirm erscheint das Bild einer sinusförmigen Wechselspannung. Von einer bestimmten Spannung ab leuchtet die Glimmlampe. Das wirkt sich in einer Änderung der Kurve auf dem Oszillografenschirm aus. Beim weiteren Vergrößern der Spannung ändert sich die Form der Kurve nur unwesentlich (Abb. 2.1.5./2).
Nach jedem Nulldurchgang wächst die Spannung zunächst sinusförmig an. Bei einer bestimmten Spannung (Zündspannung der Glimmlampe) setzt die Entladung ein. Die Spannung fällt auf einen beträchtlich geringeren Wert ab. Sinkt die angelegte Spannung unter diesen Betrag, so verlischt die Leuchterscheinung, und die Kurve auf dem Oszillografenschirm folgt jetzt wieder dem sinusförmigen Verlauf der angelegten Spannung. Erst beim Wiedererreichen der Zündspannung in der nächsten Halbperiode setzt die Entladung erneut ein.
Diese Erscheinungen lassen sich deuten, wenn man annimmt, daß das Gas im wesentlichen aus neutralen Molekülen besteht. Erst bei einer bestimmten Spannung erreichen einige der wenigen im Gas vorhandenen frei beweglichen Ladungsträger zwischen zwei Stößen mit den Gasmolekülen eine so große Geschwindigkeit, daß sie beim Zusammenstoß das getroffene Molekül in ein positives Ion und ein Elektron spalten. Auch diese Ladungsträger erreichen teilweise so große Geschwindigkeiten, daß sie ihrerseits Moleküle durch Stoß ionisieren können. Die Ionisation vollzieht sich lawinenartig. Dadurch sinkt der Widerstand der Glimmlampe und, da jetzt ein Teil der Spannung am Vorwiderstand abfällt, auch die Spannung an der Glimmlampe. Eine bestimmte Spannung ist allerdings zur Aufrechterhaltung des ionisierten Zustandes erforderlich. Deshalb bleibt die auf dem Oszillografenschirm aufgezeichnete Spannung konstant. Sinkt die angelegte Spannung unter diese Mindestspannung (Löschspannung) ab, so wird der Vorgang der Ionisation unterbrochen und die Entladung erlischt.

Bemerkungen

1. Anstelle der Demonstrationsglimmlampe kann jede andere Glimmlampe ohne eingebauten Vorwiderstand Verwendung finden.
2. Um die Ermittlung des Nulleiters in der Steckdose zu umgehen, kann ein Trenntransformator vor den Spannungsteiler geschaltet werden. Er besteht aus 2 Spulen mit je 1500 Windungen und einem geschlossenen Eisenkern.

2.1.6. Untersuchung der Leitungsvorgänge in Luft bei vermindertem Druck

1. Entladungsröhre, auf die Vakuumpumpe passend
2. Drehschieber-Hochvakuumpumpe
3. Stromversorgungsgerät (4000 V —; 0,05 A)
4. Widerstand (100 kΩ; 100 W)
5. Demonstrationsstrommesser (30 mA —)
6. elektronisches Röhrenvoltmeter mit Hochspannungstastkopf
7. Ramsayfett

Methodische Hinweise

1. Bei der Auswertung sollte die Deutung der Versuchsergebnisse der Strom-Spannungsmessung bei verschiedenen Drücken im Vordergrund stehen. Um die Schüler nicht abzulenken, bleibt die Röhre bei Versuch 1 abgedeckt, so daß sie

die Leuchterscheinungen nicht sehen können. Bei Versuch 2 sollte sich infolge der Kompliziertheit der Verhältnisse die Auswertung der beobachteten Leuchterscheinungen in erster Linie auf die auftretenden Asymmetrien beziehen.

2. Vergleiche MB 2.0.0. und 2.0.1.!

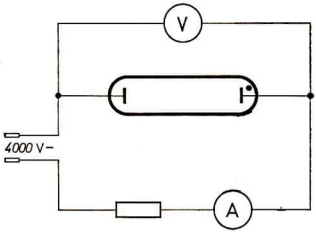


Abb. 2.1.6./1
Untersuchung der Elektrizitätsleitung in Luft bei vermindertem Druck (Schaltplan)

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.1.6./1. Der Saugstutzen der Hochvakuumpumpe sowie der Ansatzstutzen und die beiden Hähne der Entladungsröhre werden z. B. mit Benzin von alten Fettresten befreit und gleichmäßig dünn mit Ramsayfett bestrichen. Danach setzt man die Entladungsröhre auf den Saugstutzen auf, öffnet den Hahn im Ansatzstutzen und schließt den Hahn am Rohr.

Versuch 1

Vakuumpumpe, Stromversorgungsgerät und Röhrenvoltmeter werden eingeschaltet. Vor die Entladungsröhre wird ein undurchsichtiger Schirm gestellt. Der Strommesser zeigt zunächst noch keinen Strom an. Die wenigen im Gas vorhandenen frei beweglichen Ladungsträger bewegen sich zwar unter dem Einfluß des elektrischen Feldes. Infolge der großen Gasdichte ist aber ihre mittlere freie Weglänge so gering, daß sie keine große Geschwindigkeit erreichen. Bei einem bestimmten, geringeren Luftdruck wird plötzlich ein Strom angezeigt. Die Spannung sinkt ab. Einige der Elektronen haben jetzt zwischen zwei Stößen eine so große Geschwindigkeit erlangt, daß beim Zusammenstoß mit einem Molekül dieses in ein Ion und ein oder mehrere Elektronen zerfällt. Da auch diese mit weiteren Molekülen zusammenstoßen und sie z. T. ionisieren, sinkt der Widerstand des Gases, und die Stromstärke nimmt zu. Ein Teil der anliegenden Spannung fällt am Vorwiderstand ab. Mit geringer werdendem Druck wird die Stromstärke immer größer, und die Spannung an der Entladungsröhre sinkt weiter ab. Infolge der immer größer werdenden mittleren freien Weglänge nimmt die Wahrscheinlichkeit, daß ein Stoß zur Ionisation führt, immer mehr zu. Bei einem bestimmten Druck erreicht die Stromstärke ihren Höchstwert.
Eine weitere Verringerung des Druckes führt zu einer Verkleinerung der Stromstärke und zu einem Anwachsen der Spannung an der Entladungsröhre. Das rührt daher, daß infolge der zunehmenden Verdünnung des Gases die Wahrscheinlichkeit, daß ein Ladungsträger mit ausreichender kinetischer Energie ein neutrales Gasteilchen trifft, abnimmt. Dadurch sinkt die Ladungsträgerkonzentration im Rohr, und der Widerstand steigt an.
Bei einem noch geringeren Druck reicht schließlich die angelegte Spannung nicht mehr zur Aufrechterhaltung der Ionisation aus. Es fließt kein meßbarer Strom mehr.

Versuch 2

Der Schirm vor der Röhre wird entfernt. Man läßt bei laufender Pumpe durch vorsichtiges Öffnen des Hahnes soviel Luft in die Röhre eintreten, daß die vom Strommesser angezeigte Stromstärke ihren Maximalwert hat. Nun werden beide Hähne sorgfältig geschlossen.
Im abgedunkelten Raum werden die Leuchterscheinungen im Glasrohr beobachtet. Stark auffallend ist ihre unsymmetrische Verteilung. Sie äußert sich sowohl in der Lage der leuchtenden Bereiche bezüglich der Elektroden, als auch in ihrer Größe und Leuchtfarbe. Das belegt den wesentlichen Unterschied zwischen den positiven und den negativen Ladungsträgern.

Bemerkungen

1. Sollte kein Stromversorgungsgerät für Hochspannung zur Verfügung stehen, kann ein Funkeninduktor, den man an eine Wechselspannungsquelle (0 bis 20 V; 8 A) anschließt, oder ein Hochspannungstransformator aus Aufbauteilen Verwendung finden (vgl. V 4.1.1.). Im einfachsten Falle genügt bereits ein Einweggleichrichter (in Reihe geschaltete Selengleichrichter oder Siliziumdioden, Hochspannungsgleichrichterröhre).
2. Der Versuch 1 kann auch mit Wechselspannung durchgeführt werden.
3. Beim Versuch 2 kann als Spannungsquelle ein Funkeninduktor Verwendung finden. Auf sämtliche Meßinstrumente wird dann verzichtet.
4. Zur Beobachtung der Leuchterscheinungen eignet sich besonders die Vakuumskale nach Cross. Als Spannungsquelle dient der Funkeninduktor. Durch Vertauschen der Zuleitungen überzeugt man sich davon, ob die Polung richtig ist. Die scheibenförmige Elektrode soll die Katode sein. Die interessierenden Leuchterscheinungen treten in den mittleren Röhren auf.

2.2. Modellexperimente zur Streuung geladener Teilchen an Atomkernen

2.2.1. Modellmäßige Nachbildung der Streuung eines Alphateilchens am Atomkern

1. Luftkissenaufsatz zum Tageslichtschreibprojektor Ⓢ (siehe V 1.3.6.)
2. Schwebekörper Ⓢ (siehe V 1.3.6.)
3. Tageslichtschreibprojektor
4. Staubsauger mit Schlauch
5. durchsichtiger Plaststreifen (30 cm × 2 cm × 0,5 cm)
6. 5 zylinderförmige keramische Magnete (20 mm ⌀; 6 mm Höhe)
7. Alleskleber

Methodische Hinweise

1. Die Modellexperimente ermöglichen die Untersuchung des Einflusses von Geschwindigkeit und Richtung des Alphateilchens auf den Streuwinkel. Die nahezu reibungsfreie Bewegung des Gleitkörpers gestattet geringe Geschwindigkeiten und dadurch eine genaue Beobachtung des gesamten Bewegungsablaufes.
2. Vergleiche MB 2.0.2.!

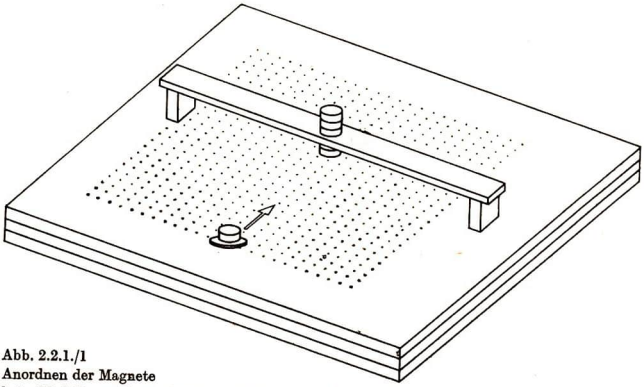


Abb. 2.2.1./1
Anordnen der Magnete
beim Modellversuch zur Streuung geladener Teilchen am Atomkern

Versuchsaufbau

Der Schreibprojektor wird auf einen stabilen justierbaren Stativtisch gestellt. Man löst die Halterungssäule vom Projektor und befestigt sie so an einem Stativ, daß sich das Objektiv einige Zentimeter über seiner ursprünglichen Lage befindet. Der Luftkissenaufsatz wird auf die Schreibplatte des Projektors gelegt und an den Druckstutzen des Staubsaugers angeschlossen. Die Magnete befestigt man gemäß Abbildung 2.2.1./1 an dem durchsichtigen Plaststreifen, so daß sich der untere 1 cm bis 2 cm über dem Aufsatz befindet. Nach Einschalten des Staubsaugers wird unter Zuhilfenahme des Schwebekörpers der Projektor mittels der Stellschrauben in den Stativfüßen waagerecht ausgerichtet. Der Schwebekörper stellt im Modell das bewegte geladene Teilchen dar, der Magnet auf dem Plaststreifen den streuenden Atomkern. Von der gegenüberliegenden Seite der ruhenden Magnete stößt man den Schwebekörper leicht mit dem Finger an, so daß er sich mit geringer Geschwindigkeit auf diesen zubewegt. In der Nähe des Magnets ändert sich seine Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung. Zur Untersuchung der Abhängigkeit des Streuwinkels von der Richtung der Geschwindigkeit setzt man den Magnet nacheinander mit etwa gleicher Geschwindigkeit längs der einzelnen Lochreihen des Luftkissengerätes in Bewegung. Je weiter die ursprüngliche Richtung der Geschwindigkeit am streuenden Kern vorbeiführt, um so geringer ist ihre Änderung. Große Streuwinkel treten dann auf, wenn sich das Teilchen fast zentral auf das Streuzentrum zubewegt. In diesen Fällen zeigt sich besonders deutlich, daß außer der Änderung der Richtung der Geschwindigkeit in der Nähe des streuenden Teilchens auch eine Änderung des Betrages der Geschwindigkeit auftritt.
Zur Untersuchung der Abhängigkeit des Streuwinkels vom Betrag der Geschwindigkeit des auftreffenden Teilchens wählt man eine Bahn aus, die ohne gegenseitige Beeinflussung etwa 1 cm neben dem streuenden Magnet vorbeiführen würde. Man stößt den Schwebekörper mehrmals nacheinander an, wobei der Betrag der

Geschwindigkeit von Versuch zu Versuch erhöht wird. Je größer der Betrag der Geschwindigkeit ist, um so kleiner ist der Streuwinkel.

Bemerkungen

1. In weiterführenden Experimenten kann auch der Einfluß der Masse und der Ladung des sich bewegenden Teilchens auf den Streuwinkel untersucht werden.
2. Die Experimente lassen sich auch ohne Luftkissenaufsatz auf dem Schreibprojektor durchführen. Zu diesem Zwecke wird die Gleitfläche des keramischen Magnets mit feinem Schmirgelpapier gut geglättet. Infolge der auftretenden Reibung ist der Kraftstoß der gleitenden Magnete entsprechend höher zu wählen.
   Es ist auch möglich, den beweglichen Magnet an einem langen Faden pendelartig zu befestigen.
   In beiden Fällen wird die Polung der Magnete so gewählt, daß Abstoßung auftritt.

2.2.2. Modellexperiment zur Streuung von Mikroteilchen beim Durchgang durch eine Metallfolie

1. Glasplatte (20 cm × 100 cm)
2. 2 Glasplatten (50 cm × 50 cm)
3. dünnes Eisenblech (25 cm × 60 cm)
4. 20 zylinderförmige keramische Magnete (10 mm ∅)
5. zerbrochener großer Ringmagnet
6. Schmirgelpapier

Methodischer Hinweis

Vergleiche MB 2.0.2.!

Versuch

Die beiden Glasplatten von je 50 cm Kantenlänge werden mit einer Neigung von 20 Grad gegen die Horizontale gemäß Abbildung 2.2.2./1 übereinander an einem Stativ befestigt. Ihr Abstand voneinander soll nur wenig größer als die Höhe der zylinderförmigen Keramikmagnete sein. An den in Abbildung 2.2.2./1 angegebenen Stellen werden außen auf beide Glasplatten gegenüberliegend Magnete aufgeklebt, so daß sich deren entgegengesetzte Pole gegenüberstehen. Unter die untere Kante der Glasplatten wird das etwas abgewinkelte Eisenblech gelegt. An die obere Kante der unteren Glasplatte schließt sich die 1 m lange um 30 Grad bis 35 Grad gegen die Horizontale geneigte Glasplatte an. An ihrem oberen Ende befindet sich die Hälfte eines großen keramischen Ringmagnets, der allen kleinen Magneten etwa die gleiche Anfangsgeschwindigkeit erteilen soll.
Die Gleitfläche der keramischen Magnete wird mittels feinen Schmirgelpapiers geglättet. Sie werden jeweils (einer nach dem anderen) ins Innere des halben Ringmagneten gelegt, so daß sich gleichnamige Pole gegenüberstehen, und mit dem Zeigefinger festgehalten. Läßt man sie los, so gleiten sie die geneigte Ebene herab und gelangen in den Luftspalt zwischen die Glasplatten. Die Lage der Pole ist so gewählt, daß sie von den aufgeklebten Magneten abgestoßen werden. Dadurch

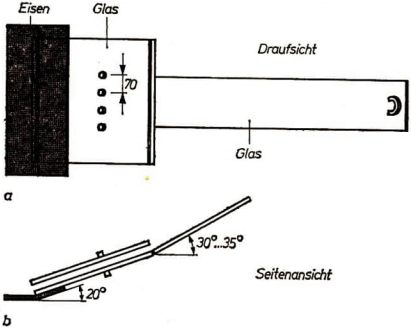


Abb. 2.2.2./1
Versuchsanordnung beim Modellexperiment zur Streuung von Mikroteilchen in einer Folie:

a) Anordnen der Magnete auf den Glasplatten,
b) Gleitbahn mit Magneten

verändert sich ihre Bewegungsrichtung. Schließlich werden sie durch das Eisenblech abgebremst und bleiben liegen.
Die beweglichen Magnete bilden im Modell die gestreuten geladenen Teilchen nach, die ruhenden Magnete sollen die Atomkerne in einer Metallfolie darstellen. Nacheinander werden nun etwa 20 kleine Magnete in das Innere des Ringmagnets gebracht und losgelassen. Infolge ihrer nicht völlig gleichen Startrichtung und der Länge der Anlaufbahn gelangen die meisten Magnete fast unabgelenkt durch die feststehenden hindurch. Nur sehr wenige kommen in die unmittelbare Nähe der Streuzentren und erfahren eine mehr oder weniger starke Änderung der Bewegungsrichtung. Da die Endpunkte der Bahnkurven durch die Stellen des Liegenbleibens der Magnete auf der Eisenplatte markiert sind, ermöglichen sie Rückschlüsse auf die Bewegung.

3. Einige wichtige atomare und allgemeine Konstanten

3.0. Methodische Bemerkungen

3.0.0. Während es bei der überwiegenden Anzahl der Versuche im Physikunterricht darauf ankommt, unbekannte Erscheinungen zu demonstrieren, funktionale Zusammenhänge festzustellen und Anwendungsmöglichkeiten der erkannten Gesetze aufzuzeigen, wird mit den Experimenten zur Konstantenbestimmung ein Festwert ermittelt. Das setzt in der Regel die genaue Kenntnis der Zusammenhänge voraus. Bei der Bestimmung universeller Konstanten ist es sogar oftmals erforderlich, auf mehrere gesetzmäßige Zusammenhänge zurückzugreifen (spezifische Ladung des Elektrons, Elementarladung). Die Experimente zur Bestimmung von Konstanten liefern damit nicht nur neue Ergebnisse, sondern tragen erheblich zur Festigung bereits gewonnener Kenntnisse und Erkenntnisse bei.
Um herauszuarbeiten, daß es sich bei der zu bestimmenden Größe um eine Konstante handelt, ist es erforderlich, das Experiment mehrmals zu wiederholen. Damit wird gleichzeitig belegt, daß die Einzelmessungen mit Fehlern behaftet sind. Erst der Mittelwert mehrerer Messungen kommt der zu bestimmenden Konstante nahe. Der mittlere Fehler ist ein Maß für die Güte der Messung. Demgegenüber ermöglicht eine einmalige Messung keine genaue Angabe darüber, wieweit der gemessene Wert von der zu bestimmenden Konstanten abweichen kann. Die Notwendigkeit einer mehrfachen Wiederholung der Experimente macht sie vor allem als Praktikumsversuche und Versuche für Arbeitsgemeinschaften geeignet. Die Tatsache, daß sich bis auf Meßfehler auch bei unterschiedlichen Versuchsanordnungen immer wieder der gleiche Wert ergibt, ist von philosophisch-weltanschaulicher Bedeutung. Die Experimente zur Konstantenbestimmung tragen weiterhin dazu bei, das Problem der kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Struktur der Stoffe zu klären. Insbesondere präzisieren die verschiedenen Varianten der Versuche zur Elementarladung den korpuskularen Aspekt der Elektronen (vgl. hierzu auch MB 9.0.0).

3.0.1. Die Bedeutung der im Abschnitt 3.1. beschriebenen Versuche besteht über das Deutlichwerden der Teilbarkeitsgrenze der Stoffe hinaus darin, daß sie es ermöglichen, die Größe der Moleküle abzuschätzen. Weiterhin gestatten sie die Abschätzung der Loschmidtschen Konstanten als wichtiger allgemeiner Konstante mit einfachen apparativen und mathematischen Mitteln.

3.0.2. Die in V 3.2.1. bis 3.2.3. beschriebenen Experimente zur Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons unterscheiden sich bezüglich der Genauigkeit der Meßergebnisse kaum voneinander. Hinsichtlich des Meß- und Rechenaufwandes weichen sie jedoch erheblich voneinander ab. Die Bestimmung der spezifischen Ladung mit dem Fadenstrahlrohr ist zweifellos das anschaulichste aller Verfahren.

Jedoch bereitet die genaue Bestimmung des Durchmessers des Fadenstrahlringes große Schwierigkeiten. Am schnellsten läßt sich V 3.2.2., Variante a, durchführen und auswerten, bei dem ein Katodenstrahl im Magnetfeld der Erde abgelenkt wird. Der Nachteil besteht jedoch darin, daß die Ablenkung nicht von jedem Beobachtungsstandpunkt aus sichtbar ist. In V 3.2.3. ist der Effekt gut sichtbar, und die magnetische Feldstärke läßt sich leicht berechnen. Komplizierter ist dagegen ihre Bestimmung in V 3.2.1. und 3.2.2., Variante b. Der Versuch 3.2.4. ist lediglich zur Abschätzung der spezifischen Ladung des Elektrons geeignet. Der Vorteil besteht hierbei darin, daß nur die elektrischen Meßinstrumente beobachtet zu werden brauchen.

3.0.3. Die Experimente zur Elementarladung im Abschnitt 3.3. belegen, daß auch bei der elektrischen Ladung ein kleinstes Quantum existiert. Außerdem gestatten sie die Bestimmung des Betrages der Elementarladung e.
Infolge der Kleinheit der Elementarladung ist für die Durchführung des Millikan-Versuches mit objektiver Demonstration die Verwendung einer Fernsehaufnahmekamera erforderlich. Zunächst sollten die Schüler jedoch das Prinzip des Versuches kennenlernen. Das kann mittels eines Demonstrationsversuches mit makroskopischen Ladungsträgern verdeutlicht werden (V 3.3.1.). Falls die Möglichkeit besteht, sollte als nächstes den Schülern der Nachweis der Existenz einer kleinsten Ladungseinheit erbracht werden. Hinweise dazu sind im V 3.3.2. gegeben. Am schnellsten führt das im V 3.3.2., Variante b, beschriebene Experiment zu den wichtigen Ergebnissen. V 3.3.3. gestattet die Bestimmung der Größe der Elementarladung. Beide Experimente setzen eine subjektive Beobachtung voraus.
Das im V 3.3.4. beschriebene Experiment zur Bestimmung der Faradayschen Konstanten ist in engem Zusammenhang mit den Versuchen im Abschnitt 2.1. zu sehen. Aus der Faradayschen Konstanten F und der Elementarladung e (vgl. V 3.3.2. und 3.3.3.) läßt sich die Loschmidtsche Konstante N_L aus der Gleichung

$$N_L = \frac{F}{e}$$

berechnen.

3.1. Moleküldurchmesser, Atomdurchmesser und Loschmidtsche Konstante

3.1.1. Abschätzung des Moleküldurchmessers, des Atomdurchmessers und der Loschmidtschen Konstanten mit dem Ölfleckversuch (Verdünnungsmethode)

1. Flache Glasschale Ⓢ (siehe V 1.1.5.)
2. Tageslichtschreibprojektor
3. durchsichtiges Lineal
4. Benzin (100 ml)
5. Ölsäure (1 ml)
6. destilliertes Wasser (1000 ml)
7. Bärlappsporen oder Schwefelpulver (fettfrei)
8. Meßzylinder (50 ml)
9. Bürette

Methodische Hinweise

1. Das Experiment zeichnet sich durch seine Einfachheit aus. Es kann deshalb in allen Klassenstufen, in denen die mathematischen Voraussetzungen gegeben sind, eingesetzt werden.
2. Das Experiment zeigt, daß die Teilung der Stoffe soweit fortgesetzt werden kann, daß eine Schicht von etwa 10^{-7} cm Dicke entsteht. Daß es sich bei der Ölschicht um eine monomolekulare Schicht handelt und die Schichtdicke gleich dem Moleküldurchmesser ist, sollte den Schülern mitgeteilt werden. Bei der Erläuterung dieser Aussage kann V 1.1.5. herangezogen werden.
3. Das Experiment führt zu gut reproduzierbaren Ergebnissen. Die grobe Abschätzung wird in erster Linie durch die Vereinfachungen bei der Auswertung bedingt. Ein Nachteil gegenüber V 3.1.2. besteht darin, daß zunächst der Nachweis erbracht werden muß, daß das Benzin keinen wesentlichen Anteil am Flächeninhalt des Fleckes liefert.

Vorarbeiten

Die flache Glasschale wird sorgfältig durch Auswaschen mit Seifenlösung von Fettresten befreit, mit Wasser gut ausgespült, auf den Projektor gestellt und 1 cm hoch mit destilliertem Wasser gefüllt. Zum Experiment benötigt man weiterhin eine Mischung aus Ölsäure und Benzin im Volumenverhältnis 1:1999. Für ihre Herstellung ist es zunächst erforderlich, mittels Bürette festzustellen, wie viele Tropfen Ölsäure ein Volumen von 1 cm^3 haben. Das geschieht durch Auszählen. Danach gibt man auf die vorausberechnete Benzinmenge von etwa 100 cm^3 so viele Tropfen Ölsäure, daß das gewünschte Volumenverhältnis entsteht. Entsprechen bei der verwendeten Bürette z. B. 50 Tropfen einem Kubikzentimeter, so ist es erforderlich, 2 Tropfen Ölsäure in 80 cm^3 Benzin zu bringen, um das gewünschte Mischungsverhältnis zu erhalten.
Vor der Versuchsdurchführung wird auch die Bürette sorgfältig von Fettresten befreit. Dabei ist vor allem der Hahn gründlich mit Benzin zu säubern.

Versuch

Die Bürette wird mit Benzin gefüllt. Kurz vor der Versuchsdurchführung wird die Wasseroberfläche gleichmäßig mit Bärlappsporen oder fettfreiem Schwefelpulver bestreut. Um eine Behinderung der sich auf der Wasseroberfläche ausbreitenden Flüssigkeit zu vermeiden, sollte die Sporen- bzw. Pulverschicht so dünn wie möglich sein. Dann wird der Hahn der Bürette so weit aufgedreht, daß sich jeweils nach einigen Sekunden ein Tropfen löst. Nach Abfallen eines Tropfens auf den Experimentiertisch hält man die Bürette über die Mitte der Glasschale und läßt den nächsten Benzintropfen auf die Wasseroberfläche fallen. Das Benzin breitet sich zu einer dünnen Schicht auf der Wasseroberfläche aus. Es drängt die Bärlappsporen zurück. Nach dem Verdunsten des Benzins ist der so entstandene Fleck fast wieder verschwunden. Nun wird auf die gleiche Weise ein Tropfen des Benzin-Öl-Gemischs auf die Wasseroberfläche gebracht (Abb. 1.1.5./1). Der durch das Gemisch entstehende Fleck wird nach dem Verdunsten des Benzins nicht wesentlich kleiner. Sein Durchmesser wird bestimmt. Eine Wiederholung des Versuches führt zu einem gleich großen Ölfleck.

Abschätzung des Moleküldurchmessers

Die Tatsache, daß sich für gleiche Ölmengen immer wieder gleich große Ölflecke ergeben, ist ein Beleg für die diskontinuierliche Struktur der Stoffe. Sie legt die Annahme nahe, daß sich die Ölteilchen bis zur Grenze ihrer Möglichkeit ausbreiten, d. h. solange, bis nur noch Ölteilchen nebeneinander, aber nicht mehr übereinander liegen. Die Schichtdicke d_M errechnet sich aus der Gleichung

$$d_M = \frac{V}{\pi \cdot r^2},$$

wobei V das Volumen des Öls und r der Radius des Ölfleckes ist. Der doppelte Radius $2\,r$ des Ölfleckes wurde im Versuch gemessen. Bei der Berechnung des Ölvolumens V ist zu berücksichtigen, wie viele Tropfen des Gemisches 1 cm³ ausmachen und daß 1 cm³ des Gemisches nur $^1/_{2000}$ cm³ Öl enthält. Unter der vereinfachenden Annahme, daß das Ölmolekül die Form eines Würfels besitzt, entspricht die berechnete Schichtdicke d_M dem Moleküldurchmesser.

Abschätzung des Atomdurchmessers

Das Ölsäuremolekül $C_{17}H_{33}COOH$ besteht aus 54 Atomen. Werden diese der Einfachheit halber wieder als würfelförmig angenommen, so ergibt sich der Durchmesser d_A des Atoms, der dann der Kantenlänge eines Würfels entspricht, aus der Gleichung

$$d_A = \sqrt[3]{\frac{d_M^3}{54}}.$$

Abschätzung der Loschmidtschen Konstanten

Stellt man sich zur Vereinfachung das Molekül als einen Würfel mit der Kantenlänge d_M vor, so besitzt ein Ölmolekül das Volumen d_M^3. Das molare Volumen der Ölsäure beträgt

$$V_m = \frac{M}{\varrho},$$

wobei M die molare Masse und ϱ die Dichte der Ölsäure sind. Die Loschmidtsche Konstante N_L ist der Quotient aus dem molaren Volumen und dem Volumen eines Moleküls:

$$N_L = \frac{V_m}{d_M^3}, \qquad N_L = \frac{M}{\varrho \cdot d_M^3}.$$

Sie ist zahlenmäßig gleich der Anzahl der Moleküle in einem Mol.

Beispiel

Das Mischungsverhältnis Ölsäure:Benzin beträgt 1:1999. Ein Tropfen des Gemisches hat das Volumen $^1/_{50}$ cm³. Der Durchmesser des Ölfleckes wurde zu 11 cm bestimmt.

$$d_M = \frac{V}{\pi \cdot r^2}$$

$$d_M = \frac{2 \cdot 10^{-2}\ \text{cm}^3 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{3{,}14 \cdot 5{,}5^2\ \text{cm}^2}$$

$$d_M = \frac{10^{-5}\ \text{cm}^3}{10^2\ \text{cm}^2}$$

$$\underline{\underline{d_M = 10^{-7}\ \text{cm}}}$$

Der Moleküldurchmesser beträgt $1 \cdot 10^{-7}$ cm.

$$d_A = \sqrt[3]{\frac{d_M{}^3}{54}}$$

$$d_A = \sqrt[3]{\frac{1 \cdot 10^{-21}}{54}}\ \text{cm}$$

$$\underline{\underline{d_A \approx 3 \cdot 10^{-8}\ \text{cm}}}$$

Der mittlere Atomdurchmesser beträgt $3 \cdot 10^{-8}$ cm.

$$N_L = \frac{M}{\varrho \cdot d_M{}^3},$$

Aus der Summenformel für die Ölsäure erhält man für die molare Masse

$M = 282\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$, die Dichte beträgt $\varrho = 0{,}9\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

$$N_L = \frac{282\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}}{0{,}9\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot 10^{-21}\ \text{cm}^3}$$

$$\underline{\underline{N_L \approx 3 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}}}$$

Für die Loschmidtsche Konstante erhält man $3 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ (Tabellenwert $6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$).

Bemerkungen

1. Vergleiche Bem. 3 V 1.1.5.!
2. Zur Erzeugung von Tropfen vom Benzin-Öl-Gemisch eignet sich besonders eine medizinische Injektionsspritze mit Nadel. Durch langsames Drücken des Kolbens erzielt man gleich große Tropfen. Besitzt die Spritze eine Kubikzentimeter-Teilung, so läßt sich das Volumen eines Tropfens aus der Anzahl der Tropfen, die je Kubikzentimeter austreten, leicht bestimmen.
3. Der Versuch kann statt mit Ölsäure auch mit einer beliebigen, ausreichend dünnflüssigen Ölart durchgeführt werden. Das ermöglicht dann jedoch nur eine grobe Abschätzung des Molekül- und Atomdurchmessers und der Loschmidtschen Konstanten.
4. Der Versuch ist sehr gut als Schülerexperiment geeignet. Man kann ihn mit einfachen Mitteln in gleicher Front durchführen. Alle Schüler benutzen einen sorgfältig gereinigten, flachen Teller, den sie mit destilliertem Wasser füllen. Für die ganze Klasse genügen wenige mit dem Benzin-Öl-Gemisch gefüllte Büretten.

3.1.2. Abschätzung des Moleküldurchmessers mit dem Ölfleckversuch (Tauchmethode)

1. Flache Glasschale Ⓢ (siehe V 1.1.5.)
2. Tageslichtschreibprojektor
3. durchsichtiges Lineal
4. Ölsäure (5 ml)
5. destilliertes Wasser (1000 ml)
6. Bärlappsporen oder Schwefelpulver (fettfrei)
7. Platindraht (0,2 mm ∅)
8. kleines Uhrglas (5 cm ∅)
9. Bunsenbrenner
10. Präzisionswaage mit Wägesatz

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH Nr. 1 und 2 V 3.1.1.!

Vorarbeiten

Die flache Glasschale wird mittels Seifenlösung sorgfältig von allen Fettresten befreit, mit Wasser gut ausgespült und 1 cm hoch mit destilliertem Wasser gefüllt auf den Projektor gestellt. Zur Bestimmung der Ölmenge, deren Ausbreitung auf der Wasseroberfläche untersucht werden soll, bringt man 1 cm³ Ölsäure in das Uhrglas. Mittels Präzisionswaage wird die Masse des gefüllten Uhrglases bestimmt. Danach taucht man den Platindraht jeweils bis auf den Boden des Glases wiederholt in die Ölsäure ein. Nach jedem Tauchen wird das Öl in der Bunsenflamme verbrannt. Durch erneutes Wägen des Uhrglases ist es möglich, die Masse Δm des insgesamt auf diese Weise entnommenen Öls zu bestimmen. Unter der Voraussetzung, daß jeweils gleich viel Öl am Platindraht haftete, errechnet sich die Masse m eines Öltröpfchens aus

$$m = \frac{\Delta m}{n},$$

wenn der Draht n-mal eingetaucht wurde. Ist ϱ die Dichte der Ölsäure, so beträgt das Volumen V eines Öltröpfchens

$$V = \frac{m}{\varrho}.$$

Versuch

Das Wasser in der Glasschale wird gleichmäßig und möglichst dünn mit Bärlappsporen oder fettfreiem Schwefelpulver bestreut. Danach entnimmt man dem Uhrglas ein Öltröpfchen und taucht den Platindraht in die Mitte der Wasseroberfläche ein. Die Ölsäure breitet sich auf der Wasseroberfläche aus und verdrängt die Bärlappssporen, die den Rand des kreisförmigen Fleckes markieren (Abb. 1.1.5./1). Sein Durchmesser wird bestimmt und daraus der Flächeninhalt berechnet. Eine Wiederholung des Versuchs führt zu annähernd gleich großen Kreisflächen. Ist V das Volumen des aufgebrachten Öls und A der Flächeninhalt der Kreisfläche, so beträgt die Schichtdicke d_M der Ölschicht

$$d_M = \frac{V}{A}.$$

Nimmt man in grober Näherung an, daß in der Schicht würfelförmige Ölmoleküle nebeneinanderliegen, so entspricht die ermittelte Schichtdicke d_M dem Durchmesser eines Ölmoleküls.

Beispiel

Dichte der Ölsäure $\varrho = 0{,}9\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$
Anzahl der entnommenen und verbrannten Öltröpfchen $n = 100$
Abnahme der Masse $\Delta m = 2{,}0\ \mathrm{mg}$
Flächeninhalt der Ölfläche $A = 200\ \mathrm{cm^2}$ (berechnet aus einem Durchmesser des Fleckes von 16 cm)

$$m = \frac{\Delta m}{n}$$

$$m = \frac{2{,}0 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{g}}{100}$$

$$\underline{m = 2{,}0 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{g}}$$

$$V = \frac{m}{\varrho}$$

$$V = \frac{2{,}0 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{g}}{0{,}9\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}}$$

$$\underline{V \approx 2 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{cm^3}}$$

$$d_M = \frac{V}{A}$$

$$d_M \approx \frac{2 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{cm^3}}{200\ \mathrm{cm^2}}$$

$$\underline{\underline{d_M \approx 1 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{cm}}}$$

Der Moleküldurchmesser beträgt $1 \cdot 10^{-7}$ cm.

Bemerkungen

1. Der Tauchmethode haften zwei wesentliche Nachteile an.
   — Infolge des unvermeidbar ungleichmäßigen Eintauchens von Versuch zu Versuch sind die Volumen der Öltröpfchen unterschiedlich. Das führt zu größeren Schwankungen der Flächeninhalte der Ölflecke.
   — Die Bestimmung des Ölvolumens mit der Waage ist sehr zeitaufwendig.
2. Die Auswertung kann gemäß V 3.1.1. fortgesetzt werden.
3. Vergleiche V 1.1.5. Bem. 3. und V 3.1.1. Bem. 3 und 4.!
4. Anstelle des Platindrahtes kann auch eine dünne Nähnadel Verwendung finden. Zur Bestimmung der Masse des anhaftenden Öls taucht man sie wiederholt abwechselnd in das Öl und in eine mit Wasser gefüllte Entwicklerschale.

3.2. Spezifische Ladung des Elektrons

3.2.1. Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons mit dem Fadenstrahlrohr (im transversalen Magnetfeld)

Zu Variante a

1. Fadenstrahlrohr mit Zubehör (Gehäuse, Spiegelskale mit Halterung)
2. Gerät zur Herleitung des Induktionsgesetzes
3. Stromversorgungsgerät (400 V —; 0,1 A)
4. Akkumulator (6 V)
5. Demonstrationsspannungsmesser (500 V —)
6. Demonstrationsstrommesser (1 A —)
7. Gleitwiderstand (30 Ω; 1 A)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 7., außerdem

8. Zylinderspule Ⓢ (siehe V 3.2.3.)
9. Stromversorgungsgerät (20 V —; 4 A)
10. Gleitwiderstand (20 Ω; 4 A)
11. Demonstrationsstrommesser (5 A —)
12. Magnetnadel mit Träger

Zu Variante c

Geräte 1. bis 11., außerdem

13. Holzklotz
14. Demonstrationsspannungsmesser (100 mV —)

Methodische Hinweise

1. Durch eine geeignete Wahl des Gasdruckes im Fadenstrahlrohr (Johnsonsche Gaskonzentration) wird erreicht, daß die Bereiche, in die die Elektronen gelangen, durch rötliche Leuchterscheinungen sichtbar werden. Dadurch kann im abgedunkelten Raum der Einfluß des magnetischen Feldes auf die Bewegung der Elektronen beobachtet werden (vgl. MB 3.0.2.).
2. Zur Erzeugung des Magnetfeldes werden Helmholtz-Spulen verwendet. Sie garantieren ein weitgehend homogenes Magnetfeld im Untersuchungsraum und besitzen außerdem den Vorteil, daß die Sichtbarkeit nur wenig beeinträchtigt wird. Schwierigkeiten bereitet die Berechnung der magnetischen Feldstärke. Die in Variante a angegebene Gleichung für die Feldstärke in den Helmholtz-Spulen ist den Schülern nicht bekannt. Deshalb wird in den Varianten b und c auf die Kompensations- und Vergleichsmessung orientiert. Diese Verfahren sind physikalisch und technisch von großem Wert.
3. Das Experiment ist als Demonstrationsversuch sehr gut geeignet, um den Schülern das Prinzip der $\frac{e}{m}$-Bestimmung zu verdeutlichen. Eine hinreichend genaue Ermittlung des Radius der Kreisbahn (diese Größe geht quadratisch in

die Rechnung ein) erfordert jedoch eine individuelle Messung. Die notwendige Abdunklung des Raumes, die aufwendige Bestimmung der magnetischen Feldstärke und die Schwierigkeiten bei der genauen Messung des Durchmessers des Fadenstrahlringes zeichnen das Experiment als Versuch für das Praktikum und für Arbeitsgemeinschaften aus.

4. Bei dem Einsatz des Versuches als Schülerexperiment müssen alle spannungsführenden Teile so gut isoliert sein, daß eine Berührung durch die Schüler mit Sicherheit ausgeschlossen ist.

Versuchsanordnung

Das Fadenstrahlrohr wird gemäß Abbildung 3.2.1./1 zwischen die Helmholtz-Spulen gebracht. Hinter dem Fadenstrahlrohr befestigt man an der Außenseite der Spulen waagerecht den Spiegelmaßstab. Die Schaltung erfolgt nach Abbildung 3.2.1./2. Die Heizspannung wird einem Akkumulator entnommen (6 V). Er dient gleichzeitig als Spannungsquelle für die Helmholtz-Spulen.

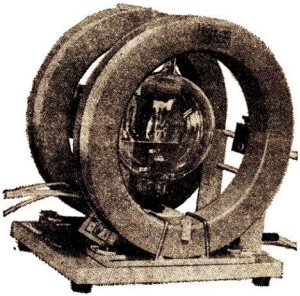


Abb. 3.2.1./1
Fadenstrahlrohr mit Spiegelskale im Magnetfeld der Helmholtz-Spulen

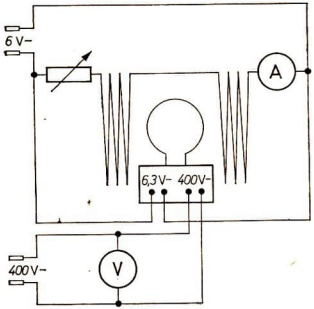


Abb. 3.2.1./2
Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons mit dem Fadenstrahlrohr (Schaltplan)

Versuch

An das geheizte Fadenstrahlrohr legt man eine Anodenspannung von 400 V an. Im abgedunkelten Raum wird der waagerecht verlaufende Fadenstrahl sichtbar. Nun verbindet man die Helmholtz-Spulen mit dem Akkumulator und vergrößert den Strom durch Verändern des Widerstandes so weit, bis ein geschlossener Kreis auftritt. Erfolgt die Krümmung des Fadenstrahls nach der falschen Seite, so werden die Zuleitungen an den Helmholtz-Spulen vertauscht.
Für einen gut sichtbaren Fadenstrahlring mit möglichst großem Durchmesser werden Feldstromstärke und Beschleunigungsspannung ermittelt. Durch Verändern der Lage des beobachtenden Auges sucht man danach die beiden am weitesten

rechts und links außen liegenden Stellen auf der Skale, an denen der Fadenstrahlring mit seinem Spiegelbild zur Deckung kommt. Der Abstand dieser beiden Stellen ist gleich dem Durchmesser des Fadenstrahlringes.

Auswertung

Das im elektrischen Feld beschleunigte Elektron besitzt die kinetische Energie

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 = e \cdot U \,. \tag{1}$$

Dabei ist m die Masse des Elektrons, v seine Geschwindigkeit, e seine elektrische Ladung und U die beschleunigende Spannung. Bewegt sich dieses Elektron senkrecht zu den magnetischen Feldlinien, so bewirkt die Lorentz-Kraft eine zusätzliche Bewegungskomponente senkrecht zur ursprünglichen Richtung und zu den Feldlinien. Da die Kraft immer senkrecht zur jeweiligen Bewegung wirkt, wird der Betrag der Energie des Elektrons nicht geändert. v bleibt dem Betrage nach konstant. Im homogenen Magnetfeld bewirkt die gleichbleibende, immer senkrecht zur Geschwindigkeit stehende Kraft eine gleichmäßige Richtungsänderung der Elektronen. Dadurch wird das Elektron auf eine Kreisbahn gezwungen. Die Lorentz-Kraft wirkt dabei als Zentralkraft.

Es gilt

$$\mu_0 \cdot e \cdot v \cdot H = m \cdot \frac{v^2}{r} \,.$$

μ_0 ist dabei die Induktionskonstante des Vakuums, H die magnetische Feldstärke und r der Radius der Kreisbahn. Als Bahnradius ergibt sich daraus

$$r = \frac{m \cdot v}{\mu_0 \cdot e \cdot H} \,.$$

Die Berücksichtigung der Gleichung (1) führt zu

$$r^2 = \frac{2\, m \cdot U}{\mu_0^2 \cdot e \cdot H^2} \,.$$

Daraus folgt für die spezifische Ladung des Elektrons:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\mu_0^2 \cdot r^2 \cdot H^2} \,.$$

Der Radius des Fadenstrahlringes wird aus dem gemessenen Durchmesser berechnet, die beschleunigende Spannung gemessen. Zur Bestimmung der wirksamen magnetischen Feldstärke gibt es folgende Möglichkeiten:

Variante a: Bestimmen der magnetischen Feldstärke auf mathematischem Wege

Die Berechnung der magnetischen Feldstärke ist aus den Spulendaten und der im Experiment ermittelten Stromstärke möglich. Für Spulen vom Helmholtz-Typ gilt

$$H = \frac{n \cdot R^2}{(R^2 + s^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot I \,.$$

Dabei ist n die Windungszahl einer Spule, I die Spulenstromstärke, R der mittlere Radius einer Spule und s der halbe wirksame Abstand der Spulen.

Berücksichtigt man, daß beim Induktionsgerät der wirksame halbe Abstand beider Spulen etwa 0,57 R beträgt, so vereinfacht sich die Gleichung zu

$$H = \frac{0{,}66\, n \cdot I}{R}.$$

Beispiel

Anodenspannung $U = 400$ V
Feldstromstärke $I = 0{,}80$ A
Radius des Fadenstrahlringes $r = 5{,}5$ cm
Windungszahl einer Spule $n = 240$
mittlerer Spulenradius $R = 0{,}133$ m
Induktionskonstante $\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ V s A^{-1} m^{-1} (Tabellenwert)

Für die magnetische Feldstärke gilt die Gleichung

$$H = \frac{0{,}66\, n \cdot I}{R}$$

$$H = \frac{0{,}66 \cdot 240 \cdot 0{,}80\ \mathrm{A}}{0{,}133\ \mathrm{m}}$$

$$\underline{\underline{H \approx 950\ \mathrm{A \cdot m^{-1}}}}.$$

Für die spezifische Ladung des Elektrons ergibt sich dann

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\mu_0^2 \cdot r^2 \cdot H^2}$$

$$\frac{e}{m} \approx \frac{2 \cdot 400\ \mathrm{V}}{1{,}26^2 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{V^2\ s^2\ A^{-2}\ m^{-2}} \cdot 5{,}5^2 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^2} \cdot 950^2\ \mathrm{A^2\ m^{-2}}}$$

$$\frac{e}{m} \approx 1{,}8 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m^2\ V^{-1}\ s^{-2}}.$$

Unter Berücksichtigung der Beziehung

$$1\ \mathrm{V\ A\ s} = 1\ \mathrm{m^2\ kg\ s^{-2}}$$

erhält man

$$\frac{e}{m} \approx 1{,}8 \cdot 10^{11}\ \mathrm{A\ s\ kg^{-1}}.$$

Der Tabellenwert beträgt $\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ A s kg^{-1}.

Die Gleichung für die Helmholtz-Spulen gibt die magnetische Feldstärke sehr genau wieder. Zu große Werte für die spezifische Ladung resultieren in erster Linie daraus, daß nicht die gesamte anliegende Spannung bei der Beschleunigung der Elektronen wirksam wird.

Variante b: Bestimmen der magnetischen Feldstärke durch Kompensation

Das Fadenstrahlrohr wird aus dem Induktionsgerät entfernt und in die Helmholtz-Spulen die Zylinderspule geschoben, so daß beide Spulenachsen übereinstimmen und in Ost-West-Richtung zeigen. Zunächst stellt man die Feldstromstärke der

Helmholtz-Spulen auf den gemessenen Wert ein, danach wird eine Magnetnadel mit Träger in das Innere der Zylinderspule gebracht. Die Zylinderspule verbindet man gemäß Abbildung 3.2.1./3 mit der Spannungsquelle (20 V —). Die Stromrichtung in der Zylinderspule wird so gewählt, daß ihr Magnetfeld das der Helmholtz-Spulen schwächt. Nun vergrößert man die Stromstärke in der Zylinderspule so weit, bis die Magnetnadel in die Nord-Süd-Richtung zeigt. In diesem Falle sind beide Felder entgegengesetzt gleich groß. Die Stromstärke I in der Zylinderspule wird gemessen. Aus der Gleichung

$$H = \frac{n \cdot I}{l}$$

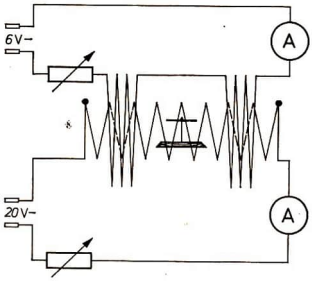


Abb. 3.2.1./3
Bestimmen der magnetischen Feldstärke durch Kompensieren (Schaltplan)

ergibt sich unter Berücksichtigung der Windungszahl n und der Länge l der Spule die gesuchte magnetische Feldstärke H.

Variante c: Bestimmen der magnetischen Feldstärke durch Vergleichsmessung

Nach Entfernen des Fadenstrahlrohres wird die große Spule mit 600 Windungen vom Gerät zur Herleitung des Induktionsgesetzes zwischen die Helmholtz-Spulen

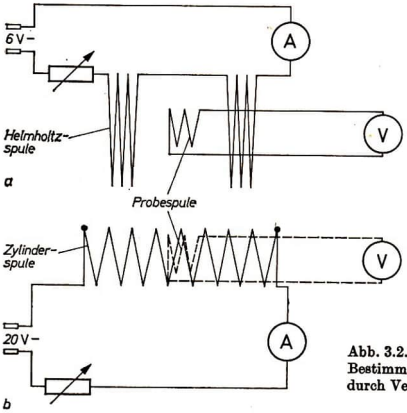


Abb. 3.2.1./4
Bestimmen der magnetischen Feldstärke durch Vergleichsmessung (Schaltplan)

gebracht. Man befestigt sie so an der Halterung für die Induktionsspulen, daß die Achsen der drei Spulen auf einer Geraden liegen. Die Feldstromstärke in den Helmholtz-Spulen wird wieder auf den Meßwert eingestellt. Die Probespule verbindet man mit den Anschlüssen des Spannungsmessers (100 mV). Mit dieser Anordnung wird der Induktionsspannungsstoß beim Ein- oder Ausschalten des Feldstromes gemessen (Abb. 3.2.1./4a). Nachfolgend wird die Probespule in eine Zylinderspule gebracht (Abb. 3.2.1./4b). Nun erhöht man die Stromstärke in der Zylinderspule so weit, bis beim Ein- oder Ausschalten des Feldstromes in der Probespule ein gleich großer Spannungsstoß entsteht wie vorher, als sich die Probespule in den Helmholtz-Spulen befand. Die magnetische Feldstärke berechnet man wieder mit der Gleichung

$$H = \frac{n \cdot I}{l}.$$

Bemerkungen

1. Die Bestimmung des Durchmessers vom Fadenstrahlring mit der Spiegelskale erfordert einige Übung. Die Messung wird dadurch kompliziert, daß der Raum abgedunkelt werden muß, um den Elektronenstrahl gut sehen zu können.
2. Anstelle des Akkumulators kann auch ein Stromversorgungsgerät Verwendung finden. Sowohl die Heizung des Fadenstrahlrohres mit Wechselspannung als auch die Verwendung eines wenig geglätteten Feldstromes bewirkt aber eine starke Verbreiterung des Fadenstrahls.
3. Sollte der Induktionsspannungsstoß bei Variante c zu klein sein, so schließt man die Feldspulen an eine Wechselspannungsquelle an. Die in der Probespule induzierte Spannung mißt man mit einem Meßgerät für Wechselspannung.

3.2.2. Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons mit der Katodenstrahlröhre (im transversalen Magnetfeld)

Zu Variante a

1. Braunsche Röhre mit geheizter Katode
2. Halterung für Röhren mit geheizter Katode
3. Demonstrationsspannungsmesser (500 V —)
4. Stromversorgungsgerät (400 V —; 6,3 V ~)
5. Magnetnadel mit Träger
6. Meßschieber
7. Faserstift

Zu Variante b

Geräte 1. bis 7., außerdem

8. Gerät zur Herleitung des Induktionsgesetzes
9. Akkumulator (6 V)
10. Gleitwiderstand (20 Ω; 4 A)
11. Demonstrationsstrommesser (500 mA —)

Methodische Hinweise

1. Das Verfahren gestattet einen sehr einfachen Versuchsaufbau. Er ist im Prinzip schon von der Behandlung der Braunschen Röhre her bekannt. Weiterhin entfällt bei Variante a die Magnetfeldmessung, da der Betrag der Intensität des Erdfeldes mit hinreichender Genauigkeit einer Tabelle entnommen werden kann.
2. Die Größe der Auslenkung des Elektronenstrahls beträgt bei Variante a etwa 1 cm. Da dieser Wert quadratisch in die Rechnung eingeht, ist eine besonders sorgfältige Bestimmung erforderlich. Das setzt voraus, daß die Messung unmittelbar an der Röhre vorgenommen werden muß. Außerdem behindert die erforderliche Drehung der Röhre die Sichtbarkeit. Der Einsatz eines Spiegels kann dabei nur teilweise Abhilfe schaffen.
   Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß Eisenteile (Rohre, Stahleinlagen) das Magnetfeld der Erde teilweise abschirmen. Das führt zu geringeren Auslenkungen des Elektronenstrahls.
3. Die Verwendung des stärkeren Magnetfeldes in Variante b bewirkt größere Ablenkungen bei beliebiger Lage der Röhre. Die dann jedoch notwendige Bestimmung der magnetischen Feldstärke kompliziert die Ermittlung der spezifischen Ladung.
4. Vergleiche MH Nr. 4 V 3.2.1.!

Variante a: Ablenkung des Elektronenstrahls im Magnetfeld der Erde

Versuchsanordnung

Die Braunsche Röhre wird horizontal etwa 40 cm über der Tischfläche am Stativ befestigt. Da alle Eisenteile in der Nähe der Röhre die Messung stören, finden Stativteile aus Aluminium oder Holz Verwendung. Die Röhre wird mittels langer Verbindungsdrähte mit dem Stromversorgungsgerät verbunden. Die Heizspannung beträgt 6,3 V. Eine der Heizspannungsleitungen (Masse) muß außerdem mit dem negativen Pol der Anodenspannung und mit dem positiven Pol der Gitterspannung verbunden werden. Die Stecker der beiden verbleibenden Leitungen verbindet man entsprechend der Beschriftung auf der Halterung der Röhre mit der freien Buchse der Anoden- bzw. Gitterspannung. Die beiden Ablenkelektroden werden auf Anodenpotential gelegt. Die gesamte Versuchsanordnung soll sich möglichst weitab von Eisenteilen und Magneten befinden.

Versuch

Das Stromversorgungsgerät wird eingeschaltet und an die Braunsche Röhre eine Anodenspannung zwischen 300 V und 400 V gelegt. Sollte danach auf dem Fluoreszenzschirm infolge von Aufladungseffekten kein Leuchtfleck auftreten, so genügt es, einen kleinen Keramikmagneten in der Nähe der Braunschen Röhre vorbeizubewegen. Danach wird auf dem Fluoreszenzschirm ein möglichst kleiner Leuchtfleck eingestellt. Das ist durch Verändern der Anodenspannung und der Gitterspannung möglich. Mit Hilfe der Magnetnadel wird die Nord-Süd-Richtung bestimmt und die Braunsche Röhre so ausgerichtet, daß ihre Rohrachse in diese Richtung zeigt. Nun wird eine markante Stelle des Leuchtfleckes auf dem Fluoreszenzschirm ausgewählt und ihre Lage mit einem spitzen Faserstift markiert. Dreht man die Röhre nacheinander in Ost-West-Richtung bzw. West-Ost-Richtung, so wandert der Leuchtfleck. Die beiden extremen Lagen des Leuchtfleckes werden möglichst genau er-

mittelt und auf dem Leuchtschirm aufgezeichnet. Mit einem Meßschieber bestimmt man sorgfältig den Abstand $2s$ zwischen den beiden Markierungspunkten auf dem Leuchtschirm. Außerdem wird die Anodenspannung U gemessen.

Auswertung

Ursache für die Ablenkung des Elektronenstrahls ist das Magnetfeld der Erde. Infolge des homogenen Erdmagnetfeldes bewegen sich die Elektronen in den beiden extremen Lagen der Elektronenstrahlröhre auf einer ebenen Kreisbahn mit großem Radius (Abb. 3.2.2./1). Je nach der gegenseitigen Lage von Bewegungsrichtung und Magnetfeld macht sich das durch eine Ablenkung des Leuchtfleckes auf dem Leuchtschirm bemerkbar. Aus der Strecke s dieser Abweichung und dem Abstand l von der durchbohrten Anode zum Leuchtschirm der Röhre läßt sich der Radius r des Kreisbogens bestimmen. Nach dem Satz von Pythagoras gilt $l^2 + (r - s)^2 = r^2$. Daraus folgt für den Radius

$$r = \frac{l^2}{2s} + \frac{s}{2}.$$

Infolge der geringen Ablenkung des Elektronenstrahls im Magnetfeld der Erde liefert der letzte Summand keinen nennenswerten Beitrag zum Krümmungsradius. Er kann deshalb in der Rechnung vernachlässigt werden.

Für die spezifische Ladung des Elektrons gilt (siehe V 3.2.1.)

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\mu_0^2 \cdot r^2 \cdot H^2}.$$

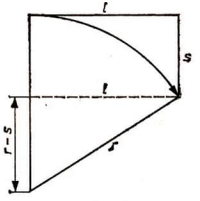


Abb. 3.2.2./1
Weg des Elektronenstrahls in der Braunschen Röhre unter dem Einfluß eines transversalen Magnetfeldes

Die Anodenspannung U wurde im Experiment bestimmt. Aus dem gemessenen Abstand $2s$ der Auftreffstellen des Leuchtfleckes und dem Abstand l von der durchbohrten Anode zum Leuchtschirm wird der Radius r berechnet. Die Induktionskonstante μ_0 und die Feldstärke H des Magnetfeldes der Erde entnimmt man einer Tabelle.

Beispiel

Abstand zwischen den beiden Markierungspunkten auf dem Leuchtschirm $2s = 1{,}7$ cm
Abstand durchbohrte Anode-Leuchtschirm $l = 17$ cm
Anodenspannung $U = 440$ V
Feldstärke des magnetischen Erdfeldes $H = 34$ A m^{-1} (Tabellenwert)
Induktionskonstante $\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ V s A^{-1} m^{-1}

$$r = \frac{l^2}{2s}$$

$$r = \frac{17^2\ \text{cm}^2}{1{,}7\ \text{cm}}$$

$$\underline{\underline{r = 1{,}7\ \text{m}}}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\mu_0^2 \cdot r^2 \cdot H^2}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot 440\ \mathrm{V}}{1{,}26^2 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{V^2\,s^2\,A^{-2}\,m^{-2}} \cdot 1{,}7^2\ \mathrm{m^2} \cdot 34^2\ \mathrm{A^2\,m^{-2}}}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{880\ \mathrm{m^2}}{530 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{V\,s^2}}.$$

Unter Berücksichtigung der Beziehung

$$1\ \mathrm{V\,A\,s} = 1\ \mathrm{m^2\,kg\,s^{-2}}$$

erhält man

$$\frac{e}{m} \approx 1{,}7 \cdot 10^{11}\ \mathrm{A\,s\,kg^{-1}}\,.$$

Variante b: Ablenkung des Elektronenstrahls im Magnetfeld von Helmholtz-Spulen

Versuchsanordnung

Um größere Auslenkungen des Elektronenstrahls zu erhalten, wird er einem stärkeren transversalen Magnetfeld ausgesetzt. Zur Erzeugung dieses homogenen Magnetfeldes dienen die Helmholtz-Spulen des Gerätes zur Herleitung des Induktionsgesetzes. Die Braunsche Röhre wird so im Innenraum der Spulen angeordnet, daß die Rohrachse parallel zu den Wicklungsebenen verläuft (Abb. 3.2.2./2). Die Helmholtz-Spulen werden über einen Gleitwiderstand und den Demonstrationsstrommesser mit dem Akkumulator verbunden.

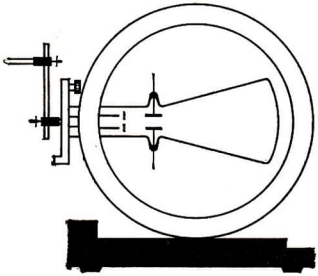


Abb. 3.2.2./2
Ablenkung des Elektronenstrahls im Magnetfeld der Helmholtz-Spulen

Versuch

Nach Anlegen der Spannungen an die Braunsche Röhre wird die Lage des Leuchtfleckes auf dem Fluoreszenzschirm mit dem Faserstift markiert. Danach wird der Strom durch die Helmholtz-Spulen allmählich solange vergrößert, bis der Leucht-

fleck an den Rand des Fluoreszenzschirmes gewandert ist. Nun werden der Abstand s des Leuchtfleckes von seiner ursprünglichen Lage, die Anodenspannung U und die Stromstärke I in den Helmholtz-Spulen gemessen.

Auswertung

Die Berechnung der spezifischen Ladung des Elektrons (siehe V 3.2.1.) erfolgt mit der Gleichung

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\mu_0^2 \cdot r^2 \cdot H^2}.$$

Die Anodenspannung U wurde gemessen. Der Radius r der Kreisbahn des Elektronenstrahls läßt sich mit der Gleichung

$$r = \frac{l^2}{2s} + \frac{s}{2}$$

ermitteln (siehe Variante a).
Beim Induktionsgerät gilt für die magnetische Feldstärke H in den Helmholtz-Spulen

$$H = \frac{0{,}66\, n \cdot I}{R}$$

(siehe V 3.2.1.a). Dabei ist n die Windungszahl einer Spule, I die Spulenstromstärke und R der mittlere Spulenradius.

Beispiel

Anodenspannung $U = 400$ V
Stromstärke in den Helmholtz-Spulen $I = 130$ mA
Windungszahl einer Spule $n = 240$
mittlerer Spulenradius $R = 13{,}2$ cm
Abstand durchbohrte Anode—Leuchtschirm $l = 17$ cm
Auslenkung des Leuchtfleckes $s = 4{,}5$ cm
Induktionskonstante $\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ V s A^{-1} m^{-1} (Tabellenwert)

Für den Radius der Kreisbahn des Elektronenstrahls gilt

$$r = \frac{l^2}{2s} + \frac{s}{2}$$

$$r = \frac{17^2\ \text{cm}^2}{9\ \text{cm}} + 2{,}25\ \text{cm}$$

$$\underline{\underline{r = 34\ \text{cm}}}$$

Für die magnetische Feldstärke ergibt sich

$$H = \frac{0{,}66\, n \cdot I}{R}$$

$$H = \frac{0{,}66 \cdot 240 \cdot 0{,}13\ \text{A}}{0{,}132\ \text{m}}$$

$$\underline{\underline{H = 160\ \text{A m}^{-1}}}$$

Die spezifische Ladung des Elektrons beträgt dann

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\mu_0^2 \cdot r^2 \cdot H^2}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot 400\ \mathrm{V}}{1{,}26^2 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{V^2\,s^2\,A^{-2}\,m^{-2}} \cdot 0{,}34^2\ \mathrm{m^2} \cdot 160^2\ \mathrm{A^2\,m^{-2}}}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{800 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m^2}}{470\ \mathrm{V\,s^2}}$$

$$\frac{e}{m} \approx 1{,}7 \cdot 10^{11}\ \mathrm{A\,s\,kg^{-1}}$$

Bemerkungen

1. In Variante b kann anstelle des Akkumulators auch ein Stromversorgungsgerät Verwendung finden. Die ungenügende Glättung der Gleichspannung bedingt dann jedoch eine Aufspaltung des Leuchtfleckes, so daß die Bestimmung seiner Auslenkung nur näherungsweise möglich ist.
2. Die Berechnung der magnetischen Feldstärke mit der Gleichung für Helmholtz-Spulen läßt sich umgehen, wenn gemäß Variante b oder c im V 3.2.1. zur Kompensation bzw. zum Vergleich eine Zylinderspule herangezogen wird.

Hochspannung

3.2.3. Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons mit der Katodenstrahlröhre (im longitudinalen Magnetfeld)

1. Große Zylinderspule Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   Plast- oder Papprohr (10 cm ∅; 35 cm Länge)
   isolierter Kupferdraht (0,5 mm ∅; 160 m Länge)
   2 Messingstreifen (35 cm × 1 cm × 0,1 cm)
   2 Meßbuchsen
2. Braunsche Röhre mit geheizter Katode
3. Halterung für Röhren mit geheizter Katode
4. Stromversorgungsgerät (400 V —; 20 V —; 6,3 V ~)
5. Gleitwiderstand (3500 Ω; 0,3 A)
6. Gleitwiderstand (20 Ω; 4 A)
7. Demonstrationsspannungsmesser (500 V —)
8. Demonstrationsstrommesser (5 A —)

Methodische Hinweise

1. Die Vorzüge des Verfahrens liegen vor allem in folgendem:
   — Es ist kein Abdunkeln des Raumes erforderlich.
   — Alle in die Rechnung eingehenden Größen können leicht ermittelt werden.
   — Die magnetische Feldstärke H läßt sich schnell und einfach berechnen.
2. Vergleiche MH Nr. 4 V 3.2.1.!

Herstellen der Zylinderspule

Zur Erzeugung eines hinreichend homogenen Magnetfeldes findet eine Zylinderspule Verwendung. Sie wird aus einem Papp- oder Plastrohr hergestellt. Um beide Enden des Rohres wird ein schmaler Metallstreifen, dessen Länge etwas größer als der Umfang des Rohres ist, herumgelegt. Die beiden Enden des Streifens sind jeweils um 90 Grad abgewinkelt und mit 4-mm-Bohrungen versehen. Durch Verschrauben der abgewinkelten Enden jedes Metallstreifens mit einer Buchse werden sie in Art einer Schelle am Rohr befestigt. Danach bewickelt man das Rohr einlagig mit Kupferdraht von etwa 0,5 mm Durchmesser. Die Enden des Drahtes werden an den Schellen befestigt und sind dadurch leitend mit den Buchsen verbunden (Abb. 3.2.3./1).

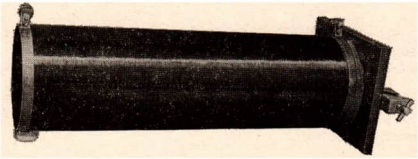


Abb. 3.2.3./1
Selbstangefertigte Zylinderspule zur Erzeugung eines homogenen magnetischen Feldes

Versuchsanordnung

Die Zylinderspule wird über die Braunsche Röhre geschoben. Damit sich die Röhre im mittleren Teil der Spule befindet, empfiehlt es sich, die Schrauben für den Röhrensockel zu lösen und den Sockel um 180 Grad gedreht wieder zu befestigen. Dadurch braucht der Fuß der Röhre nicht mehr durch die Bohrung in der Halterungsplatte hindurchgesteckt zu werden, wenn die Röhre in den Sockel eingeführt wird. Gemäß Beschriftung der Röhrenhalterung wird die Röhre an das Stromversorgungsgerät angeschlossen (siehe V 3.2.2., Variante a). Der weitere Versuchsaufbau erfolgt gemäß Abbildung 3.2.3./2.

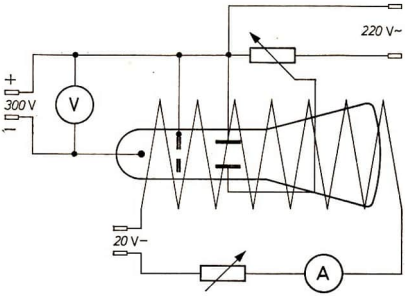


Abb. 3.2.3./2
Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons im longitudinalen Magnetfeld (Schaltplan)

Versuch

Nach Anlegen der Heizspannung werden Anoden- und Gitterspannung so gewählt, daß auf dem Bildschirm ein hinreichend kleiner Leuchtfleck auftritt. Wird an die Ablenkplatten die Wechselspannung gelegt, so erscheint auf dem Bildschirm ein Strich. Legt man danach eine Gleichspannung an die Spule und erhöht diese nach und nach, so wird das Band kürzer und verändert dabei seine Lage. Bei einer bestimmten Stromstärke in der Spule ist es zu einem kleinen Fleck zusammengeschrumpft. Diese Stromstärke I und die Anodenspannung U werden gemessen.

Auswertung

Wird über die Braunsche Röhre eine von Gleichstrom durchflossene Zylinderspule geschoben, so tritt im gesamten Raum der Braunschen Röhre ein homogenes magnetisches Feld auf. Da die magnetischen Feldlinien parallel zur Rohrachse und damit auch parallel zur Bewegung der Elektronen verlaufen, übt das Magnetfeld auf den Elektronenstrahl keinerlei ablenkende Wirkung aus. Wird nun an die Ablenkplatten der Röhre eine Gleichspannung gelegt, so erhalten die Elektronen durch das elektrische Feld zwischen den Ablenkplatten neben ihrer axial gerichteten Geschwindigkeit $v_{||}$ zusätzlich eine Geschwindigkeitskomponente $v_{\perp}$ senkrecht dazu. Da diese Geschwindigkeitskomponente nun auch senkrecht auf den magnetischen Feldlinien der Spule steht, durchlaufen die Elektronen außer dem Weg von der Katode zum Schirm noch eine Kreisbahn mit dem Radius

$$r = \frac{m \cdot v_{\perp}}{\mu_0 \cdot e \cdot H}$$

(vgl. V 3.2.1.). Als Überlagerung beider Bewegungen ergibt sich damit eine Schraubenbahn.
Die Zeit für einen Umlauf beträgt $T = \frac{2\pi \cdot r}{v_{\perp}}$. Das führt unter Berücksichtigung der Gleichung für r zu

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{\mu_0 \cdot e \cdot H}.$$

Ist l_1 die Entfernung Anode—Leuchtschirm, so benötigen die Elektronen für diesen Weg die Zeit $t = \frac{l_1}{v_{||}}$. Durch geeignete Wahl der magnetischen Feldstärke H ist es nun möglich zu erreichen, daß die Zeit T gleich der Zeit t wird, d. h., daß die Elektronen während ihrer Bewegung von der Katode zum Schirm genau einen Schraubengang durchlaufen. Sie treffen dann den Schirm an der gleichen Stelle, als wären sie durch das elektrische und das magnetische Feld gar nicht abgelenkt worden (Abb. 3.2.3./3).

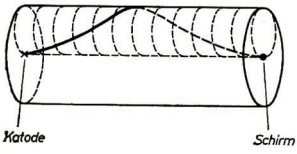


Abb. 3.2.3./3
Weg des Elektronenstrahls in der Braunschen Röhre unter dem Einfluß eines longitudinalen Magnetfeldes

Es gilt dann $T = t$ und damit

$$\frac{l_1}{v_{||}} = \frac{2\pi \cdot m}{\mu_0 \cdot e \cdot H}.$$

Daraus folgt

$$v_{||} = \frac{\mu_0 \cdot e \cdot H \cdot l_1}{2\pi \cdot m}.$$

Unter Berücksichtigung dieser Beziehung erhält man aus der Gleichung

$$\frac{m}{2} v_{||}^2 = e \cdot U \qquad \text{(vgl. V 3.2.1.)}$$

$$\frac{m \cdot \mu_0^2 \cdot e^2 \cdot H^2 \cdot l_1^2}{2 \cdot 4\pi^2 \cdot m^2} = e \cdot U.$$

Daraus folgt

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 \cdot U}{\mu_0^2 \cdot H^2 \cdot l_1^2}.$$

Wird an die Ablenkplatten eine Wechselspannung angelegt, so durchläuft für den Fall $T = t$ ebenfalls jedes Elektron genau eine Windung einer Schraubenbahn. Dabei bewegen sich die verschiedenen Elektronen, verursacht durch die angelegte Wechselspannung, auf Schraubenbahnen verschiedener Durchmesser. Die magnetische Feldstärke H wird nach der Gleichung $H = \frac{n \cdot I}{l_2}$ bestimmt, wobei I die Spulenstromstärke, n die Windungszahl der Spule und l_2 ihre wirksame Länge ist.

Beispiel

Spulenlänge $l_2 = 0{,}33$ m
Windungszahl $n = 470$
Abstand zwischen Anode und Schirm $l_1 = 0{,}165$ m
Anodenspannung $U = 300$ V
Spulenstromstärke $I = 1{,}25$ A
Induktionskonstante $\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ V s A^{-1} m^{-1} (Tabellenwert)

Für H gilt

$$H = \frac{n \cdot I}{l_2}$$

$$H = \frac{470 \cdot 1{,}25 \text{ A}}{0{,}33 \text{ m}}$$

$$\underline{\underline{H \approx 1800 \text{ A m}^{-1}}}$$

$\frac{e}{m}$ ergibt sich aus der Gleichung

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 \cdot U}{\mu_0^2 \cdot H^2 \cdot l_1^2}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot 3{,}14^2 \cdot 300\ \mathrm{V}}{1{,}26^2 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{V^2\,s^2\,A^{-2}\,m^{-2}} \cdot 1800^2\ \mathrm{A^2\,m^{-2}} \cdot 0{,}165^2\ \mathrm{m^2}}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{23{,}7 \cdot 10^3\ \mathrm{m^2}}{14 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{V\,s^2}}$$

$$\frac{e}{m} \approx 1{,}7 \cdot 10^{11}\ \frac{\mathrm{m^2}}{\mathrm{V\,s^2}}$$

Unter Berücksichtigung der Beziehung

$$1\ \mathrm{V\,A\,s} = 1\ \mathrm{m^2\,kg\,s^{-2}}$$

erhält man

$$\frac{e}{m} \approx 1{,}7 \cdot 10^{11}\ \mathrm{A\,s\,kg^{-1}}\,.$$

Bemerkungen

1. Die Bevorzugung von Wechselspannung gegenüber Gleichspannung bei der Ablenkung der Elektronen hat experimentelle Gründe:
   - In der Regel verläuft der Elektronenstrahl in der Braunschen Röhre, solange noch kein elektrisches und magnetisches Feld auf ihn wirken, nicht genau in der Rohrachse. Das hat zur Folge, daß er beim Vorhandensein eines magnetischen Feldes und eines elektrischen Feldes zwischen den Elektroden nach Durchlaufen einer Windung nicht wieder genau die Stelle auf dem Leuchtschirm erreicht, auf die er vorher auftraf.
   - Es ist experimentell viel einfacher zu ermitteln, wann der unter Verwendung der Wechselspannung auftretende Strich sich in einen hinreichend kleinen Fleck verwandelt hat, als zu bestimmen, wann der Elektronenstrahl nach Durchlaufen einer Windung die gleiche Stelle wieder erreicht hat.
2. Eine genaue Bestimmung der spezifischen Ladung macht es erforderlich, daß die Spannung, die an der Feldspule liegt, wenig pulsiert. Das ist bei Verwendung eines Stromversorgungsgerätes nur bei kleinen Stromstärken garantiert. Die Restwelligkeit läßt sich durch Parallelschalten von Elektrolytkondensatoren mit einer Gesamtkapazität von mehreren hundert Mikrofarad wesentlich verringern.

3.2.4. Abschätzung der spezifischen Ladung des Elektrons mit einer Elektronenröhre [SE]

1. Hochspannungsgleichrichterröhre (z. B. EY 81, EY 88) mit Sockel
2. Stromversorgungsgerät (20 V —; 4 A)
3. Stromversorgungsgerät (10 V —; 0,1 A; 6,3 V ~)
4. Demonstrationsstrommesser (100 mA —)
5. Demonstrationsstrommesser (5 A —)
6. Demonstrationsspannungsmesser (10 V —)
7. Gleitwiderstand (20 Ω; 4 A)
8. Spule (750 Wdg.)

Methodische Hinweise

1. Das Experiment dient der groben Abschätzung der spezifischen Ladung des Elektrons. Es ist einfach im Versuchsaufbau und in der Auswertung der Meßergebnisse (vgl. MB 3.0.2.). Das Experiment hat mit V 3.2.3. gemein, daß unter Zugrundelegung der Daten für die Elektronenröhre sämtliche Ergebnisse mit elektrischen Meßgeräten ermittelt werden können.
2. Die Diskussion der erheblichen Fehlerquellen kann einen wesentlichen Beitrag zur Schulung des physikalischen Denkvermögens der Schüler liefern. Die Tatsache, daß die Anodenstromstärke nicht sprunghaft auf Null absinkt, ist ein Beleg für die unterschiedliche Geschwindigkeit der Elektronen im Katodenmaterial.

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.2.4./1 unter Berücksichtigung von Abbildung 3.2.4./2. Die Röhre wird in eine Spule mit 750 Windungen gebracht. An diese wird über den Gleitwiderstand von 20 Ω und den Strommesser eine Spannung von 20 V gelegt.

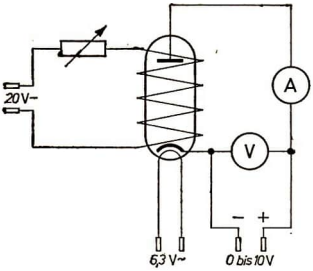


Abb. 3.2.4./1
Bestimmung der spezifischen Ladung des Elektrons mit der Elektronenröhre (Schaltplan; der Strommesser für die Spulenstromstärke ist nicht eingezeichnet)

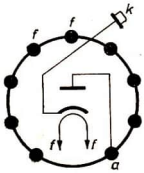


Abb. 3.2.4./2
Sockelschaltplan der Röhren EY 81 und EY 88

Versuch

Nach Einschalten der Heizspannung wird die Anodenspannung so groß gewählt (maximal 10 V), daß eine Anodenstromstärke in der Größenordnung von 10 mA auftritt. Danach wird der Spulenstrom eingeschaltet und durch Verschieben des Abgriffes am Widerstand vergrößert. Das hat zunächst keinen Einfluß auf die Anodenstromstärke. Vergrößert man jedoch die Spulenstromstärke über einen bestimmten Wert hinaus, so sinkt die Anodenstromstärke. Diese Spulenstromstärke I, bei der die Anodenstromstärke merklich zu sinken beginnt, sowie die Anodenspannung werden gemessen.

Auswertung

Die von der Katode emittierten und in Richtung Anode beschleunigten Elektronen werden durch das Magnetfeld auf eine kreisähnliche Bahn gezwungen, die bei einem

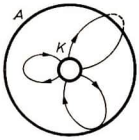


Abb. 3.2.4./3
Bahnen der Elektronen in der Elektronenröhre

bestimmten Betrag des Magnetfeldes die Anode nicht mehr schneidet (Abb. 3.2.4./3). Die Elektronen können die Anode nicht mehr erreichen. Da sie jedoch infolge der thermischen Bewegung in der Katode keine einheitliche Geschwindigkeit besitzen, sinkt die Stromstärke nicht sprunghaft auf Null ab, sondern verringert sich allmählich. Zuerst erreichen die langsamsten Elektronen nicht mehr die Anode. Der Radius ihrer Bahnen ist dann etwa halb so groß wie der Abstand Katode—Anode. Die spezifische Ladung des Elektrons errechnet sich aus der Gleichung

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\mu_0^2 \cdot H^2 \cdot r^2}.$$

Die Anodenspannung U wird gemessen. Eine Ermittlung des Abstandes Katode—Anode kann an einer defekten Röhre erfolgen. Die genaue Bestimmung der magnetischen Feldstärke bereitet Schwierigkeiten. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die Röhre ferromagnetische Teile enthält. Eine grobe Berechnung ist mit der Gleichung

$$H = \frac{n \cdot I}{l}$$

möglich. Da es sich jedoch bei der verwendeten Spule um keine Zylinderspule handelt und ihre Länge gegenüber dem Durchmesser relativ gering ist, ist bereits die so berechnete magnetische Feldstärke (abgesehen von der weiteren Störung durch ferromagnetische Stoffe im Innern der Röhre) mit erheblichen Fehlern behaftet. Die Verwendung eines Korrekturfaktors gestattet es, die Feldstärke genauer zu ermitteln. Er errechnet sich aus der Gleichung

$$K = \frac{l}{\sqrt{4R^2 + l^2}}.$$

Dabei ist R der mittlere Radius der Spulenwindungen und l die Länge der Spule.

Beispiel

Röhre EY 88, Abstand Katode—Anode 1,0 mm
Anodenspannung $U = 8{,}0$ V
Spule 750 Windungen (Länge $l = 7{,}0$ cm, mittlerer Radius der Spulenwindungen $R = 5{,}1$ cm)
Spulenstromstärke $I = 2{,}6$ A

$$H = \frac{n \cdot I}{l}$$

$$H = \frac{750 \cdot 2{,}6\ \text{A}}{0{,}07\ \text{m}}$$

$$\underline{\underline{H = 28 \cdot 10^3\ \text{A m}^{-1}}}$$

Korrekturfaktor

$$K = \frac{l}{\sqrt{4R^2 + l^2}}$$

$$K = \frac{7\ \text{cm}}{\sqrt{4 \cdot 2{,}55^2\ \text{cm}^2 + 7^2\ \text{cm}^2}}$$

$$\underline{\underline{K = 0{,}81}}$$

Spezifische Ladung

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{\mu_0^2 \cdot H^2 \cdot r^2}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot 8\ \text{V}}{1{,}26^2 \cdot 10^{-12}\ \text{V}^2\text{s}^2\ \text{A}^{-2}\ \text{m}^{-2} \cdot 28^2 \cdot 10^6\ \text{A}^2\ \text{m}^{-2} \cdot 0{,}5^2 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2}$$

Ohne Berücksichtigung des Korrekturfaktors erhält man

$$\underline{\underline{\frac{e}{m} \approx 0{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{A s kg}^{-1}\,.}}$$

Mit Berücksichtigung des Korrekturfaktors ergibt sich

$$\underline{\underline{\frac{e}{m} \approx 0{,}8 \cdot 10^{11}\ \text{A s kg}^{-1}\,.}}$$

Bemerkung

Die starke Abweichung vom Tabellenwert resultiert in erster Linie aus der abschirmenden Wirkung der ferromagnetischen Teile in der Röhre. Sie bewirkt, daß der berechnete Wert für die magnetische Feldstärke zu groß ist. Die genaue Bestimmung der magnetischen Feldstärke ist dadurch möglich, daß man eine kleine Probespule in die Anode einer defekten Röhre bringt und eine Vergleichsmessung gemäß V 3.2.1., Variante c, durchführt.

3.3. Elementarladung und Faradaysche Konstante

3.3.1. Modellversuch zur Bestimmung der Elementarladung nach dem Schwebeverfahren

1. 2 große Kondensatorplatten mit Isolatoren
2. Bandgenerator oder Influenzmaschine
3. Flaumfedern oder Wattebäusche

Methodische Hinweise

1. Der Modellversuch zeigt das Prinzip der Bestimmung der Elementarladung nach Millikan. Er trägt den Charakter eines Freihandversuches und ist infolge des überzeugenden Effektes sehr gut als Demonstrationsversuch zur einführenden Behandlung der Bestimmung der Elementarladung geeignet.
2. Vergleiche MB 3.0.3.!

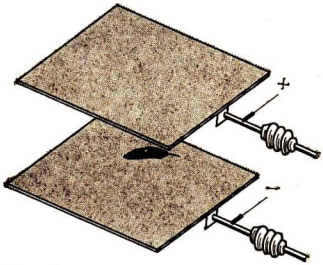


Abb. 3.3.1./1
Schweben einer Flaumfeder im elektrischen Feld

Versuch

Die Kondensatorplatten werden mittels isolierter Drähte mit den Polen des Bandgenerators verbunden. Man hält sie waagerecht übereinander und bringt auf die untere Platte mehrere kleine lose Wattebäusche oder Flaumfedern (Abb. 3.3.1./1). Durch gleichmäßiges Drehen am Bandgenerator erhält man eine konstante Spannung. Bei einem Plattenabstand von 10 cm bis 20 cm bewegen sich die Wattebäusche mehr oder weniger abrupt zur oberen Platte. Nach einiger Zeit fliegen sie wieder zur unteren Platte zurück usw. Ist die untere Platte z. B. negativ geladen, nehmen die Wattebäusche zunächst von hier Elektronen auf. Danach bewegen sie sich im elektrischen Feld zur positiven Elektrode. Hier geben sie Elektronen ab und gelangen wieder zur unteren Platte zurück. Entfernt man während des Steigens eines Bällchens die Platten voneinander, so verlangsamt sich die Bewegung. Bei einiger Übung kann man erreichen, daß die Watte schwebt. Nun verringert oder vergrößert man kurzzeitig durch schnelleres oder langsameres Drehen am Bandgenerator die angelegte Spannung. Die Watte beginnt zu steigen und zu fallen. Im Falle des Schwebens herrscht Gleichgewicht zwischen der Schwerkraft und der im elektrischen Feld auf die Watte wirkenden Kraft.

Bemerkung

Das Fallen und Steigen des zuvor schwebenden Wattebausches läßt sich experimentell leicht erreichen, wenn man die elektrische Feldstärke durch Verändern des Plattenabstandes variiert.

Hoch-Spannung

3.3.2. Nachweis der Existenz kleinster elektrischer Ladungen

Zu Variante a

1. Millikan-Kammer Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Plastplatte (10 cm × 8 cm × 1,5 cm)
   b) 2 Kupferplatten (4,5 cm × 1,5 cm × 0,05 cm)
   c) 2 Diagläser (5 cm × 5 cm)
   d) dünner Gummi- oder Plastschlauch (25 cm) mit Quetschhahn
   e) dünner Kupferdraht (25 cm)
   f) Silikonkautschuk, Alleskleber
   oder statt a) bis f)

g) durchsichtiges, quaderförmiges Plastgefäß (8 cm × 8 cm × 4 cm)
h) 2 Kupferplatten (7,5 cm × 7,5 cm × 0,1 cm)
i) 2 Metallstäbe (0,4 cm ∅; 5 cm lang)
j) Klebeband
k) dünner Gummi- oder Plastschlauch (15 cm)

2. Glasküvette (10 cm × 5 cm × 2 cm)
3. große Optikleuchte (12 V; 50 W)
4. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
5. optische Bank (50 cm)
6. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
7. Prismentisch
8. 4 Klemmreiter
9. Mikroskop, 100-fache Vergrößerung, mit Okularmikrometer
10. Stromversorgungsgerät (100 V —)
11. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr)
12. Stoppuhr
13. Widerstand (10 kΩ)
14. Schalter

Zu Variante b

Geräte 1. bis 11., außerdem

15. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
16. Funkeninduktor (120 mm Schlagweite)
17. Widerstand (10 MΩ, hochspannungsfest)

Methodische Hinweise

1. Die Experimente setzen eine subjektive Beobachtung voraus. Sie sind als Versuche für Arbeitsgemeinschaften geeignet.
2. Vergleiche MH Nr. 4 V 3.2.1.!
3. Mittels der Experimente wird der Nachweis erbracht, daß bei der Änderung des Ladungszustandes eines Körpers immer nur eine bestimmte Ladung oder ein ganzzahliges Vielfaches davon aufgenommen bzw. abgegeben wird. Das legt den Schluß nahe, daß eine kleinste Ladungseinheit existiert.
4. Vergleiche MB 3.0.3.!

Herstellen der Millikan-Kammer

Abbildung 3.3.2./1 zeigt zwei mögliche Millikan-Kammern. Im ersten Falle (Abb. 3.3.2 /1a) findet eine Plastplatte (a) mit einer Bohrung von 4 cm Durchmesser Verwendung. In dieser Kammer sind gegenüberliegend je 2 Schlitze in 5 mm Abstand angebracht, in die 2 Kupferplatten (b) eingeschoben werden. Die Kammer ist von oben und unten zweimal durchbohrt. In die größeren Bohrungen wird je ein Gummischlauch (d) straff eingepaßt. Durch die zweiten Bohrungen führt je ein dünner Kupferdraht (e) zum Anlegen der Spannung an die Kupferplatten (b) ins Innere der Kammer. Mittels Silikonkautschuk werden diese Stellen abgedichtet. Beide Kupferplatten besitzen in ihrer Mitte eine Bohrung von 2 mm Durchmesser.

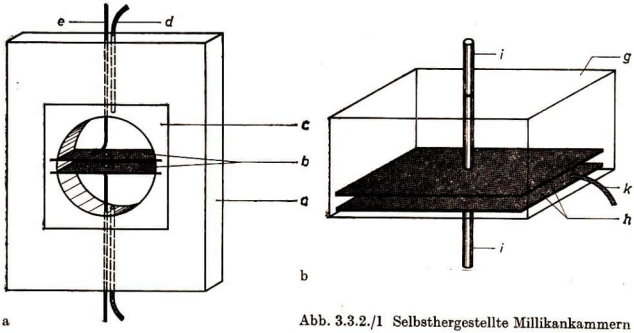


Abb. 3.3.2./1 Selbsthergestellte Millikankammern

Vorder- und Rückseite der Kammer werden durch Aufkleben von dünnen Glasplatten (c) verschlossen.
Die in Abbildung 3.3.2./1 b dargestellte Kammer besteht aus einem quaderförmigen Gefäß (g) aus durchsichtigem Plast. Am Boden des Gefäßes liegt eine Kupferplatte (h). Darüber befindet sich im Abstand von einem halben Zentimeter eine zweite, gleich große. Auf der Rückseite beider ist ein dünner Metallstab (i) befestigt. Der Deckel der Kammer ist abnehmbar. Er besitzt in seiner Mitte eine Bohrung, in die der eine Metallstab straff paßt. In entsprechender Weise ist der Boden der Kammer durchbohrt. Die Kammer besitzt außerdem eine seitliche Bohrung, die zwischen beiden Metallelektroden liegt. Ein dünner, straff in die Bohrung passender Gummischlauch (k) dient der Zufuhr von Rauch. Die Spalten zwischen Deckel und Kammer werden nach Einbringen des Rauches mittels Klebeband abgedichtet.

Versuchsaufbau

Auf der optischen Bank werden die Optikleuchte, die beiden Kondensorlinsen, die mit Wasser gefüllte Glasküvette und die Millikan-Kammer in der angegebenen

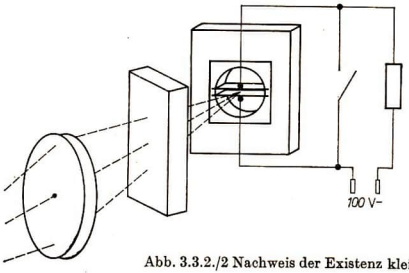


Abb. 3.3.2./2 Nachweis der Existenz kleinster elektrischer Ladungen

Reihenfolge befestigt. Gemäß Abbildung 3.3.2./2 wird die Kammer so weit gedreht, daß die Beleuchtung schräg von der Seite her erfolgt. Der Sammelpunkt der Strahlen soll sich zwischen den waagerecht liegenden Kupferplatten befinden. Das Mikroskop wird horizontal an einem Stativ befestigt, so daß sich das Objektiv unmittelbar vor der Millikan-Kammer in Höhe der Kondensatorplatten befindet. Die Platten werden über den Widerstand mit dem Stromversorgungsgerät verbunden. Parallel zu den Platten wird der Schalter gelegt.

Variante a: Gleichfeldmethode

Durch den Schlauch wird etwas Tabakrauch in die Kammer geblasen. Danach verschließt man ihn mittels eines Quetschhahnes. Im Mikroskop erscheinen die Rauchpartikel als helle Lichtpünktchen auf dunklem Hintergrund. Legt man an die Kondensatorplatten eine Spannung von 100 V an, so beginnen die Partikel entweder zu steigen oder zu fallen, je nachdem, wie sie geladen sind. Man wählt eines der Lichtpünktchen aus, das beim Anlegen der Spannung steigt (im Mikroskop fällt!). Nach Öffnen des Schalters sinkt es wieder. Nun läßt man die Zeit stoppen, die das Partikelchen braucht, um bei angelegter Spannung einen bestimmten Weg zurückzulegen. Eine Wiederholung des Experimentes führt etwa zu dem gleichen Ergebnis. Danach bringt man für einige Sekunden den Betastrahler (^{85}Kr) in die unmittelbare Nähe der Kammer. Danach wird das Experiment wiederholt. Nach erneutem Annähern des Strahlers wird wiederum die Zeit, die die Partikel bei angelegter Spannung benötigt, um einen bestimmten Weg zurückzulegen, ermittelt.
Die Rauchpartikel, an denen sich im Munde Wasser kondensiert hat, haben durch Reibung z. T. positive bzw. negative Ladungen aufgenommen. Deshalb bewegen sie sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes. Ihre Geschwindigkeit hängt dabei u. a. von ihrer Ladung ab. Die Zeit, die sie für das Zurücklegen eines bestimmten Weges benötigen, ist ein Maß für ihre Geschwindigkeit und damit für ihre Ladung. Durch Annähern des radioaktiven Strahlers erreicht man in der Regel, daß sich an das Rauchpartikelchen weitere positive und negative Ionen anlagern. Das führt zu einer Änderung seiner Ladung und damit der Geschwindigkeit unter dem Einfluß des elektrischen Feldes.
Vergleicht man nun die in den Teilversuchen ermittelten Zeiten miteinander, so stehen sie etwa im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen zueinander. Da unter den gegebenen Bedingungen Geschwindigkeit und Ladung einander annähernd proportional sind, führen die experimentellen Untersuchungen zu dem Schluß, daß das Verändern der Ladung durch Aufnehmen bzw. Abgeben einer oder mehrerer kleinster Ladungen erfolgt.

Variante b: Wechselfeldmethode

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß Variante a. Der Eingang des Funkeninduktors wird mit den *Wechselspannungsbuchsen* des Stromversorgungsgerätes verbunden. Durch weites Einschrauben der Kontaktschraube setzt man den mechanischen Unterbrecher außer Funktion. Entsprechend Abbildung 3.3.2./3 wird der Funkeninduktor mit der Millikan-Kammer verbunden. Vorsicht! Jedes Berühren der Hochspannung führenden Teile muß unbedingt vermieden werden (vgl. Bem. 1 V 4.1.1.). Nach dem Einbringen von Rauch in die Kammer wird der Schlauch mit dem Quetschhahn verschlossen. Die Rauchpartikel sind im Mikroskop als helle Punkte zu sehen. Nach Einschalten des Funkeninduktors erscheinen sie als leuchtende Striche. Durch Erhöhen der Wechselspannung nimmt die Länge der Striche

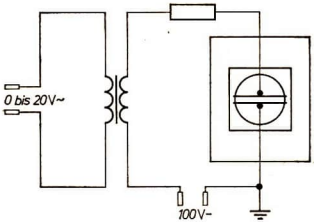


Abb. 3.3.2./3
Bestimmung der elektrischen Elementarladung mit der Wechselfeldmethode (Schaltplan)

zu. Nun stellt man die Gleichspannung am Stromversorgungsgerät so ein, daß einige der Striche ihre Lage nicht verändern. Nachfolgend wird der radioaktive Strahler in die unmittelbare Nähe des Millikan-Kondensators gebracht. Die Striche ändern wiederholt sprunghaft ihre Länge.
Durch Anlegen der Wechselspannung an den Millikan-Kondensator führen die geladenen Rauchpartikel im elektrischen Feld erzwungene Schwingungen aus und erscheinen daher als mehr oder weniger lange leuchtende Striche. Durch Überlagern der Gleichspannung läßt sich für einige Partikel die Schwerkraft durch die Kraft im elektrischen Feld weitgehend kompensieren. Bei jeder einzelnen Partikel wird die Amplitude der Schwingungen unter sonst unveränderten Bedingungen nur von seiner Ladung bestimmt. Die Amplitude wächst proportional seiner Ladung. Die Untersuchung der Strichlänge ermöglicht somit Angaben über den Ladungszustand der Rauchpartikel. Sprunghafte Änderungen der Strichlänge zeugen von sprunghaften Änderungen der Ladung. Bestimmt man aufeinanderfolgend die von einer Partikel herrührende Strichlänge mehrmals jeweils nach einer Umladung, so stehen die Längen im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen zueinander. Das belegt, daß bei jeder Umladung eine oder mehrere kleinste Ladungen aufgenommen bzw. abgegeben worden sind.

Bemerkung

Eine objektive Beobachtung des Versuchsablaufes wird mit Hilfe einer Fernsehaufnahmekamera möglich. Hierfür eignet sich besonders das unter Variante b angegebene Verfahren. Ohne Messungen durchführen zu müssen, zeigt es besonders anschaulich den quantenhaften Charakter der elektrischen Ladung.

3.3.3. Bestimmung der elektrischen Elementarladung nach Millikan

1. Millikan-Kammer Ⓢ (siehe V 3.3.2.)
2. große Optikleuchte (12 V; 50 W)
3. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
4. optische Bank (50 cm)
5. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
6. Prismentisch
7. Glasküvette (10 cm × 5 cm × 2 cm)
8. 4 Klemmreiter
9. Mikroskop mit Okularmikrometer, 100-fache Vergrößerung
10. Stromversorgungsgerät (100 V —)
11. Schalter
12. Widerstand (10 kΩ)
13. Stoppuhr
14. Demonstrationsspannungsmesser (100 V —)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch stellt ein anspruchsvolles Experiment für Praktikum und Arbeitsgemeinschaften dar (vgl. MH Nr.4 V 3.2.1.).
2. Vergleiche MB 3.0.3.!

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß V 3.3.2., Variante a. In die Millikan-Kammer wird etwas Tabakrauch gebracht. Nach Einschalten des Stromversorgungsgerätes wird der Schalter geöffnet und dadurch eine Gleichspannung von etwa 100 V an die Kondensatorplatten gelegt. Nun wählt man eine Partikel aus, die nach Anlegen der Spannung steigt (im Mikroskop fällt). Man legt im Okularmikrometer eine Strecke fest und mißt mehrmals die Zeit, die diese Partikel braucht, um die Meßstrecke nach oben zurückzulegen. Zwischendurch bestimmt man jeweils die Fallzeit der Partikel im elektrisch feldfreien Raum. Aus diesen Messungen werden Mittelwerte für die Sinkgeschwindigkeit v_0 und die Steiggeschwindigkeit v_1 berechnet. Nachfolgend werden entsprechende Messungen an anderen Teilchen vorgenommen. Die Berechnung der Tröpfchenladung erfolgt nach der Gleichung

$$Q = 9\pi \cdot \frac{d}{U} \cdot \sqrt{\frac{2\eta^3 \cdot v_0}{\varrho \cdot g}} \cdot (v_0 + v_1) .$$

Dabei sind

Q die Ladung des Tröpfchens,
d der Abstand der Kondensatorplatten,
U die Spannung am Kondensator,
η die Zähigkeit der Luft,
ϱ die Dichte des Wassers,
g die Fallbeschleunigung,
v_0 die Sinkgeschwindigkeit,
v_1 die Steiggeschwindigkeit im elektrischen Feld.

Bestimmt man für mehrere Tröpfchen die Ladung, so stellt man fest, daß sich die Ladungen wie kleine ganze Zahlen zueinander verhalten. Es zeigt sich, daß sie Vielfache der Elementarladung sind.

Bemerkungen

1. Im Experiment kann anstelle von Tabakrauch auch versprühtes Öl benutzt werden. Bei der Auswertung ist dann für ϱ die Dichte des Öls einzusetzen.
2. Unter Einsatz einer Fernsehaufnahmekamera ist es möglich, den Schülern die Partikelbewegung zu demonstrieren und die Messungen gemeinsam mit ihnen vorzunehmen.
3. Infolge der geringen Sinkgeschwindigkeit der Partikel ist das Verfahren relativ zeitaufwendig. Außerdem macht sich dabei die Brownsche Bewegung störend bemerkbar. Das kann dadurch umgangen werden, daß man die Spannung an den Kondensatorplatten umpolt. Man erhält dadurch einmal die Geschwindigkeit, die auftritt, wenn elektrische Kraft und Schwerkraft mit entgegengesetztem Richtungssinn wirken und einmal die Geschwindigkeit, die auftritt, wenn elektrische Kraft und Schwerkraft mit gleichem Richtungssinn wirken. Die Berechnung der Tröpfchenladung erfolgt dann nach der Gleichung:

$$Q = \frac{9}{2}\pi \cdot \frac{d}{U} \cdot \sqrt{\frac{\eta^2(v_1 - v_2)}{\varrho \cdot g}} \cdot (v_1 + v_2) .$$

Dabei sind v_1 die Sinkgeschwindigkeit und v_2 die Steiggeschwindigkeit im elektrischen Feld.

4. Auch das im V 3.3.2., Variante b, beschriebene Wechselfeldverfahren kann zur Bestimmung der Elementarladung benutzt werden. Zur Berechnung der Tröpfchenladung dient die Gleichung

$$Q = 9\pi \cdot \omega \cdot s \cdot \frac{d}{U} \sqrt{\frac{\eta^3 \cdot v_0}{\varrho \cdot g}},$$

wobei ω die Kreisfrequenz der Wechselspannung, s die Amplitude der Schwingung, v_0 die Sinkgeschwindigkeit und U der Effektivwert der Wechselspannung ist.

3.3.4. Bestimmung der Faradayschen Konstanten mit dem Hofmannschen Wasserzersetzungsgerät [SE]

1. Wasserzersetzungsgerät nach Hofmann
2. Stromversorgungsgerät (20 V —; 0,5 A)
3. Demonstrationsstrommesser (0,5 A —)
4. Gleitwiderstand (10 Ω; 0,5 A)
5. Schwefelsäure (20%ig)
6. Stoppuhr

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß Abbildung 3.3.4./1. Nach dem Füllen des Wasserzersetzungsgerätes mit Schwefelsäure wird durch Variieren der Spannung und des Widerstandes eine Stromstärke von 0,3 A eingestellt. Nach einigen Minuten wird das Stromversorgungsgerät wieder ausgeschaltet. Sind alle Gasblasen zur Flüssigkeitsoberfläche gestiegen, so läßt man das entstandene Gas durch vorsichtiges Öffnen der Hähne ausströmen. Nun schließt man den Stromkreis erneut und betätigt gleichzeitig die Stoppuhr. Auftretenden Schwankungen der Stromstärke kann durch Verstellen des Gleitwiderstandes entgegengewirkt werden. Hat sich eine genügend große Wasserstoffmenge entwickelt (etwa 20 cm³), so wird der Versuch beendet. Die Elektrolysezeit und das genaue Volumen des abgeschiedenen Wasserstoffs werden ermittelt.

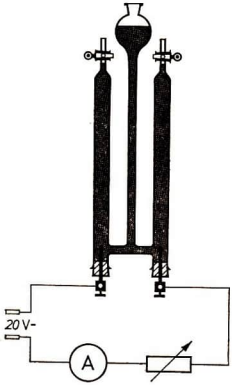


Abb. 3.3.4./1
Bestimmung der Faradayschen Konstanten mit dem Hofmannschen Wasserzersetzungsgerät (Schaltplan)

Auswertung

Die Faradaysche Konstante errechnet sich aus der Gleichung

$$F = \frac{I \cdot t}{n_{\bar{A}}}. \qquad (1)$$

Dabei ist I die mittlere Stromstärke während der Elektrolyse, t die Zeit und $n_{\bar{A}}$

die Äquivalentmenge des abgeschiedenen Stoffes. Für die Äquivalentmenge gilt

$$n_{\ddot{A}} = z \cdot n\,, \tag{2}$$

wobei z die wirksame Wertigkeit und n die Stoffmenge des abgeschiedenen Stoffes ist. Zwischen molarem Volumen V_m und dem Volumen V eines Stoffes bestehen die Beziehungen

$$V_m = \frac{V}{n}$$

$$n = \frac{V}{V_m}. \tag{3}$$

Aus (1) und (2) folgt $$F = \frac{I \cdot t}{z \cdot n}.$$

Unter Berücksichtigung von (3) ergibt sich $$F = \frac{I \cdot t \cdot V_m}{z \cdot V}.$$

Beispiel

Mittlere Stromstärke $I = 0{,}3$ A
Elektrolysezeit $t = 10$ min
Volumen des Wasserstoffs $V = 21$ ml
molares Normvolumen des idealen Gases $V_m = 22400$ ml mol^{-1} (Tabellenwert)
wirksame Wertigkeit von molekularem Wasserstoff $z = 2$

$$F = \frac{I \cdot t \cdot V_m}{z \cdot V}$$

$$F = \frac{0{,}3\ \text{A} \cdot 600\ \text{s} \cdot 22400\ \text{ml mol}^{-1}}{2 \cdot 21\ \text{ml}}$$

$$\underline{F = 96000\ \text{A s mol}^{-1}}$$

Bemerkungen

1. Zum Zwecke der Vereinfachung der Versuchsdurchführung und -auswertung wurde das abgelesene Wasserstoffvolumen nicht auf den Normalzustand reduziert. Das Ergebnis ist dadurch mit einem Fehler von einigen Prozent behaftet. Der größte Fehler wird dadurch bedingt, daß infolge der Zimmertemperatur das Gasvolumen als zu groß ermittelt wird. Dem wirkt aber der erhöhte Druck im Glasrohr entgegen (bedingt durch den Säurestand im mittleren Steigrohr), wodurch ein Teil des Fehlers kompensiert wird. Die fehlende Berücksichtigung des jeweiligen Luftdruckes beeinflußt das Ergebnis nur geringfügig.
2. Für das Experiment ist am besten ein Wasserzersetzungsgerät mit Platinelektroden geeignet. Das mehrminütige Betreiben des Gerätes vor der Messung garantiert jedoch auch bei Kohleelektroden gute Ergebnisse.
3. Auch die elektrolytische Abscheidung von Metallen kann zur Bestimmung der Faradayschen Konstanten herangezogen werden. Die Vorzüge des hier verwendeten Verfahrens liegen vor allem in der volumetrischen Messung der Wasserstoffmenge, die ebenso wie die Bestimmung von Zeit und Stromstärke im Demonstrationsversuch leicht möglich ist.
4. Beim Einsatz als Schülerexperiment müssen unbedingt die Arbeitsschutzrichtlinien für den Umgang mit Säuren beachtet werden. Nach Möglichkeit sollte der Lehrer das Experiment so weit vorbereiten, daß ein unmittelbarer Kontakt der Schüler mit der Säure von vornherein weitestgehend ausgeschlossen ist.

4. Atombau und Spektren

4.0. Methodische Bemerkungen

4.0.0. Spektroskopische Untersuchungen ermöglichen vielfältige wissenschaftliche Aussagen und finden in weiten Bereichen der Forschung und Produktion Anwendung. Die unterrichtliche Behandlung der Spektren darf deshalb nicht bei der bloßen Vermittlung der experimentellen Ergebnisse stehenbleiben. Die Schüler müssen auch einen Einblick in die große Bedeutung spektroskopischer Verfahren gewinnen. Folgende Aussagen sollten dabei im Vordergrund stehen:

— Spektroskopische Untersuchungen geben umfassende Auskunft über den Bau der Atome. Der größte Teil unserer Kenntnisse vom Aufbau der Atomhülle und wichtige Einsichten über die Struktur der Moleküle sind mittels spektroskopischer Untersuchungen gewonnen worden. Im Bereich der Atomhülle führt die Spektrometrie durch die Bestimmung der Wellenlänge des Lichts zu wichtigen Erkenntnissen über die Energie absorbierter bzw. emittierter Lichtquanten. Dabei wird die grundlegende Beziehung $E = h \cdot f$ bzw. $E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ angewendet. Man erhält so Aufschlüsse über die Energieniveauschemata von Atomen. Damit bestehen enge Beziehungen zu spektroskopischen Untersuchungen der Energie der Kernstrahlung, die gleichfalls zur Annahme bestimmter Energieniveaus bzw. Anregungsstufen der Atomkerne führen (vgl. hierzu die Abschnitte 7.5., 7.6. und 7.7.).
— Die Spektren sind Grundlage vieler Verfahren zur qualitativen und quantitativen Analyse mit oft kleinsten Stoffmengen.
— Die spektroskopischen Verfahren sind beispielgebend für Messungen mit sehr großer Genauigkeit.
— Die Spektren ermöglichen Aussagen über die chemische Zusammensetzung fernster Gestirne, Teile des kosmischen Raumes, der Sonnenkorona und der obersten Erdatmosphäre sowie der physikalischen Bedingungen in diesen Bereichen (Druck, Temperatur usw.).

Von der großen Anzahl der möglichen Experimente werden in den Abschnitten 4.1. und 4.2. solche beschrieben, die die gleichzeitige Beobachtung durch alle Schüler ermöglichen.
Für Praktikumsversuche und Arbeitsgemeinschaften kommt dem Schulspektralapparat eine besondere Bedeutung zu. Neben den Möglichkeiten der qualitativen Untersuchung der Emissions- und Absorptionsspektren vermittelt er einen unmittelbaren Eindruck von der spektroskopischen Arbeitsweise. Seine Bedeutung

für den Demonstrationsunterricht wird erst durch den Einsatz von Fernsehkameras wirksam.
Zur Demonstration und Untersuchung der Balmerlinien des Wasserstoffs und der Linienspektren der Edelgase eignen sich die Spektralröhren. Infolge ihrer geringen Leuchtdichte sind jedoch besondere Maßnahmen notwendig, um sie einem größeren Beobachterkreis zugänglich zu machen (vgl. Abschnitt 4.1.). Die Linienspektren von Metalldämpfen lassen sich mit Spektrallampen oder mittels des elektrischen Lichtbogens demonstrieren. Die Verwendung von Spektrallampen ist experimentell wenig aufwendig. Allerdings erfordert das für jeden Stoff die Anschaffung einer Spektrallampe mit zugehöriger Vorschaltdrossel. Außerdem besitzen nur wenige Spektrallampen die für die Demonstration der Spektren erforderliche Leuchtdichte.
Der Einsatz des Lichtbogens ist experimentell etwas komplizierter, es lassen sich aber kurzzeitig nacheinander die Spektren vieler Metallsalze demonstrieren.
Beim Zusammenstellen der Versuchsanordnungen sollte der Lehrer folgendes beachten:

— Eine optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Lichts ist durch breite Spalte möglich. Das führt jedoch dazu, daß dicht beieinanderliegende Linien nicht mehr voneinander getrennt werden. Die Schüler müssen ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß die dadurch verursachte große Breite der Spektrallinien nicht ihre sogenannte „natürliche Linienbreite" charakterisiert.
— Je geringer man die Spaltbreite wählt, desto stärker machen sich die Fehler der Abbildungslinse bemerkbar. Sie sollte in diesen Fällen durch das Objektiv z. B. eines Diaprojektors ersetzt werden.
— Für die Schüler sind sowohl der Versuchsaufbau als auch das Spektrum von Bedeutung. Bei der Verwendung eines Geradsichtprismas empfiehlt es sich deshalb, hinter dieses einen guten Spiegel in den Strahlengang zu bringen, der die Richtung des Lichts um 90 Grad ändert. Dadurch können die Schüler die optische Bank von der Seite sehen und außerdem beim Betrachten des transparenten Schirmes dem ankommenden Licht entgegenblicken.

Die Molekülspektren konnten trotz ihrer wachsenden Bedeutung in diesem Buch nur beschränkte Berücksichtigung finden. Neben der Tatsache, daß ihnen im Unterricht zunächst nur wenig Raum zugemessen ist, sind es vor allem ihre geringe Leuchtdichte, ihr Auftreten in z. T. schwer zugänglichen Spektralbereichen und ihre komplizierte Struktur, die den Herausgeber bewogen haben, auf die Beschreibung von Experimenten zu den Molekülspektren zu verzichten. Der Franck-Hertz-Versuch belegt die auf Grund der Linienspektren naheliegende Annahme, daß die Atome das Licht in Quanten emittieren. Er zeigt den Schülern, daß die Elektronen ihre Energie nur in bestimmten Portionen an die Atome übertragen können und daß diese dann die Energie in Form von Licht bestimmter Frequenz wieder abgeben. Von besonderer Wichtigkeit ist, daß unterschiedliche Meßverfahren — einerseits Bestimmung von Wellenlängen, andererseits Bestimmung der kinetischen Energie von Elektronen bei unelastischen Stößen mit Atomen — übereinstimmend die Existenz diskreter Energiestufen der Atomhülle belegen.

4.0.1. Im Abschnitt 4.1. wird die Demonstration von Linienspektren unter Verwendung von Spektralröhren beschrieben. Der besondere methodische Wert dieser Anordnungen besteht in der Möglichkeit, den Schülern die Balmerlinien des Wasserstoffspektrums demonstrieren zu können.

Zur spektralen Zerlegung sind sowohl das Geradsichtprisma als auch das Schulgitter geeignet. Die Verwendung des Geradsichtprismas führt jedoch zu lichtstärkeren Spektren. Der Vorteil des Schulgitters besteht darin, daß im Gegensatz zum Geradsichtprisma die Ablenkung des Lichts annähernd proportional zur Wellenlänge erfolgt. Das führt zu einer stärkeren Dehnung des roten und orangefarbenen Bereichs.

4.0.2. Die im Abschnitt 4.2. beschriebene Verwendung der Quecksilberspektrallampe und des Lichtbogens führt zu lichtstarken Linienspektren, die hervorragend für die Demonstration im Unterricht geeignet sind. Anstelle der Quecksilberspektrallampe hat der Autor mit gutem Erfolg den Heimstrahler UV de Luxe vom VEB NARVA, Berlin, eingesetzt. Zu diesem Zweck entfernt man den Glaskolben (vgl. V 4.2.3.). Dadurch wird die eingebaute Glühwendel unwirksam. Man ersetzt sie durch einen Gleitwiderstand von 150 Ω, der mit der Quecksilberentladungslampe in Reihe geschaltet wird. Durch Verschieben des Abgriffes stellt man die ursprüngliche Betriebsstromstärke wieder her (beim 300-W-Strahler 1,45 A). Infolge der höheren Leistung tritt gegenüber der Quecksilberspektrallampe ein helleres Spektrum auf.

4.0.3. Im Abschnitt 4.3. werden Möglichkeiten zur Durchführung des Franck-Hertz-Versuches unter Verwendung eines edelgasgefüllten Thyratrons beschrieben. Es besitzt gegenüber den mit Quecksilberdampf gefüllten Röhren den Vorzug, daß bei Zimmertemperatur gearbeitet werden kann. Die Nachteile bestehen darin, daß das erste Maximum erst bei einer viel höheren Spannung auftritt und daß weitere äquidistante Maxima nicht in jedem Falle nachgewiesen werden können. Gerade die Spannungsdifferenz zweier Maxima ermöglicht aber erst genaue Messungen, da die Lage des ersten Maximums von Kontaktpotentialen innerhalb des Rohres und einer rein thermisch bedingten Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen verfälscht ist.

Hochspannung

4.1. Linienspektren des Wasserstoffs und der Edelgase

4.1.1. Objektive Demonstration der Linienspektren des Wasserstoffs und der Edelgase

Zu Variante a

1. Spaltblende Ⓢ,
   dazu erforderliches Material:
   a) dicke Pappe (15 cm × 20 cm)
   b) 2 Rasierklingen
   c) Klebeband
2. Lichtschutz Ⓢ,
   dazu erforderliches Material:
   dünnes Blech (20 cm × 20 cm)
3. 2 Stromversorgungsgeräte (20 V ~; 4 A)
4. Funkeninduktor (120 mm Schlagweite)
5. Gleitwiderstand (12 Ω; 8 A)
6. 2 Isolatoren
7. Spektralröhren
   (Helium, Neon, Wasserstoff)
8. optische Bank (100 cm)
9. großer transparenter Bildschirm
   mit Fuß
10. Linse ($f = +150$ mm)
11. 3 Klemmreiter
12. Strommesser (50 mA ~)
13. Geradsichtprisma
    mit Abblendrahmen

Zu Variante b

Geräte 1. bis 13., außerdem

14. Schulgitter mit Klemmreiter

Methodische Hinweise

1. Neben der Möglichkeit einer subjektiven Beobachtung der Linienspektren der Gase ist bei Überlastung der Spektralröhren auch eine objektive Demonstration der Spektren möglich.
2. Vergleiche MB 4.0.0. und 4.0.1.!

Variante a

Die Spektralröhre wird vertikal zwischen zwei Isolatoren befestigt. Als Lichtschutz wird das Metallblech zu einem Rohr von einigen Zentimetern Durchmesser um die Spektralröhre herumgebogen. Die Röhre soll sich unmittelbar hinter dem verbleibenden Schlitz befinden (Abb. 4.1.1./1). Aus der Pappe und den Rasierklingen

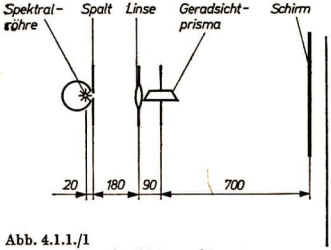


Abb. 4.1.1./1
Demonstration des Linienspektrums von Wasserstoff

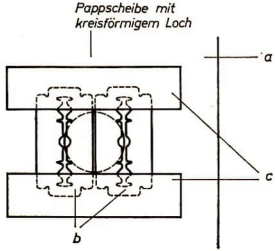


Abb. 4.1.1./2 Selbsthergestellter Spalt

wird nach Abbildung 4.1.1./2 ein Spalt von einigen zehntel Millimetern Breite hergestellt, vor den Schlitz in der Abschirmung gebracht und mittels der Linse auf dem Schirm scharf abgebildet. Nachfolgend bringt man das Geradsichtprisma in den Strahlengang (Abb. 4.1.1./1). Die Beobachtung der Spektren erfolgt auf der Rückseite des Schirms, so daß die Schüler dem ankommenden Licht entgegenblicken. Als Spannungsquelle findet der Funkeninduktor Verwendung. Vorsicht! Jedes Berühren der Hochspannung führenden Teile muß unbedingt vermieden werden! Der Eingang des Funkeninduktors wird über den Gleitwiderstand mit den *Wechselspannungsbuchsen* des Stromversorgungsgerätes verbunden. Der mechanische Unterbrecher wird kurzgeschlossen. Das geschieht durch weites Einschrauben der Kontaktschraube. Ein Anschluß des Strommessers im Sekundärkreis ist zu erden. Die erforderliche Stromstärke wird am Gleitwiderstand im Primärstromkreis eingestellt. Zunächst benutzt man eine mit Helium gefüllte Spektralröhre. Zur Betrachtung des Spektrums wird die Sekundärstromstärke für die Dauer von 20 s von 10 mA auf 50 mA gesteigert. Auf dem Schirm erscheint

ein Spektrum, das aus wenigen farbigen Linien besteht. Danach wird die Spektralröhre gegen eine mit Neon und nachfolgend gegen eine mit Wasserstoff gefüllte ausgetauscht.
Je nach der Art des Gases erscheinen Linien unterschiedlicher Anzahl, Farbe und Intensität.

Variante b

Der Versuchsaufbau erfolgt wie bei Variante a. Anstelle des Geradsichtprismas wird am Ende der optischen Bank das Schulgitter aufgestellt. Da es ein sägezahnförmiges Profil besitzt, ermittelt man zunächst, ob die lichtstärkeren Spektren rechts oder links vom Spektrum 0. Ordnung auftreten. Den Schirm bringt man auf die Seite der lichtstärkeren Spektren, so daß das Licht etwa rechtwinklig vom Gitter abgelenkt werden muß, um ihn zu erreichen. Jetzt wird das Gitter so lange um seine vertikale Achse gedreht, bis auf dem Schirm das Spektrum erster Ordnung zu beobachten ist. Während der Beobachtung durch die Schüler kann die Stromstärke für eine Dauer von 20 s von 10 mA auf 50 mA gesteigert werden. Zuerst wird das Linienspektrum des Heliums, nachfolgend werden die Linienspektren von Neon und Wasserstoff demonstriert.
Die Spektren verschiedener Gase unterscheiden sich bezüglich Anzahl, Farbe und Intensität der Linien.

Bemerkungen

1. Das Betreiben des Funkeninduktors mit Wechselspannung bedingt wesentlich geringere Sekundärspannungen als beim Anschluß an eine Gleichspannungsquelle. Gegenüber dem Gleichspannungsbetrieb liegen aber die maximalen Sekundärstromstärken mehr als eine Größenordnung höher. Das ermöglicht die Überlastung der Spektralröhren, vergrößert aber gleichzeitig die Gefahrenmomente.
2. Für längere Beobachtungszeiten ist eine Kühlung der Spektralröhre z. B. durch einen Ventilator erforderlich.
3. Die Helligkeit des Spektrums läßt sich durch weitere Erhöhung der Stromstärken bis auf 100 mA noch steigern. Dabei muß jedoch eine intensive Luftkühlung der Röhre erfolgen.
4. Eine weitere Erhöhung der Helligkeit des Spektrums läßt sich durch folgende Maßnahmen erreichen:
   a) In der Abschirmung ordnet man dicht hintereinander zwei Spektralröhren an. Sie werden in Reihe geschaltet.
   b) Die Rückseite der Spektralröhre wird mit Aluminiumfolie beklebt.
   c) Man bringt hinter dem Geradsichtprisma eine Zylinderlinse von etwa +250 mm Brennweite an, die das aus dem Prisma austretende Licht in der Vertikalen sammelt.
5. Bei gleicher Stromstärke sendet die mit Neon gefüllte Spektralröhre das meiste sichtbare Licht aus, ihr folgen die mit Helium, Wasserstoff und Argon gefüllten Röhren.

Hochspannung

4.1.2. Untersuchung des Wasserstoffspektrums

Zu Variante a

1. Spaltblende Ⓢ (siehe V 4.1.1.)
2. Lichtschutz Ⓢ (siehe V 4.1.1.)
3. 2 Stromversorgungsgeräte (20 V ~; 4 A)
4. Funkeninduktor (120 mm Schlagweite)
5. Gleitwiderstand (12 Ω; 8 A)
6. 2 Isolatoren
7. Spektralröhre mit Wasserstoff
8. optische Bank (100 cm)

9. großer Bildschirm
   aus transparentem Millimeterpapier
10. Linse ($f = +150$ mm)
11. 3 Klemmreiter
12. Strommesser (50 mA ~)
13. Meßstab (1 m)
14. Geradsichtprisma mit Abblendrahmen
15. Filtersatz (Metallinterferenzfilter)
16. große Optikleuchte (12 V; 50 W)
17. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 13., außerdem

18. Schulgitter

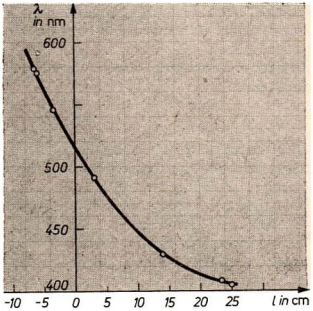


Abb. 4.1.2./1
Eichkurve eines Geradsichtprismas bei einem Abstand Prisma-Schirm von 150 cm
λ – Wellenlänge
l – Abstand der jeweiligen Linie vom Spaltbild

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 4.0.0. und 4.0.1.!
2. Vergleiche MH Nr. 1 V 4.1.1.!

Variante a

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß V 4.1.1., Variante a, mit der mit Wasserstoff gefüllten Spektralröhre. Nach einer sorgfältigen Justierung bei einer Sekundärstromstärke von 10 mA steigert man sie jeweils für einige Sekunden auf 50 mA und markiert nacheinander die Lage der einzelnen Linien auf dem Schirm. Die gelegentlich infolge der Überlastung der Spektralröhre auftretende gelbe Linie bleibt dabei unberücksichtigt. Sie wird durch das im Glas enthaltene Natrium verursacht.
Zur Eichung des Geradsichtprismas tauscht man die Spektralröhre bei völlig unverändertem Versuchsaufbau gegen die Optikleuchte mit Kondensor aus. Nun bringt man nacheinander die einzelnen Filter in den Strahlengang und markiert auf dem Bildschirm die Auftreffstellen des Lichts. Mittels der aus den Meßwerten gewonnenen Kurve (Abb. 4.1.2./1) ist es möglich, aus der Lage der Linien des Wasserstoffspektrums auf dem Bildschirm ihre Wellenlängen zu bestimmen.

Variante b

Die Versuchsanordnung wird wie in V 4.1.1., Variante b, zusammengestellt. Der Schirm befindet sich dicht über dem Versuchsaufbau in der Nähe des Spaltes (Abb. 4.1.2./2). Das Schulgitter wird so gedreht, daß in seiner Mitte das Spektrum 0. Ordnung auftritt. Danach mißt man den Abstand s jeder Linie vom Spektrum 0. Ordnung sowie den Abstand b der einzelnen Linien von der Mitte des Gitters. Die Wellenlänge λ erhält man dann in Näherung aus der Gleichung

$$\lambda = \frac{a \cdot s}{b},$$

wobei a die Gitterkonstante ist.

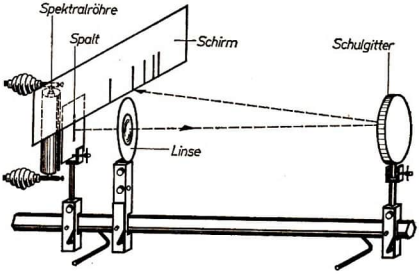


Abb. 4.1.2./2
Bestimmung der Wellenlänge von Spektrallinien mit dem Reflexionsgitter

Ermittlung der Wellenlängen des Wasserstofflichts

Gitterkonstante $a = 0{,}00154$ mm

Abstand s in cm	Abstand b in cm	Farbe	Wellenlänge in nm
12,0	45,1	violett	410
13,0	45,3	violett	442
14,4	45,8	blau	484
19,5	47,4	rot	635

Auswertung

Für die Balmer-Serie gilt die Gleichung

$$\frac{1}{\lambda} = \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad n = 3, 4, 5, \ldots ,$$

wobei R die Rydbergkonstante ist ($R = 1{,}097 \cdot 10^5\ \mathrm{cm}^{-1}$). Die aus dieser Gleichung ermittelten Wellenlängen ($H_\alpha = 656$ nm, $H_\beta = 486$ nm, $H_\lambda = 434$ nm, $H_\varrho = 410$ nm) werden mit den gemessenen verglichen. Es zeigt sich annähernd Übereinstimmung.
Damit ist der Nachweis erbracht, daß die Linien im Spektrum gesetzmäßig angeordnet sind.

Netz-spannung

4.2. Linienspektren von Metalldämpfen

UV Licht

4.2.1. Demonstration der Linienspektren von Metalldämpfen mit dem Lichtbogen

1. Plasmaquelle Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Kupferrohr (4,5 cm ∅; 32 cm lang)
   b) 2 Kupferrohrstücke (4,5 cm ∅ und 4,8 cm ∅; 7 cm und 5 cm lang)

c) 2 Kupferrohrstücke (0,6 cm Innendurchmesser; 5 cm lang)
d) 4 Kupferbleche (15 cm × 15 cm × 0,1 cm mit 4,5 cm Bohrung)
e) 2 Plastrohre (0,6 cm Innendurchmesser; 10 cm lang)
f) 2 Schaumbetonzylinder (in das Kupferrohr passend; 3 cm lang)
g) Linse ($f = +50$ mm; 4,5 cm ∅)
h) Silikonkautschuk
i) Bogenlampen-Dochtkohlen (6 mm ∅)

2. Schaltbrett ⑧, dazu erforderliches Material:
   a) Dreifachsteckdose
   b) 2 Meßbuchsen
   c) Plastplatte
   d) isolierter Kupferdraht (1,5 mm ∅; 50 cm lang)
3. optische Bank (100 cm)
4. Spaltblende
5. Linse ($f = +150$ mm)
6. Geradsichtprisma mit Abblendrahmen
7. 3 Klemmreiter
8. großer Bildschirm oder Projektionsleinwand
9. Barium-, Strontium-, Lithium- und Kaliumsalz (je 2 g)
10. 2 Tauchsieder (220 V; 1000 W)
11. Becherglas (2 l) mit Wasser
12. kleiner Luftstromerzeuger
13. Spannungsprüfer

Methodische Hinweise

1. Die herkömmlichen Bogenlampen sind in der Regel nicht zur Erzeugung von Linienspektren geeignet. Infolge der glühenden Kohlen entsteht bei ihrer Verwendung ein kontinuierliches Spektrum, dem das Linienspektrum des jeweiligen Metallsalzes überlagert ist. Die beschriebene Plasmaquelle ermöglicht es dagegen, daß nur das Licht des Lichtbogens durch das Geradsichtprisma auf den Bildschirm gelangt. Es entsteht dadurch ein reines Linienspektrum.
2. Infolge der großen Leistungsaufnahme der Plasmaquelle und der starken Färbung des Lichtbogens durch die verwendeten Salze, übertrifft dieses Linienspektrum sogar das mit der Quecksilberspektrallampe erzeugte an Intensität. Die vom Spektrum bedeckte Fläche kann bereits bei Betrachtung in Aufsicht zu 50 cm × 100 cm gewählt werden.
3. Die Plasmaquelle ist so dimensioniert, daß die Beobachtung des Spektrums beliebig lange erfolgen kann. Weil der Lichtbogen in einem weitgehend abgeschlossenen Gasraum brennt, tritt nur ein sehr geringer Abbrand der Kohlen auf (etwa 0,2 mm min^{-1}).
4. Das ständige Verdampfen des Metallsalzes führt nach einigen Minuten zu einer Abnahme der Intensität der Spektrallinien. Sie zeigt den Schülern, daß Linienspektren nicht nur Aussagen über die Art der Stoffe, sondern auch bezüglich ihrer Konzentration gestatten.
5. Vergleiche MB 4.0.0., 4.0.1. und 4.0.2.!

Herstellen der Plasmaquelle

Das Kupferrohr (a) wird in seiner Mitte mit einer Bohrung von 2 cm Durchmesser versehen. An diese Stelle wird das gleichdicke Rohr von 7 cm Länge angelötet, so daß es etwa 4,5 cm vorsteht. Über dieses soll ein weiteres, gut passendes Rohr geschoben werden, an dessen Ende die Linse mit Silikonkautschuk befestigt wird. Die beiden Schaumbetonzylinder werden koaxial durchbohrt, so daß die beiden dünnen Kupferrohrstücke hineinpassen. Gemäß Abb. 4.2.1./1 wird in jeden Zy-

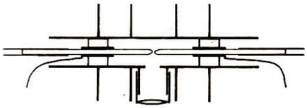


Abb. 4.2.1./1
Schnitt durch die Plasmaquelle

Abb. 4.2.1./2
Selbsthergestellte Plasmaquelle

linder ein Kupferrohr so mit Silikonkautschuk eingeklebt, daß die Rohre auf beiden Seiten je 1 cm herausragen. An jedes Kupferrohr lötet man ein isoliertes Kabel an, das der Stromzuführung zu den Kohlen dient. Danach wird von jeder Seite ein Zylinder in das Innere des langen Kupferrohres geschoben. Der gegenseitige Abstand soll 14 cm betragen. In dieser Lage klebt man die Zylinder mit etwas Silikonkautschuk ein und dichtet die Fugen ab. Auf die hinteren Teile der Bogenkohlen steckt man die Plastrohre und schiebt die Kohlen in die dünnen Kupferrohre, so daß sie sich in der Mitte der Plasmaquelle berühren. Die Plastrohre müssen jetzt so auf den Kohlen sitzen, daß eine zufällige Berührung der spannungsführenden Kohlen ausgeschlossen ist.
Zur Vergrößerung der Kühlfläche lötet man die Kupferbleche auf der Oberfläche der Plasmaquelle an (Abb. 4.2.1./2).

Versuch

Die Plasmaquelle wird an einem Ende der optischen Bank an einem gut geerdeten Stativ befestigt. Der weitere Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 4.2.1./3. Die in der Bogenlampenkohle bereits vorhandenen Salze werden im vorderen Teil mittels eines Metallbohrers von 2,5 mm Durchmesser herausgebohrt. Danach füllt man die Bohrungen mit pulverisiertem Bariumsalz und stopft es fest. Außerdem werden die Außenseiten der Kohlespitzen mit Metallsalz berieben. Die Kohlen werden in die Plasmaquelle eingeführt, so daß sie sich in ihrer Mitte berühren. Man verbindet die Plasmaquelle über zwei zueinander parallel geschaltete Tauchsieder mit dem 220 V Wechselspannungsnetz. Dazu verwendet man zweckmäßigerweise das Schaltbrett (Abb. 4.2.1./4). Die beiden Meßbuchsen sind mittels des Kupferdrahtes mit der Dreifachsteckdose verbunden. In zwei der Buchsenpaare werden die Stecker der Tauchsieder eingeführt, die beiden Meßbuchsen werden mit der Plasmaquelle bzw. dem Wechselspannungsnetz verbunden. Ist eine der beiden Leitungen des Netzes geerdet, so ist darauf zu achten, daß sich die Tauchsieder in der Phasenleitung befinden, während der Nulleiter direkt zur Plasmaquelle führt (Überprüfen mit dem Spannungsprüfer).

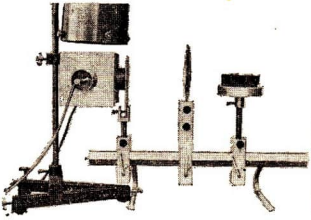


Abb. 4.2.1./3 Demonstration der Linienspektren von Metalldämpfen

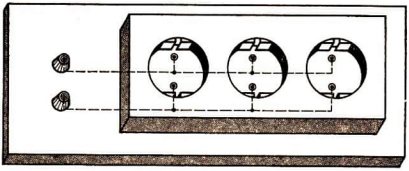


Abb. 4.2.1./4 Selbsthergestelltes Schaltbrett für die Plasmaquelle

Nach dem Zünden des Lichtbogens führt man beide Kohlen um einige Millimeter zurück und schaltet den Luftstromerzeuger ein. Den gut ausgeleuchteten Spalt bildet man mit der Abbildungslinse auf dem Bildschirm scharf ab. Danach wird das Geradsichtprisma einige Zentimeter hinter der Linse an eine Stelle gebracht, wo die beiden unscharfen Teilbilder des Spaltes, die von den glühenden Kohlen herrühren, rechts und links am Rande des Geradsichtprismas liegen. Auf dem Schirm erscheint ein Linienspektrum. Es ist sehr lichtstark und besteht aus einer Vielzahl von Linien.
Nun werden die Kohlen gegen solche ausgetauscht, die mit Strontiumsalz präpariert sind. Das ebenfalls sehr lichtstarke Spektrum besteht aus wesentlich weniger Linien. Als drittes Metallsalz wird ein Lithium- oder Kaliumsalz gewählt.
Die Metalle senden im gasförmigen Aggregatzustand Linienspektren aus. Diese unterscheiden sich bezüglich Anzahl und Farbe (Wellenlänge) der Linien.

Bemerkungen

1. Statt der Salze können auch Metallstäbe in die Kohlen eingeführt werden. Ein gutes Linienspektrum entsteht z. B. bei der Verwendung dicker Kupferdrähte.
2. Eine weitere Steigerung der Lichtstärke kann durch Vergrößern der Stromstärke erreicht werden. Dazu wird im einfachsten Falle ein weiterer Tauchsieder zu den beiden anderen parallelgeschaltet.
3. Um eine zu starke Erwärmung der Plasmaquelle zu vermeiden, bleibt der Luftstromerzeuger während der gesamten Versuchsdurchführung eingeschaltet. Dabei genügt eine geringe Luftgeschwindigkeit. Nur bei Beobachtungszeiten, die über einige Minuten hinausgehen, sollte sie groß gewählt werden.
4. Die Herstellung der beschriebenen Plasmaquelle läßt sich noch vereinfachen. Im einfachsten Falle genügt ein Metallrohr von mindestens 30 cm Länge und 3 cm Durchmesser, das in seiner Mitte eine Bohrung von 1 cm Durchmesser trägt. Es müssen lediglich zwei Schaumbetonzylinder, deren Durchmesser dem Innendurchmesser des Rohres entspricht, hergestellt werden. In die koaxiale Bohrung werden die Kohlen direkt eingeführt. Die Spannungszuführung erfolgt über 2 Drähte, die um das hintere Ende der Kohlen gewickelt werden. Der aus der Plasmaquelle herausragende Teil der Bogenlampenkohlen wird auch hier wieder mittels zweier Plastrohre isoliert. Dem Versuchsaufbau auf der optischen Bank ist in diesem Falle ein Doppelkondensor hinzuzufügen, der vor dem Spalt angeordnet wird.
   Die Nachteile einer solchen Anordnung bestehen in einem wesentlich stärkeren Abbrand der Kohlen und einer nicht ausreichenden Kühlung, die die Beobachtungszeit auf wenige

Minuten begrenzt. Letzterer kann durch eine Wasserkühlung behoben werden. Sie wird mittels eines dünnwandigen Gummischlauches von 5 m Länge und 1 cm Außendurchmesser realisiert, der schraubenförmig eng anliegend um das Kupferrohr gewickelt wird (vgl. Abb. 4.2.1./5). Eine Luftkühlung ist nicht geeignet.

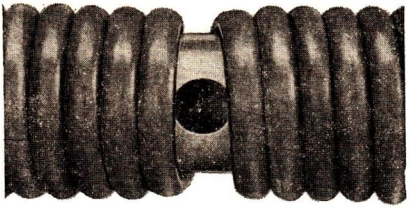


Abb. 4.2.1./5
Einfache Plasmaquelle mit Wasserkühlung

4.2.2. Demonstration der Linienspektren von Natrium- und Quecksilberdampf

Zu Versuch a

1. Quecksilberspektrallampe mit Fassung und Vorschaltdrosselspule
2. Gehäuse zur Quecksilberspektrallampe Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Konservendose (1 l)
3. optische Bank (1 m)
4. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
5. Spaltblende
6. Linse ($f = +150$ mm)
7. Geradsichtprisma mit Abblendrahmen (oder Schulgitter)
8. 5 Klemmreiter
9. transparenter Bildschirm mit Fuß

Zu Versuch b

Geräte 3. bis 9., außerdem

10. Natriumspektrallampe mit Fassung und Vorschaltdrosselspule
11. Gehäuse zur Natriumspektrallampe Ⓢ, dazu erforderliches Material:
    a) Konservendose (1 l)

Methodische Hinweise

1. Während bei der Verwendung der Quecksilberspektrallampe in mehreren Spektralbereichen Linien auftreten, ist bei der Natriumspektrallampe nur eine gelbe Linie zu beobachten, die von den beiden D-Linien herrührt. Zur Demonstration eines Linienspektrums ist daher die Quecksilberspektrallampe zu bevorzugen. Verwendet man nacheinander beide Spektrallampen, so werden dabei die Verschiedenartigkeit und die Stoffabhängigkeit der Linienspektren deutlich.

5. Metallspiegel, konkav (von der optischen Bank)
6. 2 Klemmreiter
7. Schulgitter
8. Fluoreszenzschirm (20 cm × 30 cm)
9. Glasplatte (10 cm × 10 cm)

Methodische Hinweise

1. Die Verwendung ausschließlich reflektierender Teile ermöglicht es, den ultravioletten Bereich des Spektrums weitgehend für Demonstrationsexperimente zu erschließen. Eine Grenze wird lediglich dadurch gesetzt, daß kurzwelliges ultraviolettes Licht bereits beim Durchgang durch den Lampenkolben und die Luft absorbiert wird.
2. Die Experimente zeigen, daß die Linien nicht auf den sichtbaren Teil des Spektrums beschränkt sind.
3. Vergleiche MB 4.0.0. und 4.0.2.!
4. Vergleiche MH Nr. 2 V 4.2.2.!

Präparieren der Spektrallampe

Die Spektrallampe ist zum Schutz mit einem Glaskolben versehen. Da das Glas das ultraviolette Licht weitgehend absorbiert, muß dieser Kolben entfernt werden. Zu diesem Zwecke wird er mit einer kleinen scharfen Dreikantfeile vorsichtig oberhalb des Sockels ringsherum angeritzt. Danach bewegt man die heiße Spitze eines Lötkolbens entlang dieser Kerbe. Dadurch springt das Glas längs des vorgezeichneten Weges, und der Glaskolben kann abgehoben werden. Durch dieses Präparieren erleidet die Lampe keinen Schaden, so daß sie in gleicher Weise für alle Experimente Verwendung finden kann. Ein Berühren des Entladungsgefäßes und der spannungsführenden Teile muß vermieden werden.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 4.2.3./1. Zunächst wird sorgfältig geprüft, ob das durch den ersten Spalt hindurchtretende Licht die Öffnung des

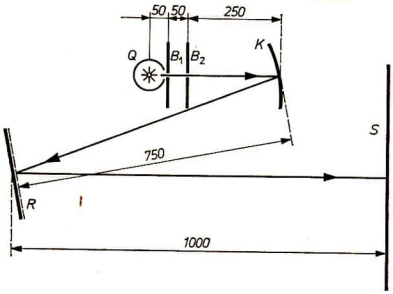


Abb. 4.2.3./1
Demonstration des ultravioletten Teils vom Quecksilberspektrum (Blick von oben auf die Versuchsanordnung)

Q – Quecksilberspektrallampe ohne Glaskolben
B_1, B_2 – Spaltblenden
K – Konkavspiegel
R – Reflexionsgitter
S – Schirm

zweiten Spaltes trifft, danach in die Mitte des Hohlspiegels und schließlich auf das Schulgitter gelangt. Danach dreht man das Gitter so, daß das Spektrum 0. Ordnung auf den Fluoreszenzschirm fällt. Durch Verschieben des Hohlspiegels auf der optischen Bank erreicht man eine scharfe Abbildung des 2. Spaltes auf dem Schirm. Danach stellt man fest, auf welcher Seite des Spektrums 0. Ordnung das lichtstärkere Spektrum 1. Ordnung auftritt. Nun wird das Schulgitter so weit gedreht, daß das Spektrum 0. Ordnung am Rande des Fluoreszenzschirmes zu liegen kommt. Auf dem Schirm treten neben den sichtbaren Linien des Quecksilberspektrums eine Fülle ultravioletter Linien auf.
Bringt man eine Glasplatte in den Strahlengang, so verschwindet der größte Teil des ultravioletten Spektrums (Abb. 4.2.3./2). Das Glas läßt lediglich das im nahen Ultraviolett gelegene Licht hindurch.

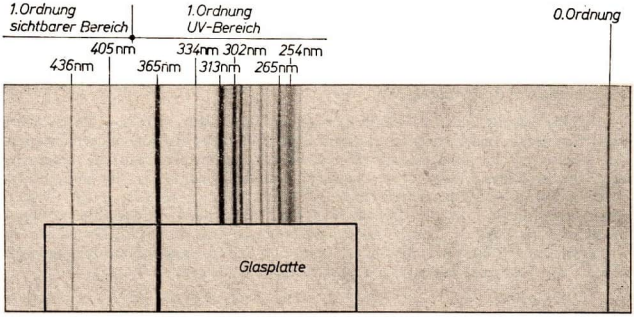


Abb. 4.2.3./2 Spektrum des Quecksilberdampfes. Die im unteren Teil in den Strahlengang gebrachte Glasplatte absorbiert das UV-Licht stark.

Auswertung

Da die Auslenkung beim optischen Gitter annähernd direkt proportional der Wellenlänge erfolgt, können die Wellenlängen der einzelnen Spektrallinien leicht berechnet werden. Dazu bestimmt man zunächst den Abstand einer Linie bekannter Wellenlänge im sichtbaren Bereich vom Spektrum 0. Ordnung. Das Verhältnis der Wellenlänge λ_x einer beliebigen Linie zur Wellenlänge λ_s der bekannten Linie ist nahezu gleich dem Verhältnis der Abstände s_x und s_s beider Linien vom Spektrum 0. Ordnung.

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_s} = \frac{s_x}{s_s}.$$

Damit gilt für die Wellenlänge der unbekannten Linie

$$\lambda_x = \lambda_s \cdot \frac{s_x}{s_s}.$$

Bemerkungen

1. Vergleiche Bem. 1 und 2 V 4.2.2.!
2. Statt des Hohlspiegels kann auch die konkave Seite einer Zerstreuungslinse Verwendung finden. Die Rückseite der Linse wird dazu mit mattschwarzem Papier bedeckt. Hierzu ist z. B. die Zerstreuungslinse der optischen Bank mit einer Brennweite von −250 mm geeignet, die beiderseits einen Krümmungsradius von 25 cm besitzt.
   Da die gewölbte Oberfläche der Linse nur einen geringen Teil des auftretenden Lichtes reflektiert, ist es möglich, sie z. B. mit Aluminium zu bedampfen. Man erhält auf diese Weise einen hochwertigen sphärischen Spiegel.
3. Statt eines Fluoreszenzschirmes kann bereits gutes weißes Papier Verwendung finden. So zeigt z. B. das für das Ormig-Verfahren verwendete „Eiweißpapier" eine starke blaue Fluoreszenz.
4. Zur genaueren Auswertung des Spektrums ist eine fotografische Aufzeichnung sinnvoll. Zu diesem Zwecke wird an die Stelle des Schirms fotografisches Vergrößerungspapier gebracht. Die Belichtungszeit liegt bei einigen Sekunden. Die Lage der Linien im sichtbaren Bereich sollte mit Bleistift markiert werden, da in diesem Teil des Spektrums bereits die ultravioletten Linien des Spektrums zweiter Ordnung liegen.

Netzspannung

UV Licht

4.2.4. Verbreiterung der Linien des Quecksilberspektrums bei steigendem Dampfdruck

1. Quecksilberdampfhöchstdrucklampe (200 W oder 500 W) mit Fassung und Gehäuse
2. Vorschaltdrossel zur Quecksilberdampfhöchstdrucklampe
3. Gleitwiderstand (300 Ω; 1 A bzw. 100 Ω; 3 A)
4. optische Bank (100 cm)
5. Spaltblende (0,3 mm)
6. Spaltblende ⑧ (siehe V 4.1.1.)
7. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
8. Linse ($f = +150$ mm)
9. Geradsichtprisma mit Abblendrahmen
10. transparenter Bildschirm mit Fuß
11. 5 Klemmreiter

Methodische Hinweise

1. Je schmaler der Spalt ist, um so schmaler sind auch die Spektrallinien. Bei ständiger Verringerung der Spaltbreite wird dann schließlich die „natürliche Breite" der Spektrallinien erreicht (vgl. MB 4.0.0.!). Das Experiment zeigt, daß diese Breite der Spektrallinien abhängig vom Zustand des Gases ist, das das Licht aussendet. Mit steigendem Druck verbreitern sich die Linien immer mehr. Das Experiment verdeutlicht den Schülern, daß über die Breite der Spektrallinien Aussagen über den Zustand des lichtaussendenden Gases möglich werden. Das ist besonders für die Astrophysik von Bedeutung.
2. Die Verbreiterung der Spektrallinien kann bei der Erklärung des kontinuierlichen Spektrums flüssiger und gasförmiger Stoffe herangezogen werden. Die Schüler wissen, daß einatomige Gase unter geringem Druck und bei niedrigen Temperaturen Linienspektren aussenden. Die Verbreiterung der Linien bei

größeren Drücken und höherer Temperatur kommt durch die stärkere gegenseitige Beeinflussung der Atome zustande. Im festen Aggregatzustand ist dann schließlich die Wechselwirkung der einzelnen Gitterbausteine so groß, daß ein kontinuierliches Spektrum auftritt.

3. Die Verbreiterung der Spektrallinien stellt einen möglichen Ausgangspunkt für die Einführung des Energiebändermodells dar.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 4.2.4./1. Die Stromstärke der Quecksilberdampfhöchstdrucklampe soll zunächst etwas mehr als ein Drittel der Betriebsstromstärke betragen. Der selbsthergestellte Leuchtspalt wird auf eine Breite von 0,1 mm eingestellt. Man bildet ihn mit der Sammellinse auf dem Bildschirm scharf ab. Das dicht hinter der Linse in den Strahlengang gebrachte Geradsichtprisma bewirkt die spektrale Zerlegung. In der Mitte des Schirmes soll sich die grüne Quecksilberlinie befinden. Durch vorsichtiges Nachjustieren der Linse sorgt man für eine besonders scharfe Abbildung dieser Linie. Nach einer Brennzeit von 5 min hat sich die Lampe genügend erwärmt. Nun stellt man durch Überbrücken des Vorwiderstandes die volle Betriebsstromstärke ein und beobachtet die Ränder der grünen Linie. Nach etwa 1 min werden sie unschärfer, in den nächsten Minuten wird die Linie breiter und überdeckt schließlich einen größeren Spektralbereich, wobei eine seitliche Begrenzung nicht mehr zu erkennen ist (Abq. 4.2.4./2).

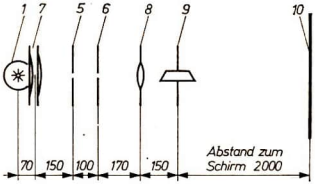
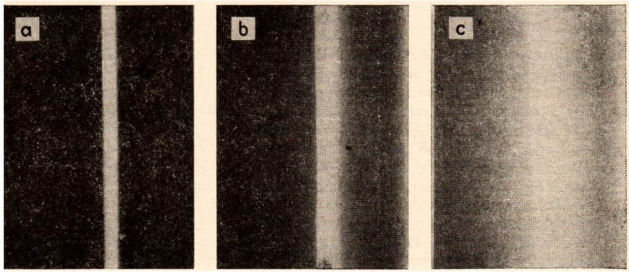


Abb. 4.2.4./1 Nachweis der Verbreiterung der grünen Quecksilberlinie bei steigendem Dampfdruck (Blick von oben auf die Versuchsanordnung)

Abb. 4.2.4./2 Verbreiterung der grünen Quecksilberlinie bei steigendem Dampfdruck: a) beim Einschalten der vollen Betriebsstromstärke, b) 1 min danach, c) 2 min danach



Bemerkungen

1. Die Tatsache, daß sich die Linienverbreiterung über einen Zeitraum von mehreren Minuten erstreckt, erschwert die Beobachtung. Die Schüler haben zum Schluß des Experiments nicht mehr in jedem Falle die Spektrallinie in der Form in Erinnerung, die sie zu Beginn des Versuches hatte. Es empfiehlt sich deshalb, im Abstand von etwa 1 min fotografische Aufnahmen anzufertigen und sie bei der Vorführung des Experimentes einzublenden. Die Schüler können dann in jedem Falle die Übereinstimmung des beobachteten Bildes mit der zugehörigen Aufnahme feststellen. Zum Schluß kann man die Aufnahmen gleichzeitig (z. B. unter Benutzung des Tageslichtschreibprojektors) oder kurzzeitig nacheinander zeigen. Dadurch werden den Schülern die interessierenden Veränderungen besonders bewußt.
2. Die Verwendung eines Projektions-Objektivs anstelle der Abbildungslinse ist bei diesem Experiment besonders zu empfehlen.
3. Zur Demonstration der Linienverbreiterung ist auch eine Natriumdampfhochdrucklampe geeignet (siehe Bem. 3 V 5.3.7.).

4.3. Anregung und Ionisation von Atomen durch Elektronenstoß

4.3.1. Durchführung des Franck-Hertz-Versuches mit einem edelgasgefüllten Thyratron [SE]

1. Edelgasgefülltes Thyratron (z. B. S 1,3/2 i V) mit Fassung
2. Stromversorgungsgerät (50 V —; 6,3 V ~)
3. Akkumulator (6 V)
4. Demonstrationsspannungsmesser (50 V —)
5. Demonstrationsstrommesser (2 mA —)
6. 2 Gleitwiderstände (25 Ω; 2 A)
7. Widerstand (100 Ω)

Methodischer Hinweis

Den Schülern sollte bewußtgemacht werden, daß der Franck-Hertz-Versuch eines der grundlegendsten Experimente der Physik der Atomhülle ist (vgl. MB 4.0.0. und 4.0.3.).

Versuch

Die Abbildung 4.3.1./1 zeigt den verwendeten Schaltplan und die Abbildung 4.3.1./3 Sockelschaltungen einiger gebräuchlicher Thyratrone. Die Heizung erfolgt mit verminderter Stromstärke. Sie sollte etwa so groß gewählt werden, daß zwischen Katode und Gitter eine Stromstärke in der Größenordnung von 10 mA auftritt. Die optimale Heizstromstärke hängt vom Röhrentyp ab und sollte durch Probieren ermittelt werden. Nach einer Vorheizzeit von 1 min ist die Röhre betriebsbereit.
Die Gitterspannung wird von Null an allmählich vergrößert. Bei 13 V tritt ein deutliches Absinken der Anodenstromstärke auf. Gleichzeitig kann man in der Röhre das Leuchten des Füllgases beobachten. Bei weiterer Erhöhung der Gitterspannung steigt auch die Anodenstromstärke wieder an. Bei 24 V ergibt sich ein weiteres Absinken usw. Das zweite und dritte Maximum sind weniger ausgeprägt als das erste. In Abbildung 4.3.1./2 ist das Stromstärke-Spannung-Diagramm bei

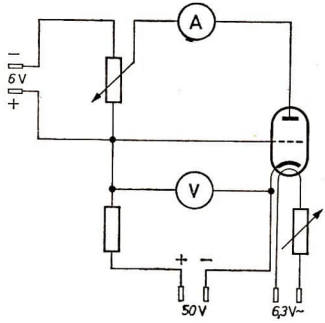


Abb. 4.3.1./1
Edelgasgefülltes Thyratron
als Franck-Hertz-Röhre (Schaltplan)

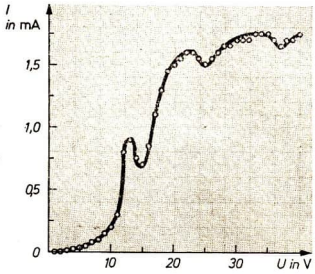


Abb. 4.3.1./2
Stromstärke-Spannungs-Diagramm des
Thyratrons S 1,3/2 iV bei unterheizter Katode

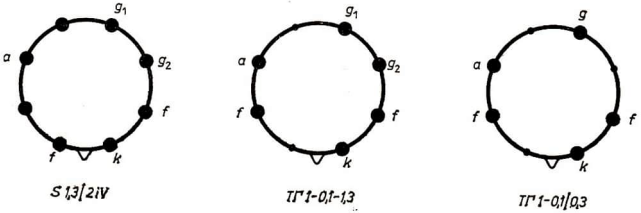


Abb. 4.3.1./3 Sockelschaltpläne gebräuchlicher Thyratrone

Verwendung des Thyratrons S 1 3/2 i V wiedergegeben. Infolge der zunehmenden Spannung erreichen die Elektronen immer größere Geschwindigkeiten. Dadurch gelangen trotz der anliegenden Gegenspannung mehr Elektronen zur Anode. Erst wenn die Elektronen eine bestimmte kinetische Energie besitzen, regen sie die Gasatome durch Stöße an. Sie geben dabei einen bestimmten Energiebetrag ab und erreichen die Anode nicht mehr.
Die Maxima sind der Anregungsspannung des Argons zuzuordnen. Abweichungen von Angaben in der einschlägigen Literatur (11,6 V) rühren in erster Linie von Kontaktspannungen her, die beim Austritt der Elektronen aus dem Katodenmaterial auftreten. Gelegentlich tritt bei 17 V ein weiteres Maximum auf, das der Anregungsspannung des Neons entspricht (16,6 V).

Bemerkungen

1. Für die Durchführung des Franck-Hertz-Versches eignen sich prinzipiell alle edelgasgefüllten Thyratrone. Je nach der Art sind jedoch geringe Abwandlungen der Versuchsdurchführung erforderlich. Folgende zwei Parameter sind wesentlich:
   - die Heizstromstärke. Sind die Maxima bei einem Thyratron nicht ausgeprägt, so verringert man die Heizstromstärke;
   - die Gegenspannung. Eine Vergrößerung der Gegenspannung führt in der Regel zu einer Verbesserung des Effektes. Die Anodenstromstärke wird aber dann so klein, daß sie mit einem Galvanometer gemessen werden muß. In einzelnen Fällen ist es aber auch möglich, auf eine negative Vorspannung ganz zu verzichten.
2. Besitzt das Thyratron mehrere Gitter, so werden diese miteinander verbunden.

4.3.2. Sichtbarmachen der Franck-Hertz-Kurve mit dem Katodenstrahloszillografen [SE]

1. Edelgasgefülltes Thyratron (z. B. S 1,3/2 i V) mit Fassung
2. Stromversorgungsgerät (30 V ~; 6,3 V ~)
3. Widerstand (100 Ω)
4. Gleitwiderstand (25 Ω; 2 A)
5. Widerstand (2,5 MΩ)
6. Demonstrationsoszillograf

Methodische Hinweise

1. Der Vorzug der direkten Darstellung der Franck-Hertz-Kurve auf dem Oszillografenschirm besteht neben der zeitlichen Einsparung und der größeren Anschaulichkeit vor allem darin, daß man auf dem Bildschirm den Einfluß veränderter Versuchsbedingungen sofort erkennen kann. Wegen der schwierigeren Schaltung sollte diese Variante jedoch erst nach der Durchführung des Grundversuchs gemäß V 4.3.1. benutzt werden.
2. Vergleiche MB 4.0.0. und 4.0.3.!

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 4.3.2./1. Die Sockelschaltung geeigneter Thyratrone ist der Abbildung 4.3.1./3 zu entnehmen. An die X-Platten des Oszillografen wird die zwischen Katode und Gitter wirksame Wechselspannung gelegt. Anode und Gitter werden mit den Y-Platten verbunden. Der Synchronisierungsschalter am Oszillografen ist auf „X“ zu stellen, die eingestellte Y-Verstärkung soll groß sein.

Nach genügendem Erwärmen der Katode erscheint auf dem Oszillografenschirm die Franck-Hertz Kurve. Dabei sind oben und unten sowie

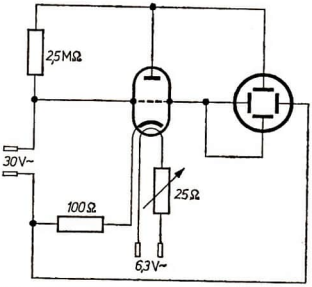


Abb. 4.3.2./1 Sichtbarmachen der Franck-Hertz-Kurve mit dem Katodenstrahloszillografen (Schaltplan)

rechts und links vertauscht. Durch langsames Verstellen der Heizstromstärke erreicht man einen optimalen Kurvenverlauf. Er entspricht — bis auf die Vertauschungen — der Abbildung 4.3.1./2.

Bemerkungen

1. Siehe Bem. Nr. 1 und 2 V 4.3.1.!
2. Durch die Abbildung des Schirmbildes mit Hilfe einer Sammellinse auf einem transparenten Bildschirm erhält man einen seitenrichtigen, aufrechten Kurvenverlauf. Dazu wird der Schirm 50 cm vor dem Oszillografen angeordnet und zwischen beide eine Kondensorlinse von +120 mm Brennweite gebracht.

4.3.3. Demonstration der Anregung von Atomen mit der Perrinschen Röhre

1. Perrinsche Röhre mit geheizter Katode
2. Halterung für Röhren mit geheizter Katode
3. Stromversorgungsgerät (400 V —; 50 V —; 6,3 V ~)
4. kleiner keramischer Magnet

Methodischer Hinweis

Das Experiment zeichnet sich durch Einfachheit und Übersichtlichkeit aus. Der Effekt ist jedoch nur bis auf eine Entfernung von etwa 2 m sichtbar.

Versuch

Die Anschlüsse der Halterung der Perrinschen Röhre werden entsprechend der Beschriftung mit dem Stromversorgungsgerät verbunden. Außerdem wird nach dem Schaltplan (Abb. 4.3.3./1) die Auffangelektrode der Röhre auf das negative Gitterpotential gelegt.
Der Elektronenstrahl, dessen Weg durch die angeregten Gasatome sichtbar wird (vgl. V 3.2.1.), verändert infolge des Gegenfeldes kurz vor der Auffangelektrode

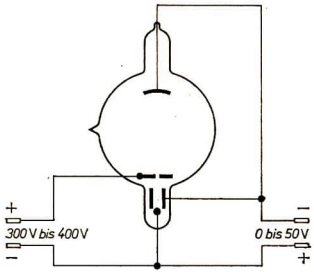


Abb. 4.3.3./1
Demonstration der Anregung von Atomen mit der Perrinschen Röhre (Schaltplan)

seine Richtung. Man bringt den keramischen Magneten in eine solche Lage, daß der Fadenstrahl für die beobachtenden Schüler die Form einer sehr schlanken Parabel erhält. Danach bewegt man den Magneten etwas hin und her, wodurch sich der Ablenkwinkel des Elektronenstrahls ändert.
Bei großem Ablenkwinkel ist der der Ablenkelektrode zugekehrte Teil des Fadenstrahls nicht mehr sichtbar. Die Geschwindigkeit der Elektronen wird dann infolge des Gegenfeldes so stark verringert, daß sie nicht genügend kinetische Energie besitzen, um die Gasatome anzuregen (Abb. 4.3.3./2).

Abb. 4.3.3./2
Elektronenstrahl in der Nähe der negativ geladenen Auffangelektrode

5. Wechselwirkung Licht—Stoff

5.0. Methodische Bemerkungen

5.0.0. Die Experimente zur Wechselwirkung von Licht und Stoff führen zu einer Reihe wichtiger Aussagen zum Wesen des Lichts und zur Struktur der Stoffe.
Die Experimente zum äußeren lichtelektrischen Effekt stellen einen günstigen Zugang zur Quantenphysik dar. Die Interpretation der Versuchsergebnisse zeigt deutlich die Grenzen der Anwendbarkeit des makrophysikalischen Wellenmodells. Die kinetische Energie der Photoelektronen hängt nicht, wie nach dem Wellenbild zu erwarten, von der Intensität des auftreffenden Lichts ab, sondern von seiner Frequenz. Eine Deutung dieses Sachverhalts gelingt erst mit der Photonenvorstellung.
Auch die Experimente zur Fluoreszenz weisen auf den Quantencharakter des Lichts hin. Selbst durch große Lichtintensitäten kann man nicht erreichen, daß beim Einstrahlen von Licht mit geringerer als der Fluoreszenzfrequenz Leuchteffekte auftreten. Die Versuche zur Resonanzfluoreszenz zeigen ferner den engen Zusammenhang zwischen Lichtemission und -absorption der Atome. Das gilt auch für die Demonstration der Umkehr der Natriumlinie.
Bei der Interpretation der Resonanzfluoreszenz werden häufig Analogien aus dem Bereich makrophysikalischer Schwingungen und Wellen herangezogen. Man sollte jedoch nicht versäumen, den Akzent vor allem auf die „Energieresonanz" zu legen unter Verwendung der Beziehung $E = h \cdot f$. Der energetische Aspekt stellt die Verbindung zum Photonenmodell her und ist nicht den Einschränkungen unterworfen wie die Anwendung des makrophysikalischen Wellenmodells.

5.0.1. Im Abschnitt 5.1. werden einfache Experimente zur Demonstration des äußeren lichtelektrischen Effekts beschrieben. Seine genaue Untersuchung wird mittels einer Hochvakuumfotozelle möglich. Sie wird im Abschnitt 5.2. beschrieben. Als zweckmäßige Quellen ultravioletten Lichts haben sich der Heimstrahler „UV de Luxe" vom VEB NARVA, Berlin, und die Leuchtstofflampe UVS 40 A vom VEB NARVA, Leuchten und Leuchtstofflampenwerk Brand-Erbisdorf, erwiesen. Erstere kann, in eine Normalfassung geschraubt, direkt an 220 V angeschlossen werden. Letztere kann anstelle herkömmlicher Leuchtstofflampen in jede Anlage für Netzspannungs-Leuchtstofflampen eingeschraubt werden.

5.0.2. Das Plancksche Wirkungsquantum ist eine der wichtigsten Naturkonstanten. Es ist für die gesamte Quantenphysik von grundlegender Bedeutung. Die Bestimmung dieser Konstanten an Hand geeigneter experimenteller Anordnungen sollte daher in keinem modernen Physikunterricht der Abiturstufe fehlen. Im Abschnitt 5.2. werden verschiedene experimentelle Varianten angeboten, die sich

durch den erforderlichen Aufwand an Meßgeräten und, damit zusammenhängend, durch die erreichbare Meßgenauigkeit unterscheiden.
Wenn ein Meßverstärker zur Verfügung steht, so ist besonders V 5.2.2., Variante b, zu empfehlen. Der Versuch ermöglicht nicht nur die Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums, sondern weist auch deutlich auf den komplexen Welle-Teilchen-Charakter des Lichts hin. Der Teil der experimentellen Anordnung, bei dem das Linienspektrum des Quecksilberdampfs erzeugt wird, kann im Unterricht nur durch Anwendung des Wellenbildes interpretiert werden. Die Wirkungen des Lichtes auf die Fotozelle, insbesondere die Unabhängigkeit der Gegenspannung von der Lichtintensität, können demgegenüber nur verstanden werden, wenn der korpuskulare Aspekt berücksichtigt wird. Die Auswertung des Experimentes ermöglicht deshalb auch eine konkrete Interpretation der grundlegenden Beziehung $E = h \cdot f$. Analoge Folgerungen ergeben sich bei der Verwendung von Interferenzfiltern zur Aussonderung bestimmter Frequenzbereiche, deren Wirkung gleichfalls mit dem Wellenmodell des Lichts erklärt wird.

5.0.3. Bei den Experimenten zum äußeren lichtelektrischen Effekt erweist sich das Wellenmodell zur Erläuterung der Versuchsergebnisse als ungeeignet. Auch Fluoreszenzerscheinungen können mit dem makrophysikalischen Wellenmodell nicht ausreichend erklärt werden. Immerhin werden aber hier die Grenzen der Wellenvorstellung nicht so deutlich. Deshalb bieten sich Resonanzerscheinungen bei makrophysikalischen Systemen als Modell an, um die Resonanzfluoreszenz zu deuten. Im wellenmechanischen Atommodell werden solche Analogien verwendet, um die Strahlungsemission oder -absorption durch Schwingungen der räumlich verteilt gedachten Elektronenladung zu erklären. Vielfach steht aber dieses Atommodell nicht zur Verfügung. Dann bietet der bereits erwähnte energetische Aspekt eine Möglichkeit zur Einordnung der experimentellen Fakten in allgemeinere physikalische Zusammenhänge. Wichtigstes methodisches Hilfsmittel ist hierbei die Erläuterung der Fluoreszenz im Energieniveauschema.

UV Licht

Hoch-spannung

5.1. Der äußere lichtelektrische Effekt

5.1.1. Nachweis des äußeren lichtelektrischen Effektes mit dem Elektrometer

1. Elektrometer
2. Zinkplatte (5 cm × 15 cm)
3. Holtzsche Klemme
4. PVC-Stab mit Wollappen
5. Bandgenerator
6. UV-Strahler
7. Schmirgelpapier

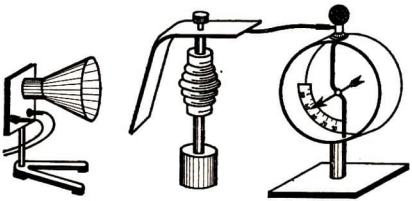


Abb. 5.1.1./1
Nachweis des äußeren lichtelektrischen Effektes mit dem Elektrometer

Methodische Hinweise

1. Das Experiment zeichnet sich durch Einfachheit und Übersichtlichkeit aus. Experimentelle Schwierigkeiten infolge mangelnder Isolation lassen sich durch Beachten der gegebenen Hinweise vermeiden.
2. Vergleiche MB 5.0.0. und 5.0.1.!

Versuchsaufbau

Die Zinkplatte wird sorgfältig auf einer Seite glattgeschmirgelt, vertikal an der Holtzschen Klemme befestigt und mit einem kurzen Verbindungsdraht leitend mit dem Elektrometer verbunden (Abb. 5.1.1./1). Zinkplatte, Holtzsche Klemme und Verbindungsdraht sollen keine Spitzen oder scharfen Kanten besitzen. Der Verbindungsdraht darf nirgends aufliegen.

Versuch

Der UV-Strahler wird in 50 cm Entfernung von der Zinkplatte aufgestellt. Bereits 2 min nach dem Einschalten sendet er genügend ultraviolettes Licht aus. Zunächst soll dieses die Zinkplatte noch nicht treffen. Man lädt sie durch Bestreichen mit dem geriebenen PVC-Stab negativ auf. Nun wird der Strahler so gedreht, daß sein Licht die Zinkplatte trifft. Der Ausschlag des Elektrometers geht schnell zurück. Danach lädt man die Zinkplatte durch Berühren mit der großen Kugel des Bandgenerators positiv auf. Trifft das Licht des Strahlers jetzt die Zinkplatte, so ändert sich ihr Ladungszustand nicht.
Durch das ultraviolette Licht werden aus der Zinkplatte Elektronen herausgelöst.

Bemerkungen

1. Sollte trotz Beachten aller angegebenen Maßnahmen der Ausschlag des Elektrometers bereits ohne Bestrahlung merklich geringer werden, so ist das auf zu hohe Luftfeuchtigkeit zurückzuführen. Dann wird der Versuchsaufbau vor der Durchführung mittels eines Infrarotstrahlers aus einer Entfernung von 1 m einige Minuten lang erwärmt.
2. Als UV-Strahler sind u. a. der Strahler „UV de Luxe", die Leuchtstofflampe UVS 40 A, Quecksilberdampfhöchstdrucklampen und die gemäß V 4.2.3. präparierte Quecksilberspektrallampe geeignet.
3. Steht kein leistungsfähiger UV-Strahler zur Verfügung, so kann der Effekt durch Amalgamieren der Zinkplatte verbessert werden. Dazu wird sie abgeschmirgelt und in eine Quecksilberwanne gelegt. Man feuchtet sie mit verdünnter Schwefelsäure an und verreibt auf ihr mit einem Wattebausch einige Tröpfchen Quecksilber. Danach wird sie mit Wasser abgespült. (Vorsicht! Arbeitsschutzvorschriften beim Arbeiten mit Quecksilber beachten!)

5.1.2. Nachweis des äußeren lichtelektrischen Effektes mit dem Wulf-Elektroskop

1. Wulf-Elektroskop mit Zubehör (Zinkplatte, Spiralelektrode)
2. Stromversorgungsgerät (400 V —)
3. Holtzsche Klemme
4. Widerstand (1 MΩ)
5. UV-Strahler

Methodischer Hinweis

Vergleiche MB 5.0.0. und 5.0.1.!

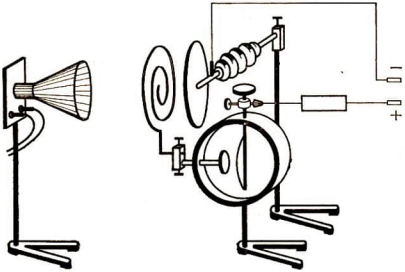


Abb. 5.1.2./1
Nachweis des äußeren lichtelektrischen Effektes mit dem Wulf-Elektroskop

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 5.1.2./1. Die Zinkplatte wird der Spiralelektrode auf einige Millimeter genähert. Vor der Versuchsdurchführung schmirgelt man ihre der Spiralelektrode zugewandte Seite sorgfältig ab. Der Widerstand soll verhindern, daß im Falle einer versehentlichen Berührung von Zinkplatte und Spiralelektrode durch das Bändchen ein zu großer Strom fließt, der zu dessen Zerstörung führen würde.
In einem Abstand von 50 cm von der Spiralelektrode wird der UV-Strahler aufgestellt, so daß dessen Licht durch die Spiralelektrode hindurch auf die Zinkplatte fällt. Der Abstand zwischen Influenzplatte und Bändchen soll wenige Millimeter betragen.
Zwei Minuten nach dem Einschalten sendet der Strahler ausreichend viel ultraviolettes Licht aus. Das Bändchen nähert sich jetzt wiederholt der Influenzplatte und kehrt nach deren Berührung in die Ausgangslage zurück.
Die energiereichen Lichtquanten schlagen aus der Zinkplatte Elektronen heraus. Diese gelangen infolge der angelegten Spannung auf die Spiralelektrode. Infolge der elektrostatischen Anziehung nähert sich das Bändchen der Influenzplatte in dem Maße, wie ihre Ladung zunimmt. Beim Berühren wird das Influenzplattensystem entladen, und das Bändchen kehrt in die Ausgangslage zurück.
Durch Vertauschen der Zuleitungen an der Spannungsquelle wird die Zinkplatte mit dem positiven Pol der Spannungsquelle verbunden. Das Bändchen bewegt sich nicht. Damit ist der Nachweis erbracht, daß nicht die mögliche Ionisation der Luft zwischen Platte und Spiralelektrode infolge der Bestrahlung mit ultraviolettem Licht Ursache des Effektes ist.

Bemerkungen

1. Nähert sich das Bändchen der Influenzplatte nicht so weit, daß es zur Entladung kommt, so muß der Abstand zwischen beiden verringert werden. Bewegt sich das Bändchen jedoch nicht mehr als 1 mm, so ist ein vorsichtiges Dehnen des gewendelten Aluminiumfoliestreifens erforderlich.
2. Um ein Ankleben des Bändchens an der Influenzplatte zu vermeiden, ist auf ihr eine Preßspanfolie angebracht. Ihre Leitfähigkeit reicht in der Regel aus, um die Ladung abzuführen. Zeigt sich jedoch im Experiment, daß das Bändchen an der Folie hängenbleibt, so ist die Leitfähigkeit zu gering. Die Folie muß dann vorsichtig angefeuchtet werden. Das kann

durch Herausschrauben des Halterungsstabes und leichtes Hineinblasen in die dadurch freiwerdende Öffnung erfolgen.
3. Vergleiche Bem. Nr. 2 und 3 V 5.1.1.!
4. Um die Bewegung des Bändchens der ganzen Klasse sichtbar zu machen, kann der Schattenwurf benutzt oder der Tageslichtschreibprojektor eingesetzt werden.

5.2. Plancksches Wirkungsquantum

5.2.1. Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mittels Fotozelle, Kondensator und Röhrenvoltmeter

1. Vakuum-Fotozelle zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit Fassung (z. B. 451 SUMU GKV)
2. Gehäuse zur Fotozelle ⓑ, dazu erforderliches Material:
   a) Konservendose (1 l)
3. Kondensator (0,25 μF; 1000 V)
4. Morsetaste
5. Röhrenvoltmeter mit möglichst hochohmigem Eingang
6. Quecksilberspektrallampe mit Fassung und Vorschaltdrosselspule
7. Gehäuse zur Quecksilberspektrallampe ⓑ (siehe V 4.2.2.)
8. optische Bank (50 cm)
9. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
10. 3 Klemmreiter
11. Metallinterferenzfilter, zu den Quecksilberlinien passend
12. Stromversorgungsgerät (2 V ~)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeichnet sich durch große Einfachheit aus. Sein Prinzip besteht in folgendem: Durch das auf die Fotokatode auftreffende Licht treten Elektronen aus. Sie laden zunächst einen Kondensator auf. Dabei stellt sich eine Endspannung ein, die der Energie der schnellsten Elektronen entspricht. Diese Spannung wird mit dem Röhrenvoltmeter gemessen.
2. Infolge der geringen Fotostromstärke ist für die Experimente ein Kondensator auszuwählen, der über lange Zeit die aufgebrachten Ladungen speichert. Alle spannungsführenden Teile (auch die Morsetaste) sollten gut isoliert sein.
3. Das Experiment ist sehr gut als Schülerexperiment geeignet. Durch entsprechendes Montieren der Quecksilberspektrallampe und der Drossel muß aber garantiert sein, daß ein Berühren netzspannungsführender Teile durch die Schüler ausgeschlossen ist.
4. Vergleiche MB 5.0.2.!

Versuchsaufbau

Damit die Fotozelle von keinem Streulicht getroffen wird, empfiehlt sich die Anfertigung eines Gehäuses. Dazu wird in den Boden der Konservendose ein Loch von 1 cm Durchmesser und in die Seitenwand eine Öffnung von 3 cm Durchmesser

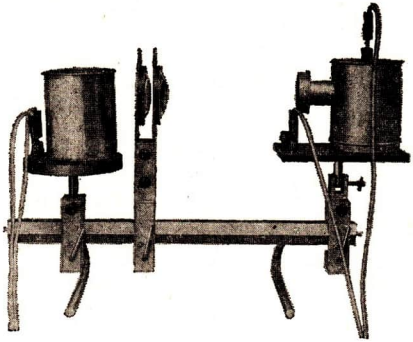


Abb. 5.2.1./1
Beleuchten der Fotozelle bei der Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

geschnitten. Nach dem Überstülpen der Konservendose über die Fotozelle erfolgt der Anschluß der Katode durch die Öffnung im Boden, der Eintritt des Lichts durch die seitliche Öffnung.
Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 5.2.1./1. Die beiden Kondensorlinsen dienen zur Erzeugung eines schwach konvergenten Lichtbündels, das auf die Katode der Fotozelle trifft. Nach dem Schaltplan (Abb. 5.2.1./2) wird die Fotozelle über die Morsetaste mit dem Kondensator und dem Röhrenovltmeter (1 V —) verbunden.

Versuch

Zunächst wird die Anode einige Sekunden lang erwärmt, indem man die Anschlüsse der Fotozellenfassung mit dem Stromversorgungsgerät (2 V) verbindet.

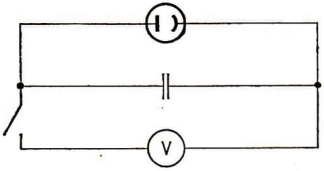


Abb. 5.2.1./2 Bestimmen des Planckschen Wirkungsquantums durch Aufladen eines Kondensators (Schaltplan)

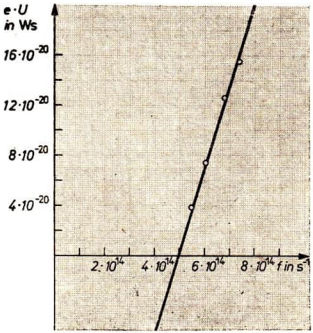


Abb. 5.2.1./3 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums aus den Meßwerten. h ist der Anstieg der Geraden im Energie-Frequenz-Diagramm.

Dadurch entfernt man den evtl. auf ihrer Oberfläche vorhandenen dünnen Alkalibelag, der beim Beleuchten die Meßergebnisse verfälschen würde. Dann bringt man unmittelbar vor die Öffnung im Fotozellengehäuse nacheinander die Filter. Man wartet jeweils, bis sich der Kondensator auf die Endspannung aufgeladen hat. Die dafür erforderliche Zeit wird durch Probieren ermittelt. Sie liegt in der Größenordnung von 10 s. Die nach dem Drücken auf die Morsetaste vom Röhrenvoltmeter angezeigte Höchstspannung wird gemessen.

Auswertung

Die Energie E der schnellsten aus der Katode herausgeschlagenen Elektronen beträgt

$$E = e \cdot U ,$$

wobei e die Elementarladung und U die gemessene Spannung ist. Diese Energie E stellt man als Funktion der Frequenz f grafisch dar. Es ergibt sich eine Gerade (Abb. 5.2.1./3). Sind W_a die Austrittsarbeit, f_1 und f_2 zwei verwendete Lichtfrequenzen und U_1 und U_2 die gemessenen Spannungen, so gelten die Gleichungen

$$h \cdot f_1 = e \cdot U_1 + W_a$$

$$h \cdot f_2 = e \cdot U_2 + W_a$$

$$h = \frac{\Delta(e \cdot U)}{\Delta f} .$$

Der Quotient $\frac{\Delta(e \cdot U)}{\Delta f}$ entspricht dem Anstieg der Geraden in der grafischen Darstellung. Er beträgt für die Gerade in Abbildung 5.2.1./3 $h = 6{,}5 \cdot 10^{-34}$ W s².
Aus der grafischen Darstellung ergibt sich weiterhin die Grenzfrequenz der Fotozelle aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der Abszisse.
Der Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate markiert die (negative) Austrittsarbeit.

Bemerkungen

1. Vergleiche MB 4.0.2. und Bem. 1. und 2. V 4.2.2.!
2. Bei genügend schmalem spektralem Durchlaßbereich der Filter kann anstelle der Quecksilberdampflampe auch die große Optikleuchte Verwendung finden.
3. Infolge des großen Eingangswiderstandes des Röhrenvoltmeters erfolgt die Entladung des Kondensators relativ langsam. Dennoch sind dadurch die gemessenen Spannungen mit einem Fehler behaftet. Bei Vergrößern der Kapazität des Kondensators auf 1 µF ist er zu vernachlässigen. Dann sind jedoch Beleuchtungszeiten in der Größenordnung von Minuten erforderlich.
4. Der durch den endlichen Eingangswiderstand des Röhrenvoltmeters bedingte Fehler läßt sich dadurch vermeiden, daß man den Kondensator über ein Galvanometer entlädt. Die auf diese Weise gemessenen Stromstöße sind der Ladespannung des Kondensators proportional. Zur Eichung der Versuchsanordnung ist es lediglich erforderlich, den Kondensator auf eine bekannte Spannung aufzuladen und den dadurch hervorgerufenen Stromstoß zu messen.
5. Zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums genügt es bereits, mit zwei, möglichst weit voneinander entfernt liegenden Frequenzen zu arbeiten. Die Auswertung erfolgt dann gemäß V 5.2.2., Variante a.

5.2.2. Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit der Gegenfeldmethode

Zu Variante a

1. Vakuumfotozelle zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit Fassung
2. Gehäuse zur Fotozelle Ⓢ (siehe V 5.2.1.)
3. Demonstrationsspannungsmesser (1 V —)
4. Galvanometer
5. Akkumulator (6 V)
6. Gleitwiderstand (150 Ω; 2 A)
7. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
8. 4 Klemmreiter
9. optische Bank (50 cm)
10. große Optikleuchte (12 V; 50 W)
11. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
12. Metallinterferenzfilter

Zu Variante b

Geräte 1. bis 9., außerdem

13. Quecksilberspektrallampe mit Fassung und Vorschaltdrosselspule
14. Gehäuse zur Quecksilberspektrallampe Ⓢ (siehe V 4.2.2.)
15. Spaltblende
16. Linse ($f = +150$ mm)
17. Geradsichtprisma mit Abblendrahmen
18. Bildschirm mit Fuß

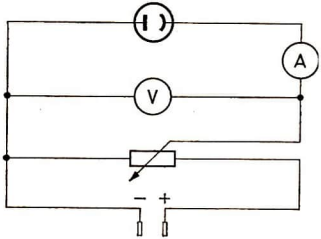


Abb. 5.2.2./1
Bestimmen des Planckschen Wirkungsquantums nach der Gegenfeldmethode (Schaltplan)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 5.0.2. und MH Nr. 3 V 5.2.1.!
2. Die Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums erfolgt am einfachsten numerisch aus zwei gemessenen Gegenspannungen und den verwendeten Lichtfrequenzen. Dieser Weg wird in Variante a beschritten. Zu genaueren Ergebnissen führt das in V 5.2.1. verwendete grafische Verfahren.

Variante a

Versuch

Die Anordnung der Fotozelle und der Optikleuchte erfolgt wie in V 5.2.1. beschrieben (Abb. 5.2.1./1). In gleicher Weise wird der auf der Anode vorhandene Alkalibelag entfernt. Danach verbindet man die Fotozelle gemäß Schaltplan (Abb. 5.2.2./1) mit dem Galvanometer. Das an den Akkumulator angeschlossene Potentiometer dient der Erzeugung einer variablen Gegenspannung, die am Spannungsmesser abgelesen werden kann.

Zunächst bringt man unmittelbar vor die Öffnung des Fotozellengehäuses ein violettes Filter. Infolge des Bestrahlens der Fotokatode zeigt das Galvanometer einen geringen Strom an. Nun erhöht man allmählich die zwischen Katode und Anode angelegte Spannung. Dadurch nimmt der Strom ab. Das elektrische Gegenfeld wirkt der Bewegung der Elektronen entgegen. Auf diese Weise ermittelt man den Betrag der Gegenspannung, bei dem gerade kein Strom mehr vom Galvanometer angezeigt wird. Danach wird das Experiment mit einem grünen Filter wiederholt.

Auswertung

Die Einsteinsche Gleichung für den äußeren lichtelektrischen Effekt lautet

$$h \cdot f = e \cdot U + W_a .$$

Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum, f die Frequenz des jeweiligen Lichts, e die Elementarladung, U die Spannung und W_a die Austrittsarbeit. Die Frequenzen des verwendeten Lichts sind bekannt (Beschriftung der Filter), ebenso die elektrische Elementarladung e. Die beiden gemessenen Spannungen U_1 und U_2 ermöglichen es, die Austrittsarbeit zu eliminieren. Aus

$$h \cdot f_1 = e \cdot U_1 + W_a \quad \text{und}$$

$$h \cdot f_2 = e \cdot U_2 + W_a$$

ergibt sich

$$h = e \cdot \frac{U_1 - U_2}{f_1 - f_2} .$$

Beispiel

Es wurden Filter für die Wellenlängen $\lambda_1 = 405$ nm und $\lambda_2 = 546$ nm benutzt, die gemessenen Spannungen betrugen $U_1 = 1{,}02$ V und $U_2 = 0{,}28$ V. Aus den Wellenlängen errechnen sich die Frequenzen nach der Gleichung

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

zu $f_1 = 7{,}41 \cdot 10^{14}\ \mathrm{s}^{-1}$ und $f_2 = 5{,}49 \cdot 10^{14}\ \mathrm{s}^{-1}$.
Die Elementarladung beträgt $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ A s.

$$h = e \cdot \frac{U_1 - U_2}{f_1 - f_2}$$

$$h = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{A\,s} \cdot \frac{0{,}74\ \mathrm{V}}{1{,}92 \cdot 10^{14}\ \mathrm{s}^{-1}}$$

$$\underline{\underline{h = 6{,}2 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{W\,s}^2}}$$

Variante b

Mit der Quecksilberspektrallampe und den Teilen der optischen Bank stellt man nach V 4.2.2. eine Anordnung zur Erzeugung des Linienspektrums des Quecksilbers zusammen. Das Beseitigen des evtl. auf der Anode vorhandenen Alkalibelags sowie das Verbinden der Fotozelle mit dem Spiegelgalvanometer erfolgt wie in Variante a beschrieben. Man bringt die Öffnung im Fotozellengehäuse an

eine solche Stelle des Spektrums, daß zunächst das Licht der kurzwelligsten violetten Spektrallinie auf die Katode der Fotozelle trifft. Dazu wird die Öffnung durch Aufkleben von schwarzem Papier so weit verkleinert, daß sie der Form einer Spektrallinie entspricht. Das Spiegelgalvanometer zeigt einen Strom an. Nun vergrößert man die Gegenspannung so weit, bis die Stromstärke auf Null sinkt. Die Gegenspannung wird am Spannungsmesser abgelesen.
Nachfolgend führt man in entsprechender Weise Messungen im blauen, grünen und gelben Spektralbereich durch. Die Auswertung erfolgt wie in V 5.2.1.

Bemerkungen

1. Besonders gut für die Messungen sind die grüne (546 nm), die blaue (436 nm), die violette (403 nm und 408 nm) und die intensive UV-Linie (366 nm) des Quecksilberspektrums geeignet (vgl. V 4.2.2.).
2. Der große Unterschied zwischen dem geringen Innenwiderstand des Galvanometers und dem großen Innenwiderstand der Vakuumfotozelle bewirkt relativ kleine Ausschläge. Ein genügend empfindlicher Meßverstärker mit Demonstrationsmeßinstrument ist deshalb dem Galvanometer vorzuziehen, weil er in der Regel einen viel größeren Eingangswiderstand besitzt.

Netz-spannung

5.3. Optische Anregung von Atomen

5.3.1. Nachweis der Fluoreszenz mit einer Leuchtstofflampe

1. Leuchtstofflampe mit teilweise entferntem fluoreszierendem Belag
2. Zubehör zur Leuchtstofflampe (Fassungen, Drosselspule, Glimmzünder), auf Schaltplatte montiert
3. Papprohr von der halben Länge der Leuchtstofflampe (⌀ 5 cm), längs aufgeschlitzt

Methodische Hinweise

1. Aus dem Experiment ist die große Bedeutung der Leuchtstoffe für die Lichttechnik zu erkennen. Ihr Einsatz ermöglicht es, Gase und Dämpfe auszuwählen, die neben sichtbarem Licht vornehmlich im ultravioletten Bereich Strahlung emittieren. Dieser Teil der Strahlung wird dann von den Leuchtstoffen in sichtbares Licht umgewandelt. Durch Mischen geeigneter Leuchtstoffe kann man die spektrale Zusammensetzung des Lichtes verändern.
2. Das Nachleuchten (Phosphoreszieren) nach dem Ausschalten des Stromes bestätigt die Annahme, daß das ultraviolette Licht im Leuchtstoff zunächst absorbiert und erst nachfolgend wieder ausgestrahlt wird.
3. Da die Bedingungen bei der Leuchtstofflampe nicht variiert werden können, ist das Experiment nicht zur Untersuchung der Fluoreszenz geeignet. Es kann als Überraschungsversuch bei der Einführung oder als Bestätigungsexperiment im Hinblick auf technische Anwendungen Einsatz finden.

Versuch

Das Papprohr wird über die Leuchtstofflampe geschoben, so daß es zunächst den mit Leuchtstoff versehenen Teil verdeckt. Man verbindet die Leuchtstofflampe über

die zugehörige Drossel mit dem 220 V-Wechselspannungsnetz. Nach ihrer Zündung leuchtet der Quecksilberdampf im Rohr schwach bläulich. Nun entfernt man das Papprohr. In dem mit Leuchtstoff beschichteten Teil tritt ein intensives weißes Leuchten auf. Im Entladungsraum entsteht neben dem Licht im sichtbaren Bereich ein hoher Anteil ultravioletter Strahlung. Diese wird beim Auftreffen auf die Fluoreszenzstoffschicht zunächst absorbiert und nachfolgend im Bereich des sichtbaren Lichtes wieder emittiert.
Nachfolgend wird im abgedunkelten Raum die Lampe ausgeschaltet. Der Teil der Lampe, der mit Leuchtstoff bedeckt ist, sendet noch über längere Zeit mit abnehmender Intensität Licht aus.

5.3.2. Nachweis der Fluoreszenz von festen und flüssigen Stoffen

Zu Versuch 1

1. Quecksilberspektrallampe mit Fassung und Vorschaltdrosselspule
2. Gehäuse zur Quecksilberspektrallampe ⑥ (siehe V 4.2.2.)
3. Filter, nur für ultraviolettes Licht durchlässig
4. fluoreszierende feste Sotffe (z. B. Waschmittel, Leuchtfarbe, Leuchtschirm)
5. Klebstoff
6. Metallplatte (10 cm × 10 cm)

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 3., außerdem

7. fluoreszierende Flüssigkeiten (z. B. Petroleum, Benzol, Feinmechanikeröl, rote Tinte, Fluoreszeinlösung)

Methodische Hinweise

1. Das Experiment dient zur Einführung des Begriffes der Fluoreszenz. Außerdem zeigt es das Prinzip einiger der Anwendungen der Fluoreszenz: Untersuchung von Mineralien, Überprüfung der Echtheit von Gemälden und Schriftstücken, Feststellen von Spuren bestimmter Stoffe.
2. Jeder fluoreszierende Stoff sendet das Fluoreszenzlicht in einer für ihn charakteristischen spektralen Zusammensetzung aus. Auch die Fluoreszenzspektren geben Aufschluß über den Aufbau der Stoffe.

Versuch 1

Von der Quecksilberspektrallampe wird, wie in V 4.2.3. beschrieben, der Schutzkolben aus Glas entfernt. Danach schließt man die Lampe über die Vorschaltdrossel an das Wechselspannungsnetz an. Vor die Lichtaustrittsöffnung im Schutzgehäuse wird das Filter gebracht, das alles sichtbare Licht weitgehend absorbiert, dagegen das ultraviolette hindurchläßt. Die pulverförmigen Leuchtstoffe werden auf Filterpapier gestreut, das vorher mit Klebstoff bestrichen wurde. Im abgedunkelten Raum werden nacheinander die Leuchtstoffe in das Lichtbündel gebracht. Sie fluoreszieren mit einer Farbe, die sich in der Regel von ihrer Eigenfarbe unterscheidet.

Durch die Metallplatte wird der primäre Lichtstrom unterbrochen. Je nach der Art des Stoffes klingt die Lichtemission unterschiedlich schnell ab.

Versuch 2

Man bringt einige fluoreszierende Flüssigkeiten nacheinander in den Strahlengang. Sie werden kurz vor der Versuchsdurchführung auf Filterpapier getropft. Die Flüssigkeiten zeigen beim Auftreffen des ultravioletten Lichts eine lebhafte Fluoreszenz. Wiederum treten verschiedene Fluoreszenzfarben auf, die sich von den Eigenfarben der Flüssigkeiten unterscheiden. Selbst geringste Flüssigkeitsmengen sind an ihrem Fluoreszenzleuchten zu erkennen.

Bemerkung

Anstelle der Quecksilberspektrallampe ist auch eine Quecksilberdampfhöchstdrucklampe oder ein Heimstrahler (vgl. MB 4.0.2.) geeignet.

5.3.3. Nachweis des Stokesschen Gesetzes mit einem Filtersatz

Zu Versuch 1

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W)
2. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
3. optische Bank (50 cm)
4. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
5. 5 Klemmreiter
6. Filtersatz (Metallinterferenzfilter aller Farbbereiche)
7. Glasküvette (25 cm × 15 cm × 10 cm)
8. Fluoreszein (10 mg)
9. Natronlauge (1 ml)

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 9., außerdem

10. 2 Polarisationsfilter

Methodischer Hinweis

Vergleiche MB 5.0.3.!

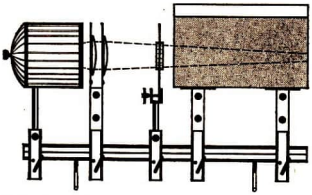


Abb. 5.3.3./1
Abhängigkeit der Fluoreszenz von der Frequenz des eingestrahlten Lichts

Versuch 1: Abhängigkeit der Fluoreszenz von der Frequenz des eingestrahlten Lichtes

Gemäß Abbildung 5.3.3./1 werden die Leuchte und die Kondensorlinsen so auf der optischen Bank befestigt, daß ein schwach konvergentes Lichtbündel entsteht. Man füllt die Glasküvette zur Hälfte mit Wasser und gibt einige Tropfen Natronlauge hinzu. Einige Milligramm Fluoreszein werden in 100 ml Wasser gelöst. Durch Hineingießen in die Glasküvette vergrößert man die Konzentration der

Lösung in der Küvette solange schrittweise, bis die Fluoreszenz nicht mehr längs des ganzen Lichtweges auftritt. Nachfolgend füllt man mit Wasser auf.
In den Strahlengang wird zuerst ein Violett-Filter gebracht. Die Fluoreszenzerscheinungen in der Küvette werden im abgedunkelten Raum beobachtet. Längs des gesamten Lichtweges tritt in der Flüssigkeit grüne Fluoreszenz auf.
Jetzt wird das Blaufilter in den Strahlengang gebracht. Es zeigt sich die gleiche Erscheinung. Aufeinanderfolgend strahlt man nun grünes, gelbes, orangefarbenes und rotes Licht ein. Nur im Falle des grünen Lichts fluoresziert die Lösung noch. In allen anderen Fällen sind keine Fluoreszenzerscheinungen zu beobachten.
Die Fluoreszenz tritt nur dann auf, wenn die Frequenz des eingestrahlten Lichtes größer als die Frequenz des Fluoreszenzlichtes ist.

Versuch 2: Abhängigkeit der Fluoreszenz von der Intensität des eingestrahlten Lichtes

Bei unverändertem Versuchsaufbau werden hinter dem Kondensor dicht aufeinanderfolgend zwei Polarisationsfilter angebracht. Zuerst bringt man das violette Filter in den Strahlengang und stellt durch Verdrehen eines Polarisationsfilters größte Helligkeit ein. Dann verringert man die Helligkeit allmählich.
Das Fluoreszenzleuchten wird entsprechend der Abnahme der Lichtintensität schwächer. Solange aber violettes Licht in die Küvette gelangt, tritt auch Fluoreszenz auf.
Nachfolgend wird das Experiment mit grün-blauem Licht wiederholt. Es zeigt sich dasselbe Ergebnis. Die Wiederholung des Experimentes im gelben Spektralbereich verläuft negativ. Es ist keine Fluoreszenz zu beobachten.

Bemerkung

Anstelle der Küvette mit Fluoreszeinlösung kann auch der Uranglaswürfel benutzt werden.

5.3.4. Nachweis des Stokesschen Gesetzes mittels spektral zerlegten Lichtes

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W)
2. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
3. optische Bank (100 cm)
4. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
5. Linse ($f = +100$ cm)
6. Spaltblende
7. Geradsichtprisma mit Abblendrahmen
8. 8 Klemmreiter
9. Bildschirm
10. Glasküvette (25 cm × 15 cm × 10 cm)
11. Fluoreszein (10 mg)
12. Natronlauge (1 ml)

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 5.3.4./1. Durch Verändern des Abstandes zwischen der Leuchte, den Kondensorlinsen und der Spaltblende erreicht man eine gute Ausleuchtung des Spalts im schwach konvergenten Licht. Der Spalt wird mit der Linse auf dem Schirm scharf abgebildet und nachfolgend das Geradsichtprisma in den Strahlengang gebracht. Auf dem Schirm erscheint ein kontinuierliches Spektrum, in dem die Farben übereinanderliegen. Die Glasküvette

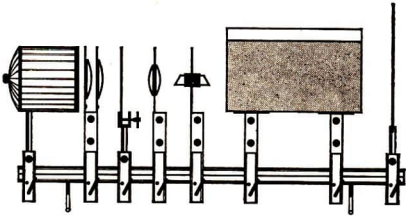


Abb. 5.3.4./1
Nachweis
des Stokesschen Gesetzes

wird mit Wasser gefüllt, dem man einige Tropfen Natronlauge zufügt. Das Fluoreszein löst man in 200 ml Wasser auf und bringt es in kleinen Portionen unter ständigem Rühren in die Küvette. Dabei werden im abgedunkelten Raum die Fluoreszenzerscheinungen in der Küvette im Zusammenhang mit dem auf dem Schirm abgebildeten Spektrum betrachtet.
Bereits bei geringer Konzentration wird das blaue Licht stark absorbiert, da die Eigenfarbe der Fluoreszenzlösung gelb ist. In dem vom blauen Licht getroffenen Flüssigkeitsbereich tritt eine starke Fluoreszenz auf. Bei zunehmender Konzentration wird zunächst das violette und schließlich das blau-grüne bis grüne Licht absorbiert. Gleichzeitig tritt in dem von diesem Licht getroffenen Flüssigkeitsbereich Fluoreszenz auf. Das gelb-grüne, gelbe, orangefarbene und rote Licht durchdringen die Flüssigkeit bei allen Konzentrationen weitgehend unbehindert. In den entsprechenden Bereichen der Flüssigkeit wird keine Fluoreszenz beobachtet.
Fluoreszenz tritt nur dann auf, wenn die Frequenz des einfallenden Lichtes größer als die Fluoreszenzfrequenz ist.

Netz-spannung

5.3.5. Demonstration der Resonanzfluoreszenz von Natriumdampf

1. Glühlampe, mit Natrium gefüllt Ⓢ (siehe V 2.1.2.)
2. Eisenschale mit Sand
3. Bunsenbrenner
4. Stadtgas
5. Natriumspektrallampe mit Fassung und Gehäuse Ⓢ (siehe V 4.2.2.)
6. Vorschaltdrosselspule für die Natriumspektrallampe
7. optische Bank (50 cm)
8. Linse ($f = +200$ mm)
9. Linse ($f = +50$ mm)
10. Lochblende
11. Bildschirm

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 5.0.3.!
2. Das Experiment zur Resonanzfluoreszenz steht in engem Zusammenhang mit der Wirkungsweise des Lasers. Das beim Festkörperlaser benutzte „optische Pumpen“ entspricht der Absorption des einfallenden Natriumlichts durch die Natriumatome. Der hier beobachtete Resonanzeffekt tritt in ähnlicher Weise

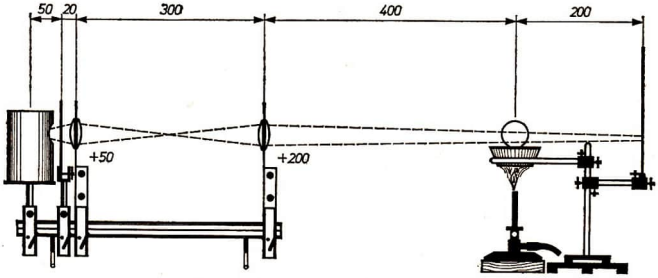


Abb. 5.3.5./1 Nachweis der Resonanzfluoreszenz von Natriumdampf

bei der stimulierten Emission in Erscheinung, wobei sich der Energiefluß in umgekehrter Richtung vollzieht.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 5.3.5./1. Mittels der Lochblende und der beiden Linsen wird ein lichtstarkes, annähernd paralleles Lichtbündel erzeugt. Es soll im Bereich der Glühlampe einen Durchmesser von 1 cm besitzen. Zunächst durchdringt das Lichtbündel die Glühlampe, ohne daß im abgedunkelten Raum der Lichtweg sichtbar wird. Das Natriumlicht hinterläßt auf dem Schirm hinter der Glühlampe einen kreisförmigen gelben Fleck. Nun wird der Sand in der Schale mit dem Bunsenbrenner kräftig erhitzt. Dadurch erhöht sich der Dampfdruck des Natriums im Lampenkolben. Allmählich beginnt der sich im Lichtkegel befindliche Natriumdampf zu leuchten. Mit steigender Temperatur nimmt die Leuchterscheinung an Intensität zu. Der Fleck auf dem Schirm verliert dabei immer mehr an Helligkeit. Schließlich verschwindet er ganz. Die Leuchterscheinung in der Glühlampe konzentriert sich immer mehr auf die Eintrittsstelle des Lichtbündels. Auch in der Umgebung dieser Stelle leuchtet der Natriumdampf.
Die Natriumatome absorbieren das auftreffende Licht und strahlen es nachfolgend mit der gleichen Frequenz wieder aus. Dieser Vorgang kann sich mehrmals wiederholen.

Bemerkung

Anstelle der mit Natrium gefüllten Glühlampe kann auch ein mit Natrium gefülltes Glasrohr Verwendung finden.

5.3.6. Demonstration der Umkehr der Natriumlinie mittels gefärbter Flamme

1. Optische Bank (100 cm)
2. große Optikleuchte (12 V; 50 W)
3. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
4. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
5. Spaltblende (0,1 mm ··· 0,2 mm)
6. Linse ($f = +150$ mm)
7. Geradsichtprisma mit Abblendrahmen
8. 8 Klemmreiter
9. transparenter Bildschirm
10. Bunsenbrenner
11. Stadtgas
12. Gehäuse für Bunsenbrenner Ⓑ, dazu erforderliches Material:
    a) Konservendose (1 l)
13. Metalldraht (2 mm ∅; 50 cm lang)
14. Asbestfaden
15. Natriumnitrat (10 g)

Methodische Hinweise

1. Voraussetzung für das Gelingen des Experimentes ist das Erzeugen einer intensiv leuchtenden Natriumdampfwolke, die längs eines großen Weges vom Licht durchsetzt wird. Eine Aufhellung des Raumes durch das Natriumlicht muß dabei vermieden werden.
2. Vergleiche MB 5.0.3.!

Versuchsaufbau

Die Befestigung der Teile auf der optischen Bank erfolgt nach Abbildung 5.3.6./1. In die Konservendose werden an zwei gegenüberliegenden Stellen des Zylindermantels und in den Boden Löcher von etwa 3 cm Durchmesser geschnitten. Die seitlichen Löcher liegen in einer solchen Höhe, daß das Licht der Optikleuchte ungehindert hindurchtreten kann. Zur Erzeugung der Natriumdampfwolke wird aus dem Draht ein Ring von 2,5 cm Durchmesser zusammengebogen, der 3 lange Stützen besitzt. Er soll sich etwa 2 cm über dem Brenner befinden. Man bewickelt den Ring einige Millimeter dick mit Asbestfaden und tränkt diesen mit konzentrierter Natriumnitratlösung.

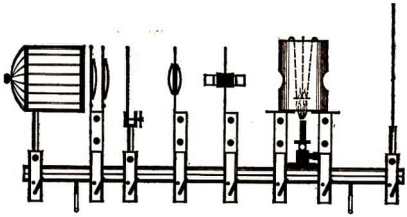


Abb. 5.3.6./1
Demonstration der Umkehr der Natriumlinie

Versuch

Nach dem Einschalten der Optikleuchte erscheint auf dem Schirm das kontinuierliche Spektrum. Nun wird der Bunsenbrenner angezündet. Das Natriumnitrat

bewirkt eine intensive gelbe Flammenfärbung. Auf dem Schirm entsteht im gelben Spektralbereich eine schwarze Linie. Durch geringfügiges Verändern der Lage der Abbildungslinse läßt sich eine optimale Einstellung erreichen.

Bemerkung

Eine noch intensiver gelb gefärbte Flamme erhält man, wenn man ein etwa erbsengroßes Stück Natrium auf einem Eisenlöffel in der Bunsenflamme verbrennt. (Vorsicht! Arbeitsschutzvorschriften beachten!)

5.3.7. Demonstration der Umkehr der Natriumlinie mittels präparierter Glühlampe

1. Optische Bank (100 cm)
2. große Optikleuchte
3. Glühlampe zur großen Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Natrium gefüllt Ⓢ (siehe V 2.1.2.)
4. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)
5. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
6. Spaltblende (0,1 mm ··· 0,2 mm)
7. Linse ($f = +150$ mm)
8. Geradsichtprisma mit Abblendrahmen
9. 6 Klemmreiter
10. transparenter Bildschirm
11. Mineralwolle (1000 cm³)

Methodische Hinweise

1. Der einfache Versuchsaufbau gestattet die sichere Demonstration der Umkehr der Natriumlinie. Zunächst tritt das kontinuierliche Spektrum der Glühwendel auf. Erst in dem Maße, wie das Natrium in der Glühlampe infolge der Erwärmung verdampft, tritt im gelben Spektralbereich die Absorptionslinie des Natriums auf.
2. Vergleiche MB 5.0.3.!

Versuchsaufbau

Beim Füllen der Glühlampe mit Natrium ist darauf zu achten, daß ein möglichst großer Teil der Glaswandung in die Schmelze eintaucht. Die Stromstärke darf 2 mA nicht überschreiten, da es sonst zu einer zu starken örtlichen Erhitzung des Glases kommen kann. Bei 1,5 mA soll die Elektrolysezeit mindestens 2 h betragen. Eine geringfügige Verfärbung des Glaskolbens wirkt sich nicht störend auf den Versuchsablauf aus.
Um eine ausreichende Erwärmung der Glühlampe zu erreichen, wird in das Lampengehäuse um die Glühlampe herum Mineralwolle geschichtet. Lediglich längs der optischen Achse bleibt ein Kanal von 2 cm Durchmesser zum Austritt des Lichts frei.
Der weitere Versuchsaufbau erfolgt nach V 4.2.2.

Versuch

An die Glühlampe wird eine Spannung von 12 V ··· 14 V gelegt und das Spektrum auf dem Bildschirm beobachtet. Nach 1 min erscheint im gelben Spektralbereich eine graue Linie, die zunehmend dunkler wird. Nach einigen Minuten ist sie auch aus einer Entfernung von mehreren Metern deutlich zu erkennen. Der im Innern der Glühlampe immer dichter werdende Natriumdampf absorbiert in zunehmendem Maße das Licht mit den Wellenlängen der gelben Natriumlinien.

Bemerkungen

1. Der Grad der Schwärzung der Absorptionslinie hängt in erster Linie von der Temperatur im Innern der Glühlampe ab. Je besser die Wärmeisolation ist, umso eher wird die Umkehr der Natriumlinie sichtbar.
2. Für das Experiment eignet sich bereits eine Glühlampe von 6 V; 30 W. Um eine ausreichende Erwärmung zu garantieren, sollte dann die Betriebsspannung 9 V betragen. Obwohl durch die erhöhte Spannung die Lebensdauer der Lampen erheblich sinkt, gestatten sie dennoch viele Male die Demonstration des Effektes.
3. Anstelle der mit Natrium gefüllten Glühlampe kann auch eine Natriumdampfhochdrucklampe (z. B. vom Typ NATRALOX NA 175-00 vom VEB NARVA, Berlin) Verwendung finden. Sie wird über eine Drosselspule (aus Aufbauteilen), die in dem angegebenen Beispiel die Stromstärke auf 2,15 A begrenzt, an eine Wechselspannung von 220 V angeschlossen. Die Zündung erfolgt mittels eines Teslatransformators (durch Annähern der Sprühelektrode an den Lampenkolben). Ein selbsthergestelltes Gehäuse (große Konservendose) dient zur Abschirmung des störenden Nebenlichts.
   Beim Einschalten der Lampe tritt zunächst ein Linienspektrum auf. Es besteht aus den Quecksilberlinien. Die gelbe Linie rührt vor allem von den D-Linien des Natriums her. Die Linien werden zunächst zunehmend heller, mit steigendem Dampfdruck nimmt außerdem die Breite der Natriumlinie zu (vgl. V 4.2.4.). Nach wenigen Minuten reicht sie bis an die rote und die grüne Quecksilberlinie heran. Demgegenüber weisen die Quecksilberlinien infolge des geringen Dampfdruckes nur eine unwesentliche Verbreiterung auf. Nach etwa 2 min tritt im Zentrum der verbreiterten gelben Linie eine graue Linie auf, die zunehmend dunkler wird. Sie wird dadurch verursacht, daß der Natriumdampf in der Nähe der Rohrwandung wesentlich kälter ist als der Dampf im Innern und das gelbe Licht absorbiert.

6. Detektoren zum Nachweis der Kernstrahlung

6.0. Methodische Bemerkungen

6.0.0. Alle wissenschaftlichen Erkenntnisse von den Eigenschaften der Mikroteilchen beruhen letztlich auf deren Wechselwirkung mit geeigneten Meß- und Nachweisgeräten. Daher sollten auch im Physikunterricht die Eigenschaften der Kernstrahlung nicht losgelöst von geeigneten Kernstrahlungsdetektoren behandelt werden. Bei der Fülle vorhandener Detektortypen mit ihrem oft komplizierten Wirkungsmechanismus ist allerdings eine sorgfältige Auswahl erforderlich. Sie wird sich nach der wissenschaftlich-technischen Bedeutung der Detektoren richten, vor allem aber auch danach, wie weit die prinzipielle Wirkungsweise von Kernstrahlungsdetektoren exemplarisch deutlich gemacht werden kann.
Bei Kernstrahlungsdetektoren werden recht unterschiedliche *Wirkungen der Strahlung* genutzt, wie z. B. Ionisation, Anregung von Lumineszenzerscheinungen, Änderung der Leitfähigkeit oder chemische Veränderungen. Der Physikunterricht stellt hierzu unterschiedliche Vorkenntnisse zur Verfügung. Daher wird auch die Erläuterung der verschiedenen Detektortypen mit unterschiedlicher Tiefe erfolgen müssen.
Bei aller Verschiedenartigkeit der Detektoren lassen sich aber auch Gemeinsamkeiten herausarbeiten, die für den allgemeinbildenden Physikunterricht wichtiger sind als spezielle Detailkenntnisse von den einzelnen Detektortypen.
Zunächst können *energetische Betrachtungen* zum Verständnis von Kernstrahlungsdetektoren beitragen. Allgemein gilt, daß die Mikroteilchen Energie an den Detektor abgeben und daß erst dadurch registrierbare Veränderungen hervorgerufen werden. Im einzelnen bieten sich dabei vielfältige Möglichkeiten zur Wiederholung oder Ausweitung bereits vorhandener Kenntnisse über energetische Umsetzungen im atomaren Bereich (Darstellung von Energieabsorption oder -emission im Energieniveauschema oder Bändermodell, Foto- und Comptoneffekt).
Ein weiterer übergeordneter Gesichtspunkt ist die Betonung von *Verstärkungsprozessen*, die beim Nachweis einzelner Mikroteilchen angewendet werden müssen. Vielfältige Verstärkungsmechanismen werden dabei genutzt, wie etwa die Gasverstärkung beim Geiger-Müller-Zählrohr, die Vervielfachung der Elektronenanzahl im Fotosekundärelektronenvervielfacher oder die Verstärkung der primären Wirkungen auf der Fotoplatte beim Entwicklungsprozeß. Auch hier muß sich der Physikunterricht vor einem zu hohen Maß an Spezialkenntnissen hüten. Empfehlenswert ist es, an einem Beispiel die Bedeutung des Verstärkungsprozesses beim Nachweis von Mikroteilchen näher zu erläutern und diese Einsicht bei weiteren Detektortypen anzuwenden, ohne jedesmal den jeweiligen Verstärkungsmechanismus in allen Einzelheiten zu erläutern.

Wenn es das von der Klassenstufe abhängende Unterrichtsniveau zuläßt, sollte nicht versäumt werden, den Schülern an einem geeigneten Beispiel zu zeigen, daß zwischen Detektor und Mikroteilchen eine *Wechselwirkung* stattfindet. Nicht nur die Mikroteilchen wirken auf den Detektor, sondern vom Detektor geht auch eine Rückwirkung auf die Mikroteilchen aus. Diese Rückwirkung kann bis zur Vernichtung des Mikroobjekts gehen, wie etwa bei der Absorption von Gammaquanten im Szintillationszähler. Zumindest findet aber in jedem Fall eine Beeinflussung von Impuls und Energie statt. Derartige Überlegungen sind von grundlegender Bedeutung für das Verständnis von Messungen im Bereich der Quantenphysik.
Ein allgemeines Problem bei Kernstrahlungsdetektoren ist ferner die Tatsache, daß nicht jedes Mikroteilchen, das auf einen Detektor trifft, registriert wird. Die Experimente zur *Totzeitbestimmung* (V 6.4.4.) bieten die Möglichkeit, dieses Problem zu berühren und eventuell noch zusätzlich darauf hinzuweisen, daß auch die Ansprechwahrscheinlichkeit der Detektoren für die verschiedenen Strahlenarten unterschiedlich ist. Ein näheres Eingehen auf die Ursachen für die unterschiedliche Quantenausbeute dürfte jedoch die Ziele und Möglichkeiten des Physikunterrichts überschreiten.

6.0.1. Wegen des geringen apparativen Aufwandes ist der Nachweis radioaktiver Strahlung durch fotografische Schichten auch dann geeignet, wenn keine komplizierteren Kernstrahlungsdetektoren zur Verfügung stehen. Der beträchtliche Zeitaufwand verlangt die Einbeziehung von Arbeitsgemeinschaften.
Die Anfertigung von Autoradiografien ist für den Physikunterricht aus historischen und aus wissenschaftlich-technischen Gründen von Interesse. Unter historischem Aspekt sollte darauf hingewiesen werden, daß die Fotoplatte der älteste Detektor für Kernstrahlung ist. Der französische Physiker Becquerel stellte 1896 als erster fest, daß die von Uranmineralien ausgehende Strahlung fotografische Schichten schwärzt. Unter wissenschaftlich-technischem Aspekt ist zu bemerken, daß die Autoradiografie ein wichtiges Hilfsmittel z. B. bei Werkstoffprüfungen und Oberflächenuntersuchungen ist. In Medizin, Biologie und Landwirtschaft ermöglicht sie wichtige Erkenntnisse über die Verteilung bestimmter Radioisotope in den Geweben und damit Aufschlüsse über biologisch-chemische Prozesse in Lebewesen.
Die Fotoemulsion ist ferner in Form von Kernspurplatten geeignet, Zerfalls- und Umwandlungsprozesse von Mikroteilchen zu registrieren. Das Arbeiten mit Kernspurplatten erfordert jedoch viele Erfahrungen und ist in der Schule nur unter günstigen Bedingungen realisierbar.

6.0.2. Im Physikunterricht können Expansions- und Diffusionsnebelkammern verwendet werden.
Bau und Funktionsweise der verschiedenen Nebelkammertypen bedingen ihre methodischen Vorzüge und Nachteile. Expansionskammern können im allgemeinen schnell aufgebaut werden. Sie sind sofort betriebsbereit. Dafür sind die Spuren bei jeder Expansion nur 1 s bis 2 s beobachtbar. Bei Diffusionskammern ist nach der Füllung mit Kohlendioxid-Schnee einige Zeit erforderlich, bis sich das erforderliche Temperaturgefälle ausgebildet hat. Sie zeigen dann aber etwa eine Stunde lang Spuren. Die Nebelkammerspuren scheinen eindrucksvoll den Teilchencharakter der Mikroobjekte zu demonstrieren. Bei der Auswertung der Spuren ist jedoch zu beachten, daß sie keinesfalls eine genaue Teilchenbahn anzeigen. Vergleicht man etwa den „klassischen Elektronenradius" (Größenordnung 10^{-15} m)

mit der Breite der Nebelkammerspuren (Größenordnung etwa 10^{-5} m), so ergibt sich ein Größenverhältnis von $1:10^{10}$. Das entspricht einer Kugel vom Radius 1 cm, die sich innerhalb einer „Spur" mit der Breite von 100000 km bewegt. Hinweise dieser Art sind wichtig zur Vorbereitung auf die Behandlung des Welle-Teilchen-Dualismus und der Unbestimmtheitsbeziehung von Heisenberg.

6.0.3. Die Wirkungsweise von Ionisationskammern kann im Unterricht leicht erklärt werden. Ein in das Kammervolumen eindringendes geladenes Teilchen erzeugt längs seines Weges Ionenpaare, deren Anzahl je Weglängeneinheit von der Art und Energie der einfallenden Teilchen sowie vom Gasdruck und von der Gasart abhängt. Diese Ladungsträger wandern infolge der angelegten Spannung zu den Elektroden und erzeugen einen Kammerstrom. Seine Stromstärke ist ein Maß für die Anzahl der je Zeiteinheit einfallenden Teilchen.
Zu beachten ist das sehr unterschiedliche Ionisationsvermögen von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung. Es verhält sich in der genannten Reihenfolge etwa wie $10^4:10^2:1$. Für den Physikunterricht kommen daher vor allem Alphastrahler zum Erzeugen eines nachweisbaren Ionisationsstroms in Frage.

6.0.4. Bei den Geiger-Müller-Auslösezählrohren unterscheidet man nach der Konstruktion Zylinder- (z. B. VA-Z-117) und Glockenzählrohre (z. B. BOH-41), nach der Gasfüllung Zählrohre mit organischen Stoffen oder Halogendämpfen als Löschgase. Die Erläuterung der Wirkungsweise des Geiger-Müller-Zählrohres bereitet im Physikunterricht ebensowenig Schwierigkeiten wie die der Ionisationskammer, wenn die vorhandenen Vorkenntnisse insbesondere über die Stoßionisation in Gasen genutzt werden.
Beim Nachweis radioaktiver Strahlung in Schulexperimenten hat das Geiger-Müller-Zählrohr wesentliche Vorteile gegenüber der Ionisationskammer. Durch die erhebliche Gasverstärkung im Zählrohr entstehen am Arbeitswiderstand Spannungsimpulse, die mit einfachsten Verstärkerschaltungen akustisch oder optisch wahrnehmbar gemacht werden können. Da die Impulse von einzelnen Mikroteilchen oder Quanten ausgelöst werden, können auch Quellen mit verhältnismäßig schwacher Aktivität verwendet werden. Dabei kommt der diskontinuierliche, quantenhafte Charakter der Strahlung sowohl bei akustischer als auch bei optischer Anzeige bzw. bei der Impulszählung deutlich zum Ausdruck. Einfache Bedienung und sichere Funktion sind weitere Vorzüge, die dem Geiger-Müller-Zählrohr eine dominierende Stellung bei Experimenten mit radioaktiver Strahlung im Physikunterricht sichern.
Besonders vorteilhaft sind Halogenzählrohre. Sie geben bei relativ geringer Betriebsspannung (400 V) Impulse mit einer Amplitude von 10 V bis 30 V ab und können daher sogar ohne jede weitere Verstärkung betrieben werden. Die Impulsamplituden von Zählrohren mit organischem Löschgas liegen bei Betriebsspannungen von über 1000 V wesentlich niedriger, z. B. beim VA-Z-320 in der Größenordnung von 10 mV.

6.0.5. Experimente mit Szintillationszählern sind derzeit im Physikunterricht noch wenig verbreitet. Sie werden aber zukünftig an Bedeutung gewinnen. Szintillationszähler haben eine Reihe von Vorzügen, die auch im Physikunterricht genutzt werden sollten.

— Ihr sehr gutes Auflösungsvermögen gestattet es, hohe Impulsraten zu messen. Die Meßdauer bei Experimenten mit radioaktiver Strahlung kann deshalb stark verkürzt werden.

— Sie sind vielseitig für alle Arten radioaktiver Strahlung einsetzbar und ergeben insbesondere bei der Gammastrahlung eine wesentlich höhere Quantenausbeute als Geiger-Müller-Zählrohre.
— Die Impulsamplitude ist der Energie der registrierten Mikroteilchen bzw. Gammaquanten proportional, so daß auch spektroskopische Untersuchungen im Bereich der Kernphysik durchgeführt werden können.
— Der Fotosekundärelektronenvervielfacher kann auch unabhängig vom Szintillationskopf betrieben werden und kann dann eine Fotozelle mit angeschlossenem Verstärker ersetzen, z. B. in V 9.3.1.

Die Wirkungsweise von Szintillationszählern wird aus den Versuchen V 6.5.1. bis 6.5.3. deutlich. Ihre Erläuterung bereitet im Unterricht keine Probleme, wenn man sich auf Grundsätzliches beschränkt.

6.0.6. Die Erläuterung der Funktionsweise von Halbleiterdetektoren im Physikunterricht setzt voraus, daß Grundkenntnisse über die Wirkungsweise von Halbleiterdioden vorhanden sind. An diese Kenntnisse anknüpfend, sollte man darüber informieren, daß auch im Halbleiterdetektor ein p- und ein n-leitendes Gebiet vorhanden ist, zwischen denen sich eine Grenzschicht ausbildet. Der Halbleiterdetektor wird in Sperrichtung betrieben. Dringt ein geladenes energiereiches Mikroteilchen in den Detektor, so erzeugt es längs seiner Bahn unter Energieabgabe freie Ladungsträger (Elektron-Defektelektron-Paare). Sie werden durch das vorhandene elektrische Feld in der Grenzschicht schnell getrennt und bewegen sich entsprechend ihrer unterschiedlichen Ladung in Richtung des elektrischen Feldes bzw. entgegengesetzt. Es entsteht ein kurzzeitiger Stromstoß, der am äußeren Arbeitswiderstand einen Spannungsimpuls hervorruft. Da die Impulse im Millivoltbereich liegen, müssen sie noch elektronisch verstärkt werden.
Vorteilhaft sind bei Halbleiterdetektoren ihre kleinen geometrischen Abmessungen, ihre mechanische Stabilität, ihr hohes Auflösungsvermögen und, ähnlich wie bei Szintillationszählern, die Möglichkeit zur Energiebestimmung der einfallenden Mikroteilchen.

6.1. Fotoemulsion

6.1.1. Herstellen eines Autoradiogrammes

1. Röntgenzahnfilm (z. B. XR 11)
2. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr)
3. Entwicklerdose
4. Entwickler
   (z. B. MH 28, 1 Teil Entwickler, 4 Teile Wasser)
5. Schnellfixiersalz (z. B. A 304)
6. Trichter
7. Tageslichtschreibprojektor

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.1.!
2. Die Exposition eines Autoradiogrammes erfolgt während einer Unterrichtsstunde. Der Klassenraum muß für den Zeitpunkt des Herausnehmens des Films aus dem Papier und des Einlegens in die Entwicklerdose verdunkelbar sein. Entwickler und Fixierbad sind entsprechend der Vorschrift vorher anzusetzen.

3. Das erhaltene Autoradiogramm kann zur Herstellung von Äquidensiten verwendet werden.
4. Der Versuch kann gleichzeitig benutzt werden, um die Schüler in die fotografische Technik einzuführen.

Versuch

Die radioaktive Quelle (^{85}Kr) wird am Beginn der Stunde an einem Stativ befestigt und unmittelbar über dem Film gehaltert. Nach einer Expositionszeit von 25 Minuten erfolgt die Entwicklung. Dazu wird der Klassenraum kurzfristig abgedunkelt, der Film aus dem Papier entnommen und in die Entwicklerdose gelegt. Nachdem die Dose verschlossen ist, kann bei Licht Entwickler in die Dose gegossen werden. Bei einer Entwicklertemperatur von etwa 20 °C beträgt die Entwicklungszeit 4 min. Danach wird der Entwickler in die Flasche zurückgegossen, die Dose kurz mit Wasser durchgespült und anschließend das Fixierbad eingefüllt. Nach 5 min kann der Film entnommen und kurz mit Wasser abgespült werden. Eine Projektion mit dem Projektor zeigt deutlich einen kreisförmigen Schwärzungsfleck (Abb. 6.1.1/1).

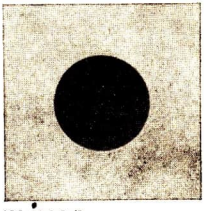


Abb. 6.1.1./1
Autoradiogramm von ^{85}Kr

Bemerkungen

1. Wenn der Film weiter verwendet werden soll, ist eine gründliche Wässerung von etwa 15 min notwendig. Danach wird der Film zum Trocknen aufgehängt.
2. Entwickler und Fixierbad dürfen nicht zusammenkommen. Der zum Einfüllen benötigte Trichter ist nach dem Einfüllen des Entwicklers mit Wasser abzuspülen. Entwickler und Fixierbad können mehrfach verwendet werden.
3. Da Betastrahlen schon von Materialien geringer Kernladungszahl absorbiert werden, ist es günstig, nur eine der zwei Filmschichten zu verwenden.
   Dazu wird in völliger Dunkelheit die Verpackung entfernt und jede Filmschicht einzeln in einer Lage schwarzem Papier lichtdicht verpackt.

6.1.2. Äquidensiten eines Autoradiogrammes [SE]

1. Röntgenzahnfilm (z. B. XR 11)
2. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr)
3. Entwicklerdose
4. Entwickler (z. B. MH 28, 1 Teil Entwickler, 4 Teile Wasser)
5. Schnellfixiersalz (z. B. A 304)
6. Trichter
7. 3 kleine Fotoschalen
8. 2 Fotozangen
9. fototechnischer Film (z. B. FU 5)
10. Entwickler (z. B. MH 28, 1 Teil Entwickler, 2 Teile Wasser)
11. Kopierrahmen

Methodische Hinweise

1. Dem Versuch liegt das folgende Prinzip zugrunde:
   Das exponierte Fotogramm wird zunächst anentwickelt. Danach wird die Entwicklung im Wasserbad gestoppt; es wird diffus nachbelichtet und dann ausentwickelt. Dabei entsteht an den vorher unbelichteten Stellen ein Positivbild. An der Grenze zwischen Negativ- und Positivbild bildet sich ein heller Saum, die Äquidensite, deren Lage durch Variation der Erst- und Nachbelichtung geändert und damit das gesamte Schwärzungsgebirge untersucht werden kann.
2. Bei diesem Versuch wird wie im V 6.1.1. ein Fotogramm hergestellt. Die Expositionszeit sollte etwa 1 h betragen. Von diesem Fotogramm können nun Schüler selbständig Äquidensiten herstellen.
3. Es lassen sich gleich auf dem Röntgen-Zahnfilm die Äquidensiten erzeugen. Günstiger ist es aber, wenn man von dem entwickelten und fixierten Fotogramm Kopien gewinnt und darauf Äquidensiten herstellt.

Versuch

Vom Autoradiogramm aus V 6.1.1. wird zunächst eine Kontaktkopie auf Fotopapier hergestellt. Die Belichtungszeit wird dabei so gewählt, daß alle schwach bzw. nicht geschwärzten Stellen des Negativs zu einer kräftigen Schwärzung des Kopier*r*materials führen. Danach wird 1 min bis 3 min entwickelt (Verdünnung 1:2) und zwischengewässert. Im Wasserbad wird die Kopie diffus zweitbelichtet (z. B. mit einer Opallampe). Die Belichtungszeit wird so gewählt, daß nach der Sekundärentwicklung alle bisher ungeschwärzten Bildstellen nachschwärzen. Nach der Sekundärentwicklung wird die Kopie kurz zwischengewässert, fixiert und getrocknet.
Fertigt man von den entstandenen Schwärzungsflächen Kopien an, dann entsteht bei richtig gewählter Zweitbelichtung und Zweitentwicklung eine dunkle Linie auf hellem Grund, eine Äquidensite. Zur Herstellung von Äquidensitenscharen wird die Erstbelichtung in mehreren Stufen verkürzt. Es ergeben sich verschiedene Äquidensiten. Legt man alle so gewonnenen Fotogramme übereinander, so erhält man aus den Äquidensiten eine Übersicht über den Verlauf der Schwärzungsfläche.

a

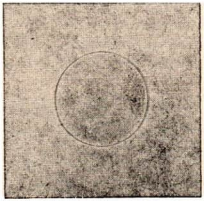

b

Abb. 6.1.2./1 Entstehung eines Äquidensitogramms: a) erste Kopie des Fotogramms von Abb. 6.1.1./1, b) erste Äquidensite

Bemerkung

Äquidensitenscharen werden vor allem deshalb hergestellt, weil das menschliche Auge Schwärzungsunterschiede nicht sicher feststellen kann. Eine elektronische Abtastung des Fotogramms ist aufwendig. Äquidensitenscharen lassen sich leicht herstellen und vermitteln genaue Informationen über den wahren Verlauf der Schwärzung und damit über die Aktivität bzw. Konzentration eines radioaktiven Stoffes. Äquidensiten werden vor allem in der angewandten Kernphysik, z. B. der Nuklearmedizin und der Defektoskopie, verwendet.

6.1.3. Herstellen verschiedener Radiogramme [SE]

Zu Variante a

1. Röntgenzahnfilm (z. B. XR 11)
2. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr; ^{60}Co)
3. Entwicklerdose
4. Entwickler (z. B. MH 28, 1 Teil Entwickler, 4 Teile Wasser)
5. Schnellfixiersalz (z. B. A 304)
6. Trichter
7. Briefmarke oder Papier mit Wasserzeichen oder Geldschein

Zu Variante b

Geräte 1. bis 6., außerdem

8. kleiner Gerätestecker oder Streichholzschachtel mit kleinen Metallgegenständen

Methodische Hinweise

1. Da die Expositionszeit relativ lang ist, muß darauf geachtet werden, daß sich die Lage von Film, durchstrahltem Gegenstand und Strahler nicht ändert.
2. Der Versuch ist ein Beispiel für die Anwendung der Kernphysik in der Radiografie und Defektoskopie.

Variante a: Radiografie einer Briefmarke

Auf einen wie im V 6.1.1. präparierten Röntgenzahnfilm wird eine Briefmarke mit Wasserzeichen (Papier mit Wasserzeichen, Geldschein) gelegt und darüber im Abstand von 5 cm die ^{85}Kr-Quelle befestigt. Nach einer Expositionszeit von 7 Tagen wird der Film wie beim V 6.1.1. entwickelt, fixiert, gewässert und getrocknet. Deutlich sind Wasserzeichen sichtbar. Negativ und Original werden nebeneinander in durchstrahltem Licht beobachtet und verglichen.

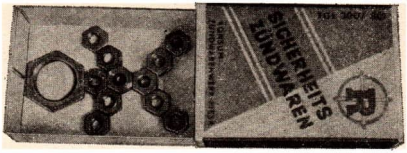


Abb. 6.1.3./1
Streichholzschachtel mit Muttern

Variante b: Radiografie von Gegenständen mit Metallteilen

Die Versuchsanordnung erfolgt wie bei Variante a. Als durchstrahlte Gegenstände nimmt man entweder einen Gerätestecker, der etwa die Größe des Zahnfilmes hat, oder eine Streichholzschachtel, in die man verschiedene metallene Gegenstände klebt (Abb. 6.1.3./1). Man verschließt sie so, daß der Inhalt nicht festgestellt werden kann. Als Strahler verwendet man ^{60}Co und exponiert 7 Tage. Die Verarbeitung des Filmes erfolgt wie beim V 6.1.1.

6.2. Nebelkammer

6.2.1. Nachweis von Alphateilchen mit der Expansionsnebelkammer

Zu Variante a

1. Expansionsnebelkammer
2. Experimentierleuchte
3. Zylinderlinse Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Becherglas (200 ml) mit Stopfen
4. Stromversorgungsgerät (400 V —)
5. Widerstand (1 MΩ)
6. Nebelkammerstrahlungsquelle (^{210}Pb)
7. Mischung aus Wasser und Äthanol im Verhältnis 1:1 (1 ml)

Zu Variante b

Geräte 4. bis 7., außerdem

8. Tageslichtschreibprojektor
9. Projektionsnebelkammer Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) 2 Plastrohre (10 cm ∅ und 13 cm ∅; 5 cm lang)
   b) 2 Piacrylplatten (15 cm × 15 cm × 0,8 cm)
   c) Gummi (15 cm × 15 cm × 0,2 cm)
   d) schwarzer Samt (35 cm × 5 cm)
   e) Draht (2 mm ∅; 80 cm lang)
   f) Filz (40 cm × 2 cm × 0,1 cm)
   g) Alleskleber
10. Vakuumpumpe
11. Vakuumschlauch mit Olive
12. Dreiwegehahn
13. Exsikkator
14. 4 Zugfedern

Methodische Hinweise

1. Nebelkammerspuren sind besonders gut geeignet, die Eigenschaften radioaktiver Teilchen eindrucksvoll zu demonstrieren. Deshalb sollte jeder Schüler mindestens einen Nebelkammerversuch gesehen haben (vgl. MB 6.0.2.).

2. Selbst die Verwendung eines geneigten Spiegels, der über der Nebelkammer angebracht wird, erhöht die Sichtbarkeit nicht so sehr, daß alle gleichzeitig die Nebelspuren beobachten können. Eine Fernsehkamera oder eine selbsthergestellte Projektionsnebelkammer beseitigen diesen Nachteil.
3. Auf Grund der Expansion (Druckänderung, Verwirbelung) ist die Länge der Spuren nicht mit der Reichweite der Teilchen identisch. Eine quantitative Auswertung ist folglich mit sehr großen Fehlern behaftet.

Variante a: Expansionsnebelkammer zur direkten Beobachtung

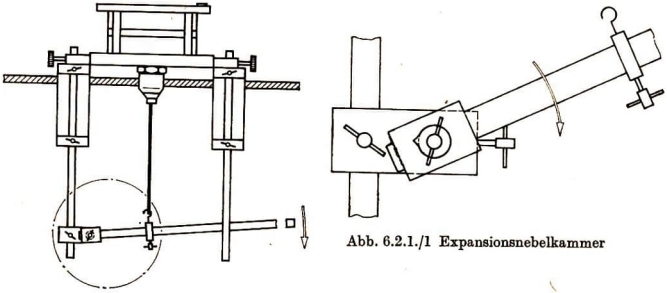


Abb. 6.2.1./1 Expansionsnebelkammer

Versuchsanordnung

Die Nebelkammer wird entsprechend der Abbildung 6.2.1./1 zusammengebaut, die Gummimembran zusammengedrückt und die radioaktive Quelle eingeschraubt. Die Ausleuchtung erfolgt am besten durch eine Zylinderlinse, die man sich aus einem Becherglas, das mit Wasser gefüllt und mit einem Stopfen verschlossen wird, selbst anfertigt. Als günstig erweist sich ein schwarzer Anstrich, der nur in der Mitte durch einen Schlitz unterbrochen ist, durch den das Licht hindurchgelassen wird.

Versuch

Zuerst wird das Kammerinnere beleuchtet. Die Ausleuchtung muß dabei in Höhe der radioaktiven Strahlungsquelle erfolgen. Nach Anlegen der Spannung (400 V —) über einen Schutzwiderstand (1 MΩ) können durch Expandieren die Nebelspuren sichtbar gemacht werden. Wenn die Kammer nicht nebelt, so gibt man wenige Tropfen der Wasser-Alkohol-Mischung in das Kammerinnere. Dabei ist darauf zu achten, daß die radioaktive Strahlungsquelle nicht benetzt wird, weil sonst die Alphateilchen absorbiert werden.

Variante b: Projektionsnebelkammer

Versuchsanordnung

Der Aufbau der Nebelkammer erfolgt nach Abbildung 6.2.1./2. Beide Rohre werden ineinandergestellt, nachdem das kleinere Rohr zwölfmal in gleichen Abständen durchbohrt wurde (∅ 1 cm). Diese Bohrungen klebt man mit Samt zu,

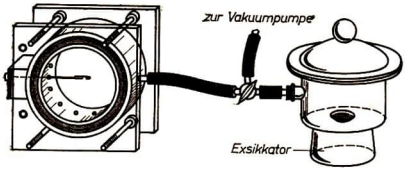


Abb. 6.2.1./2
Expansionsnebelkammer zur Projektion

so daß Luft ein- und austreten kann, aber möglichst wenige Wirbel entstehen. In den Raum zwischen beiden Rohren wird der Filzstreifen gelegt, der mit dem Wasser-Alkohol-Gemisch getränkt ist. Das äußere Rohr klebt man auf der unteren Platte fest. Die Abdichtung zur Deckplatte erfolgt mit dem Gummi, in den eine kreisförmige Öffnung von 9 cm Durchmesser geschnitten wird. Zwei Ringelektroden aus dickem Draht dienen bei angelegter Spannung zum Absaugen der Ionen. Zum Anschluß des Vakuumschlauches wird an der Außenwand eine Olive angebracht. Über einen Dreiwegehahn kann eine Vakuumpumpe an die Kammer angeschlossen werden. Die radioaktive Strahlungsquelle wird an der Außenwand der Kammer festgeschraubt.

Versuch

Die Kammer wird zunächst mit 4 Federn auf dem Tageslichtschreibprojektor befestigt. Bei der Projektion ist darauf zu achten, daß das Kammerinnere in der Höhe der radioaktiven Quelle scharf abgebildet wird.
Im Exsikkator wird mit der Vakuumpumpe ein Unterdruck von etwa $7 \cdot 10^3$ Pa $\approx$ 50 Torr erzeugt. Durch Öffnen des Dreiwegehahnes strömt die Luft aus der Kammer teilweise in den Exsikkator. In der Projektion werden die Nebelspuren sichtbar.

6.2.2. Nachweis von Alpha- und Betastrahlen sowie des Nulleffektes mit der Diffusionsnebelkammer

1. Diffusionsnebelkammer
2. Unterrichtsquellensatz oder Uranylnitrat
3. Nebelkammerstrahlungsquelle, gealterte Thoriumverbindung oder Zifferblätter mit Leuchtfarbe
4. große Optikleuchte (12 V; 50 W)
5. Stromversorgungsgerät (0 ··· 20 V ~; 4 A)

6. Zylinderlinse ⑧ (siehe V 6. 2.1.)
7. Stromversorgungsgerät (400 V —)
8. Widerstand (1 MΩ)
9. Trockeneis oder Kohlendioxidschnee
10. Fotoapparat mit empfindlichem Film (z. B. NP 27)
11. Blitzlichtgerät
12. Gummistopfen mit Bohrung (11 mm ∅)
13. Lineal
14. Mischung aus Wasser und Äthanol im Verhältnis 1:1 (1 ml)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.2.!
2. Vergleiche MH Nr. 2 V 6.2.1.!
3. Anhand vorher angefertigter Aufnahmen sollten einige typische Spuren gezeigt und physikalisch interpretiert werden. Dabei ist es empfehlenswert, auf die Bedeutung der Blasenkammer für die moderne Hochenergiephysikforschung einzugehen. (Die Blasenkammer ähnelt der Nebelkammer weitgehend.)
4. Zum Nachweis der Alphastrahlung eignet sich die Nebelkammerstrahlungsquelle, zum Nachweis der Betastrahlung die Kryptonquelle aus dem Unterrichtsquellensatz, die auf Grund der zu großen Aktivität mit einer Aluminiumlochblende von 1 mm Durchmesser abgedeckt sein muß. Dazu wird etwa 2 cm bis 3 cm über der Bodenplatte ein Loch als Schleuse in den Glaszylinder gebohrt. Die Quelle befestigt man in der Mitte des durchbohrten Gummistopfens in der Glaswand.

Versuch

Der Boden der Kammer (Abb. 6.2.2./1) wird mit Trockeneis oder Kohlendioxidschnee gekühlt. Der Filz muß mit dem Gemisch aus Alkohol und Wasser getränkt werden. Über einen Schutzwiderstand wird die Spannung (400 V —) angelegt. Der Raum wird abgedunkelt.

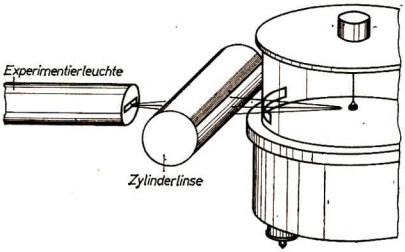


Abb. 6.2.2./1
Diffusionsnebelkammer

1. Teilversuch: Nachweis des Nulleffektes

Nachdem sich ein stabiles Temperaturgefälle ausgebildet hat, sind bereits ohne radioaktive Quelle Spuren sichtbar, die vor allem durch die Höhenstrahlung hervorgerufen werden und den Nulleffekt bilden.

2. Teilversuch: Nachweis von Alphastrahlen

Zum Nachweis der Alphastrahlung werden der Nebelkammerstrahler (^{210}Pb), Zifferblätter mit Leuchtfarbe (^{226}Ra) oder gasförmiges Thoron (^{220}Rn) durch Abpusten aus einer Plastflasche in das Kammerinnere gebracht und ein Lineal auf den Kammerboden gelegt. Die Spuren können entweder gezeichnet oder fotografiert werden (Abb. 6.2.2./2). Dabei sollte man die mittlere Länge einzelner Spuren der Alphateilchen bestimmen. Bei der Fotografie der Spuren erhält man eine scharfe

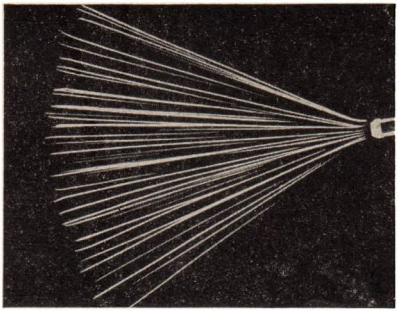


Abb. 6.2.2./2
Alphateilchenspuren

Spurzeichnung, wenn neben der kontinuierlichen Ausleuchtung ein Blitzgerät verwendet wird.
Bei einem Filmmaterial NP 27 verwendet man vorteilhaft Blende 5,6 bei einer Belichtungszeit von 1/30 s (ohne Blitzgerät).

Auswertung

Alphateilchen werden in Luft auf Grund ihrer großen Masse und Geschwindigkeit kaum abgelenkt. Gibt man die mittlere Reichweite $\overline{R}$ der Alphateilchen in Luft in Zentimetern an, so erhält man nach folgender Zahlenwertgleichung die mittlere Energie $\overline{E}$ der Teilchen in Millionen Elektronenvolt.

$$\overline{E} = 2{,}12\ \overline{R}^{2/3}\ .$$

Beispiel

Die Reichweite der Alphateilchen der Nebelkammerstrahlungsquelle wurde mit $\overline{R} = 3{,}8$ cm gemessen. Daraus ergibt sich eine Energie von $\overline{E} \approx 5{,}2$ MeV.
Der Tabellenwert für ^{210}Pb beträgt 5,4 MeV.

3. Teilversuch: Nachweis von Betastrahlen

Zum Nachweis der Betastrahlung bringt man entweder Uranylnitrat auf den Kammerboden oder steckt die Kryptonquelle mit Blende durch den Glaszylinder. Die Spuren können gezeichnet oder fotografiert werden. Sie sind im Vergleich zu Alphateilchenspuren dünner und im allgemeinen nicht geradlinig.

Bemerkung

Der Kohlendioxidschnee wird hergestellt, indem man flüssiges Kohlendioxid aus einer waagerecht liegenden CO_2-Flasche ohne Reduzierventil in einen festen Leinenbeutel, der an der Flasche befestigt ist, strömen läßt.

radioaktive Strahlung

6.3. Ionisationskammer

6.3.1. Prinzip der Ionisationskammer

1. 2 Kondensatorplatten
2. Wulf-Elektroskop
3. 2 Holtzsche Klemmen
4. Glasstab und Wollappen
5. Alphastrahler
   (z. B. mehrere Nebelkammerstrahlungsquellen ^{210}Pb)

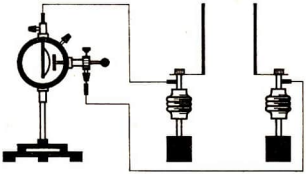


Abb. 6.3.1./1
Plattenkondensator als Ionisationskammer

Methodischer Hinweis

Vergleiche MB 6.0.3.!

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß Abbildung 6.3.1./1. Der Plattenkondensator wird mit einem geriebenen Glasstab aufgeladen. Die Ladung wird am Elektroskop angezeigt. Bringt man die Alphastrahlungsquelle zwischen die Platten, so setzt die Entladung ein, und der Elektroskopausschlag geht zurück.

Hochspannung

6.3.2. Messung des Ionisationsstromes

radioaktive Strahlung

Zu Variante a

1. Ionisationskammer
2. Stromversorgungsgerät (400 V —)
3. Demonstrationsspannungsmesser (500 V —)
4. Alphastrahler (z. B. Nebelkammerstrahlungsquelle ^{210}Pb)
5. 2 Widerstände (1 MΩ) mit Schutzkästchen
6. Gleichstrommeßverstärker mit Demonstrationsstrommesser oder Galvanometer

Zu Variante b

Geräte 1. bis 5., außerdem
7. Wulf-Elektroskop

Zu Variante c

Geräte 1. bis 5., 7., außerdem
8. Widerstand (1 MΩ)
9. Kondensator (0,1 μF; 1000 V)
10. Rundfunkgerät

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.3.!
2. Ionisationskammerströme liegen in der Größenordnung von 10^{-10} A. Man braucht deshalb hochempfindliche Meßgeräte oder Gleichstrommeßverstärker. Auch das Wulf-Elektroskop spricht auf solche geringen Ströme an. In diesem Zusammenhang können die Leistungen von Pierre und Marie Curie gewürdigt werden, die mit ähnlichen Geräten in mühevoller Kleinarbeit die Radioaktivität von Radium und Polonium nachwiesen.

Variante a: Ionisationskammer und Gleichstrommeßverstärker

1. Teilversuch

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß Abbildung 6.3.2./1. Nach angelegter Spannung (400 V —) wird zunächst die Stromstärke gemessen, ohne daß der Nebelkammerstrahler in die Ionisationskammer eingeschraubt wurde. Nach Einführen des Strahlers kommt es zu einer sichtbaren Erhöhung der Kammerstromstärke durch Ionisierung des Kammerinnern.

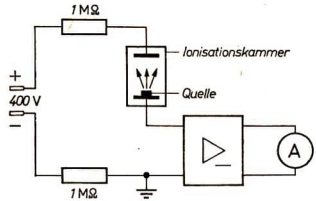


Abb. 6.3.2./1 Ionisationskammer mit Gleichstrommeßverstärker

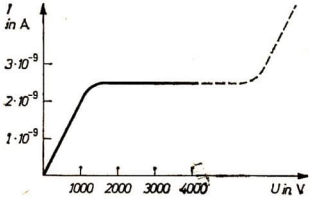
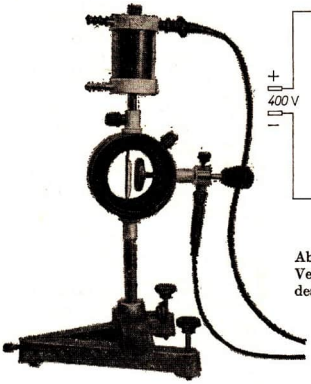


Abb. 6.3.2./2 Kennlinie einer Ionisationskammer

2. Teilversuch: Kennlinie einer Ionisationskammer

Bei eingeschraubtem Alphastrahler wird die Kammerspannung von 0 beginnend um jeweils 50 V erhöht und die dazugehörige Stromstärke gemessen. Abbildung 6.3.2./2 zeigt die erhaltene Kennlinie. Der Strom steigt bis zu einem Sättigungswert an und bleibt danach konstant.



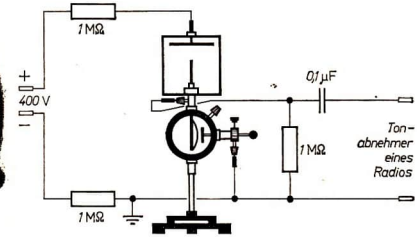


Abb. 6.3.2./4
Versuchsanordnung zum akustischen Nachweis des Ionisationsstromes

Abb. 6.3.2./3
Ionisationskammer mit Wulf-Elektroskop

Variante b: Ionisationskammer mit Wulf-Elektroskop

Wulf-Elektroskop, Ionisationskammer und Strahler werden entsprechend der Abbildung 6.3.2./3 zusammengesteckt und die Spannung (400 V —) über zwei Schutzwiderstände angelegt. Nach einiger Zeit beginnt sich das Bändchen des Elektroskops abzuspreizen.

Variante c: Akustischer Nachweis des Ionisationsstromes

Der Versuchsaufbau erfolgt ähnlich wie in Variante b nach Abbildung 6.3.2./4. Bei angelegter Spannung (400 V —) und eingeschraubtem Alphastrahler bewegt sich das Bändchen. Die Empfindlichkeit läßt sich durch Abstandsänderung der Influenzplatte verändern. Bei Entfernen des Strahlers hört die Bewegung des Bändchens auf.
Ionisationskammern haben einen sehr geringen Nulleffekt.

Bemerkung

Als günstig erweist sich der Selbstbau einer Ionisationskammer, die eine Projektion der Versuchsanordnung auf dem Tageslichtschreibprojektor ermöglicht. Sie kann aus zwei Metallelektroden (Aluminium) und einem Gehäuse (10 cm × 10 cm × 5 cm) aus Piacryl angefertigt werden.

radioaktive Strahlung

Hoch-spannung

6.4. Geiger-Müller-Zählrohr

6.4.1. Aufnahme der Kennlinie eines Geiger-Müller-Zählrohres [SE]

Zu Variante a

1. Zählrohradapter
2. elektronisches Röhrenvoltmeter
3. Zählrohr VA-Z-118, mit Aceton entlackt
4. Unterrichtsquellensatz (z. B. ^{85}Kr)
5. Zählrohrkabel

Zu Variante b

Geräte 1. bis 5., außerdem

6. Zählgerät
7. Stoppuhr

Zu Variante c

Geräte 4. und 7., außerdem

8. Zählgerät (mit Hochspannungsquelle 2000 V, Verstärker und elektronischem Zähler)
9. Zählrohr VA-Z-320

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.4.!
2. Mit Variante a kann man in einfacher Weise den Verlauf der Kennlinie qualitativ demonstrieren und zugleich die Ionisierung des Zählgases nachweisen. In den Varianten b und c wird die vollständige Aufnahme der Kennlinie eines Halogenzählrohres und eines organisch gelöschten Zählrohrs beschrieben.
3. Zählrohre dürfen nur am Metallsockel angefaßt werden.
4. In Variante a sollten vor der Versuchsdurchführung zunächst der Verlauf der Kennlinie anhand einer Abbildung beschrieben und die Begriffe Einsatzspannung, Proportionalitätsbereich, Geigerschwelle, Arbeitspunkt, Plateau und Dauerentladungsbereich erläutert werden.

Variante a: Demonstration des Verlaufs der Zählrohrkennlinie

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.4.1./1 dargestellt. Der Lautsprecher im Zählrohradapter wird eingeschaltet.

Versuch

Die Spannung wird allmählich erhöht. Die radioaktiven Teilchen zünden jeweils die Glimmentladung, die als rötliches Leuchten beobachtbar wird. Im Lautsprecher treten parallel dazu akustische Signale auf. Im Bereich der Dauerentladung erfolgt keine Löschung mehr. Bei Entfernen der radioaktiven Quelle zählt das Zählrohr weiter. Die Glimmentladung füllt das gesamte Rohr aus.

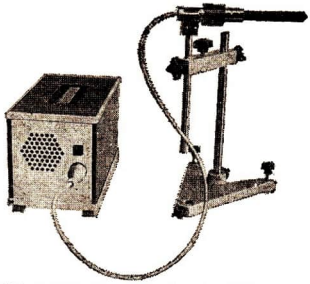


Abb. 6.4.1./1 Demonstration der Zählrohrkennlinie mit Hilfe der Glimmentladung

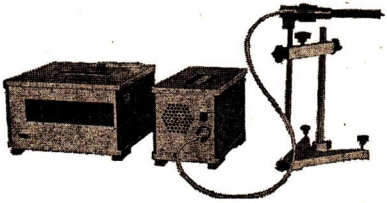


Abb. 6.4.1./2
Versuchsaufbau zur Aufnahme der Kennlinie eines Halogenzählrohres

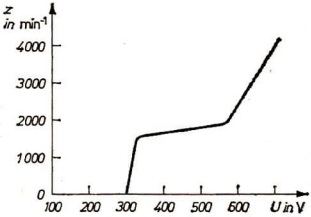


Abb. 6.4.1./3
Kennlinie des Zählrohres VA-Z-118

Variante b: Kennlinie des Zählrohres VA-Z-118

Versuch

An den Zählrohradapter wird das Zählgerät angeschlossen (Abb. 6.4.1./2). Die Zählrohrspannung wird zunächst in groben Schritten (50 V) erhöht und die Einsatzspannung bestimmt. Oberhalb der Einsatzspannung mißt man in Schritten von 25 V jeweils eine Minute lang die Zählrate. Die Meßwerte werden grafisch dargestellt. Einsatzspannung, Proportionalitätsbereich, Geiger-Schwelle, Plateau, Arbeitsspannung und der Bereich der Dauerentladung werden besonders hervorgehoben (Abb. 6.4.1./3).

Auswertung

Für Zählrohre wird die Arbeitsspannung aus der Beziehung

$$U_A = U_E + 100\ \text{V}$$

bestimmt, mit U_E = Einsatzspannung und U_A = Arbeitsspannung. Wichtiges Kriterium für die Güte eines Zählrohrs ist die Steigung des Plateaus. Für einen Plateauanstieg von 100 V wird sie wie folgt berechnet:

$$S = \frac{(z_2 - z_1) \cdot 100\,\%}{z_A} : 100\ \text{V}$$

mit z_1: Zählrate bei der Spannung $U_A - 50$ V,
z_2: Zählrate bei der Spannung $U_A + 50$ V und
z_A: Zählrate am Arbeitspunkt.

Die Steigung sollte nicht mehr als 5%/100 V betragen.

Beispiel

Für die gemessenen Zählraten von $z_1 = 1500\,\text{Imp min}^{-1}$ bei 320 V, $z_2 = 1720\,\text{Imp min}^{-1}$ bei 420 V und einer Zählrate $z_A = 1610\,\text{Imp min}^{-1}$ am Arbeitspunkt $U_A = 370$ V ergibt sich eine Steigung von

$$S = 13{,}7\,\%/100\text{ V}.$$

Das Zählrohr sollte ausgesondert werden.

Variante c: Kennlinie eines Glockenzählrohres VA-Z-320

Das Zählrohr wird an das Zählgerät angeschlossen. Man bestimmt zunächst durch Erhöhen der Spannung in Schritten von 50 V die Einsatzspannung. Sie liegt bei etwa 1000 V. Die weitere Durchführung und Auswertung erfolgt wie bei Variante b.

6.4.2. Messungen im Bereich der beschränkten Proportionalität eines Zählrohres VA-Z-320

1. Zählgerät
   (mit Hochspannungsquelle 2000 V,
   Verstärker und
   elektronischem
   Zähler)
2. Zählrohr VA-Z-320
3. Nebelkammerstrahler (^{210}Pb)
4. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co; ^{85}Kr)
5. Stoppuhr

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.4.!
2. Mit diesem Versuch soll gezeigt werden, wie man bei dem Gemischtstrahler Ra-D (^{210}Pb) nur die Alphateilchen zählen kann. Damit hat man die Möglichkeit, alle Versuche zu den Eigenschaften von Alphateilchen mit einem Gemischtstrahler durchzuführen.

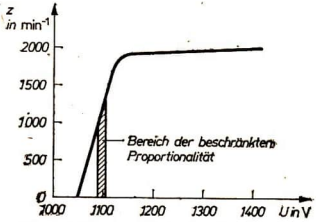


Abb. 6.4.2./1 Bereich der beschränkten Proportionalität des Zählrohres VA-Z-320

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt genau wie zum V 6.4.1., Variante c. Anhand der im V 6.4.1. aufgenommenen Kennlinie bestimmt man die Spannung für den Bereich der beschränkten Proportionalität, der sich zwischen dem Proportionalitätsbereich und der Geigerschwelle befindet (Abb. 6.4.2./1). Die Spannungseinstellung wird korrigiert, indem man die Spannung so einstellt, daß Beta- (^{85}Kr) und Gamma-

strahlung (^{60}Co) nicht registriert, aber Alphateilchen innerhalb der Reichweite (bis zu etwa 4 cm) nachgewiesen werden.

Auswertung

Alphateilchen geben auf Grund ihres großen Ionisierungsvermögens bei niedrigeren Spannungen als die Beta- und Gammastrahlung registrierbare Spannungsimpulse ab, die mit einfachen elektronischen Anordnungen gezählt werden können.

6.4.3. Oszillografischer Nachweis der Kernstrahlung

Zu Variante a

1. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohranpassungsstufe)
2. Zählrohr (VA-Z-118)
3. Demonstrationsoszillograf
4. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr)

Zu Variante b

Geräte 3. und 4., außerdem

5. Hochspannungsquelle (2000 V —)
6. Zählrohranpassungsstufe ⑧
7. Zählrohr (VA-Z-320)

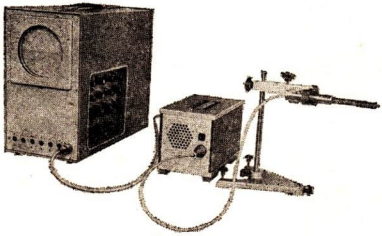


Abb. 6.4.3./1
Versuchsaufbau zum oszillografischen Nachweis der Impulse des Zählrohres VA-Z-118

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.0. und 6.0.4.!
2. Mit diesem Versuch kann bei kleinen Impulsdichten die zeitlich statistische Aufeinanderfolge der Impulse optisch sichtbar gemacht werden. Bei Verwendung eines Oszillografen mit einstellbarer Empfindlichkeit läßt sich die unterschiedliche Größe der Impulse von einem Halogenzählrohr (VA-Z-118) und einem mit organischen Dämpfen gefüllten Zählrohr (VA-Z-320) demonstrieren.

Variante a: Demonstration der Impulse eines Zählrohres VA-Z-118

Der Versuchsaufbau erfolgt entsprechend Abbildung 6.4.3./1. An das Zählrohr wird eine Spannung von 400 V gelegt. Zunächst ist der Nulleffekt des Zählrohres auf dem Oszillografenschirm beobachtbar (Abb. 6.4.3./2).
Bei Annäherung einer Strahlungsquelle (^{85}Kr) nimmt die Anzahl der Impulse und deren Amplitude bis zu einem Maximalwert zu. Die zeitlich statistische Aufeinanderfolge der Impulse ist durch den unterschiedlichen Abstand der Impulse auf dem Schirm bei geringen Impulsraten gut beobachtbar.
Die radioaktiven Teilchen erzeugen im Zählvolumen eine Ladungsträgerlawine, die einen Stromstoß bedingt, der vom Arbeitswiderstand in einen Spannungsstoß umgeformt wird.

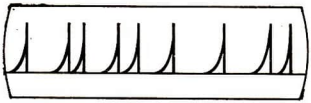


Abb. 6.4.3./2
Zählrohrimpulse auf dem Oszillografenschirm

Variante b: Demonstration der Impulse des Zählrohres VA-Z-320

Der Versuchsaufbau erfolgt analog Abbildung 6.4.3./1. Die Durchführung wird in gleicher Weise wie bei Variante a vorgenommen. Im Unterschied zum Zählrohr VA-Z-118 haben die Impulse des Zählrohres VA-Z-320 eine Amplitude von einigen Millivolt. Zu ihrem Nachweis ist ein größerer elektronischer Aufwand notwendig.

Bemerkung

Die Hochspannung von etwa 1250 V für Variante b kann man mit Hilfe eines Kaskadengenerators erzeugen (Abb. 6.4.3./3). Dabei ist darauf zu achten, daß die Widerstände und keichrichter der Kaskade gut isoliert voneinander angeordnet werden. Günstig ist ein Aufbau auf einer Plastplatte, die mit Lötösen versehen wird. Mit dem Spannungsteiler ist die Spannung kontinuierlich einstellbar. Die Zählrohranpassung kann in dasselbe Gehäuse eingebaut werden.

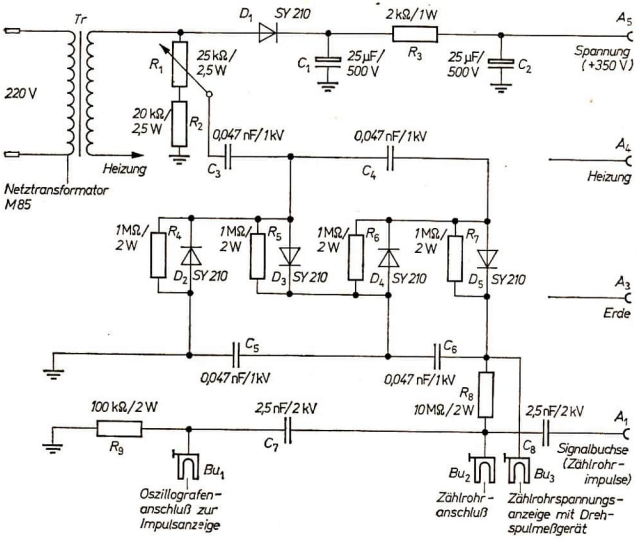


Abb. 6.4.3./3 Schaltplan des Kaskadengenerators mit Zählrohranpassungsstufe

radioaktive Strahlung

6.4.4. Tot- und Auflösungszeit eines Geiger-Müller-Zählrohres

Zu Variante a

1. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohranpassungsstufe)
2. Zählrohr (VA-Z-118)
3. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co; ^{137}Cs)
4. Stoppuhr

Zu Variante b:

Geräte 1. bis 3., außerdem

5. Demonstrationsoszillograf
6. Universalgenerator

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.4. und 6.0.0.!
2. Bei hohen Zählraten oberhalb 10000 Imp min^{-1} ist die Totzeit eines Zählrohres beobachtbar.
3. Der in Variante a beschriebene Versuch, bei dem die Summen zweier Zählraten mit der Summenzählrate zweier Quellen verglichen werden, ist zur Demonstration der Auflösungszeit eines Zählrohres geeignet.
4. Bei Verwendung eines triggerbaren Oszillografen kann man den zeitlichen Verlauf der Impulsamplituden verfolgen und die Tot- und Auflösungszeit direkt bestimmen.

Variante a: Demonstration der Auflösungszeit mit der Zwei-Quellen-Methode

Der Versuchsaufbau der Zählanordnung erfolgt in gleicher Weise wie beim V 6.4.1., Variante b. In etwa 1 cm Abstand werden zunächst die Zählraten der Quellen $^{137}Cs(z_1)$ und $^{60}Co(z_2)$ einzeln und dann gemeinsam gemessen. Die Summenzählrate z_{12} ist kleiner als die Summe der Zählraten $z_1 + z_2$. Anschließend wird bei entfernten Quellen der Nulleffekt z_0 bestimmt.

Auswertung

Der Zusammenhang zwischen wahrer Zählrate z_W, Auflösungszeit τ_A und gemessener (verlustbehafteter) Zählrate ist gegeben durch

$$\tau_A = \frac{z_W - z}{z \cdot z_W}.$$

Für zwei Quellen erhält man daraus näherungsweise

$$\tau_A = \frac{z_1 + z_2 - z^{12} - z_0}{2z_1 \cdot z_2}.$$

Beispiel

Für $z_1 = 3151$ Imp min^{-1}
$z_2 = 29304$ Imp min^{-1}
$z_{12} = 31541$ Imp min^{-1}
und $z_0 = 105$ Imp min^{-1} ergibt sich eine Auflösungszeit von

$$\tau_A = 260\ \mu s.$$

Bemerkung

Bei diesem Experiment wird nicht beachtet, daß die Totzeit sowohl von der Zählrate als auch von der Art der Strahler (^{137}Cs und ^{60}Co) abhängt.

Variante b: Oszillografischer Nachweis der Tot- und Auflösungszeit

Statt des digitalen Zählgerätes bei Variante a wird der Oszillograf so angeschlossen (Abb. 6.4.3./1), daß Zeitlinie und Impulshöhe gleichzeitig aufgezeichnet werden (Triggerung). Dadurch kann jeder einzelne Impuls in seinem zeitlichen Verlauf verfolgt werden. Der Oszillograf wird eingeschaltet und die Hochspannung an das Zählrohr gelegt. Auf dem Oszillografenschirm ist der Elektronenstrahl als Punkt abgebildet. Bei Annäherung einer radioaktiven Quelle (^{60}Co) werden Impulse auf dem Oszillografenschirm sichtbar. Das Bild wird entweder fotografiert oder mit Transparentpapier abgezeichnet. Das typische Oszillogramm ist aus Abbildung 6.4.4./1 ersichtlich. Bei gleicher Oszillografeneinstellung werden danach Rechteckimpulse des Universalgenerators einer bestimmten Frequenz auf die Y-Platten des Oszillografen gegeben. Aus der Frequenz des Generators und der Anzahl der Schwingungen zwischen den beiden ersten Impulsamplituden sind Tot- und Auflösungszeit bestimmbar.

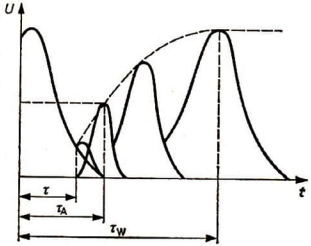


Abb. 6.4.4./1 Oszillogramm zur Bestimmung der Tot- und Auflösungszeit

Auswertung

Zwischen dem Beginn des ersten Impulses und der Amplitude des zweiten Impulses, die etwa halb so groß ist wie die Anfangsamplitude, liegen 3 Schwingungen. Die Frequenz am Universalgenerator betrug 10 kHz. Aus der Beziehung $T = \frac{1}{f}$ erhält man mit $f = 3$ kHz eine Totzeit von 330 µs.

Bemerkungen

1. Die unter Variante b beschriebene Methode der Totzeitbestimmung ist nur bei großen Impulsdichten (10000 Imp min^{-1}) anwendbar. Sie ist nicht so genau wie das in Variante a angegebene Verfahren. Die oszillografische Demonstration ist allerdings eindrucksvoller und ermöglicht ein tieferes Verständnis.
2. Die Totzeit ist von der Zählrate abhängig. Bei sehr großen Zählraten ($z > 100000$ Imp min^{-1}) wird sie unendlich, d. h., das Zählrohr zählt nicht mehr.

6.5. Szintillationszähler

6.5.1. Prinzip des Szintillationszählers

Zu Versuch 1

1. Leuchtschirm
2. Nagel

Zu Versuch 2

3. Spinthariskop

Methodische Hinweise

1. Versuche zum Szintillationsverfahren sind im Unterricht schwer durchführbar, da im völlig abgedunkelten Raum gearbeitet werden muß. Deshalb ist es ratsam, kleinere Beobachtungsgruppen zu bilden, die außerhalb der Unterrichtszeit die Experimente durchführen.
2. Als Analogieversuch zur Wirkungsweise des Spinthariskops kann man ein Experiment zur Triboluminesszenz durchführen. Hierbei entstehen wie beim Auftreffen von Alphateilchen auf einen Leuchtschirm einzelne Lichtblitze.
3. Bei der Behandlung des Spinthariskops sollte auf die mühevolle experimentelle Arbeit Rutherfords und anderer hingewiesen werden, die mit dieser primitiven Beobachtungsmethode auch heute noch bedeutsame Gesetzmäßigkeiten der Atomkerne erkundeten.

Versuch 1: Versuch zur Triboluminesszenz

Im abgedunkelten Raum setzt man die Spitze des Nagels nacheinander an verschiedenen Stellen mit leichtem Druck auf den Schirm auf. Danach bewegt man die Spitze über den Leuchtschirm. Das dunkeladaptierte Auge nimmt einzelne Lichtblitze wahr, die im letzten Falle in Form einer Leuchtspur angeordnet sind.

Versuch 2: Nachweis von Alphateilchen mit dem Spinthariskop

Das Spinthariskop besteht aus einem Zinksulfidschirm, einer Alphastrahlungsquelle ($\approx$ 3,7 kBq = 0,1 μCi), die in ihrem Abstand zum Schirm geändert werden kann, und einer Lupe (Abb. 6.5.1./1). Im Hellen bildet man zunächst mit der Lupe den Leuchtschirm ab. Danach blickt man im Dunkeln mit dem dunkeladaptierten Auge durch die Lupe. Man sieht einzelne Lichtblitze. Die Anzahl der Lichtblitze ist ein Maß für die Aktivität der Strahlungsquelle.
Durch Änderung des Abstandes ändert sich die Anzahl der Lichtblitze. Auf diese Weise kann die Reichweitekurve für Alphateilchen in Luft ermittelt werden. Man bestimmt die Anzahl der Szintillationen je Zeiteinheit und stellt sie über der Entfernung grafisch dar.

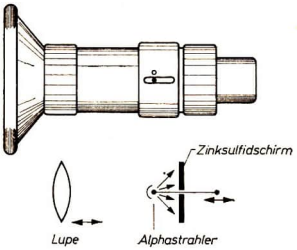


Abb. 6.5.1./1 Spinthariskop

Bemerkung

Da bei Versuch 1 der Leuchtschirm allmählich zerstört wird, sollte man entweder einen alten oder nur eine Ecke des Schirmes benutzen.

6.5.2. Spektrale Empfindlichkeit eines Fotosekundärelektronenvervielfachers

1. Hochspannungsquelle (2000 V —)
2. Stromversorgungsgerät (12 V —)
3. Szintillationszähler (z. B. VA-S-50)
4. Anpassungsstufe Ⓢ
5. Demonstrationsstrommesser (10 μA; z. B. DSD mit Meßverstärkervorsatz)
6. optische Bank (100 cm) mit 4 Reitern
7. Strahlungsthermoelement
8. Experimentierleuchte (siehe V 4.2.2.)
9. verschiedene Monochromatfilter für den ultravioletten und sichtbaren Bereich

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.5.!
2. Szintillationszähler bestehen aus Szintillationskristall und Fotosekundärelektronenvervielfacher. Fotosekundärelektronenvervielfacher sind meist im ultravioletten Spektralbereich maximal lichtempfindlich. Beim Szintillationszähler muß zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades die Frequenz des Lichts, das vom Szintillationskristall ausgesandt wird, mit der Frequenz maximaler Empfindlichkeit übereinstimmen.
3. Die Absolutbestimmung der Empfindlichkeit ist schwierig, da es keine Lichtquelle gibt, die bei allen Frequenzen den gleichen Lichtstrom abstrahlt. Deshalb muß man einen nichtselektiven Empfänger (Strahlungsthermoelement) verwenden, mit dem man das Spektrum der Lichtquelle ausmessen kann.

Versuchsanordnung

Für den verwendeten Szintillationszähler fertigt man sich eine Anpassungsstufe, die aus der Steckerbuchse für den entsprechenden Szintillationszähler und den Buchsen für die Hochspannungszuführung, 12 V Betriebsspannung und einem Ausgang für die Stromstärkemessung besteht. Zur Messung der Anodenstromstärke ist die Anodenleitung des Fotosekundärelektronenvervielfachers aufzutrennen und durch zwei Buchsen nach außen zu führen, die bei Normalbetrieb mit einer Brücke kurzgeschlossen werden können.
Leuchte, Blende, Filter und Szintillationszähler ohne Kristall werden auf der optischen Bank montiert (Abb. 6.5.2./1).
Hochspannungsquelle und Strommesser schließt man an die Anpassungsstufe an.

Versuch

Das Licht wird eingeschaltet. Die Blende wird so gewählt, daß die Empfängerfläche ausgeleuchtet und der Strom genügend groß ist. Für verschiedene Wellenlängen wird jeweils die Stromstärke gemessen. Danach wird der Fotosekundärelektronenvervielfacher gegen ein Strahlungsthermoelement ausgetauscht. Die Blende wird so verändert, daß die empfindliche Fläche des Thermoelements ausgeleuchtet ist. Die Messungen werden in gleicher Weise wiederholt. In einer gra-

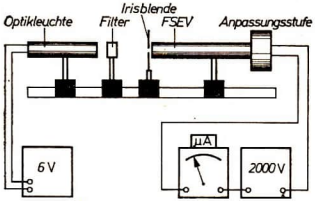


Abb. 6.5.2./1
Versuchsaufbau zur Messung der spektralen Empfindlichkeit eines FSEV

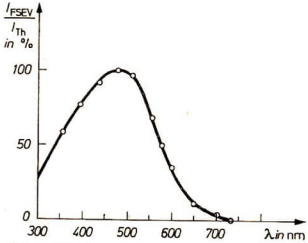


Abb. 6.5.2./2
Spektrale Empfindlichkeit des FSEV

fischen Darstellung wird das Verhältnis der Stromstärken von Fotosekundärelektronenvervielfacher und Thermoelement über der Wellenlänge aufgetragen (Abb. 6.5.2./2).

Bemerkung

Der FSEV ist ein hochempfindliches Nachweisgerät für Lichtstrahlung. Er kann bei angelegter Spannung durch eine zu große Beleuchtungsstärke zerstört werden. Deshalb sollte er mit einer Irisblende betrieben werden, die nur während der Messung geöffnet wird.

radioaktive Strahlung

Hochspannung

6.5.3. Kennlinie eines Szintillationszählers

1. Szintillationszähler (VA-S-50)
2. Hochspannungsquelle (2000 V —)
3. Breitbandlinearverstärker (z. B. VA-V-100)
4. Zählgerät (z. B. Polydigit)
5. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co)

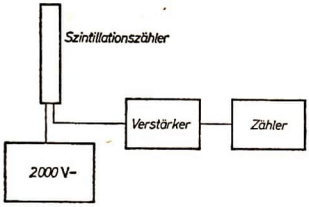
Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.5.!
2. Der Szintillationszähler ist ein robustes und sehr empfindliches Nachweisinstrument für Kernstrahlung. Durch verschiedene Szintillatoren wird er universell zum Nachweis aller Strahlenarten verwendbar. Für Alphastrahlung verwendet man Kristalle aus Zinksulfid, für Betastrahlung Stilben bzw. Anthrazen und für Gammastrahlung Natriumjodid, das mit Thallium aktiviert ist.
3. Mit dem Szintillationszähler können sowohl Teilchen gezählt als auch ihre Energie bestimmt werden. Ein Nachteil besteht in seinem hohen thermischen Eigenrauschen.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt entsprechend dem Blockschaltbild (Abb. 6.5.3./1).

Abb. 6.5.3./1
Blockschaltbild zur Aufnahme der Kennlinie eines Szintillationszählers



Zunächst wird ohne radioaktive Quelle die Rauschkennlinie aufgenommen. Dazu wird die Hochspannung um jeweils 50 V erhöht und die Zählrate jeweils 1 min lang gemessen. Danach wird die gleiche Kennlinie noch einmal, diesmal aber mit radioaktiver Quelle vor dem Szintillationskristall, aufgenommen.

Auswertung

Der Arbeitspunkt des Szintillationszählers ergibt sich nicht in gleicher Weise wie beim Geiger-Müller-Zählrohr. Er wird bestimmt, indem man das Verhältnis von Zählrate mit radioaktiver Quelle und Zählrate ohne Quelle für jede Spannung bildet und den Maximalwert bestimmt. Die Spannung, für die man ein maximales Verhältnis errechnet, ist die Arbeitsspannung des Szintillationszählers. Sie sollte, ähnlich wie beim Geiger-Müller-Zählrohr, im ersten Drittel des Plateaus liegen Abb. 6.5.3./2).

Bemerkung

Für die gewählte Quelle muß ein geeigneter Szintillationskristall verwendet werden. Beim Auswechseln des Kristalls ist darauf zu achten, daß ein guter optischer Kontakt zwischen Kristall und Eintrittsfenster mit Hilfe von Lichtleitpaste hergestellt wird.

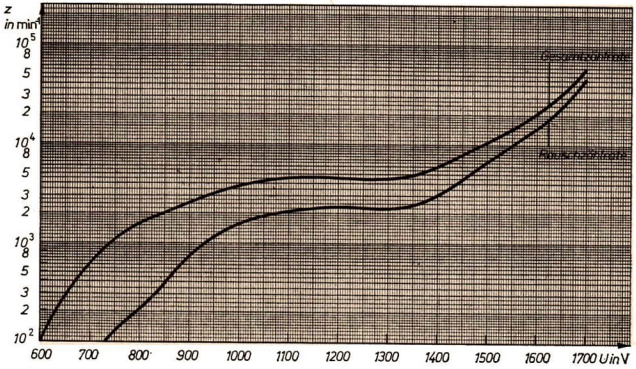


Abb. 6.5.3./2 Zähl- und Rauschkennlinie eines Szintillationszählers

6.5.4. Vergleich der Gammastrahlungsempfindlichkeit des Szintillationszählers mit der des Zählrohres

1. Szintillationszähler (z. B. VA-S-50 mit Anthrazen-Kristall)
2. Hochspannungsquelle (1000 V —)
3. Breitbandlinearverstärker (z. B. VA-V-100)
4. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
5. Unterrichtsquellensatz (^{137}Cs)
6. Fensterzählrohr(z. B. BOH-41)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MB 6.0.5.!

Versuch

Der Aufbau des Versuchs erfolgt in gleicher Weise wie beim V 6.5.3. Zuerst wird im Abstand von etwa 3 cm die Zählrate der ^{137}Cs-Quelle mit dem Szintillationszähler gemessen. Die Arbeitsspannung des Szintillationszählers entnimmt man aus V 6.5.3. Danach wird unter gleichen geometrischen Bedingungen die Zählrate mit dem Zählrohr bestimmt. Die Arbeitsspannung des Zählrohres wird nach V 6.4.1., Variante c, festgelegt.

Beispiel

Die Zählrate mit dem Szintillationszähler ergab 38039 Imp min^{-1}. Das Zählrohr registriert unter gleichen geometrischen Verhältnissen nur 3% der Zählrate des Szintillationszählers.

6.6. Halbleiterdetektor

6.6.1. *I-U*-Sperrkennlinie eines Halbleiterdetektors

1. Halbleiterdetektor (z. B. 70300)
2. Stromversorgungsgerät (40 V —)
3. Demonstrationsspannungsmesser (50 V —)
4. Demonstrationsstrommesser (10 µA; z. B. DSD mit Meßverstärkervorsatz)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 6.0.6.!
2. Halbleiterdetektoren dürfen nur in Sperrichtung betrieben werden.
3. Die Schüler können darauf hingewiesen werden, daß die Kennlinie eines Halbleiterdetektors einen ähnlichen Verlauf wie die eines Flächengleichrichters hat.

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 6.6.1./1. Für den Anschluß des Halbleiterdetektors fertigt man sich ein entsprechendes Kabel an, das an dem einen

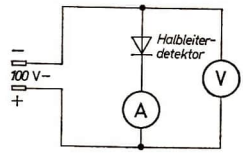


Abb. 6.6.1./1 Schaltplan zur Aufnahme der I-U-Kennlinie

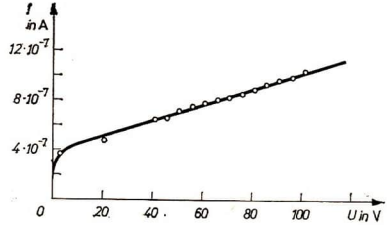


Abb. 6.6.1./2 I-U-Kennlinie des Halbleiterdetektors

Ende den Anschluß des Halbleiterdetektors ermöglicht und bei dem am anderen Ende zwei Bananenstecker befestigt sind.

Versuch

Aus dem Datenblatt entnimmt man Polung und Maximalwerte für Stromstärke und Spannung. Die Spannung wird um jeweils 5 V erhöht und die zugehörige Stromstärke gemessen. Die erhaltenen Meßwerte werden grafisch dargestellt (Abb. 6.6.1./2).

6.6.2. Bestimmung der Sperrschichtdicke eines Halbleiterdetektors

1. Halbleiterdetektor (z. B. 70300)
2. spannungsempfindlicher Vorverstärker für Halbleiterdetektoren
3. Stromversorgungsgerät (40 V —)
4. Demonstrationsoszillograf
5. Universalgenerator
6. verschiedene Kondensatoren mit Kapazitäten im Bereich von 10 pF bis 200 pF

Methodische Hinweise

1. Die Dicke der Sperrschicht von Halbleiterdetektoren ist entscheidend für ihre Anwendungsmöglichkeiten. Zum Nachweis der Alphastrahlung genügt eine Sperrschichtdicke von einigen Mikrometern, zum Nachweis der Gammastrahlung von etwa einem Millimeter.
2. An einer Eichkurve, bei der der Einfluß der Eingangskapazität auf die Amplitude eines konstanten Eingangssignals dargestellt ist, kann die Kapazität des verwendeten Halbleiterdetektors bestimmt werden.
   Unter der Annahme, daß die Gleichung für den Plattenkondensator auf den Halbleiterdetektor angewendet werden kann, ist es dann möglich, die Dicke der Sperrschicht des Detektors zu berechnen.

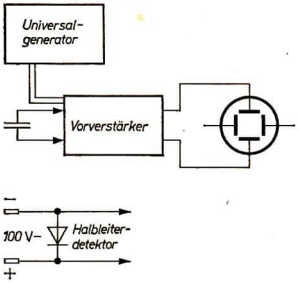


Abb. 6.6.2./1 Blockschaltbild zur Aufnahme der C-U_{Imp}-Kennlinie

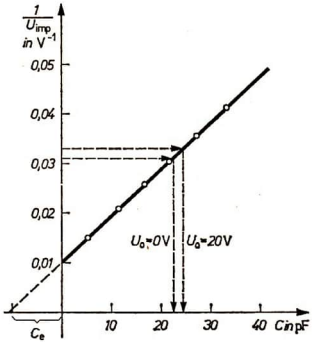


Abb. 6.6.2./2 C-U_{Imp}-Kennlinie zur Bestimmung der Detektorkapazität

Versuchsanordnung

Vorverstärker, Universalgenerator und Oszillograf werden entsprechend der Abbildung 6.6.2./1 angeschlossen.

Versuch

Die Impulsamplituden einer festen Frequenz werden so groß gewählt, daß sie bei einer entsprechenden Oszillografeneinstellung in voller Größe unter Ausnutzung des gesamten Bildschirms abgebildet werden. Danach wird die Amplitude in Volt gemessen. Anschließend bestimmt man die Impulshöhen in Abhängigkeit von den Kapazitäten der Kondensatoren, die anstelle des Detektors an den Vorverstärker angeschlossen werden. Daraus erhält man die Eichkurve, wenn man den reziproken Wert der Impulsamplituden als Funktion der Kapazität darstellt (Abb. 6.6.2./2). Danach wird der Detektor angeschlossen, und es werden die Impulsamplituden ohne und mit angelegter Detektorspannung gemessen.

Auswertung

Aus den gemessenen Impulshöhen ohne und mit Detektorspannung wird die jeweilige Kapazität mit der C-U_{Imp}-Kennlinie bestimmt. Mit der Gleichung

$$d = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{C}$$

kann man die Sperrschichtdicke berechnen.
Dazu entnimmt man aus dem Datenblatt des Detektors den Stoff des Detektors (meist Silizium) und den Flächeninhalt A der Sperrschicht. Es ergibt sich, daß mit zunehmender Detektorspannung die Sperrschichtdicke größer wird. Die Kapazität des Vorverstärkers erhält man durch Extrapolation der Kennlinie bis zur

C-Achse. Die „negativen Kapazitäten" entsprechen der Kapazität des Vorverstärkers.

Beispiel

Aus der Abbildung 6.6.2./2 entnimmt man folgende Werte:

$$U_1 = 0; \qquad C_1 = 22\ \text{pF}$$
$$U_2 = 20\ \text{V}; \qquad C_2 = 24\ \text{pF}$$
$$C_e = 11\ \text{pF}$$

Für $A = 8\ \text{mm}^2$, $\varepsilon_0 = 8{,}80 \cdot 10^{-12}\ \text{A s V}^{-1}\ \text{m}^{-1}$ und $\varepsilon_{Si} = 11{,}8$ erhält man damit die Sperrschichtdicken

$$d_1 = 38\ \mu\text{m} \quad \text{und} \quad d_2 = 35\ \mu\text{m}.$$

Für die Kapazität des Vorverstärkers erhält man 11 pF.

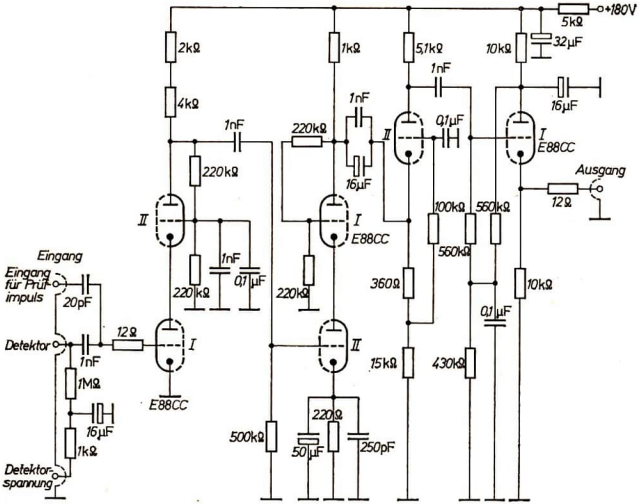


Abb. 6.6.2./3 Spannungsempfindlicher Vorverstärker für Halbleiterdetektoren

7. Eigenschaften der Strahlenarten

7.0. Methodische Bemerkungen

7.0.1. In der Mikrophysik werden gesetzmäßige Zusammenhänge vor allem durch statistische Gesetze erfaßt. Das gilt in besonderem Maße für die Kernphysik, aber auch für die Physik der Atomhülle und für den Welle-Teilchen-Dualismus der Mikroobjekte. Die Versuche des Abschnitts 7.1. haben daher auch wichtige Bezüge zum Kapitel 9.
Eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis statistischer Zusammenhänge ist die Kenntnis der Begriffe „Häufigkeit" bzw. „relative Häufigkeit". Ebenso sollten die Schüler erfahren, daß die relative Häufigkeit zufälliger Ereignisse weitgehend stabil sein kann und daß daraus die Möglichkeit einer statistischen Erklärung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs folgt.
Im allgemeinen leuchtet es den Schülern nur schwer ein, daß zufällige Ereignisse dennoch zu sicheren und vorhersagbaren statistischen Gesetzmäßigkeiten führen. Es ist deshalb zu empfehlen, den Zusammenhang von Zufall und Notwendigkeit am Beispiel einiger möglichst einfacher und überschaubarer Realversuche zu demonstrieren. In diesem Abschnitt werden einige Versuche zur Demonstration von Häufigkeitsverteilungen beschrieben. Sie können leicht durch weitere Versuche, wie Münzenwerfen, Würfeln, Kartenziehen usw., ergänzt werden. Zur Einführung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs ist besonders der einfache Versuch des Werfens einer Münze geeignet. Als Hausaufgabe wirft jeder Schüler z. B. 100mal eine Münze und notiert, wie häufig dabei das zufällige Ereignis „Zahl liegt oben" auftritt. Im Unterricht werden dann die relativen Häufigkeiten H des betrachteten Ereignisses für $N = 100$, $N = 200$, $N = 300$ ... Würfe berechnet. In einem Diagramm wird H über der jeweiligen Gesamtzahl N der ausgewerteten Würfe aufgetragen (Abb. 7.0.1./1).

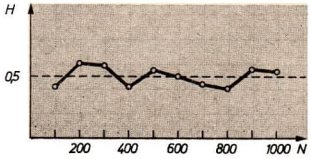


Abb. 7.0.1./1 Häufigkeitsverteilung beim Münzwerfen

Der Versuch zeigt sehr deutlich, daß nach einer größeren Anzahl von Würfen die relative Häufigkeit weitgehend stabil bleibt und nur geringfügig um den Wert $H = 0{,}5$ schwankt. Diese Schwankungen werden mit zunehmender Anzahl von Würfen kleiner. Anhand dieser Ergebnisse kann dann eine vereinfachte, aber für den Physikunterricht ausreichende statistische Erklärung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs gegeben werden.
Häufigkeitsverteilungen können am Beispiel von Trefferverteilungen (V 7.1.1.) oder mit dem Galtonschen Nagelbrett (V 7.1.2.) demonstriert werden. Besonders am Galtonbrett ist die weitgehende Stabilität der Häufigkeitsverteilungen bei mehrfacher Versuchswiederholung ohne größeren Zeitaufwand demonstrierbar. Gleichzeitig weisen die geringen Abweichungen der bei den einzelnen Versuchen erhaltenen Verteilungen darauf hin, daß bei statistischen Gesetzmäßigkeiten stets auch Schwankungen auftreten.
Ein wichtiges Beispiel für das Auftreten gesetzmäßiger Verteilungen in der Kernphysik ist die Verteilung der Zählraten beim Registrieren radioaktiver Strahlung (V 7.1.3.). Ein Anwendungsbeispiel aus dem Stoffkomplex „Welle-Teilchen-Dualismus" ist die Verteilung der Photonenhäufigkeit bei einem Interferenzversuch (V 9.3.1.).

7.0.2. Experimente zur Bestimmung der Halbwertszeit vermitteln die Kenntnis einer der wichtigsten Kenngrößen von Radionukliden. Sie sind weiterhin ein wesentliches Beispiel für statistische Gesetzmäßigkeiten im Bereich der Kernphysik. Bei der Versuchsauswertung sollte betont werden, daß für die Lebensdauer des einzelnen Kerns lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich sind. Dennoch führt die außerordentlich große Anzahl von Atomen, die in einer Quelle enthalten sind, zu gesetzmäßigen Zerfallskurven und zu einer für das betreffende Nuklid konstanten Halbwertszeit.

7.0.3. Versuche zur Aktivitätsbestimmung machen die Schüler mit einer wichtigen Meßmethode der Kernphysik vertraut. Sie sind bei quantitativer Auswertung vor allem für Arbeitsgemeinschaften geeignet. Dabei ist eine ausreichende Klärung der Größe Aktivität sowie deren Einheiten Becquerel (Bq) und Curie (Ci) vorzunehmen. Aktivitätsangaben beziehen sich auf die Anzahl von Atomkernen, die sich je Zeiteinheit umwandeln. $1\ \mathrm{Bq} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$ ($1\ \mathrm{Ci} = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ \mathrm{Bq}$).

7.0.4. Der Einsatz von mechanischen Modellversuchen zur Veranschaulichung von Kernprozessen kann das Verständnis dieser Vorgänge wesentlich erleichtern. Allerdings müssen dabei die Grenzen dieser vereinfachenden Betrachtungsweise sorgfältig beachtet und nach Möglichkeit auch den Schülern bewußtgemacht werden.

7.0.5. Mit V 7.5.1. beginnt die Darstellung von Versuchen zur Spektroskopie im Bereich der Kernphysik am Beispiel der Alphastrahlung. Sie wird in Abschnitt 7.6. mit der Beta- und in Abschnitt 7.7. mit der Gammaspektroskopie fortgesetzt. Die Spektroskopie der Kernstrahlung ist zur Zeit für den Physikunterricht noch wenig erschlossen. Das liegt vor allem an den aufwendigen Versuchsapparaturen (z. B. Impulshöhenanalysatoren). Deshalb wird auf einfachere Anordnungen orientiert. Das gilt besonders für die Methode der Graukeil-Spektroskopie (V 7.5.1., Variante a), die nicht nur bei der Alpha-, sondern auch bei der Beta- und Gammastrahlung angewendet werden kann.
Spektroskopische Versuche ermöglichen es, auch die Kernphysik stärker mit energetischen Betrachtungen zu durchdringen. Sie zeigen ferner wesentliche Analogien zur Physik der Atomhülle. In der Kern- und in der Hüllenphysik erfolgt die Deutung spektroskopischer Versuche unter Verwendung von diskotinuierlichen Ener-

gieniveauschemata. Anschauliche Vorstellungen vom Atomaufbau treten auch im Schulunterricht mehr in den Hintergrund. So werden bei der Atomhülle die „Elektronenschalen" weitgehend mit den Energiestufen gleichgesetzt und dadurch von den Bohrschen Vorstellungen gelöst. Die gleiche Gedankenführung ist auch für das Verständnis der Kernphysik wesentlich. Der Kern ist keine einfache Addition von Protonen und Neutronen. Die anschaulich schwer faßbare Struktur eines Kerns äußert sich in entscheidender Weise in seinen möglichen Energiezuständen.

Die Energie der Alphastrahlung ist weitgehend monoenergetisch und entspricht einem Linienspektrum mit einigen eng benachbarten Linien. Das deutet auf Übergänge zwischen diskreten Kernenergieniveaus des primären Kerns und des Folgekerns hin. Diese Deutung ist auch auf mittlerer Stufe des Physikunterrichts möglich. Der Zusammenhang zwischen der Energie der Alphastrahlung und der Halbwertszeit des betreffenden strahlenden Nuklids (Geiger-Nuttallsche Beziehung) und seine Erklärung durch den Tunneleffekt kann dagegen frühestens im Abiturstufenunterricht behandelt werden.

Bei den Versuchen zur Absorption der Alphastrahlung in Gasen (V 7.5.2.) sollte nach Möglichkeit auch auf die Elementarprozesse eingegangen werden, die zum Energieverlust der Alphateilchen führen (Ionisationsbremsung).

7.0.6. In V 7.6.1. und 7.6.2. werden Varianten zur Betaspektroskopie dargestellt. Zur allgemeinen Bedeutung spektroskopischer Untersuchungen vergleiche MB 7.0.5. Das Betaspektrum ist, im Unterschied zum Alphaspektrum, kontinuierlich. Außerdem sind die vom Kern emittierten Elektronen nicht im Kern enthalten. Beide Sachverhalte erschweren die Deutung des Betaspektrums. Auf mittlerer Niveaustufe kann das Auftreten der Betastrahlung mit der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton erklärt werden $n \rightarrow p + e$. Der Zusammenhang mit den Kernenergieniveauschemata wird in diesem Fall mit der im Betaspektrum auftretenden Maximalenergie hergestellt. Sie entspricht der Differenz der Energiestufen der beteiligten Kerne. Die Erklärung der unterhalb der Maximalenergie liegenden Teile des Betaspektrums ist allenfalls im Abiturstufenunterricht möglich.

Bei der Betaabsorption fällt die Strahlungsflußdichte exponentiell mit der Dicke der durchstrahlten Schicht ab, während bei der Alphastrahlung die Teilchenflußdichte zunächst fast konstant bleibt und dann plötzlich auf Null abfällt. Die Deutung dieser Erscheinungen folgt unmittelbar aus dem monoenergetischen Charakter der Alphastrahlung und aus dem kontinuierlichen Charakter des Betaspektrums. Es ist nützlich, auf diese Zusammenhänge bei Experimenten zur Alpha- bzw. Betaabsorption einzugehen.

Versuche zur Ablenkung im Magnetfeld (V 7.6.5.) sind mit Elektronenstrahlung wesentlich einfacher als mit Alphastrahlung und daher diesen vorzuziehen.

7.0.7. Bei der Gammaspektroskopie (V 7.7.1.) werden die Analogien zur Photonenemission aus der Atomhülle besonders deutlich, da sich hier Übergänge zwischen Energiestufen des gleichen Kerns abspielen. Der Hinweis auf diese Analogien erleichtert den Schülern das Verständnis der Gammaspektroskopie.

Bei der Gammaabsorption und Streuung der Gammaquanten (V 7.7.2. und 7.7.4.) sollten wieder im Rahmen der verfügbaren physikalischen Vorleistungen die Elementarprozesse erläutert werden (Fotoeffekt bei geringen, Comptoneffekt bei mittleren und zusätzlich Paarbildung bei hohen Energien der Gammaquanten). Es sollte auch darauf geachtet werden, daß keine Verwechslungen zwischen der

(relativ großen) Energie der einzelnen Gammaquanten und der (relativ geringen) Gesamtenergie der von einem in der Schule verwendeten Gammastrahler emittierten Gammastrahlung auftreten.

7.1. Demonstration von Häufigkeitsverteilungen

7.1.1. Trefferverteilung mit dem Wurfgerät

1. Wurfgerät mit Geschoß
2. flache Kiste mit Sand (Grundfläche 40 cm × 80 cm)
3. Meßband

Methodische Hinweise

1. Bei diesem Versuch werden die Trefferhäufigkeiten als Funktion des Ortes ermittelt. Er bereitet daher an einem eindimensionalen Beispiel auf die Häufigkeitsverteilung von Mikroobjekten z. B. bei Interferenzversuchen (vgl. 9.3.1). vor.
2. Wegen des Zeitaufwandes ist anzuraten, den Versuch außerhalb des Unterrichts von einigen interessierten Schülern durchführen zu lassen. Im Unterricht wird nur das Versuchsprinzip demonstriert. Anschließend werden die Ergebnisse der Schüler ausgewertet.

Versuch

Das Wurfgerät wird mit einem Anstellwinkel von 45° betrieben. Bei der Vorbereitung des Versuchs wird zunächst die ungefähre mittlere Wurfweite bei dem gewählten Geschoß ermittelt. Die Sandkiste wird so aufgestellt, daß ihre Mitte diesen Abstand vom Wurfgerät hat.
Mit dem Wurfgerät wird dann bei konstant gehaltener Federspannung eine größere Anzahl von Würfen ausgeführt. Der Bereich, in dem die Treffer liegen, wird in mehrere gleich große Streckenintervalle (Klassen) eingeteilt. Es wird die Anzahl der Treffer für jedes Intervall ermittelt. Sie wird grafisch über den (mittleren) Abstand des jeweiligen Intervalls vom Wurfgerät aufgetragen. Bei genügend großer Anzahl von Würfen tritt eine glockenförmige Verteilung auf.

7.1.2. Verteilungen am Galtonschen Nagelbrett

1. Galtonsches Nagelbrett
2. 100 Kugeln

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sollen in erster Linie zeigen, daß sich trotz zufälliger, im einzelnen nicht vorhersagbarer Bewegung der Kugeln eine annähernd konstante Ver-

teilung der Kugeln auf die verschiedenen Auffangfächer einstellt. Sie eignen sich deshalb besonders zur Einführung bzw. Vertiefung der Begriffe „relative Häufigkeit" und „Wahrscheinlichkeit". Bei einer genügend großen Gesamtzahl N von Kugeln weist die relative Häufigkeit $H_k = N_k/N$ (N_k ist die Anzahl der im k-ten Auffänger eingetroffenen Kugeln) des zufälligen Ereignisses, daß eine Kugel im Auffänger k eintrifft, eine weitgehende Stabilität auf. Der Wert von H_k kann in diesem Fall (vereinfacht) als Wahrscheinlichkeit für dieses zufällige Ereignis interpretiert werden.

2. Bei ausreichenden mathematischen Vorkenntnissen kann darüber hinaus gezeigt werden, daß der Erwartungswert für die Füllung der einzelnen Fächer mit der Wahrscheinlichkeitsrechnung berechnet werden kann. Beim Galtonschen Nagelbrett sind die Nägel so eingesetzt, daß der Abstand von zwei benachbarten Nägeln durch den jeweils darüber liegenden Nagel im Verhältnis $p:(1-p)$ geteilt wird. Jede Kugel, die durch die Nagelreihen läuft, hat die Möglichkeit, beim Auftreffen auf einen Nagel nach rechts oder links abgelenkt zu werden, und zwar mit der Wahrscheinlichkeit p bzw. $(1-p)$. Die daraus resultierende Wahrscheinlichkeit $P_n(k)$, daß eine Kugel nach Durchlaufen von n Nagelreihen im Fach k eintrifft, genügt einer Binomialverteilung

$$P_n(k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} .$$

Durchlaufen insgesamt N Kugeln die Nagelreihen, so sind im k-ten Auffänger $N \cdot P_n(k)$ Kugeln zu erwarten. Ist N genügend groß, so nähert sich die tatsächliche Anzahl von Kugeln diesem Erwartungswert meist weitgehend an. Die Füllung der Fächer zeigt dann angenähert die Binomialverteilung als Säulendarstellung.

Versuch 1: Relative Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit

Zunächst läßt man einzelne Kugeln in größerem Zeitabstand über das Nagelbrett laufen, so daß die Schüler den zufälligen Charakter des Bewegungsablaufs erkennen. Anschließend läßt man eine kleinere Anzahl von Kugeln (etwa 10) mehrfach über das Nagelbrett laufen und notiert jeweils die Anzahl der in den einzelnen Auffängern eingetroffenen Kugeln. Die Verteilungen erweisen sich als recht verschieden. Eine Gesetzmäßigkeit ist nicht zu erkennen. Dann wird eine größere Anzahl von Kugeln (etwa 100) unter gleichen Bedingungen zwei- bis dreimal durch das Nagelbrett geschickt und die jeweilige Verteilung auf die Auffänger registriert. Die Häufigkeitsverteilungen gleichen sich trotz gewisser Unterschiede weitgehend. Nun dividiert man die Häufigkeiten der Kugeln in den einzelnen Auffängern durch die Gesamtzahl der Kugeln. Man erhält so die relativen Häufigkeiten. Sie erweisen sich bei einer genügend großen Gesamtzahl von Kugeln als annähernd konstant. Die relativen Häufigkeiten nähern sich mit wachsender Anzahl der zufälligen Ereignisse (hier: zufälliges Eintreffen in einem bestimmten Auffänger) einem bestimmten Wert. Er entspricht der Wahrscheinlichkeit für dieses zufällige Ereignis.

Versuch 2: Berechnung und experimentelle Überprüfung der Wahrscheinlichkeitsverteilung

Eine Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung nach der angegebenen Beziehung für $P_n(k)$ ist im allgemeinen im Physikunterricht auf Grund fehlender

mathematischer Vorkenntnisse nicht möglich. Sie gelingt aber durch elementare Überlegungen, wenn nur eine kleine Anzahl von Nagelreihen berücksichtigt wird, z. B. nur zwei. Dazu werden die drei untersten Nagelreihen so eingestellt, daß $p = 1/2$ ist, d. h. daß der Abstand zweier benachbarter Nägel durch den darüber befindlichen im Verhältnis $1/2:1/2 = 1:1$ geteilt wird. Eine Kugel wird in der dritten Nagelreihe von unten zwischen zwei Nägeln gehalten und auf den darunter liegenden Nagel fallengelassen. Die Kugel wird von diesem Nagel mit gleicher Wahrscheinlichkeit $p = 1/2$ nach links oder rechts abgelenkt. Trifft sie auf einen Nagel in der untersten Reihe, so wird sie wieder mit gleicher Wahrscheinlichkeit $p = 1/2$ nach links oder rechts abgelenkt. Aus dieser einfachen Überlegung folgt, daß die Kugel im Fach $k = 0$ mit der Wahrscheinlichkeit $P(0) = 1/2 \cdot 1/2 = 1/4$, im Fach $k = 1$, das von zwei Nägeln aus erreicht werden kann, mit $P(1) = 1/4 + 1/4 = 1/2$ und im Fach $k = 2$ mit $P(2) = 1/4$ eintreffen wird (vgl. Abb. 7.1.2./1). Die Summe der Wahrscheinlichkeiten ist $1/4 + 2/4 + 1/4 = 1$, d. h. die Kugel trifft sicherlich in einem der Fächer $k = 0$, $k = 1$ oder $k = 2$ ein.

Läßt man eine größere Anzahl von Kugeln (etwa 40) in der beschriebenen Weise unter gleichen Bedingungen über die beiden untersten Nagelreihen laufen, so verhalten sich die Häufigkeiten in den drei Auffängern entsprechend den vorherberechneten Wahrscheinlichkeiten annähernd wie 1:2:1. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung kann die Häufigkeitsverteilung zufälliger Ereignisse annähernd vorhergesagt werden.

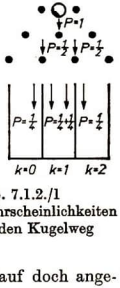


Abb. 7.1.2./1
Wahrscheinlichkeiten für den Kugelweg

Versuch 3: Gauß-Verteilung und Poisson-Verteilung

Die Binominalverteilung geht für den Grenzfall $n \to \infty$ und für $p = 1/2$ in die Gauß-Verteilung, für $n \to \infty$ und $p \to 0$ in die Poisson-Verteilung über. Die Anzahl der Nagelreihen n kann beim Galton-Brett nicht beliebig vergrößert werden. Die Verteilungen können aber in ihrem charakteristischen Verlauf doch angenähert demonstriert werden.

Die Nagelreihen werden zunächst so eingestellt, daß der Abstand zweier benachbarter Nägel durch den darüber liegenden im Verhältnis $1/2:1/2 = 1:1$ geteilt wird. Es werden alle verfügbaren Nagelreihen genützt. Etwa 100 Kugeln durchlaufen das Nagelbrett und zeigen in den Auffängern annähernd den glockenförmigen Verlauf der Gauß-Verteilung (Abb. 7.1.2./2). Nun werden die Nagelreihen so eingestellt, daß der Abstand zweier benachbarter Nägel durch den darüber liegenden etwa im Verhältnis $0{,}2:0{,}8 = 1:4$ geteilt wird. Durchläuft eine größere Anzahl von Kugeln die Nagelreihen, so ist das Maximum ihrer Häufigkeitsverteilung gegenüber der Gauß-Verteilung deutlich nach einer Seite verschoben. Die Verteilung entspricht annähernd einer Poisson-Verteilung (Abb. 7.1.2./3).

Bemerkung

Ein Galtonsches Nagelbrett kann gemäß Abbildung 7.1.2./2 hergestellt werden. Der Abstand je zweier benachbarter Nägel soll um etwa 10% größer sein als der Durchmesser der verwendeten Kugeln. Gleiches gilt für den Abstand zweier benachbarter Nagelreihen. Die aufeinanderfolgenden Nagelreihen enthalten 1, 2, 3 ... n Nägel. Unter der letzten Nagelreihe befinden sich $(n + 1)$ Auffangfächer. Es sollten mindestens 10, besser jedoch 14 oder 16 Nagelreihen angebracht werden. Die Auffangfächer sollen so lang sein, daß in einem Fach mindestens 20 Kugeln übereinander Platz finden. Es ist zweckmäßig, die erste Nagelreihe mit

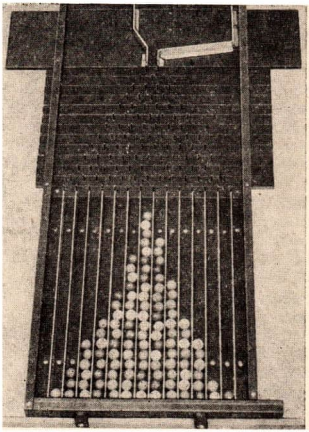


Abb. 7.1.2./2
Gauß-Verteilung am Galtonbrett

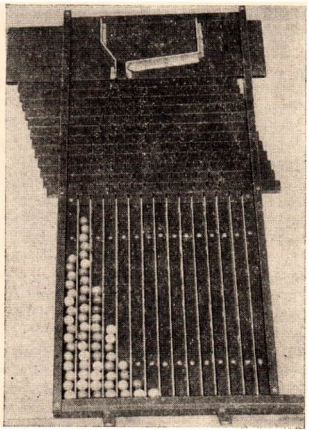


Abb. 7.1.2./3
Poisson-Verteilung am Galtonbrett

nur einem Nagel wegzulassen und die Kugeln zwischen den beiden Nägeln der folgenden Reihe hindurch dem Nagelbrett zuzuleiten, wie es in Abbildung 7.1.2./2 dargestellt ist. Dann durchlaufen alle eingegebenen Kugeln das Nagelbrett, während sonst ein größerer Teil am ersten Nagel so stark seitlich abgelenkt wird, daß er aus dem statistischen Prozeß ausscheidet. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Nägeln wird jeweils durch den darüber befindlichen Nagel im Verhältnis $p:(1-p)$ geteilt. Bei einer Normalverteilung (Gauß-Verteilung) wird $p = 1/2$. Das Teilungsverhältnis beträgt dann 1:1. Soll mit dem Galton-Brett auch die Poisson-Verteilung dargestellt werden, so müssen die Nägel auf Leisten angebracht werden, die gegeneinander verschiebbar sind.

Als Kugeln können Spielkugeln (Murmeln) Verwendung finden. Dazu werden aus einer größeren Menge 100 mit annähernd gleichem Durchmesser ausgesucht.

radioaktive Strahlung

7.1.3. Experimentelle Bestimmung der Gaußverteilung durch Zählrohrmessungen

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohranpassungsstufe)
3. Unterrichtsquellensatz (z. B. ^{137}Cs)
4. Stoppuhr
5. Abschirmkammer oder 3 Eisenplatten (30 cm × 15 cm × 0,5 cm)
6. Zählrohrkabel

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 7.0.1.!
2. Bei diesem Versuch wird eine ideale, d. h. fehlerfrei arbeitende Meßapparatur vorausgesetzt. Unter dieser Bedingung sind alle Schwankungen der Zählrate in gleichen Zeitabschnitten durch die Statistik des radioaktiven Zerfalls interpretierbar. Diese Verhältnisse können praktisch dadurch angenähert werden, daß man die Spannungen stabilisiert, ein einwandfrei arbeitendes Zählrohr benutzt und den Abstand Zählrohr — Quelle nicht verändert. Unter diesen Bedingungen folgt die Verteilung der Zählraten einer Gauß-Funktion.

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau erfolgt in gleicher Weise wie beim V 6.4.1., Variante b. Die Arbeitsspannung des Zählrohres wird ebenfalls dort entnommen. Die Geräte werden eine halbe Stunde vor Beginn des Versuches eingeschaltet. Da der Versuch längere Zeit dauert, muß unbedingt auf die Abschirmung der Strahlen geachtet werden. Wenn keine Abschirmkammer vorhanden ist, genügen auch 3 Eisenplatten, die um die Versuchsanordnung gestellt werden. Mit dem gleichen Aufbau lassen sich auch alle Absorptionsmessungen durchführen.

Versuch

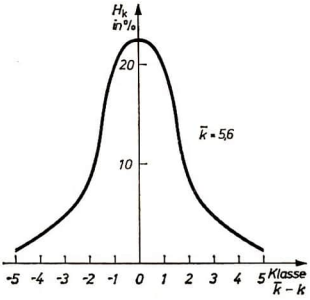
Der Abstand Quelle — Zählrohr wird so gewählt, daß eine Impulsdichte von mindestens 1000 Imp min^{-1} registriert werden kann. Dann bestimmt man 100mal die Zählrate unter sonst gleichen Bedingungen.

Auswertung

Um eine rationelle Auswertung zu ermöglichen, sucht man den kleinsten und den größten Meßwert und teilt den dazwischenliegenden Bereich in 10 Intervalle (Klassen) auf. Danach sortiert man die Meßwerte in die einzelnen Klassen und bestimmt die relative Häufigkeit der Meßwerte je Klasse (vgl. Tabelle).

Klassennummer k_k	Meßwertbereich in Imp. min^{-1}	relative Häufigkeit H_K in %
1	2318—2332	2
2	2333—2347	4
3	2348—2362	8
4	2363—2377	16
5	2378—2392	22
6	2393—2407	22
7	2408—2422	14
8	2423—2437	6
9	2438—2452	4
10	2453—2467	2

Abb. 7.1.3./1
Gaußsche Glockenkurve



Wird die relative Häufigkeit der Meßwerte je Klasse als Funktion der Differenz zwischen Mittelwert der Klassennummern und jeweiliger Klassennummer grafisch dargestellt, so ergibt sich annähernd eine Gaußsche Glockenkurve (Abb. 7.1.3./1). Aus dieser Kurve kann man den Mittelwert $\bar{k}$ und die Standardabweichung ($\sigma = \pm\sqrt{\bar{k}}$) ablesen. Wenn in dem Intervall $\bar{k} - 2\sqrt{\bar{k}}$ und $\bar{k} + 2\sqrt{\bar{k}}$ 95,6% aller Meßwerte liegen, dann bezeichnet man die gemessenen Werte als statistisch rein. Die Meßapparatur hat dann zuverlässig gearbeitet.

Bemerkung

Der Zusammenhang zwischen dem Modellexperiment V 7.1.2., Versuch 3, und dem Kernzerfall wird durch folgende Überlegungen hergestellt.

— Die Wahrscheinlichkeit p ist beim Kernzerfall diejenige Wahrscheinlichkeit, mit der der einzelne Kern zerfällt. Dementsprechend besteht zwischen der Wahrscheinlichkeit und der Aktivität ein unmittelbarer Zusammenhang.

— Die Verteilungsfunktion beschreibt das Auftreten der einzelnen Meßwerte bei einer Serie von Versuchen.

7.2. Halbwertszeit

7.2.1. Halbwertszeit von ^{220}Rn (Thoron) [SE]

1. Meßgefäß Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) 6 Plastplatten (1 mm × 60 mm × 60 mm)
   b) 2 Plaströhrchen (5 mm ∅; h = 10 mm)
   c) Gummiplatte (2 mm × 60 mm × 60 mm) mit Bohrung (35 mm ∅)
2. Aquarienpumpe oder Gummigebläse
3. Plastflasche mit Thoriumverbindung (z. B. ThO) und Watte
4. Fensterzählrohr (z. B. BOH-41)
5. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
6. Zählrohrkabel
7. Dreiwegehahn
8. Schlauch

Methodische Hinweise

1. Dieser Versuch dient zur Festigung des Begriffs Halbwertszeit und zur Bestätigung des Zerfallsgesetzes.

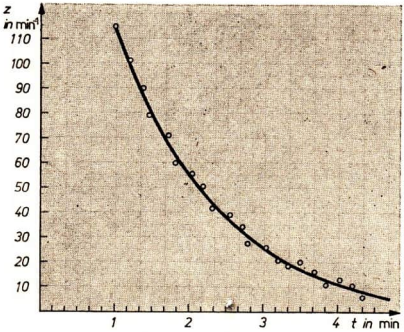


Abb. 7.2.1./2
Zerfallskurve von ^{220}Rn

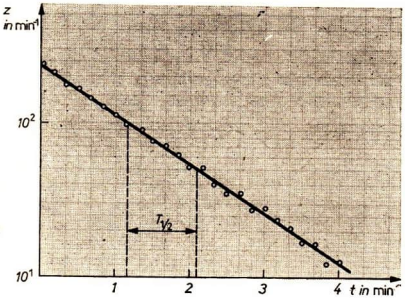


Abb.7.2.1./3
Zerfallskurve von ^{220}Rn
(halblogarithmisch)

Zur Bestimmung der Halbwertszeit und der Zerfallskonstante stellt man die Meßwerte halblogarithmisch dar und gleicht die Punkte durch eine Gerade aus. Dann kann man aus dem Anstieg die Zerfallskonstante λ und über die Beziehung $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ die Halbwertszeit berechnen (Abb. 7.2.1./3).

Der Literaturwert für die Halbwertszeit des ^{220}Rn beträgt 55,6 s.

Bemerkungen

1. Da die Impulsdichten erfahrungsgemäß sehr gering sind, sollte der Versuch unter gleichen Bedingungen wiederholt und bei der Auswertung über alle Messungen gemittelt werden.
2. Neben der Abkling- kann auch die Anstiegskurve gemessen werden. Dazu wird der Dreiwegehahn so gestellt, daß die Pumpe das gasförmige ^{220}Rn zunächst in die Umgebung drückt. Danach wird der Hahn geschlossen und das Ansteigen der Zählrate gemessen und grafisch dargestellt.

radioaktive Strahlung

7.3. Aktivität

7.3.1. Relative Aktivitätsbestimmung

1. Fensterzählrohr (z. B. BOH-41)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Abschirmkammer
4. Zählrohrkabel
5. Stoppuhr
6. 2 Unterrichtsquellensätze (z. B. ^{85}Kr; ^{22}Na)

Methodische Hinweise

1. Bei der relativen Aktivitätsbestimmung braucht man Standardquellen, von denen Anfangsaktivität und Meßdatum bekannt sein müssen und deren geometrische Form der der Quelle mit unbekannter Aktivität gleicht. Nach Berechnung der derzeitigen Aktivität mit Hilfe der Halbwertszeit werden unter gleichen geometrischen Bedingungen die Zählraten gemessen.
2. Während die Bestimmung der Aktivitäten gleichartiger Quellen mit geringem Aktivitätsunterschied relativ einfach ist, kann die Aktivität von unterschiedlichen Quellen nur bedingt nach Relativmethoden gemessen werden.

Variante a: Relative Aktivitätsbestimmung von zwei gleichartigen Quellen eines Nuklids mit geringem Aktivitätsunterschied

Von dem Standardstrahler sind Herstellungsdatum und Anfangsaktivität gegeben oder werden als gegeben vorausgesetzt. Aus einer Tabelle entnimmt man die Zerfallskonstante und berechnet nach der Gleichung

$$A_{St} = A_{0\,St}\,e^{-\lambda t}$$

die derzeitige Aktivität A_{St}.
Unter gleichen geometrischen Verhältnissen werden dann die Zählraten z_x des Strahlers unbekannter Aktivität und des Standardstrahlers z_{St} gemessen und die Aktivität nach der Gleichung

$$A_x = \frac{z_x}{z_{St}} A_{St}$$

berechnet.

Variante b: Relative Aktivitätsbestimmung von zwei gleichartigen Quellen verschiedener Nuklide

Diese Methode läßt sich nur bedingt anwenden, und zwar dann, wenn die Aktivität der Strahler, die Energie und Bauform etwa gleich sind. Eine Quelle wird als Standardstrahler verwendet, dessen Aktivität bekannt sein muß. Genau wie bei Variante a bestimmt man zuerst die Zählraten unter gleichen Bedingungen. Für die Berechnung der unbekannten Zählrate braucht man aber noch zwei Korrekturfaktoren f_{St} und f_x, die die unterschiedliche Absorption im Zählrohrfenster und in Luft berücksichtigen. Dazu nimmt man die Absorptionskurven für beide Strahler auf. Bei einem Abstand von 5 cm zwischen Strahler und Zählrohr werden Alumi-

niumplatten unterschiedlicher Flächenmasse unmittelbar vor das Zählrohr gebracht und die Zählrate bestimmt. Für einen Abstand von 5 cm hat die Luft eine Flächenmasse von 4 mg cm^{-2}. Die Flächenmasse des Zählrohres entnimmt man aus dem Datenblatt. Sie beträgt zwischen 2 mg cm^{-2} und 3 mg cm^{-2}. Um diese Flächenmassen extrapoliert man die gemessenen Kurven auf eine Flächenmasse von Null (Abb. 7.3.1./1). Die Korrekturfaktoren berechnet man aus den Quotienten der Zählraten in Luft bei 5 cm ohne Absorber ($z_{d_F} + d_L$) und bei der Flächenmasse 0(z^{d_0}),

$$f = \frac{z_{d_F} + d_L}{z_{d_0}}.$$

Damit berechnet sich die unbekannte Aktivität nach der Gleichung

$$A_x = \frac{z_x \cdot f_{St}}{z_{St} \cdot f_x} A_{St}.$$

Bemerkung

Bei bekannter Aktivität kann man die Gesamtzahl der von einer Quelle ausgehenden radioaktiven Teilchen je Minute berechnen und mit der gemessenen Zählrate vergleichen. Der Quotient

$$\eta = \frac{z}{A}$$

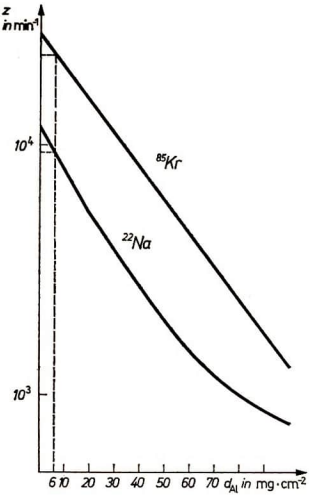


Abb. 7.3.1./1
Absorptionskurven für ^{22}Na und ^{85}Kr in Aluminium

gibt den Wirkungsgrad der Zählanordnung an. Er wird von verschiedenen Faktoren (Totzeit, Geometrie usw.) beeinflußt. Wenn bei einem Zerfall gleichzeitig mehrere Teilchen ausgestoßen werden, muß eine Korrektur erfolgen.

radioaktive Strahlung

7.3.2. Absolute Aktivitätsbestimmung mit Hilfe von Koinzidenzen

1. Fensterzählrohr (z. B. BOH-41)
2. Zylinderzählrohr (VA-Z-118)
3. 2 Zählrohradapter
4. Koinzidenzverstärker
5. Demonstrationsoszillograf
6. Zählgerät (z. B. Polydigit)
7. Abschirmbleche
8. 2 Zählrohrkabel
9. Stoppuhr
10. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co; ^{85}Kr)

Methodische Hinweise

1. Die Aktivitätsbestimmung mit Hilfe von Koinzidenzen ist nur auf solche Nuklide anwendbar, die gleichzeitig zwei oder mehrere Teilchen bzw. Quanten aussenden.

2. Vor Beginn des Versuches muß der Begriff der Koinzidenz anschaulich erläutert werden. Dazu verfolgt man am besten den Signalverlauf am Oszillografen bei den verschiedenen Einstellungen.

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau muß gewährleisten, daß die Betazählrate, die Gammazählrate und die $\beta\gamma$-Koinzidenzzählrate registriert werden können. Die dazu erforderliche Anordnung der Zählrohre und der Quelle ist aus Abbildung 7.3.2./1 ersichtlich. Der Gesamtaufbau erfolgt nach Abbildung 7.3.2./2.

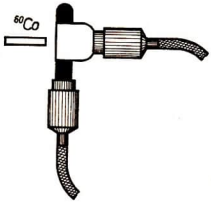


Abb. 7.3.2./1
Versuchsanordnung

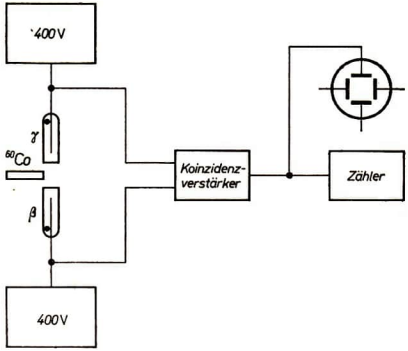


Abb. 7.3.2./2 Blockschaltbild

Mit dem Zählrohr VA-Z-118 soll die reine Gammazählrate registriert werden. Um zu verhindern, daß auch Betateilchen gezählt werden, wird das Zählrohr mit einem Hohlzylinder aus Aluminium oder Plast von etwa 2 mm Dicke abgeschirmt.
Das Zählrohr BOH-41 besitzt für Gammastrahlung eine geringe Ansprechwahrscheinlichkeit. Deshalb wird es zur Messung der reinen Betazählrate verwendet.

Vorversuch

Der Vorversuch dient zunächst zur Erprobung der Versuchsanordnung und zur Erklärung der Funktion der einzelnen Geräte.
Zuerst weist man nach, inwieweit die Forderung, daß ein Zählrohr die reine Beta- und das andere die reine Gammazählrate nachweist, erfüllt ist. Zur Überprüfung der Betaabschirmung wird anstelle der ^{60}Co-Quelle eine ^{85}Kr-Quelle verwendet und die Zählrate registriert. Sie darf sich nicht vom Nulleffekt unterscheiden.
Die reine Betazählrate ist nur als Differenzmessung möglich. Dazu wird mit dem Fensterzählrohr die Gesamtzählrate der ^{60}Co-Quelle und danach die Gammazählrate durch Abschirmen mit einem etwa 2 mm dicken Aluminiumblech gemessen. Aus der Differenz ergibt sich die reine Betazählrate.
Die Funktion des Koinzidenzgerätes kontrolliert man dadurch, daß zunächst nur das abgeschirmte Zählrohr VA-Z-118 angeschlossen und die Gammazählrate re-

gistriert wird. Danach wird der Diskriminatorpegel des Koizidenzverstärkers so eingestellt, daß keine Impulse mehr registriert werden. Durch Verbinden mit dem zweiten Eingang erreicht man nun, daß alle Impulse der Gammazählrate zur Koinzidenz führen. Die Koinzidenzzählrate muß also gleich der vorher gemessenen Gammazählrate sein. Bevor gezählt wird, schließt man am Ausgang einen Oszillografen an und vergleicht die Oszillogramme.
In gleicher Weise wird der Versuch wiederholt und der Diskriminatorpegel für das Fensterzählrohr eingestellt. Die Einstellung, bei der der Diskriminatorpegel am kleinsten war, wird für die Koinzidenzmessungen verwendet.

Versuch

Messung von z_β*:* Mit dem Fensterzählrohr wird zunächst die Zählrate $z_\beta + z_{\gamma_1} + z_0$ gemessen. Dann wird das Zählrohr gegen Betateilchen abgeschirmt und die Zählrate $z_{\gamma_1} + z_0$ registriert. Die Differenz ergibt z_β.

Messung von z_γ*:* Mit dem abgeschirmten Zählrohr VA-Z-118 wird zuerst die Zählrate $z_\gamma + z_0$ und danach der Nulleffekt z_0 bei entfernter Quelle gemessen. Aus der Differenz erhält man die reine Gammazählrate z_γ.

Messung von $z_{\beta\gamma}$*:* Beide Zählrohre werden angeschlossen. Der Diskriminatorpegel wird entsprechend dem Vorversuch eingestellt. Die Zählrate setzt sich aus echten $\beta\gamma$- und $\gamma\gamma$-Koinzidenzen, aus zufälligen Koinzidenzen, die durch die Auflösungszeit des Verstärkers bedingt sind, und aus Nulleffektskoinzidenzen, die durch die Höhenstrahlung verursacht werden, zusammen.
Bei der vorliegenden Versuchsanordnung mit abgeschirmtem Zählrohr VA-Z-118

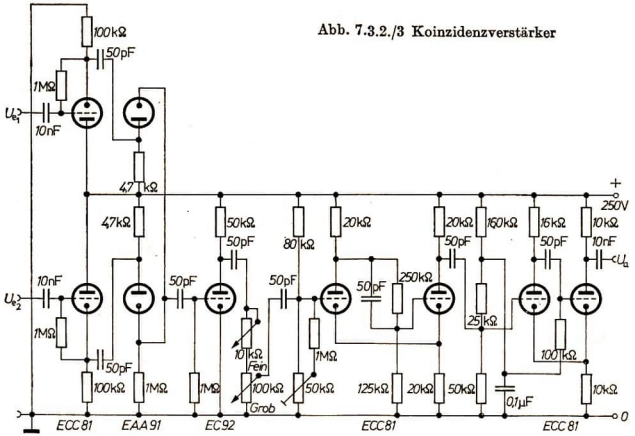


Abb. 7.3.2./3 Koinzidenzverstärker

kann man bei 10% Meßgenauigkeit die gemessene Zählrate mit der $\beta\gamma$-Koinzidenzzählrate identifizieren. Aus der Gleichung

$$A = \frac{z_\beta \cdot z_\gamma}{z_{\beta\gamma}}$$

errechnet sich die absolute Aktivität der ^{60}Co-Quelle.

Bemerkung

Bei einer exakten Bestimmung der absoluten Aktivität müssen die Zählraten z_β und z_γ mit den Auflösungszeiten der Zählrohre korrigiert werden. Außerdem müssen bei der Koinzidenzzählrate die $\gamma\gamma$- und 00-Koinzidenzen sowie die zufälligen Koinzidenzen berücksichtigt werden. Das geschilderte Verfahren ist zum Verständnis des Prinzips und zur Bestimmung der Aktivität bis auf eine Genauigkeit von 10% geeignet. Die Schaltung eines Koinzidenzverstärkers mit einer Auflösungszeit von $\tau \approx 1$ µs zur Messung von Zweifachkoinzidenzen ist in Abb. 7.3.2./3 dargestellt.

7.4. Kernreaktionen

7.4.1. Modellversuch zu Kernreaktionen

1. Tageslichtschreibprojektor
2. Glasplatte mit Rahmen
3. Kugelrinne Ⓢ,
   dazu erforderliches Material:

a) 2 durchsichtige Plaststreifen
   (2 mm × 25 mm × 500 mm)

4. kleine Glaskugeln mit 2 verschiedenen Farben und 5 Kugeln mit etwa 4-fachem Volumen
5. Uhrglas

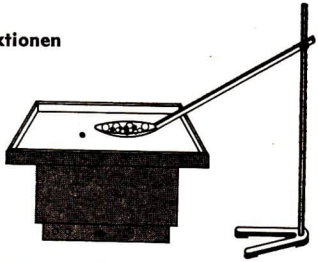


Abb. 7.4.1./1 Versuchsanordnug

Methodische Hinweise

1. Mit diesem Modellversuch kann gezeigt werden, daß das Eintreten einer Kernreaktion ein statistischer Prozeß ist und daß mehrere Reaktionen ablaufen können, deren Wahrscheinlichkeit verschieden ist.
2. Die Schüler sollten nach entsprechender Einführung eine Tabelle anlegen und die beobachteten Reaktionen registrieren.
3. Der Versuch kann auch als Einführungsversuch in die Problematik der statistischen Gesetze dienen.

Versuchsanordnung

Aus den Plaststreifen fertigt man sich zur Beschleunigung der Geschosse eine Kugelrinne, die in ein Stativ eingespannt werden kann. Das Uhrglas (Potentialtopf des Kernes) wird mit Kugeln unterschiedlicher Färbung (Neutronen und Protonen) gefüllt (Abb. 7.4.1./1).

Versuch

Die Kugeln werden als Protonen, Neutronen, Alphateilchen oder schwere Ionen beschleunigt und auf den Modellkern geschossen. Dabei sind folgende Reaktionen zu beobachten:

1. Ein oder mehrere Teilchen geraten so in Bewegung, daß sie um den Modellkern rotieren. Ihr Zurückkehren zum Kern wird modellmäßig so gedeutet, daß sie überschüssige Energie in Form von Gammastrahlung abgeben (n, γ- bzw. p, γ-Prozeß). Es kann im allgemeinen gut beobachtet werden, daß im Vergleich zur Hülle eine kollektive Anregung stattfindet, d. h. daß mehrere Teilchen gleichzeitig auf höhere Energieniveaus gehoben werden.
2. Bei dem Zusammenstoß einer Kugel mit dem Modellkern können eine oder mehrere Kugeln den Kern verlassen. Bei gleicher Energie des Geschosses sind die Anzahl der ausgestoßenen Kugeln und ihre Richtungen statistisch verteilt.

Bemerkungen

1. Es muß darauf geachtet werden, daß die Anzahl der Neutronen und Protonen vor jedem neuen Experiment wieder auf die ursprüngliche Anzahl gebracht wird, um immer wieder den gleichen Kern zu betrachten.
2. In der folgenden Tabelle wird eine Übersicht über die möglichen Kernreaktionen gegeben.

Geschoß	Reaktion					
p	—	(p, n)	—	(p, α)	—	(p, γ)
n	(n, p)	(n, n)	$(n, 2n)$	(n, α)	(n, f)	(n, γ)
α	(α, p)	(α, n)	—	—	(α, f)	—
γ	(γ, p)	(γ, n)	—	(γ, α)	(γ, f)	(γ, γ)

f = Kernspaltung

Im Experiment werden mehr Reaktionen gezeigt, als in der Praxis vorkommen, z. B. (p, p).
Einige Reaktionen sind nicht zu demonstrieren, z. B. (γ, γ).

7.5. Eigenschaften der Alphastrahlen

7.5.1. Alphaspektroskopie

Zu Variante a

1. Hochspannungsquelle (1000 V —)
2. Szintillationszähler (z. B. VA-S-50 mit Zinksulfid-Kristall)
3. Breitbandlinearverstärker (z. B. VA-V-100)
4. Demonstrationsoszillograf mit Fotovorsatz
5. Graukeil
6. Kamera mit Film (z. B. NP 27)
7. Entwicklerdose
8. Entwickler (z. B. MH 28)
9. Fixierbad (z. B. A 304)
10. Alphastrahler (z. B. ^{241}Am, ^{226}Ra)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 3. und 10., außerdem

11. Diskriminator
12. Zählgerät (z. B. Polydigit)
13. Stoppuhr

Zu Variante c

Geräte 3., 10., 12. und 13., außerdem

14. Stromversorgungsgerät (100 V —)
15. Halbleiterdetektor (z. B. 70300)
16. Vorverstärker (z. B. 20027)
17. Analysator (z. B. VA-W-02)

Methodische Hinweise

1. Alphaspektren können sowohl mit dem Szintillationszähler mit Zinksulfid-Kristall als auch mit dem Halbleiterdetektor aufgenommen werden.
2. Im Demonstrationsversuch werden die Alphaspektren mit Hilfe eines getriggerten Oszillografen gezeigt.
3. Vergleiche MB 7.0.5.!

Variante a: Graukeilspektroskopie
Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 7.5.1./1. An den Szintillationszähler wird eine Spannung von etwa 1000 V gelegt. Das Prinzip der Meßanordnung besteht darin, daß Alphateilchen entsprechend ihrer Energie einen proportionalen Spannungsimpuls erzeugen, der im Verstärker verstärkt wird. Hat man einen Oszillografen mit einer Zeitbasis von 10 ns cm^{-1}, dann erscheinen die Impulse

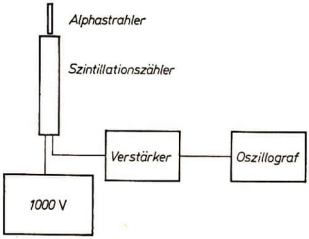


Abb. 7.5.1./1
Blockschaltbild für die Graukeilspektroskopie

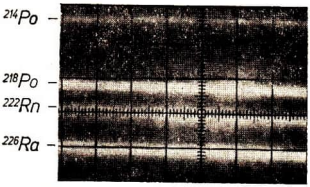


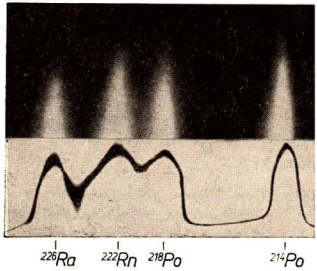
Abb. 7.5.1./2
Oszillogramm der Impulse von ^{226}Ra

in der Stellung „Triggern" als horizontale Linien auf dem Oszillografenschirm (Abb. 7.5.1./2). Die Impulshöhe entspricht der Energie der Alphateilchen. Parallel zur Zeitachse wird der Graukeil so gelegt, daß die Durchlässigkeit von links nach rechts zunimmt.
Der Fotovorsatz und die Kamera werden befestigt.

Versuch

Für die fotografische Registrierung des Graukeilspektrums benötigt man bei dem Filmmaterial NP 27 und Blende 2,8 eine Belichtungszeit von etwa 6 Stunden. Das

Abb. 7.5.1./3
Spektrum mit Graukeil ($z = f(U)$). Gegenüber Abb. 7.5.1./2 um 90° gedreht



erhaltene Fotogramm (Abb. 7.5.1./3) kann mit Hilfe einer Äquidensite (vgl. V 6.1.2.) ausgewertet werden.

Variante b: Aufnahme eines integralen Spektrums

Der Versuchsaufbau erfolgt entsprechend dem Blockschaltbild in Abbildung 7.5.1./4. Die Verstärkung wird so eingestellt, daß die größten Impulse etwa eine Amplitude von 50 V haben. Danach wird für alle Impulsamplituden zwischen 0 und 50 V die Impulszahl pro Minute gemessen und grafisch dargestellt. In der Abbildung 7.5.1./5 ist das integrale Spektrum, das man auf diese Weise erhält, ersichtlich.

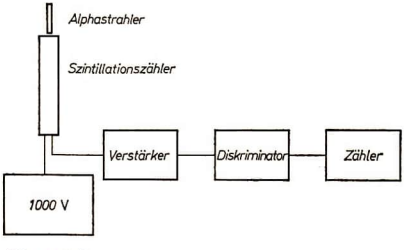


Abb. 7.5.1./4
Blockschaltbild zur Aufnahme eines integralen Spektrums

Auswertung

Durch grafische Differentiation konstruiert man das differentielle Spektrum (Abb. 7.5.1./5). Die gemessene Linie muß einem bestimmten Übergang des alphaaktiven Kerns zugeordnet werden. Mit dem Termschema ergibt sich eine Energie der Alphateilchen von 5,5 MeV (Abb. 7.5.1./6). Unter der Voraussetzung, daß die Anordnung energielinear arbeitet, kann man bei der gewählten Einstellung jedem Kanal einen Energiebetrag zuordnen. Die Energie von 5,5 MeV entspricht dem Kanal maximaler Impulszahl, die Energie 0 dem Kanal 0. Damit kann die Eichkurve gezeichnet werden (Abb. 7.5.1./7). Nun können die Energien unbekannter Alphastrahlen bestimmt werden.

Variante c: Aufnahme eines differentiellen Spektrums

Statt des Szintillationszählers wird ein Halbleiterdetektor verwendet (Abb. 7.5.1./8), dessen Arbeitsspannung nach V 6.5.3. bestimmt wird. Bei Verwendung des Analysators statt des Diskriminators erhält man sofort das differentielle

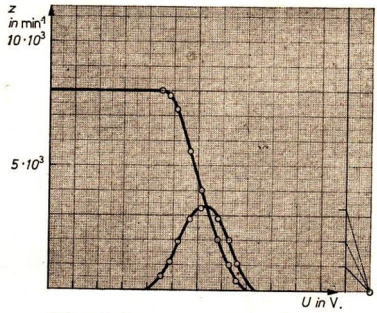


Abb. 7.5.1./5
Integrales Spektrum
von ^{241} Am und daraus
konstruiertes differentielles Spektrum

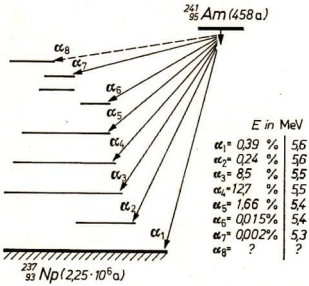


Abb. 7.5.1./6
Termschema von ^{241}Am

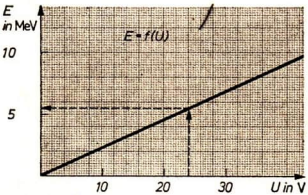


Abb. 7.5.1./7
Eichkurve $E = f(U)$

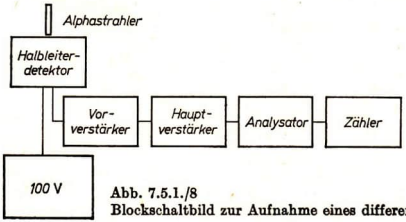


Abb. 7.5.1./8
Blockschaltbild zur Aufnahme eines differentiellen Spektrums

Spektrum. Durchführung und Auswertung des Versuches erfolgt wie bei Variante b.

Bemerkungen

1. Die langen Belichtungszeiten in Variante a sind durch die geringe Aktivität der Alphastrahlungsquelle bedingt. Mit der Betastrahlungsquelle ^{85}Kr beträgt die Belichtungszeit nur wenige Sekunden.
2. Hat man für Variante a keinen Oszillografen mit einer Zeitachse von 10 ns cm^{-1} zur Verfügung, so muß zwischen Verstärker und Oszillograf ein Impulsdehner geschaltet werden, den man entsprechend Abbildung 7.5.1./9 anfertigen kann.
3. Bei einer exakten Energieeichung muß der „Energieverlust" der Alphateilchen in der Luft und an der Detektoroberfläche (Schutzhülle) berücksichtigt werden.

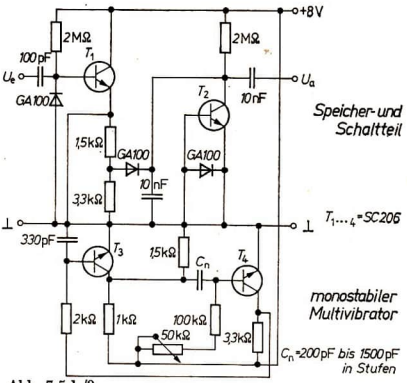


Abb. 7.5.1./9
Schaltplan des Impulsdehners

radioaktive Strahlung

7.5.2. Absorption der Alphastrahlen

Zu Variante a

1. Alphastrahler (z. B. ^{210}Pb)
2. Absorptionsbox Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) 2 Piacrylplatten (4 mm × 50 mm × 130 mm)
   b) Plastplatte (4 mm × 50 mm × 130 mm)
   c) 2 Plastplatten (4 mm × 50 mm × 60 mm)
3. Fensterzählrohr (z. B. BOH-41)
4. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
5. Zählrohrkabel
6. Tageslichtschreibprojektor
7. Äther (10 ml)

Zu Variante b

Geräte 1. und 3. bis 5., außerdem

8. Glasrohr Ⓢ (40 mm ∅; l = 200 mm)
9. Vakuumpumpe
10. Quecksilbermanometer
11. Stoppuhr
12. Ramsayfett

Methodische Hinweise

1. Auf Grund der geringen Reichweite der Alphateilchen in Gasen müssen bei der Aufnahme der Reichweitekurven stets die Abmessungen der Anordnung berücksichtigt werden. In Variante b wird deshalb eine Möglichkeit gezeigt, wie bei konstantem Abstand die Reichweitekurven durch Änderung des Luftdruckes aufgenommen werden können.
2. Variante a ist besonders als Demonstrationsversuch geeignet. Dabei lassen sich die Reichweite und die Dichteabhängigkeit zeigen.

Variante a: Reichweite der Alphateilchen in Gasen
Versuchsanordnung

Da die Versuchsanordnung naturgemäß sehr klein sein muß, ist es günstig, eine Projektion vorzunehmen. Dazu baut man sich einen „Trog" mit einer durchsichtigen Seiten- und Grundplatte, auf der eine Längenteilung angebracht ist. Der

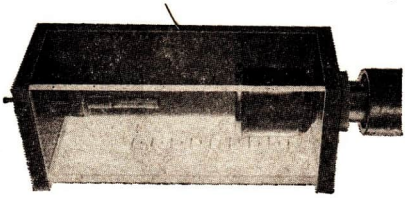


Abb. 7.5.2./1
Absorptionsbox
für Alphastrahlung

Strahler wird an einem verschiebbaren Draht befestigt, so daß eine Reichweiteänderung leicht möglich ist (Abb. 7.5.2./1). Das Zählrohr wird im Bereich der beschränkten Proportionalität betrieben (V 6.4.2.).

Versuch

Bei Annäherung des Strahlers an das Zählrohr stellt man bei einem bestimmten Abstand ein abruptes Einsetzen der Zählrate fest. Für den Nebelkammerstrahler beträgt die Reichweite in Luft etwa 3 cm.
Zum Nachweis der Dichteabhängigkeit füllt man Ätherdampf in die Absorptionsbox. Der Abstand Strahler — Zählrohr ist dabei kleiner als die maximale Reichweite. Die Zählrate sinkt erheblich ab und steigt bei Ausblasen des Äthers wieder auf den ursprünglichen Wert.

Auswertung

Mit Hilfe der Braggschen Beziehung wird aus der Reichweite die Energie berechnet (siehe V 6.2.2.).

Variante b: Absorption der Alphateilchen in Abhängigkeit vom Gasdruck
Versuchsanordnung

Ein evakuierbares Glasrohr wird mit einem Stopfen, in dem ein Zählrohr befestigt ist, vakuumdicht verschlossen (Abb. 7.5.2./2). Der Strahler wird an einer Kreis-

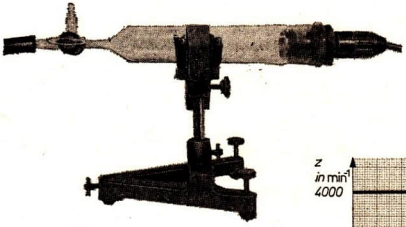


Abb. 7.5.2./2
Versuchsanordnung zur Druckabhängigkeit der Alphateilchenabsorption

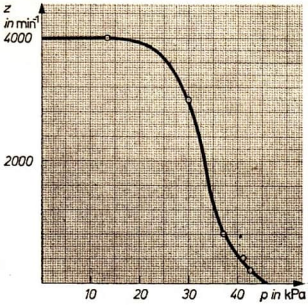


Abb. 7.5.2./3
Absorption der Alphateilchen in Abhängigkeit vom Luftdruck

scheibe so befestigt, daß er in der Mitte des Rohres in einer Entfernung von etwa 3 cm vor dem Zählrohr liegt. Das Zählrohr wird im Bereich der beschränkten Proportionalität betrieben.

Versuch

Für einen festen Abstand Strahler — Zählrohr wird in Abhängigkeit vom Gasdruck die Zählrate jeweils eine Minute gemessen und grafisch dargestellt (Abb. 7.5.2./3).

7.6. Eigenschaften der Betastrahlen

7.6.1. Betaspektroskopie mit magnetischem Spektrometer

Zu Variante a

1. 2 Manipermmagnete, quaderförmig
2. Unterrichtsquellensatz mit Blenden (^{22}Na, ^{85}Kr)
3. Zählrohrgoniometer Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) gebogener Stativstab ($l_1 = 60$ mm; $l_2 = 100$ mm)
   b) Ring mit Haken
   c) Stativstab ($l = 55$ mm) mit Schelle (⌀ 30 mm)
   d) Winkelmesser

4. Zylinderzählrohr (z. B. VA-Z-118) mit Schlitzblende
5. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
6. Zählrohrkabel
7. Stoppuhr

Zu Variante b

Geräte 2. bis 7., außerdem

8. Elektromagnet mit kreisförmigem Polquerschnitt
9. Demonstrationsstrommesser (5 A)
10. Stromversorgungsgerät (20 V —; 4 A)

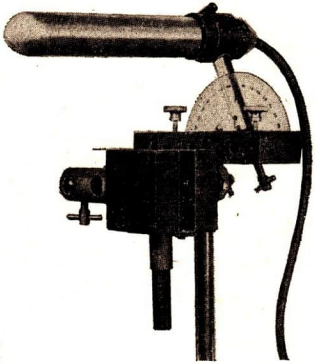


Abb. 7.6.1./1
Versuchsanordnung zur Betaspektroskopie mit B = const.

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 7.0.6.!
2. Die Spektroskopie mit magnetischen Spektrometern ist experimentell relativ einfach. Von den beiden vorgeschlagenen Verfahren ist Variante a am einfachsten, Variante b jedoch genauer.

Variante a: Betaspektroskopie mit konstanter magnetischer Induktion

Versuchsanordnung

Die radioaktive Quelle (^{85}Kr oder ^{22}Na) wird mit einer Blende versehen und in der Mitte unterhalb der Magnete befestigt, die sich im Abstand von 1 cm gegenüberstehen. Die Querschnittsfläche eines Magneten besteht aus einem Quadrat mit der Kantenlänge l. Der Mittelpunkt des Zählrohrgoniometers befindet sich gegenüber der Quelle. Das Zählrohr ist mit einer Kunststoffkappe abgedeckt, die eine Schlitzblende von 2 mm Breite enthält (Abb. 7.6.1./1).
Vor Beginn des Versuches muß die magnetische Induktion der Anordnung bestimmt werden.

Versuch

Die Arbeitsspannung des Zählrohres wird eingestellt und für verschiedene Winkel die Zählrate jeweils 1 min lang gemessen. Danach wird ohne Quelle der Nulleffekt bestimmt.

Auswertung

Bei der Berechnung der Energie der Betateilchen muß berücksichtigt werden, daß sowohl für die Masse als auch für die Energie relativistische Ausdrücke anzusetzen sind. Aus der Gleichung

$$v = \frac{e}{m} \cdot B \cdot r$$

wird unter Berücksichtigung von

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$v = \frac{e}{m_0} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot B \cdot r \,.$$

Der relativistische Ausdruck für die Energie lautet

$$E_{\text{kin}} = m_0 \cdot c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Damit erhält man

$$E_{\text{kin}} = m_0 \cdot c^2 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{e \cdot B \cdot r}{m_0 \cdot c} \right)^2} - 1 \right),$$

mit den Konstanten c = Vakuumlichtgeschwindigkeit, e = Ladung und m_0 = Ruhemasse der Elektronen.
Wenn die magnetische Induktion B und der Radius r der Ablenkung bekannt sind, läßt sich die Energie der Betateilchen berechnen. Zur Berechnung für quadratischen Feldquerschnitt und für Austrittswinkel zwischen $0° < \alpha < 53{,}1°$ gilt die Gleichung (Abb. 7.6.1./2)

$$r = \frac{a}{\sin \alpha} \,.$$

Damit läßt sich für jeden Winkel α zwischen 0° und 53,1° die kinetische Energie der Elektronen berechnen und die Zählrate als Funktion der Energie darstellen.

Beispiel

Für eine Kantenlänge a = 1,0 cm des Magneten berechnet sich bei einem Winkel α = 30° der Krümmungsradius zu r = 2 cm. Damit ergibt sich die kinetische Energie bei B = 0,05 Vs m^{-2} zu

$$E_{\text{kin}} = 0{,}511 \text{ MeV} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 0{,}05 \text{ Vs m}^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^{8} \text{ m s}^{-1}} \right)^2} - 1 \right)$$

$$E_{\text{kin}} = 0{,}276 \text{ MeV},$$

mit $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, $c = 3 \cdot 10^8$ m s^{-1} und $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As.
Aus dem Termschema (Abb. 7.6.2./1) erhält man für $E_{\max}$ = 0,67 MeV. Ein Vergleich der Abbildung 7.6.1./3 ergibt gute Übereinstimmung.

Variante b: Betaspektroskopie mit veränderlicher magnetischer Induktion

Für verschiedene Stromstärken ist zunächst die magnetische Induktion (siehe auch V 2.1.1. und 3.2.1.) zu bestimmen und eine Eichkurve aufzunehmen. Danach wird die ausgeblendete Quelle unter die Polschuhe gestellt und das Zählrohr bei einem Ablenkwinkel von α = 30° am Goniometer befestigt, bei dem die Auflösung am größten ist (Abb. 7.6.1./4).
Für verschiedene magnetische Induktionen wird die Zählrate und danach der Nulleffekt bestimmt.

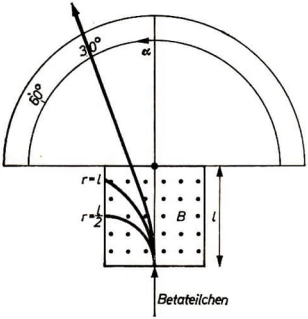


Abb. 7.6.1./2
Berechnung des Krümmungsradius für quadratischen Feldquerschnitt

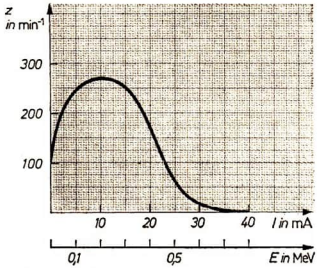


Abb. 7.6.1./3 Spektrum von ^{85}Kr

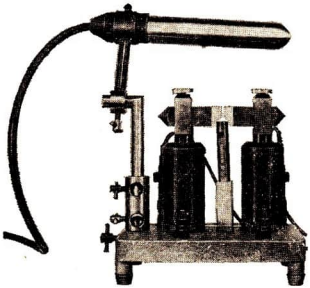


Abb. 7.6.1./4
Versuchsanordnung zur Betaspektroskopie mit r = const. und $B \neq$ const.

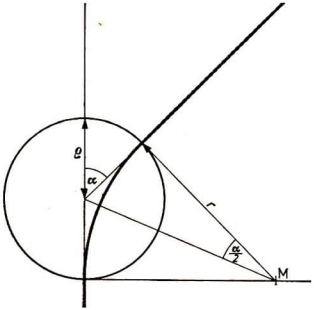


Abb. 7.6.1./5
Berechnung des Krümmungsradius für kreisförmigen Feldquerschnitt

Auswertung

Die Berechnung des Krümmungsradius r für die Ablenkung in einem Feld mit dem Radius ϱ erfolgt nach der Gleichung (Abb. 7.6.1./5)

$$r = \varrho \cot \frac{\alpha}{2}.$$

Bei bekanntem B läßt sich damit genau wie in Variante a die Energie berechnen. Die grafische Darstellung der Zählrate als Funktion der Energie ist das Betaspektrum.

Hochspannung

Radioaktive Strahlung

7.6.2. Betaspektroskopie mit Szintillationszähler

1. Unterrichtsquellensatz (^{22}Na, ^{85}Kr)
2. Szintillationszähler (z. B. VA-S-50 mit Anthrazen-Kristall)
3. Hochspannungsquelle (1000 V —)
4. Breitbandlinearverstärker (z. B. VA-V-100)
5. Demonstrationsoszillograf mit Fotovorsatz
6. Graukeil
7. Kamera mit Film (z. B. NP 27)
8. Lichtleitpaste oder Silikonöl
9. 2 Papierhüllen
10. Entwicklerdose
11. Entwickler (z. B. MH 28)
12. Fixierbad (z. B. A 304)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 7.0.6.!
2. Bei diesem Versuch wird neben der Bestimmung der Struktur des Betaspektrums gleichzeitig das prinzipielle Vorgehen bei der Identifizierung unbekannter Strahler gezeigt. Dazu muß durch Papierhüllen die Aufschrift auf den Strahlenquellen verdeckt werden.

Versuch

Der Aufbau der Versuchsanordnung erfolgt in gleicher Weise wie bei V 7.5.1., Variante a. Es wird lediglich ein anderer Szintillationskristall verwendet. Beim Auswechseln des Kristalls ist darauf zu achten, daß die Verbindung von Fotosekundärelektronenvervielfacher und Kristall durch einen dünnen Film Lichtleitpaste oder Silikonöl hergestellt werden muß. Die Arbeitsspannung wird entsprechend V 6.5.3. eingestellt. Es wird zunächst das Spektrum des bekannten

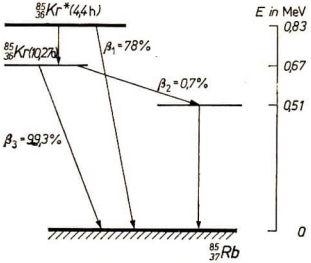


Abb. 7.6.2./1 Termschema von ^{85}Kr

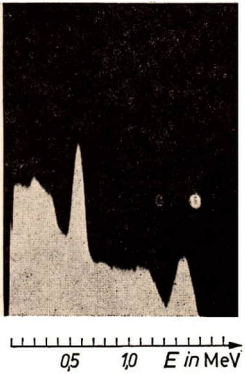


Abb. 7.6.2./2 Spektrum von ^{22}Na

Strahlers (z. B. ^{85}Kr) genau wie bei V 7.5.1. aufgenommen. Aus dem Termschema (Abb. 7.6.2./1) wird die Maximalenergie zu 0,67 MeV entnommen. Damit kann die Abszissenachse in Einheiten von 0,1 MeV eingeteilt werden. Unter gleichen Einstellungsbedingungen läßt sich das Spektrum eines unbekannten Betastrahlers aufnehmen und die Maximalenergie bestimmen.
Für den Positronenstrahler ^{22}Na ergibt sich die maximale Betaenergie von 0,54 MeV. Außerdem ist noch ein Gammaübergang von 1,5 MeV beobachtbar (Abb. 7.6.2./2).

Bemerkung

Eine mögliche Versuchsvariante ist außerdem noch unter Verwendung eines Diskriminators (V 7.5.1., Variante b) oder Analysators (V 7. 5.1., Variante c) gegeben.

7.6.3. Betaabsorption [SE]

Zu Variante a

1. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr, ^{22}Na)
2. Absorber (Papier, Aluminium, Plast)
3. Fensterzählrohr (z. B. BOH-41)
4. Zählgerät
   (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
5. Zählrohrkabel

Zu Variante b

Geräte 1. bis 5., außerdem

6. Stoppuhr
7. Abschirmkammer

Methodische Hinweise

1. Durch Absorptionsmessungen lassen sich Alpha-, Beta- und Gammastrahlen unterscheiden. Bei der Demonstration verwendet man genau wie bei der Alphastrahlung Schichtdicken, die zur totalen Absorption führen.
2. Das Absorptionsverhalten der Betastrahlung sollte dem der Alphastrahlung gegenübergestellt werden (z. B. nach Variante a). Bei Messung der gesamten Absorptionskurve ist eine Berechnung der maximalen Energie der Betastrahlen möglich.

Variante a

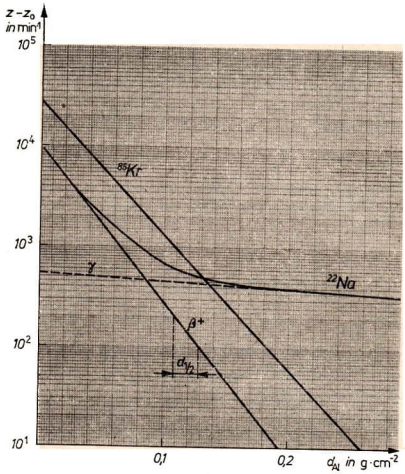
Die Arbeitsspannung des Zählrohres wird entsprechend V 6.4.1., Variante c, eingestellt und der Strahler (z. B. ^{85}Kr) in einem Abstand von 5 cm vor dem Zählrohr befestigt. Zunächst wird gezeigt, daß Betastrahlung im Gegensatz zur Alphastrahlung durch Papier hindurchgeht.
Danach demonstriert man, daß die Betastrahlung von einer 2 mm dicken Plastplatte vollständig absorbiert wird.

Variante b

Versuchsanordnung

Zur Gewährleistung konstanter Abstände und zur Abschirmung verwendet man am zweckmäßigsten eine Abschirmkammer.

Abb. 7.6.3./1
Absorptionskurven für ^{22}Na und ^{85}Kr



Versuch

Die Arbeitsspannung des Zählrohres wird entsprechend V 6.4.1., Variante c, eingestellt und der Nulleffekt gemessen. Die Quelle (^{85}Kr oder ^{22}Na) wird danach im Abstand von 5 cm vor dem Zählrohr stationiert. Aluminiumplatten einer Flächenmasse zwischen 2 mg cm^{-2} und 400 mg cm^{-2} werden unmittelbar vor das Zählrohr gebracht und die Zählrate 1 min lang gemessen. Die Meßpunkte werden halblogarithmisch nach Abzug des Nulleffektes dargestellt (Abb. 7.6.3./1).

Auswertung

Die Absorptionskurven der Betastrahlung lassen sich durch die Funktion

$$z = z_0 \cdot e^{-\mu^* d} \quad \text{oder } z = z_0 \cdot e^{-\mu x}$$

beschreiben.

Dabei bedeuten z_0 = Anfangszählrate ohne Absorption, $\mu^* = \frac{\mu}{\varrho}$ = Massenschwächungskoeffizient, μ = totaler Schwächungskoeffizient, d = Flächenmasse, ϱ = Dichte des Absorbermaterials und x = Dicke.

Die Flächenmasse d errechnet sich bei bekannter Dicke x und Dichte ϱ des Materials gemäß

$$d = \varrho \cdot x\,.$$

Aus dem Anstieg kann man den Massenschwächungskoeffizienten mit Hilfe der Gleichung

$$\frac{\mu}{\varrho} = \frac{\ln 2}{d_{1/2}}$$

bestimmen. Die Halbwertsflächenmasse $d_{1/2}$ ist dabei die Flächenmasse, die zu einer Verringerung der ursprünglichen Impulsrate auf die Hälfte führt.
Aus den Absorptionskurven lassen sich außerdem die maximalen Reichweiten ablesen, wenn bis zur vollständigen Absorption gemessen wurde. Dazu muß sowohl die Absorption in Luft als auch im Zählrohrfenster berücksichtigt werden. Die Flächenmasse des Zählrohres entnimmt man dem Datenblatt. Sie beträgt etwa 2 mg cm^{-2}. Die Flächenmasse für 5 cm Luft ist 4 mg cm^{-2}. Diese Werte müssen zu den Flächenmassen des Aluminiums addiert werden (Abb. 7.6.3./1). Beim Positronenstrahler ^{22}Na ist der Gammauntergrund abzuziehen (Abb. 7.6.3./1). Erst dann ist die maximale Reichweite bestimmbar. Aus der maximalen Reichweite kann man die Energien der Strahler nach der Zahlenwertgleichung

$$E_{max} = 1{,}92\sqrt{R_{max}^2 + 0{,}22 R_{max}}\ \text{MeV}$$

berechnen. Die Reichweite ist dabei in g cm^{-2} anzugeben.

Beispiel

Aus den Anstiegen in Abbildung 7.6.3./1 ergeben sich die Massenschwächungskoeffizienten für ^{85}Kr zu $\mu^* = 0{,}028$ cm^2 g^{-1} und ^{22}Na zu $\mu^* = 0{,}043$ cm^2 g^{-1}. Die Reichweite für ^{85}Kr wurde zu $R_{max} = 0{,}26$ g cm^{-2} und für ^{22}Na zu $R_{max} = 0{,}19$ g cm^{-2} bestimmt. Daraus berechnen sich die Energien

$$E_{max}\ (^{85}\text{Kr}) = 0{,}67\ \text{MeV},$$

$$E_{max}\ (^{22}\text{Na}) = 0{,}54\ \text{MeV}\ .$$

7.6.4. Selbstabsorption

1. Urangläser
2. Zählrohr (VA-Z-118)
3. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
4. Stoppuhr

Methodischer Hinweis

Die Selbstabsorption spielt vor allem bei Alpha- und Betastrahlung eine wesentliche Rolle. Zur Demonstration ist die Selbstabsorption der Betastrahlen am geeignetsten.

Versuch

Nachdem die Arbeitsspannung des Zählrohres eingestellt wurde, bestimmt man die Zählraten einzelner Uranglasplatten jeweils eine Minute lang. Dabei werden die Uranglasplatten jeweils unmittelbar auf das Zählrohr gelegt. Danach legt man die Platten übereinander und bestimmt die Zählraten von einer Platte, zwei Platten usw. und vergleicht sie mit der Summe der Einzelzählraten. Durch die Absorption im Uranglas ist die Summenzählrate jeweils kleiner als die Summe der Einzelzählraten.

radioaktive Strahlung

7.6.5. Ablenkung von Positronen- und Elektronenstrahlen im Magnetfeld [SE]

Zu Variante a

1. Unterrichtsquellensatz (^{22}Na, ^{85}Kr)
2. Magnethalterung mit 2 Manipermmagneten Ⓢ
3. Zählrohr (VA-Z-118)
4. Zählgerät
   (z. B. Polydigit
   mit Zählrohradapter)
5. Stoppuhr
6. Zählrohrkabel

Zu Variante b

Geräte 1. und 2., außerdem

7. Röntgenfilm XR 11
8. Entwickler (z. B. MH 28, 1:4)
9. Fixierbad (z. B. A 304)
10. Entwicklerdose
11. Trichter

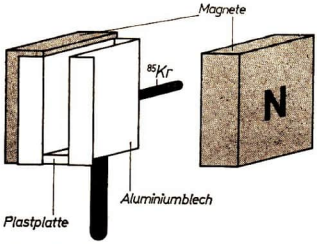


Abb. 7.6.5./1 Magnethalterung

Methodische Hinweise

1. Bei diesem Versuch wird die entgegengesetzte Ladung der Positronen- und Elektronenstrahlung durch magnetische Ablenkung qualitativ demonstriert.
2. Der fotografische Nachweis der abgelenkten Strahlung kann mit V 6.1.1. verbunden werden.

Variante a: Nachweis der Ablenkung mit dem Zählrohr

Aus Aluminiumblech baut man sich entsprechend Abbildung 7.6.5./1 eine Magnethalterung.
Das Zählrohr wird zunächst einmal vor der Quelle befestigt, die Zählrohrspannung entsprechend V 6.4.1., Variante b, angelegt und die Zählrate ohne Magnetfeld gemessen. Danach werden die Magnete entsprechend Abbildung 7.6.5./1 angeordnet und das Zählrohr so lange geschwenkt, bis die Zählrate einsetzt. Die Messung wird für den Positronenstrahler (^{22}Na) und den Elektronenstrahler (^{85}Kr) durchgeführt.

Variante b: Fotografischer Nachweis der Ablenkung

Von dem Röntgenfilm wird im Dunkeln die Verpackung entfernt. Die beiden Filmschichten werden einzeln in schwarzes Papier lichtdicht verpackt. Links und rechts des unabgelenkten Teilchenstrahles werden die zwei Röntgenfilme danach auf die Magnethalterung gelegt und nacheinander mit dem Elektronen- und Positronenstrahler zuerst ohne und dann mit Magnetfeld jeweils 1 Woche exponiert. Entwickeln, Fixieren und Wässern des Filmes erfolgt in gleicher Weise wie bei

V 6.1.1. Man erhält drei deutlich voneinander getrennte Schwärzungsflächen. Durch die verschiedenen Energien der einzelnen Betateilchen erfolgt im Magnetfeld eine Auffächerung, die zu einer Vergrößerung der Schwärzungsflächen führt.

Bemerkungen

1. Wenn die Polarität der Magnete bekannt ist, kann die Ablenkungsrichtung vorausgesagt werden.
2. Die drei Schwärzungsflächen lassen sich deutlicher unterscheiden, wenn man den Film nach der Exposition ohne Magnetfeld seitlich etwas verschiebt.

7.6.6. Betarückstreuung [SE]

Zu Variante a

1. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr, ^{22}Na)
2. Fensterzählrohr (z. B. BOH-41)
3. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
4. Stoppuhr
5. Zählrohrkabel
6. Demonstrationsrückstreuanordnung ⑧, dazu erforderliches Material:
   a) Piacrylplatte ($r = 75$ mm; $d = 4$ mm)
   b) Piacrylklotz (20 mm × 30 mm × 45 mm) mit Bohrung (∅ 12 mm)
   c) Piacrylklotz (20 mm × 30 mm × 30 mm) mit Bohrung (∅ 20 mm)
   d) Piacrylklotz (15 mm × 20 mm × 20 mm)
   e) 3 Piacrylfüße (4 mm × 10 mm × 10 mm)
7. Würfel aus dem Satz zur Dichtebestimmung
8. Tageslichtschreibprojektor

Zu Variante b

Geräte 1. bis 5., außerdem

9. Praktikumsrückstreuanordnung ⑧, dazu erforderliches Material aus Plast:
   a) Hohlzylinder (∅ innen 30 mm; ∅ außen 45 mm; $h = 70$ mm)
   b) Ringplatte (∅ 140 mm; $d = 6$ mm) mit Bohrung für Zählrohr (∅ 30 mm), mit Bohrung für Strahler (∅ 12 mm)
   c) Platte (1000 mm × 100 mm) mit Ausschnitt (70 mm × 70 mm)
   d) 2 Streifen (2 mm × 12 mm × 105 mm)
   e) 4 Streifen (2 mm × 12 mm × 80 mm)
10. Polyäthylenfolien
11. Platten aus Aluminium, Eisen

Methodischer Hinweis

Der in Variante a beschriebene Demonstrationsversuch zeigt qualitativ, daß die Rückstreurate vom Material abhängig ist. In Variante b werden der Einfluß der Geometrie und der Sättigungsschichtdicke sowie die Ordnungszahlabhängigkeit untersucht.

Variante a

Aus Piacryl wird entsprechend Abbildung 7.6.6./1 für Zählrohr, Quelle und Rückstreumaterial eine Halterung gebaut, die mit dem Tageslichtschreibprojektor projiziert werden kann. An das Zählrohr wird entsprechend V 6.4.1., Variante c, die Arbeitsspannung angelegt und zunächst mit Quelle ohne Rückstreumaterial, die Zählrate eine Minute lang gemessen. Danach wird die Rückstreurate für die Würfel aus Aluminium, Eisen und Blei bestimmt. Sie steigt in der Reihenfolge Aluminium, Eisen, Blei an.

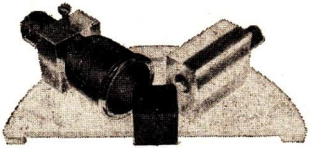


Abb. 7.6.6./1
Demonstrationsrückstreuanordnung

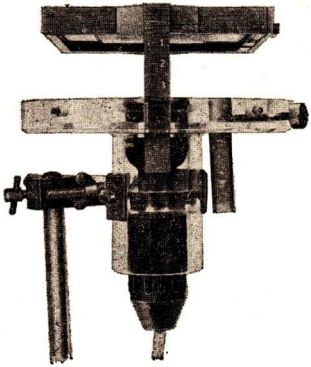


Abb. 7.6.6./2 Praktikumsrückstreuanordnung

Variante b

Zur Gewährleistung konstanter Abstände von Zählrohr und Quelle und zur Abschirmung baut man sich entsprechend Abbildung 7.6.6./2 eine zweiteilige Rückstreuanordnung. Der Abstand des Halters für das Rückstreumaterial muß sich gegenüber dem Unterteil verstellen lassen. Die Zählrohrspannung wird entsprechend V 6.4.1., Variante c, angelegt.

1. Teilversuch: Optimaler Abstand Strahler-Rückstreumaterial

Auf den Halter wird eine Rückstreuplatte von Sättigungsschichtdicke (s. u.) gelegt und für verschiedene Abstände die Rückstreurate eine Minute lang gemessen. Ein mögliches Ergebnis ist in Abbildung 7.6.6./3 dargestellt. Demnach beträgt der optimale Abstand, bei dem die Rückstreurate am größten ist, 1,5 cm. Er wird für die weiteren Messungen verwendet.

2. Teilversuch: Sättigungsschichtdicke

Für verschiedene Folien aus Polyäthylen (Dicke 0,03 mm) oder Aluminium (Dicke 0,02 mm) wird die Rückstreurate gemessen und grafisch dargestellt (Abb. 7.6.6./4). Oberhalb einer bestimmten Schichtdicke bleibt die Rückstreurate konstant (Sättigungsschichtdicke).

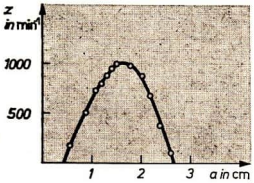


Abb. 7.6.6./3 Rückstreurate als Funktion des Abstandes

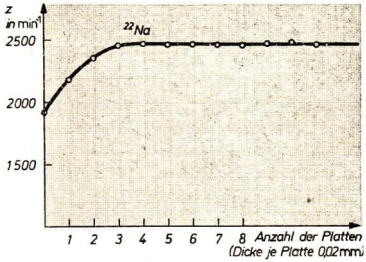


Abb. 7.6.6./4 Rückstreurate als Funktion der Schichtdicke

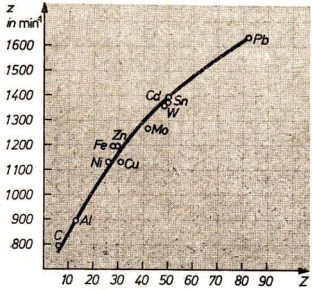


Abb. 7.6.6./5 Rückstreurate als Funktion der Ordnungszahl

3. Teilversuch: Ordnungszahlabhängigkeit

Für verschiedene Stoffe, z. B. Graphit ($Z = 6$), Aluminium ($Z = 13$), Eisen ($Z = 26$), Zink ($Z = 30$), Zinn ($Z = 50$), Wolfram ($Z = 74$) und Blei ($Z = 82$) werden die Rückstreuraten eine Minute lang gemessen und grafisch dargestellt (Abb. 7.6.6./5). Dabei ergibt sich mit steigender Ordnungszahl eine erhöhte Rückstreurate.

Bemerkung

Bestimmt man zusätzlich die Rückstreurate z_L in Luft ohne Rückstreumaterial, den Nulleffekt z_0 und berechnet den Rückstreufaktor f_R nach der Gleichung

$$f_R = \frac{z - z_0}{z_L - z_0},$$

dann lassen sich die Meßwerte mit der Funktion

$$f_R = a \cdot Z^b$$

beschreiben (Z ... Ordnungszahl des Rückstreumaterials). Die Konstanten a und b haben die Werte $a = 0{,}0855$ bzw. $b = 0{,}666$.

7.7. Eigenschaften der Gammastrahlen

7.7.1. Gammaspektroskopie

1. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co, ^{137}Cs)
2. Szintillationszähler (z. B. VA-S-50 mit Anthrazen-Kristall)
3. Hochspannungsquelle (1000 V —)
4. Breitbandlinearverstärker (z. B. VA-V-100)
5. Demonstrationsoszillograf mit Fotovorsatz
6. Graukeil
7. Kamera mit Film (z. B. NP 27)
8. Lichtleitpaste
9. Entwicklerdose
10. Entwickler (z. B. A 49)
11. Fixierbad (z. B. A 304)

Methodische Hinweise

1. Wie im V 7.6.2. kann sowohl die Struktur des Gammaspektrums als auch das Spektrum eines unbekannten Strahlers gemessen und identifiziert werden.
2. Im Gegensatz zu den anderen Strahlenarten treten bei der Gammastrahlung Wechselwirkungen mit dem Detektormaterial auf, die neue Linien hervorrufen (Compton- und Paarbildungslinie).

Versuch

Die Versuchsdurchführung erfolgt in gleicher Weise wie im V 7.6.2. Die Messungen werden zuerst mit ^{137}Cs und dann mit ^{60}Co durchgeführt. In Abbildung 7.7.1./1 und 2 sind die ermittelten Spektren dargestellt.

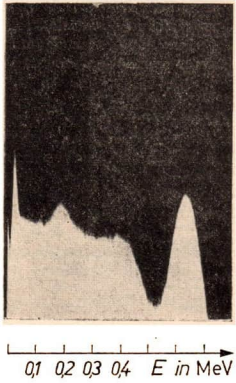


Abb. 7.7.1./1 Spektrum von ^{137}Cs

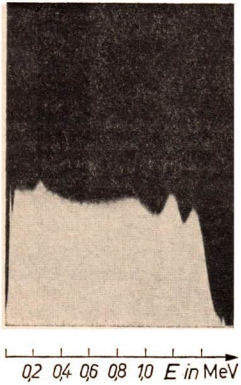
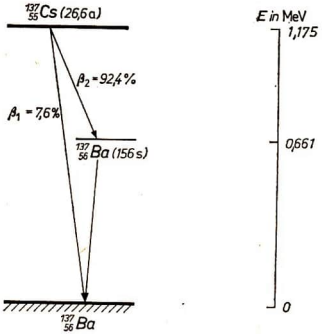


Abb. 7.7.1./2 Spektrum von ^{60}Co

Abb. 7.7.1./3 Termschema von ^{137}Cs



Auswertung

Auf Grund der einfachen Struktur wird das Spektrum des ^{137}Cs-Strahlers zur Eichung der Meßanordnung verwendet. Aus dem Termschema (Abb. 7.7.1./3) entnimmt man für die Gammalinie eine Energie von 0,661 MeV (Übergang des Isomer ^{137}Ba in den Grundzustand) und eicht damit die Meßapparatur (siehe V 7.5.1., Variante c).

Zusätzlich zur Gammalinie (auch oft als Fotolinie bezeichnet) tritt die durch Comptonstreuung bedingte Comptonlinie auf. Sie berechnet sich für einen Streuwinkel von $\varphi = 180°$ nach der Gleichung

$$E'_\gamma = \frac{m_0 c^2 \cdot E_\gamma}{m_0 c^2 + E_\gamma (1 - \cos\varphi)}.$$

Dabei bedeuten c = Lichtgeschwindigkeit, m_0 = Ruhemasse des Elektrons, E_γ, E'_γ = Energie der Gammaquanten vor und nach der Streuung.

Für ^{137}Cs ergibt sich demnach

$$E'_\gamma = \frac{0{,}511 \cdot 0{,}661}{0{,}511 + 0{,}661 \cdot 2}\,\text{MeV}$$

$$E'_\gamma = 0{,}184\ \text{MeV}.$$

Damit ist es möglich, das Spektrum des ^{60}Co zu identifizieren. Es ergeben sich folgende Linien:

$E_{\gamma_1} = 1{,}33$ MeV, $E_{\gamma_2} = 1{,}17$ MeV und

ein Betaübergang von 0,312 MeV. Die anderen Übergänge sind auf Grund ihrer geringen Wahrscheinlichkeit nicht beobachtbar.

Damit ergibt sich die Comptonlinie zu

$$E'_\gamma = \frac{0{,}511 \cdot 1{,}3}{0{,}511 + 1{,}3 \cdot 2}\,\text{MeV},$$

$$E'_\gamma = 0{,}21\ \text{MeV}.$$

Die scharfe Linie bei etwa 0,1 MeV ist die Paarbildungslinie.

Bemerkung

Der Versuch kann auch mit Hilfe eines Diskriminators (V 7. 5.1., Variante b) oder eines Analysators (V 7.5.1., Variante c) durchgeführt werden.

7.7.2. Gammaabsorption [SE]

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co, ^{137}Cs)
4. Absorberplatten aus Aluminium, Eisen, Kupfer und Blei (Dicke 5 mm)
5. Stoppuhr
6. Abschirmkammer oder Abschirmplatten aus 5 mm dickem Eisenblech
7. Zählrohrkabel

Methodische Hinweise

1. Im Demonstrationsversuch wird das Absorptionsvermögen der Gammastrahlung mit dem der Betastrahlung verglichen (Variante a).
2. In der Variante b wird das exponentielle Schwächungsgesetz der Gammastrahlung nachgewiesen und der Massenschwächungskoeffizient berechnet. Aus der Abhängigkeit $\mu^* = f(E)$ läßt sich die Energie eines unbekannten Gammastrahlers bestimmen.
3. Mit Hilfe der in Variante b bestimmten Schwächungskurven kann man die Halbwertsdicken berechnen (Variante c).

Versuchsanordnung

Der Aufbau der Versuchsanordnung erfolgt entsprechend dem Versuch 7.6.3. Zwischen Quelle und Zählrohr ist ein Abstand von etwa 5 cm einzuhalten. Die Absorberplatten werden unmittelbar vor das Zählrohr gebracht.

Variante a: Demonstration der Gammaabsorption

Da beim Demonstrationsversuch die Abschirmung nicht notwendig ist, kann man Zählrohr, Quelle und Absorberplatten an einem Stativ befestigen. Zuerst werden 2 mm dicke Plast- oder Aluminiumplatten vor das Zählrohr gebracht, die, wie beim V 7.6.3., Variante a, gezeigt, eine vollständige Absorption der Betastrahlen bewirken. Es ergibt sich eine kaum feststellbare Schwächung der Gammastrahlen. Erst die Verwendung von Eisen, Kupfer- oder Bleiplatten von einigen Zentimetern Dicke führt zu einer merklichen Absorption.

Variante b: Gammaabsorptionskurven

Zwischen Zählrohr und Quelle werden Eisen-, Kupfer- und/oder Bleiplatten von jeweils 5 mm Dicke gebracht und die Zählrate eine Minute lang gemessen. Die Meßwerte werden halblogarithmisch dargestellt (Abb. 7.7.2./1). Als Quelle kann man ^{137}Cs und ^{60}Co verwenden.

Auswertung

Die Berechnung der Massenschwächungskoeffizienten erfolgt in gleicher Weise wie beim V 7.6.3., Variante b, über die Halbwertsflächenmassen. Aus der Abbildung 7.7.2./2 läßt sich aus der empirisch für verschiedene Elemente ermittelten Funktion $\mu^* = f(E)$ die Energie des verwendeten Gammastrahlers berechnen.

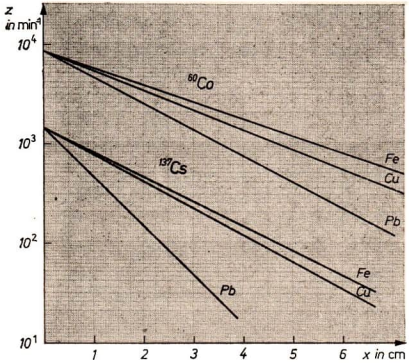


Abb. 7.7.2./1
Absorptionskurven für ^{60}Co und ^{137}Cs

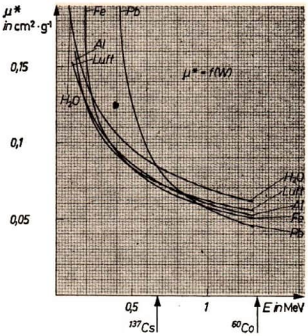


Abb. 7.7.2./2
Massenschwächungskoeffizient als Funktion der Energie

Beispiel

In der nachfolgenden Tabelle sind für verschiedene Metalle Halbwertsdicken und Schwächungskoeffizienten bei Verwendung der Gammastrahler ^{137}Cs und ^{60}Co angeführt.

Quelle	Absorber	ϱ in g cm^{-3}	$x_{1/2}$ in cm	$d_{1/2}$ in g cm^{-2}	μ^* in cm^2 g^{-1}
^{137}Cs	Al	2,72	3,5	9,64	0,072
	Fe	7,8	1,2	9,35	0,074
	Cu	8,93	1,12	9,97	0,069
	Pb	11,35	0,60	6,78	0,102
^{60}Co	Al		5,2	14,2	0,049
	Fe		1,7	13,3	0,052
	Cu		1,53	13,6	0,051
	Pb		1,13	12,8	0,054

Variante c: Demonstration der Halbwertsdicke

Es werden zunächst die Impulsraten ohne Absorber eine Minute lang bestimmt. Danach werden Absorberplatten verschiedener Materialien von Halbwertsdicke zwischen Quelle und Zählrohr gebracht und die Impulsraten bestimmt, die etwa halb so groß wie die Anfangszählraten sind.
Damit kann sowohl der Begriff der Halbwertsdicke als auch das unterschiedliche Absorptionsvermögen einzelner Stoffe qualitativ demonstriert werden.

7.7.3. Reichweite der Gammastrahlen [SE]

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählrohrkabel
3. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
4. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co)
5. optische Bank (100 cm) mit 2 Reitern
6. Längenmeßstab
7. Stoppuhr

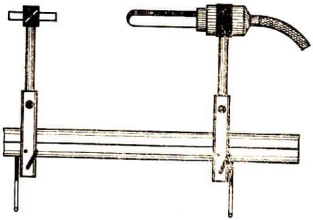


Abb. 7.7.3./1
Versuchsaufbau zur Reichweitemessung

Methodischer Hinweis

Bei diesem Versuch soll in Analogie zum Licht das Abstandsgesetz für Punktquellen nachgewiesen werden. Allerdings treten bei kleinen Abständen Abweichungen, die durch die Totzeit und den Geometriefaktor bedingt sind, auf. Bei großen Entfernungen ($r > 0{,}5$ m) macht sich die Absorption der Luft bemerkbar.

Versuch

Zählrohr und Quelle (^{60}Co) werden auf einer optischen Bank befestigt (Abb. 7.7.3./1). An das Zählrohr wird entsprechend V 6.4.1., Variante a, die Arbeitsspannung angelegt und einige Minuten lang der Nulleffekt bei entfernter Quelle gemessen.
Danach wird der Abstand Quelle — Zählrohr um jeweils 5 cm vergrößert und die Zählrate eine Minute lang bestimmt. Die Meßergebnisse werden doppeltlogarithmisch dargestellt (Abb. 7.7.3./2). Der Anstieg der Kurve beträgt $n = -2$.

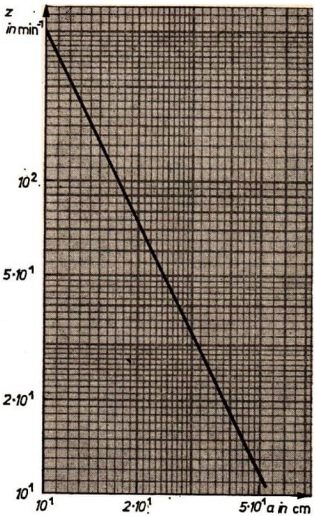


Abb. 7.7.3./2
Zählrate als Funktion des Abstandes

Bemerkungen

1. Wird das Zählrohr so gehaltert, daß der Zähldraht senkrecht zur Richtung der Gammastrahlung steht, so ergibt sich der Anstieg $|n| < 2$. Die Bedingung der Punktförmigkeit der Eintrittsfläche des Detektors und der Quellenfläche ist nicht mehr gegeben.
2. Die Meßergebnisse können auch nach der Beziehung

$$z_1 : z_2 : z_3 : \cdots = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2} : \frac{1}{r_3^2} : \ldots$$

ausgewertet werden.

radioaktive Strahlung

7.7.4. Streuung der Gammastrahlen

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählrohrkabel
3. Zählgerät
   (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
4. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co)
5. optische Bank (50 cm) mit 3 Reitern
6. Blei- oder Eisenzylinder ($d = 15$ mm; $h = 30$ mm)
7. 2 Eisenplatten (10 mm × 150 mm × 300 mm)
8. Stoppuhr

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll zeigen, daß Gammastrahlung ähnlich wie Lichtstrahlung reflektiert werden kann. Auf Grund ihrer hohen Energie dringt die Strahlung in den Reflektor ein, wird gebeugt und kann deshalb nicht mit den Gesetzen der geometrischen Optik beschrieben werden.

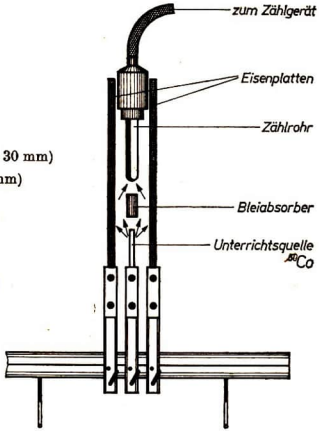


Abb. 7.7.4./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Streuung

Versuch

Quelle (^{60}Co), Bleizylinder und Zählrohr werden auf einer optischen Bank entsprechend Abbildung 7.7.4./1 angeordnet. Die Arbeitsspannung wird entsprechend V 6.4.1., Variante a, an das Zählrohr gelegt und die Zählrate 2 Minuten lang gemessen. Danach werden links und rechts von Zählrohr, Zylinder und Quelle im Abstand von 1 cm Eisenplatten aufgestellt und die Zählrate erneut bestimmt. Durch die Rückstreuung an den Eisenplatten erhöht sich die Zählrate deutlich. Die Streustrahlung besteht aus den durch Fotoeffekt erzeugten Elektronen und aus Gammaquanten, die durch Comptoneffekt gestreut worden sind.

8. Anwendungen von Radionukliden

8.0. Methodische Bemerkungen

8.0.1. Eine wachsende Anzahl von Werktätigen wird mit Fragen des Strahlenschutzes und der Zivilverteidigung konfrontiert. Das liegt an der zunehmenden Anwendung von Radionukliden in der Technik, der Medizin und Biologie, an der zunehmenden Bedeutung von Kernkraftwerken zur Energiegewinnung und nicht zuletzt an den notwendigen vorbereitenden Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung gegen Kernwaffen. Experimente zum Strahlenschutz sind daher in einem modernen Physikunterricht unerläßlich. Sie sind außerdem von fachübergreifendem Wert, da radioaktive Isotope auch im Chemie- und Biologieunterricht verwendet werden können.
Die Bestimmung der Radioaktivität der Atmosphäre (V 8.1.3.) führt deutlicher als Worte vor Augen, wie notwendig die Begrenzung von Kernwaffenversuchen ist. Der Versuch weist ferner darauf hin, daß bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie Fragen des Umweltschutzes (Luft, Wasser) beachtet werden müssen.
Im Physikunterricht sind gesundheitlich bedenkliche Strahlenschädigungen kaum zu befürchten, da im allgemeinen mit umschlossenen Strahlern oder nur sehr schwachen radioaktiven Stoffen in offener Form gearbeitet wird.

8.0.2. Bei der Vorbereitung und Auswertung von Experimenten zur Anwendung radioaktiver Strahlung soll an einigen ausgewählten Beispielen gezeigt werden, wie die theoretischen Erkenntnisse über die Eigenschaften radioaktiver Strahlung vielseitig in der Praxis genutzt werden. Dabei ist gerade der Zusammenhang von theoretischer Erkenntnis und praktischer Verwendung in Industrie, Landwirtschaft, Biologie und Medizin zu betonen. Eine einseitige Darstellung technischer Details würde nicht der Forderung entsprechen, den Schülern ein geordnetes, zusammenhängendes Wissen zu vermitteln. Die mitgeteilten Experimente gehören in die Gruppe der Durchstrahlungsverfahren. Man wird hier besonders auf den Zusammenhang mit den theoretischen Grundlagen von Absorptionsmessungen hinweisen und an die entsprechenden Experimente (V 7.6.3., V 7.7.2.) mit Beta- und Gammastrahlen erinnern.
Andere wichtige Verfahren, wie Markierungsverfahren und Bestrahlungsverfahren, wurden nicht aufgenommen. Sie erfordern entweder das Arbeiten mit offenen radioaktiven Stoffen oder Quellen mit höheren Aktivitäten. Es sollte aber nicht versäumt werden, im Anschluß an die Auswertung von Experimenten zum Durchstrahlungsverfahren auch auf diese wichtigen Anwendungsmöglichkeiten einzugehen.

8.1. Dosimetrie und Strahlenschutz

8.1.1. Aktivität und Exposition

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co; ^{137}Cs)
4. Stoppuhr
5. Zählrohrkabel
6. optische Bank (100 cm) mit zwei Reitern

Methodische Hinweise

1. Die wichtigsten Größen zur Charakterisierung der gefährlichen Auswirkungen durch radioaktive Strahler sind die Energiedosis D und die Energiedosisleistung. Zwischen der Exposition X und der Energiedosis setzt man beim Strahlenschutz $1\ \mathrm{R} = 1\ \mathrm{rd}$, wobei $2{,}58 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{C \cdot kg^{-1}} \triangleq 1\ \mathrm{Gy}$ gilt.
2. Bei bekannter Aktivität kann man aus der Grundgleichung für den Strahlenschutz die Expositionsleistung berechnen.
3. Beim vorliegenden Versuch wird eine normale Zählanordnung als Expositionsleistungsmesser geeicht.
4. Ergebnisse von Berechnungen zum Strahlenschutz werden immer nach oben abgerundet, d. h., es wird der ungünstigste Fall betrachtet, um das Risiko möglichst gering zu halten.
5. Bei der Behandlung der Exposition können die Werte für die normale Strahlenbelastung der Bevölkerung und die Letaldosis diskutiert und Zusammenhänge zum Zivilschutz hergestellt werden.

Versuch

Die Aktivität A des Strahlers wird als bekannt vorausgesetzt. Sie kann entweder nach V 7.3.1. oder 7.3.2. bestimmt werden, oder es wird die Aktivität des Strahlers laut Meßdatum mit der Halbwertszeit und dem Alter auf die gegenwärtige Aktivität umgerechnet.
Danach wird nach der Strahlenschutzgleichung bei Vernachlässigung der Absorption in Luft (bei Gammastrahlung bis zu Abständen von etwa $r = 0{,}5$ m möglich) die Expositionsleistung für verschiedene Abstände berechnet.

$$\frac{X}{t} = \frac{\Gamma \cdot A}{r^2}.$$

Die spezifische Gammastrahlungskonstante Γ beträgt für ^{60}Co $2{,}52 \cdot 10^{-18}\ \frac{\mathrm{A\ m^2}}{\mathrm{Bq\ kg}} = 1{,}3\ \frac{\mathrm{R\ m^2}}{\mathrm{h\ Ci}}$, und für ^{137}Cs ist $\Gamma = 0{,}63 \cdot 10^{-18}\ \frac{\mathrm{A\ m^2}}{\mathrm{Bq\ kg}} = 0{,}35\ \frac{\mathrm{R\ m^2}}{\mathrm{h\ Ci}}$.

Die Expositionsleistungen werden in $\mathrm{A\ kg^{-1}}$ angegeben. Danach mißt man bei gleichem Versuchsaufbau wie im V 7.7.4. die Zählrate als Funktion des Abstandes. Damit kann man die Eichkurve konstruieren, indem die gemessenen Zählraten

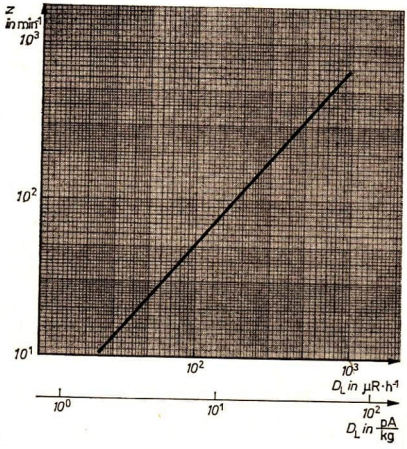


Abb. 8.1.1./1
Zählrate als Funktion der Dosisleistung

als Funktion der berechneten Expositionsleistungen dargestellt werden (Abb. 8.1.1./1).

Bemerkung

Bei Vorhandensein eines Expositionsleistungsmessers, wie er etwa bei der Zivilverteidigung verwendet wird, kann man statt der Berechnung die Expositionsleistungen für verschiedene Abstände messen. Bei den geringen Aktivitäten der Schulstrahler sind die Meßwerte aber sehr ungenau.
Die Eichung der Zählapparatur erfolgt wie oben beschrieben.

8.1.2. Isodosen

1. Fensterzählrohr (BOH-41)
2. Zählgerät
   (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Stoppuhr
4. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr)
5. Polarkoordinatenpapier
6. Zählrohrkabel

Methodische Hinweise

1. Zur Berechnung der maximal zulässigen Aufenthaltsdauer bei Kernstrahlungsmessungen einer vorgegebenen experimentellen Anordnung muß man die Exposition bzw. Expositionsleistung in verschiedenen Abständen und Richtungen von einem Strahler kennen.

2. Bei bekannter Aktivität und vorgegebener Entfernung ist nur eine grobe Abschätzung der Expositionsleistung möglich, weil verschiedene Faktoren (Fläche des Strahlers, Selbstabsorption, Rückstreuung, Absorption usw.) sehr schwer theoretisch zu erfassen sind. Deshalb ist man stets auf eine experimentelle Überprüfung der Verteilung der Expositionsleistungen in verschiedenen Entfernungen und Richtungen angewiesen.
3. Orte gleicher Expositionsleistung werden miteinander verbunden und ergeben die Isodosen.

Versuch

Die Quelle wird an einem Stativ befestigt. Um das Stativ schwenkbar befindet sich an einem langen Stativstab das Zählrohr (Abb. 8.1.2./1).

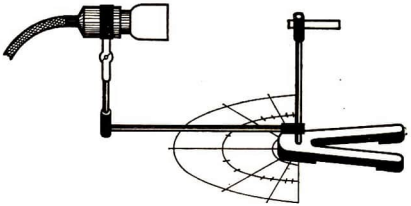


Abb. 8.1.2./1
Versuchsanordnung zur Messung von Isodosen

Man fertigt sich Polarkoordinatenpapier an, indem man im Abstand von 5 cm Kreisbögen schlägt und auf diesen alle 10° Punkte markiert (für 180°). Das so vorbereitete Papier (25 cm × 50 cm) wird unter die Versuchsanordnung gelegt, so daß sich der Strahler im Drehpunkt befindet. Für verschiedene Abstände und Winkel werden die Zählraten bestimmt und genau wie bei V 8.1.1. in Expositionsleistungen umgerechnet. Punkte gleicher Expositionsleistungen werden verbunden und ergeben die Isodosen.

8.1.3. Radioaktivität der Atmosphäre

1. Fensterzählrohr (z. B. BOH-41)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Plastgefäß mit Watte ®, dazu erforderliches Material:
   a) 4 Plastplatten (30 mm × 60 mm)
   b) 2 Plastplatten (60 mm × 60 mm)
4. Luftdusche
5. Stoppuhr
6. Zählrohrkabel

Methodischer Hinweis

Die Schüler sollten darauf hingewiesen werden, daß sich die Radioaktivität der Atmosphäre vor allem durch überirdische Kernwaffenexperimente ergibt. Aus diesem Grund werden ständig mit Hilfe von Luftfiltern, in denen Staubteilchen und Aerosole aufgefangen werden, Kontrollen durchgeführt.

Versuch

In ein Plastgefäß wird eine große Öffnung für das Zählrohrfenster bzw. die Luftdusche gebohrt. Eine zweite kleinere Öffnung dient zum Auslassen der eingeblasenen Luft. Das Gefäß wird mit Watte gefüllt und vor das Zählrohr gebracht. Die Zähl-

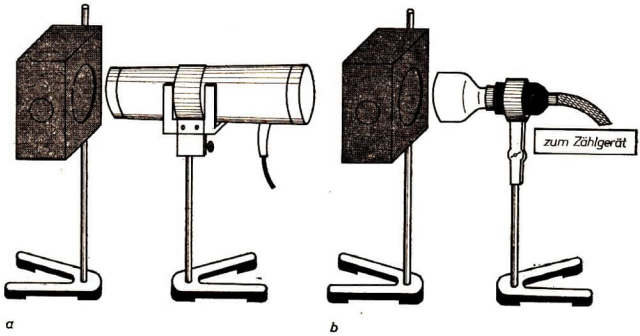


Abb. 8.1.3./1 Versuchsaufbau zum Nachweis der Radioaktivität der Atmosphäre

rate wird gemessen. Danach wird das Plastgefäß unmittelbar vor der Luftdusche befestigt (Abb. 8.1.3./1). Die Luftdusche wird eingeschaltet und etwa eine Stunde lang Luft durch das Gefäß gepumpt. Danach wird wieder die Zählrate gemessen. Sie liegt deutlich über dem Nulleffekt.

Bemerkung

Wenn das Abklingen der Zählrate über mehrere Stunden verfolgt wird, so stellt man eine komplexe Zerfallskurve fest, die sich aus kurzen und langen Halbwertszeiten zusammensetzt. Die radioaktiven Nuklide sind vor allem Folgeprodukte von Emanationen.

radioaktive Strahlung

8.1.4. Aufsuchen von radioaktiven Kontaminationen

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählrohrkabel
3. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradaptere)
4. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co; ^{137}Cs; ^{85}Kr; ^{22}Na)
5. Karton (10 cm × 50 cm × 50 cm)

Methodischer Hinweis

Eine Kontamination, d. h. eine radioaktive Verunreinigung, z. B. einer Arbeitsfläche, darf in der Schule aus Strahlenschutzgründen nicht herbeigeführt werden. Man kann jedoch das Aufspüren von Kontaminationen dadurch demonstrieren, daß man für den Schüler unsichtbare Strahlungsquellen mit einer Zählapparatur aufsucht.

Versuch

In einem geschlossenen Karton werden Strahlungsquellen in unregelmäßiger Verteilung angeordnet. Mit Hilfe eines Zählrohres werden die Stellen maximaler Impulsdichte aufgesucht und markiert. Bei geöffnetem Deckel wird danach die gemessene Impulsdichteverteilung mit der Lage der Quellen verglichen.

radioaktive Strahlung

8.2. Anwendungen von Radionukliden in der Technik

8.2.1. Dickenmessung

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Stoppuhr
4. Filmmaterial oder Plastfolie
5. Zählrohrkabel
6. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr)

Methodischer Hinweis

Dickenmeßverfahren beruhen auf der Absorption von Kernstrahlung und besitzen den Vorteil, daß kontinuierlich und berührungslos gemessen werden kann. Die Meßwerte lassen sich zur Regelung von Prozessen verwenden. Das Verfahren ist um so genauer, je steiler der Verlauf der Absorptionskurve ist. Deshalb müssen Art und Energie des Strahlers dem Meßgut angepaßt sein.

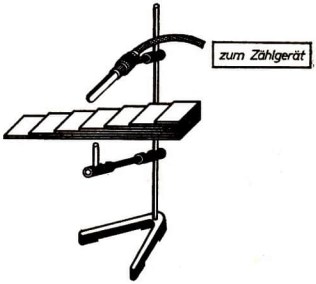


Abb. 8.2.1./1 Prinzip der Dickenmessung

Versuch

Filmstreifen oder Plastfolien werden so übereinandergeklebt, daß ein Band mit stufenförmiger Zunahme der Schichtdicke entsteht (Abb. 8.2.1./1). Die Breite des Bandes beträgt etwa 9 cm, die Länge der Stufen etwa 5 cm. Die letzte Stufe besteht aus 7 Schichten. Das Band wird mit dünnem Seidenpapier eingeschlagen. Zählrohr und Quelle (^{85}Kr) werden im Abstand von 5 cm an einem Stativ befestigt. Bei Vorbeiführen des Bandes am Zählrohr kann man anhand der Impulsdichten die unterschiedlichen Schichtdicken verfolgen.

8.2.2. Defektoskopie

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Metallplatte mit Bohrlöchern ⓢ (10 mm × 100 mm × 100 mm)
4. Zählrohrkabel
5. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co bzw. ^{137}Cs)

Methodischer Hinweis

Neben Röntgenstrahlen werden auch Gammastrahlen für Grobstrukturuntersuchungen verwendet. In der Technik wird dabei hauptsächlich Filmmaterial zur Registrierung benutzt. Für einen Demonstrationsversuch ist die Verwendung eines Zählrohres günstiger.

Versuch

In einer Eisenplatte werden „Strukturfehler" durch Bohrlöcher simuliert. Die Bohrstellen werden ungleichmäßig auf die Platte verteilt. Der Durchmesser eines Loches beträgt mindestens 10 mm, die Tiefe höchstens 8 mm. Die Plattenseite, auf der sich die gebohrten Vertiefungen befinden, wird mit Papier zugeklebt. Zählrohr und Quelle ^{137}Cs oder ^{60}Co werden an einem Stativ im Abstand von 5 cm befestigt (Abb. 8.2.2./1). Die Platte wird „punktweise" verschoben und die Impulsdichte verfolgt. Alle Stellen erhöhter Zählrate werden markiert. Am Ende des Versuches werden die beobachteten mit den tatsächlichen Strukturfehlern verglichen.

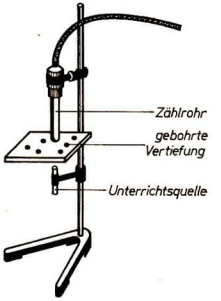


Abb. 8.2.2./1 Versuchsaufbau zur Defektoskopie

Bemerkung

Einen Analogieversuch kann man auch wie folgt aufbauen: In eine pneumatische Wanne wird Wasser gefüllt und die Absorption in Richtung der größten Ausdehnung der Wanne gemessen (mindestens 12 cm). Danach wird ein leerer Glaskolben eingebracht, der den Strukturfehler (Lunker) simuliert. Man beobachtet ein Ansteigen der Zählrate.

radioaktive Strahlung

8.2.3. Inhalts- und Packkontrolle

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr)
4. Streichholzschachteln unterschiedlicher Füllung
5. Stoppuhr
6. Zählrohrkabel

Methodischer Hinweis

Inhalts- und Packkontrolluntersuchungen beruhen auf Absorptionsmessungen. Der Meßaufgabe entsprechend müssen Art und Energie des Strahlers ausgewählt werden.

Versuch

Strahlungsquelle und Zählrohr werden im Abstand von 5 cm an einem Stativ befestigt. Für Streichholzschachteln mit unterschiedlicher Füllung wird die Zählrate gemessen. Vor jeder Messung muß durch Schütteln eine gleichmäßige Schichtung der Hölzer erreicht werden.

radioaktive Strahlung

8.2.4. Füllstandsmessungen

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Meßzylinder (500 ml; ∅ 5 cm)
4. Unterrichtsquellensatz (^{137}Cs)
5. Zählrohrkabel

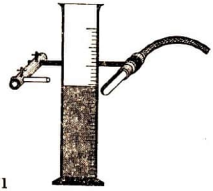


Abb. 8.2.4./1
Versuchsaufbau zu Füllstandsmessungen

Methodischer Hinweis

Bei Füllstandsmessungen können Strahler und Detektor entweder in Richtung der Füllhöhe oder quer dazu angeordnet werden. Für die Demonstration ist das hier beschriebene Prinzip der Einstrahlenschranke am einfachsten und eindrucksvollsten. In der Technik werden die Signale des Detektors meist zur Regelung eines Prozesses verwendet.

Versuch

Ein Meßzylinder wird mit Papier beklebt, so daß der Inhalt nicht erkennbar ist, und mit Wasser gefüllt. An einem Stativstab werden Quelle (^{137}Cs) und Zählrohr so befestigt, daß sie sich gegenüberstehen und in Richtung der Wassersäule gemeinsam bewegt werden können. Der Abstand von Zählrohr und Quelle soll nicht viel größer als der Durchmesser des Meßzylinders sein (Abb. 8.2.4./1). Die deutliche Änderung der Zählrate zeigt die Füllstandshöhe an.

radioaktive Strahlung

8.2.5. Volumenbestimmung

1. Zährohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Stoppuhr
4. Gummihandschuh
5. Becherglas (500 ml)
6. Becherglas (100 ml)
7. Uranylnitrat (9 g)
8. Tablett
9. Zählrohrkabel

Methodische Hinweise

1. Die hier geschilderte Methode der Volumenbestimmung beruht auf der Verdünnungsanalyse.
2. Das Ansetzen und Mischen der Probe darf nur vom Lehrer auf einem Tablett erfolgen.

Versuch

In 50 cm³ Wasser werden 9 g Uranylnitrat gelöst. Nachdem die Zählrate gemessen wurde, vermischt man diese Probe mit einer unbekannten Wassermenge, entnimmt davon 50 cm³ Probenflüssigkeit und bestimmt die Zählrate.
Bei allen Messungen wird das Zählrohr mit einem Gummifinger überzogen. Es ist darauf zu achten, daß die Eintauchtiefe für alle Messungen gleich sein muß. (Markierung vor Versuchsbeginn!)

Auswertung

Das unbekannte Volumen V_x berechnet sich nach der Gleichung

$$V_x = V_1 \cdot \left(\frac{A_1}{A_x} - 1\right).$$

Dabei bedeutet A_1 die Aktivität bzw. Zählrate der Probe mit bekanntem Volumen V_1. Es ist A_x die Aktivität bzw. Zählrate des unbekannten Volumens.

9. Wellen- und Teilcheneigenschaften von Mikroobjekten

9.0 Methodische Bemerkungen

9.0.0. Bei den in diesem Kapitel wiedergegebenen Experimenten sind in besonderem Maße die Beziehungen zwischen den festgestellten experimentellen Fakten und den zu ihrer Interpretation verwendeten Modellvorstellungen zu beachten. Struktur und Bewegungsformen der Mikroobjekte werden im Physikunterricht im allgemeinen nicht mit den Verfahren der modernen Quantentheorie beschrieben. Meist wird versucht, unter Verwendung des makrophysikalischen Teilchen- bzw. Wellenbildes eine erste Einführung in grundlegende Ergebnisse der Mikrophysik zu geben. Werden bei der erforderlichen didaktischen Vereinfachung die Relationen zwischen den makrophysikalischen Modellen und den realen Mikroobjekten nicht sorgfältig beachtet, so treten leicht erhebliche „Abbildungsfehler" bei der Darstellung mikrophysikalischer Sachverhalte auf.
Um Widersprüche zu den Ergebnissen der Fachwissenschaft zu vermeiden, sollte deshalb bei der Interpretation experimenteller Fakten mit dem Teilchen- oder Wellenbild stets deutlich die Realitätsebene von der Modellebene unterschieden werden. Das erfordert, die Übereinstimmungen zwischen experimentellen Ergebnissen und aus dem Modell folgenden Aussagen möglichst genau herauszuarbeiten, Unterschiede aufzuzeigen und auf offene Fragen hinzuweisen. Im Rahmen des Möglichen können dabei die bekannten Verfahren der *experimentellen Methode* bzw. der *Modellmethode* angewendet werden.
Die Darstellung der Dualismusproblematik kann im Physikunterricht auf verschiedenen Niveaustufen erfolgen. Bei der einfachsten Stufe werden bestimmte experimentelle Fakten, wie etwa Interferenzerscheinungen bei Licht, Röntgenstrahlung oder Elektronenstrahlen, allein mit dem Wellenbild, andere, wie z. B. der Fotoeffekt, nur mit dem Teilchenbild interpretiert. Auf einer höheren Stufe wird dagegen eine stärkere Annäherung an die Ergebnisse der Quantentheorie versucht, indem das gleiche Experiment mit den Aussagen sowohl des Teilchen- als auch des Wellenmodells verglichen wird. Anhand solcher Vergleiche wird die Erkenntnis gewonnen, daß das Verhalten von Mikroobjekten nur in einigen Punkten mit dem von Teilchen bzw. Wellen übereinstimmt. Die Grenzen der makrophysikalischen Modelle werden genauer dargestellt als bei der ersten Variante. Die Möglichkeit einer logisch widerspruchsfreien Synthese von Wellen- und Teilchenaspekt mit Hilfe des Wahrscheinlichkeitsbegriffs wird angedeutet.
Die Auswertung experimenteller Fakten auf dieser Niveaustufe setzt voraus, daß die Schüler einige Kenntnisse aus dem Bereich der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung besitzen. Insbesondere sollten sie mit den Begriffen „Häufigkeit" und „relative Häufigkeit" zufälliger Ereignisse sowie mit dem Wahrscheinlichkeitsbegriff vertraut sein (vgl. Abschnitt 7.1.).

9.0.1. In der schulbezogenen Literatur zur Mikrophysik wird häufig das „Doppelspaltexperiment" zur Einführung in die Bewegungsproblematik von Mikroobjekten verwendet. Es wird meist als reines Gedankenexperiment behandelt, da z. B. die Elektronenbeugung am Doppelspalt nicht mit schulischen Mitteln als Realversuch gezeigt werden kann. Es ist aber methodisch zweckmäßig, die Verhältnisse am Doppelspalt wenigstens mit makrophysikalischen Teilchen bzw. Wellen zu veranschaulichen und so eine geeignete Grundlage für das Verständnis der Interferenzerscheinungen mit Mikroobjekten zu schaffen.
Die (qualitativen) Versuche dieses Abschnitts demonstrieren das Typische der Bewegungsform von Makroteilchen und Wellen beim Passieren eines Doppelspalts. Dabei werden nur die Ergebnisse akzentuiert, die für einen Vergleich mit dem Verhalten von Mikroobjekten wesentlich sind:

- Teilchen bewegen sich auf bestimmten Bahnen. Ein bestimmtes Teilchen fliegt daher eindeutig entweder durch Spalt 1 oder 2. Hinter dem Doppelspalt treten keine Interferenzen auf, vielmehr addieren sich die Häufigkeiten der durch Spalt 1 bzw. 2 geflogenen Teilchen (vgl. V 9.1.1.).
- Bei der Wellenbewegung wird dagegen im allgemeinen ein ausgedehnter Bereich erfaßt, so daß dieser Bewegung keine bestimmte Bahn zugeordnet werden kann. Das Wellenfeld wird gleichzeitig sowohl an Spalt 1 wie 2 wirksam. Die beiden Wellenzüge hinter dem Doppelspalt überlagern sich und bilden durch Verstärkung und Auslöschung ein Interferenzmuster.
- Dieser Sachverhalt kann mit der Wellenwanne demonstriert werden (vgl. V 9.1.2.). Der Versuch ist bereits aus der Wellenlehre bekannt. Er wird hier mit einem neuen Akzent versehen, nämlich mit der Darstellung der Intensitätsverteilung des Wellenfeldes hinter dem Doppelspalt. Sie ist von Bedeutung für einen Vergleich mit der Häufigkeitsverteilung von Makroteilchen bzw. von Mikroobjekten nach Passieren eines Doppelspalts. So entspricht bei der Elektronenbeugung am Doppelspalt die Häufigkeitsverteilung der Elektronen nicht dem bei Makroteilchen (V 9.1.1.) erhaltenen Ergebnis. Sie ist im Prinzip vielmehr der Intensitätsverteilung des Wellenfeldes bei V 9.1.2. analog.

Bei einem gebundenen Elektron in einem definierten Energiezustand zeigt bekanntlich die räumliche Verteilung der Ortswahrscheinlichkeitsdichte Analogien zum Verlauf stehender Wellen. So können sich bei den kettenförmigen Molekülen cyaninartiger Farbstoffe einzelne Eletkronen frei zwischen den Potentialwällen an den Molekülgrenzen bewegen, etwa wie ein Elektron zwischen zwei vollelastisch reflektierenden Wänden (Reflexionsoszillator). Die Verteilung der Ortswahrscheinlichkeitsdichte entspricht dabei dem Verlauf des Amplitudenquadrats einer eindimensionalen stehenden Welle unter den Bedingungen der Reflexion am festen Ende. Zur Veranschaulichung der Maxima und Minima kann z. B. ein langer, waagerecht ausgespannter Schlauch benutzt werden, dessen eines Ende von Hand periodisch auf und ab bewegt wird. Den verschiedenen Schwingungszuständen der stehenden Seilwelle mit unterschiedlicher Anzahl von Knoten entsprechen verschiedene Energiezustände des Elektrons mit unterschiedlicher Verteilung der Ortswahrscheinlichkeitsdichte.
Beim Elektron des Wasserstoffatoms bestehen Analogien zu dreidimensionalen stehenden Wellen mit Knotenflächen. Sie können mit schulischen Mitteln nur schwer demonstriert werden. Als Überleitung von ein- zu dreidimensionalen sind zweidimensionale stehende Wellen geeignet, bei denen Knotenlinien auftreten.

Sie werden im allgemeinen mit den Chladnischen Klangfiguren gezeigt. Bei der Anwendung derartiger Versuche im Bereich der Atomphysik ist deutlich auf deren Analogiecharakter hinzuweisen, um mechanische Fehldeutungen der Bewegungsform im Bereich der Mikrophysik zu vermeiden!

9.0.2. Mikroteilchen wie z. B. Elektronen oder die Bausteine des Atomkerns sind zwar keine Teilchen im Sinne der Makrophysik, der Teilchenaspekt kann aber angewendet werden, solange die durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsbeziehung gesetzten Grenzen nicht überschritten werden. Experimentelle Fakten, die mit dem korpuskularen Aspekt vereinbar sind, werden bereits bei einigen Versuchen vermittelt, die in anderen Abschnitten beschrieben werden. Sie werden in die folgenden Ausführungen einbezogen. Für den Physikunterricht sind vor allem die folgenden korpuskularen Eigenschaften von Bedeutung:

— Elektronen besitzen eine bestimmte, nicht weiter teilbare Elementarladung und eine bestimmte Ruhemasse (vgl. Abschnitt 3.2. und 3.3.).

— Elektronen (und andere Mikroteilchen) können mit geeigneten Detektoren einzeln nachgewiesen und gezählt werden, z. B. mit einem Geiger-Müller-Zählrohr, einem Szintillationszähler oder einem Halbleiterdetektor (vgl. hierzu Kapitel 7).

— An Elektronen und anderen Mikroteilchen können ferner Größen (genauer Observablen) gemessen werden, wie z. B. Ort, Geschwindigkeit bzw. Impuls, kinetische Energie, die auch im Teilchenbild erklärt sind.

So können Elektronen weitgehend lokalisiert nachgewiesen werden, d. h., ihr Ort kann bestimmt werden. Dagegen ist es nicht möglich, daß etwa Teile eines Elektrons gleichzeitig an verschiedenen Stellen von mehreren Detektoren registriert werden, wie es nach der Modellvorstellung der „Elektronenwelle" bzw. des „verschmierten Elektrons" zu erwarten wäre.
Auch Licht-, Röntgen- oder Gammaquanten breiten sich nicht in Form von kugelförmigen oder stark divergierenden Wellenzügen aus. In vereinfachter Form kann die Unzulänglichkeit des Wellenbildes durch die Abhängigkeit der Zählrate von Blenden (V 9.2.2.) oder durch Koinzidenzmessungen (V 9.2.3.) demonstriert werden. Würden sich beispielsweise Gammaquanten wie kugelförmige Wellenzüge ausbreiten, so wäre die Anzahl der auf eine Detektorfläche treffenden Wellenzüge unabhängig von der Größe dieser Fläche. Tatsächlich nimmt aber die Zählrate bei Verkleinerung der wirksamen Detektorfläche durch Blenden stark ab. Zwei im gleichen Abstand vom Strahler einander gegenüberstehende Detektoren müßten bei jedem kugelförmigen Wellenzug gleichzeitig ansprechen. Mit einer Koinzidenzanlage kann gezeigt werden, daß derartige Koinzidenzen nicht auftreten.
Auch die Abnahme der Zählrate bei Vergrößerung des Abstandes Strahler — Detektor spricht gegen die Ausbreitung von Strahlungsquanten als kugelförmige Wellenzüge. Nach dem Wellenbild verringert sich zwar die Amplitude der Wellenzüge mit wachsendem Abstand vom Wellenzentrum, aber nicht ihre Anzahl. Bei einem Punktstrahler, der Teilchen regellos in alle Richtungen des Raumes emittiert, nimmt dagegen die Anzahl der durchschnittlich je Zeiteinheit auf die Detektorfläche fallenden Teilchen quadratisch mit dem Abstand ab. Die experimentelle Bestimmung des quadratischen Abstandsgesetzes bei Gammaquanten wird in V 7.7.3. beschrieben.

Möglichkeiten zur Bestimmung der kinetischen Energie von Mikroteilchen mit schulischen Mitteln sind in den Versuchen zur Alphaspektroskopie (V 7.5.1.) und Betaspektroskopie (V 7.6.1. und 7.6.2.) dargestellt.
Es ist zu beachten, daß die Lokalisierung von Mikroobjekten bei den angegebenen Versuchen auf makrophysikalische Dimensionen beschränkt bleibt. Die bei der Alpha- oder Betaspektroskopie erreichbare Genauigkeit der Energiebestimmung ist gleichfalls sehr begrenzt. Die durch die Unbestimmtheitsbeziehung gesetzten prinzipiellen Grenzen der Meßgenauigkeit bleiben daher noch weit entfernt. Schülern der Abiturstufe sollte dies mitgeteilt werden. Sie werden dann auch verstehen, daß z. B. die Spuren in einer Nebelkammer mit der makrophysikalischen Bahnvorstellung verträglich sind (vgl. V 6.2.1.) oder daß bei der Betaspektroskopie mit magnetischem Spektrometer (V 7.6.1.) anscheinend Ort und Geschwindigkeit der Elektronen gleichzeitig bestimmt werden.

9.0.3. Demonstrationsexperimente zum Welle-Teilchen-Verhalten des Lichts können im Physikunterricht mit verhältnismäßig geringem experimentellen Aufwand durchgeführt werden. Bei diesen Versuchen wird eine Anordnung, deren Wirkungsweise gemeinhin mit dem Wellenbild interpretiert wird (Gitter, Polarisationsfilter), mit einem Detektor zum Nachweis des Lichts gekoppelt, dessen Wirkung auf dem Fotoeffekt beruht. Die Erklärung des Lichtnachweises erfordert daher die Anwendung der Photonenvorstellung (vgl. Abschnitt 5.1. und 5.2.). Geeignete Detektoren sind Fotozellen oder Lichtzählrohre. Besser als durch bloße theoretische Überlegungen wird so direkt demonstriert, daß Licht gleichzeitig einige mit dem Teilchenbild und einige mit dem Wellenbild vereinbare Eigenschaften hat.
Eine vorläufige, dem möglichen theoretischen Niveau des Physikunterrichts angemessene Klärung der Dualismusproblematik kann durch die Zuordnung von Wellenintensität und Photonenanzahl erfolgen. So tritt nach dem Wellenbild bei einem Gitter ein Interferenzmuster mit Maxima und Minima der Wellenintensität auf, wobei die Intensität dem Quadrat der Wellenamplitude proportional ist. Bei V 9.3.1. werden in den Maxima des Interferenzmusters viele, in den Minima nur wenige Photonen registriert.
Entsprechendes gilt für V 9.3.2. Nach dem Wellenbild ist die Intensität J des Lichts, das Polarisator und Analysator passiert, vom Winkel φ zwischen den Polarisationsebenen abhängig: $J \sim \cos^2 \varphi$. Stimmen die Ebenen von Polarisator und Analysator überein, so kann das polarisierte Licht den Analysator ungeschwächt passieren. In diesem Fall wird eine große Anzahl von Photonen je Zeiteinheit durch Fotozelle oder Lichtzählrohr nachgewiesen. Mit wachsendem Winkel zwischen den Ebenen von Polarisator und Analysator nimmt die Anzahl N der registrierten Photonen entsprechend der Beziehung $N \sim \cos^2 \varphi$ ab.

9.0.4. Experimente zur Beugung von Röntgen- und Elektronenstrahlen zeigen die allgemeine Bedeutung des Wellenaspekts bei so verschiedenen Mikroobjekten wie Röntgenquanten und Mikroteilchen mit Ruhemasse. Sie sind ferner eine wichtige Grundlage für das Verständnis der vielseitigen wissenschaftlich-technischen Anwendungen der Röntgen- bzw. Elektronenbeugung bei der Strukturaufklärung von Kristallen und Molekülen.
Die Demonstration von Röntgen- oder Elektronenstrahlinterferenzen im Physikunterricht ist allerdings nur mit einem erheblichen apparativen Aufwand möglich. Im V 9.4.1. und 9.4.2. werden die zur Zeit bestehenden experimentellen Möglichkeiten am Beispiel der Röntgenstrahlen wiedergegeben.

Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse sollte auch auf die Grenzen des Wellenaspekts hingewiesen werden. Weder Röntgenquanten noch Elektronen breiten sich tatsächlich wie Wellenzüge aus. Vielmehr wird das Interferenzmuster aus einer Vielzahl von Einzeltreffern aufgebaut. Die Ergebnisse der Versuche zur Demonstration des Teilchenaspekts werden also durch die Interferenzversuche nicht aufgehoben (vgl. Abschnitt 9.2.). Die Synthese von Wellen- und Teilchenaspekt kann durch die Zuordnung der Trefferhäufigkeit auf der Fotoplatte zu der nach dem Wellenbild erwarteten Wellenintensität angedeutet werden (vgl. hierzu MB 9.0.0. und 9.0.3. sowie V 9.3.1.).

9.1. Vergleich von Teilchen- und Wellenbewegung

9.1.1. Doppelspaltexperiment mit Teilchen

Zum Vorversuch

1. Tageslichtschreibprojektor
2. Stahlkugel (⌀ 3 mm)
3. 2 Holzquader (1 cm × 1 cm × 10 cm)
4. 1 Holzwürfel (1 cm × 1 cm × 1 cm)

Zum Versuch

5. Doppelspalt Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Pappscheibe (20 cm × 20 cm)
6. Zeichenkarton (A 4 oder A 3) auf einer festen Unterlage (Pappe, Holzbrett)
7. Farbsprühdose

Methodische Hinweise

1. Der Wert des Versuches liegt in seinem Vergleich mit dem Doppelspaltexperiment mit Wellen (V 9.1.2.). Beide Versuche sollten daher zusammen in der gleichen Unterrichtsstunde durchgeführt werden.
2. Der Vorversuch soll das Charakteristische der Bewegung eines einzelnen Teilchens demonstrieren, beim Versuch liegt der Erkenntnisschwerpunkt auf der Häufigkeitsverteilung der Farbtröpfchen bzw. der Verteilung der Farbintensität auf dem Schirm.

Vorversuch

Die beiden Holzquader und der Holzwürfel werden so auf den Projektor gelegt, daß sie einen Doppelspalt bilden. Man läßt die Kugel mehrfach über die Glasscheibe auf den Doppelspalt zurollen. Dabei sollten folgende Fälle eintreten:

— Die Kugel wird an den Hindernissen reflektiert.
— Die Kugel rollt durch Spalt 1.
— Die Kugel rollt durch Spalt 2.

Die Bewegung der Kugel soll nicht zu schnell erfolgen, so daß sie gut beobachtet werden kann. Der Versuch veranschaulicht die mit dem Teilchenmodell verbundene

Bewegungsform. Die Teilchenbewegung erfolgt auf einer bestimmten Bahn entweder durch Spalt 1 oder Spalt 2, falls keine Reflexion an den Hindernissen stattfindet. Verläuft die Bewegung des Teilchens z. B. durch Spalt 1 (oder 2), so ist der Ablauf dieser Bewegung offensichtlich unabhängig davon, ob noch ein zweiter Spalt vorhanden ist oder nicht.

Versuch

In die Pappscheibe wird ein Doppelspalt eingeschnitten (Abmessungen eines Spalts 2 cm × 0,2 cm, Abstand der Spalte 0,2 cm). Der Abstand der Spalte sollte so klein sein, da sich sonst ein aus methodischen Gründen unerwünschtes Minimum der Farbintensität auf dem Schirm bilden kann. Pappscheibe und Zeichenkarton werden mit Stativteilen in einem Abstand von etwa 20 cm hintereinander befestigt. Unter die Anordnung ist zum Schutz des Tisches vor herablaufender Farbe Papier zu legen. Mit einer Farbsprühdose werden Farbtröpfchen aus 5 cm Entfernung in Richtung auf die Mitte des Doppelspalts geblasen (Abb. 9.1.1./1).

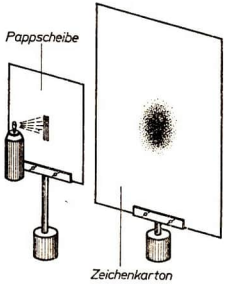
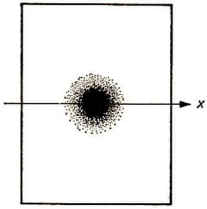


Abb. 9.1.1./1
Doppelspaltexperiment mit Farbsprühdose



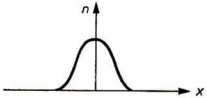


Abb. 9.1.1./2
Häufigkeitsverteilung der Farbtröpfchen

Auf dem Zeichenkarton tritt ein Farbfleck auf, dessen Intensität im Zentrum am größten ist. Aus der Intensitätsverteilung wird die Häufigkeit der Farbtröpfchen qualitativ abgeschätzt und grafisch dargestellt (Abb. 9.1.1./2). Diese Kurve unterscheidet sich grundlegend von der analogen Darstellung für die Intensität eines Wellenfeldes im V 9.1.2.

Bemerkungen

1. Unter Heranziehung der Ergebnisse des Vorversuchs kann darauf hingewiesen werden, daß die auf einem beliebigen Flächenelement des Schirms (Zeichenkarton) aufgetroffene Anzahl von Farbtröpfchen gleich der Summe der durch Spalt 1 und Spalt 2 zu diesem Flächenelement geflogenen Tröpfchen ist. Für die Gesamtintensität gilt deshalb $J_{1,2} = J_1 + J_2$.
2. Der Vorversuch läßt sich auch mittels des im V 1.3.6. beschriebenen Luftkissenaufsatzes zum Tageslichtschreibprojektor durchführen. Der Doppelspalt ist dann größer zu wählen. Die geringe Geschwindigkeit läßt hierbei eine genaue Beobachtung zu.

9.1.2. Doppelspaltexperiment mit Wellen

1. Wasserwellengerät (z. B. WSP 220)
2. Doppelspalt
3. Zeichenkarton (A 2)
4. Lineal

Methodischer Hinweis

Vergleiche MB 9.0.1. und MH Nr. 1 V 9.1.1.!

Vorversuch

Mit dem Wasserwellengerät wird eine fortschreitende Oberflächenwelle erzeugt und auf den Zeichenkarton projiziert. Es wird betont, daß einer Wellenbewegung keine bestimmte Bahn zugeordnet werden kann. Vielmehr wird ein ausgedehnter Bereich, der bei diesem Versuch flächenförmig ist, erfaßt. Es bildet sich ein „Wellenfeld".

Versuch

Vor den Erreger wird der Doppelspalt gestellt und ein Interferenzmuster erzeugt. Das Wellenfeld wird auf den Zeichenkarton projiziert. Dann wird auf den Zeichenkarton etwa in der Mitte des Wellenfeldes und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

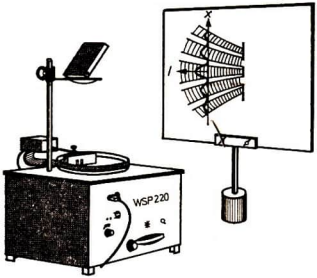


Abb. 9.1.2./1
Wellenintensität beim Doppelspaltversuch

eine x-Achse eingezeichnet und die Wellenintensität längs dieser Achse als Kurve aufgetragen (Abb. 9.1.2./1).
Es wird herausgestellt, daß jetzt Maxima und Minima der Wellenintensität auftreten, die durch Auslöschung bzw. Verstärkung der einzelnen Wellenzüge entstehen. Die Wellenintensität ist nicht die Summe der Intensitäten der beiden sich überlagernden Wellenzüge.

$$J_{1,2} \neq J_1 + J_2 .$$

Bemerkung

Anstelle des Zeichenkartons kann auch eine durchsichtige Folie verwendet werden, die über bzw. unter die Wellenwanne gelegt wird. Bei Geräten mit Zwischenbildhalter kann die Folie in diesen eingesetzt werden.

9.2. Demonstration des Teilchenaspekts bei kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung

9.2.1. Nachweis von Strahlungsquanten mit dem Zählrohr

Zu Versuch 1

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Schulröntgenröhre mit Stromversorgung und Abschirmung

Zu Versuch 2

Gerät 2., außerdem

4. Lichtzählrohr
5. UV-Strahler (z. B. Heimstrahler UV de Luxe)

Methodische Hinweise

1. Die folgenden Versuche machen die Schüler mit der Möglichkeit vertraut, energiereiche elektromagnetische Strahlung auch mit einem Zählrohr nachzuweisen. Die Auslösung der Impulse beruht bei Licht auf dem Fotoeffekt, bei der Röntgenstrahlung auch auf dem Compton-Effekt. Im Physikunterricht kann am Beispiel des Fotoeffekts erläutert werden, daß der Strahlennachweis mit dem Zählrohr nur mit der Annahme von energiereichen, diskreten Strahlungsquanten zu erklären ist.
2. Das diskontinuierliche Prasseln im Lautsprecher vermittelt einen anschaulichen Eindruck von der diskontinuierlichen, quantenhaften Natur der Strahlung. Allerdings ist die Anzahl der ausgelösten Impulse nicht identisch mit der Anzahl der das Zählrohr treffenden Strahlungsquanten. Die Quantenausbeute ist sehr unterschiedlich. Bei der Gamma- und Röntgenstrahlung werden im allgemeinen weniger als 1% der eintreffenden Quanten registriert. Eine noch geringere Ausbeute erhält man bei Lichtquanten, wenn ein behelfsmäßig präpariertes Geiger-Müller-Zählrohr verwendet wird. Bei speziell gefertigten Lichtzählrohren kann die Quantenausbeute dagegen in der Nähe von 100% liegen.

Versuch 1: Nachweis von Röntgenquanten mit dem Zählrohr

Das betriebsbereit angeschlossene Zählrohr wird in etwa 1 m Abstand von der Röntgenröhre innerhalb des Strahlenkegels aufgestellt. Die Röntgenröhre wird einige Sekunden in Betrieb gesetzt. Das diskontinuierliche Prasseln im Lautsprecher demonstriert den diskontinuierlichen Quantencharakter der Röntgenstrahlung.
Bei einer mit einem Funkeninduktor betriebenen Röntgenröhre könnte die Vermutung auftreten, daß das Zählrohr auf die vom Funkeninduktor ausgehenden elektromagnetischen Wellenzüge anspricht. Diese Vermutung kann durch Betreiben des Funkeninduktors ohne angeschlossene Röntgenröhre widerlegt werden.

Versuch 2: Nachweis von Lichtquanten mit einem Lichtzählrohr

Das betriebsbereit angeschlossene Lichtzählrohr wird in die Nähe einer Lichtquelle gebracht. Bei einem industriell gefertigten Lichtzählrohr ist darauf zu achten,

daß die verwendete Lichtquelle der spektralen Empfindlichkeit der jeweiligen Fotokatode entspricht. Bei guter Quantenausbeute des Zählrohres genügt eine Kerzen- oder Streichholzflamme. Im angeschlossenen Lautsprecher tritt ein diskontinuierliches Prasseln auf, das beim Einschieben eines Absorbers (Pappe, Blech) zwischen Zählrohr und Lichtquelle oder beim Verlöschen der Lichtquelle verschwindet.

Bemerkung

Steht ein industriell gefertigtes Lichtzählrohr nicht zur Verfügung, so kann man versuchen ein gewöhnliches Geiger-Müller-Zählrohr zu verwenden. Dazu wird die auf den Zählrohren meist vorhandene dünne schwarze Lichtschutzschicht vorsichtig mit Azeton abgewaschen. Präparierte Geiger-Müller-Zählrohre sprechen vorwiegend auf energiereiche Quanten aus dem UV-Bereich an, so daß eine entsprechende Lichtquelle verwendet werden muß (vgl. MB 4.0.2.). Es sei darauf hingewiesen, daß die Quantenausbeute von Exemplar zu Exemplar sehr unterschiedlich sein kann, so daß man nicht mit jedem Zählrohr den gewünschten Effekt erreicht.

9.2.2. Änderung der Zählrate durch Blenden

Zu Versuch 1

1. Zählrohr (VA-Z-118)
2. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
3. Unterrichtsquellensatz (^{137}Cs)
4. 2 Eisenplatten, Dicke 4 cm
5. Aluminiumblech, Dicke 0,3 cm

Zu Versuch 2

Geräte 1. und 2., außerdem

6. Lochdrehblende
7. Unterrichtsquellensatz (^{85}Kr)

Methodische Hinweise

1. Die Versuche demonstrieren in einfacher Form, daß sich die einzelnen Strahlungsquanten bzw. Elektronen nicht wie räumlich ausgebreitete Wellenzüge bewegen. Da die Abmessungen der Blenden außerordentlich groß sind gegenüber dem Wellenlängenbereich, der den Mikroobjekten nach dem Wellenbild zugeordnet wird, kann der Versuch allerdings nur zeigen, daß sich Gammaquanten bzw. Elektronen nicht in Form von kugelförmigen oder zumindest stark divergierenden Wellenzügen mit großem Raumwinkel ausbreiten.
2. Vergleiche MB 9.0.2.

Versuch 1

Das betriebsbereit angeschlossene Zählrohr wird 20 cm vor der Gammastrahlenquelle aufgestellt. Vor der Quelle befindet sich das Aluminiumblech zum Ausfiltern der Betastrahlung. Die beiden Eisenplatten werden unmittelbar vor dem Zählrohr so angebracht, daß aus ihnen ein Spalt unterschiedlicher Breite gebildet werden kann.

Zunächst ist dieser Spalt so breit, daß das gesamte Zählrohrvolumen von der Strahlung erreicht werden kann. Im Lautsprecher zeigt heftiges Prasseln eine hohe Anzahl von Strahlungsquanten an. Dann werden die Platten so weit zusammengeschoben, daß nur noch ein kleiner Teil des Zählrohrs von der Strahlung getroffen wird. Die Impulsdichte nimmt stark ab. Das Ergebnis ist gut mit der Vorstellung vereinbar, daß die Gammaquanten wie ein Schauer von Teilchen in das Zählrohr eindringen. Es ist dagegen schwer mit der Annahme zu erklären, daß räumlich ausgedehnte Wellenzüge auf das Zählrohr treffen.

Versuch 2

Zählrohr und Betastrahlenquelle werden in einem Abstand von 5 cm aufgestellt. Vor dem Zählrohr befindet sich die Lochdrehblende. Bei Verkleinerung des Blendendurchmessers nimmt die Anzahl der nachgewiesenen Elektronen immer mehr ab. Der Ort der registrierten Elektronen wird dabei in den Grenzen des Blendendurchmessers bestimmt. Es ist darauf hinzuweisen, daß dadurch nur eine außerordentlich ungenaue Ortsbestimmung erfolgt, die um viele Zehnerpotenzen von atomaren Dimensionen entfernt ist.

9.2.3. Koinzidenzmessungen

1. 2 Zählrohre (VA-Z-118)
2. 2 Zählrohradapter
3. Koinzidenzverstärker
4. Unterrichtsquellensatz (^{60}Co)
5. 2 Aluminiumbleche (Dicke 0,3 cm)
6. Zählgerät (z. B. Polydigit)

Methodischer Hinweis

Auch dieser Versuch zeigt überzeugend, daß sich Strahlungsquanten nicht in Form von Kugelwellenzügen ausbreiten. Die Versuchsdurchführung und Auswertung ist sehr einfach. Voraussetzung ist allerdings, daß ein Koinzidenzverstärker zur Verfügung steht. Mit einer solchen Anlage werden nur die Impulse registriert, die gleichzeitig von zwei Zählrohren erzeugt werden.

Versuch

Die beiden Zählrohre werden in einem Abstand von 30 cm aufgestellt und an den Koinzidenzverstärker angeschlossen. Die ^{60}Co-Quelle wird in die Mitte zwischen beide Zählrohre gestellt, so daß sie von beiden den gleichen Abstand hat. Die beiden Aluminiumabsorber werden so zwischen Zählrohr und Quelle gestellt, daß die Betastrahlung der Quelle die Zählrohre nicht erreichen kann. Anderenfalls kann die Anlage Beta-Gamma-Koinzidenzen anzeigen, die bei diesem Versuch unerwünscht sind. Zunächst werden die Zählrohre einzeln ohne Koinzidenzverstärker in Betrieb gesetzt. Die auftretenden Impulse zeigen, daß die Gammastrahlung die Zählrohre erreicht und dort registriert wird. Dann wird einige Minuten beobachtet, ob Koinzidenzen auftreten. Es zeigt sich, daß keine Koinzidenzen registriert werden. Bei sich kugelförmig ausbreitenden Wellenzügen müßten dagegen laufend Koinzidenzen auftreten.

UV Licht

9.3. Welle-Teilchen-Verhalten des Lichts

Netz-spannung

9.3.1. Interferenz und Photonenhäufigkeit

Zu Versuch 1

1. Quecksilberspektrallampe mit Drossel und Gehäuse (siehe V 4.2.2.)
2. Transmissionsstrichgitter (Gitterkonstante etwa 0,05 mm) oder Geradsichtprisma
3. Spaltdrehblende oder verstellbarer Spalt
4. Bildschirm
5. optische Bank (100 cm) mit 6 Reitern
6. 2 Kondensorlinsen ($f = +120$ mm)
7. Linse ($f = +150$ mm)
8. Vakuumfotozelle mit Cäsium-Antimon-Katode mit Fassung
9. Meßverstärker mit Demonstrationsstrommesser (2 mA —)
10. Stromversorgungsgerät (200 V —)
11. Widerstand (1 MΩ)

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 7., außerdem

12. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
13. Lichtzählrohr

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt einen wesentlichen Zusammenhang von Teilchen- und Wellenaspekt des Lichts. Das auftretende Interferenzmuster rechtfertigt die Anwendung des Wellenbildes auf das Licht. Tatsächlich wirkt aber auf den Schirm, die Fotozelle oder das Lichtzählrohr kein ausgebreitetes Wellenfeld, sondern eine große Anzahl von Lichtquanten (vgl. Abschnitte 5.1. und 5.2.). Die Häufigkeitsverteilung der an den verschiedenen Stellen des Schirms auf treffenden Photonen ist dem Intensitätsverlauf des nach dem Wellenbild vor liegenden Wellenfeldes analog.
2. Zu Versuch 2 vergleiche MH Nr. 2 V 9.2.1.!

Versuch 1

Der Versuchsaufbau entspricht dem im V 4.2.2. Der über einen Kondensor beleuchtete Spalt soll eine Breite von 0,4 mm ··· 0,8 mm haben.
Auf der Fotozelle wird eine Lichtschutzkappe aus Pappe oder schwarzem Papier befestigt, die nur einen Spalt von 2 mm Breite für den Lichteintritt freiläßt. Die Fotozelle, der Widerstand, die Gleichspannungsquelle und der Meßverstärkereingang werden in Reihe geschaltet. An die Fotozelle wird eine Spannung von 100 V gelegt. (Polung beachten: Fotokatode an den Minuspol!)
Die Fotozelle wird nun vor die einzelnen Maxima und Minima des Interferenzmusters gebracht. Der Strommesser zeigt in den Maxima einen größeren (verstärkten) Fotostrom an, der in den Minima verschwindet.

Die Stärke des Fotostromes ist ein Maß für die Anzahl der eintreffenden Photonen. Wegen der unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeit der Fotokatode gilt allerdings nur bei monochromatischem Licht, daß die Photonenanzahl N der Stromstärke I des Fotostromes porportional ist. Cäsium-Antimon-Katoden haben das Maximum ihrer spektralen Empfindlichkeit im violetten Bereich bei 420 nm. Die Stärke des Fotostroms in den Maxima verschiedener Ordnung sollte deshalb jeweils bei den in diesem Bereich liegenden Linien des Quecksilberspektrums verglichen werden.
Aus der Stromstärke I des Fotostroms kann die Photonenanzahl N abgeschätzt werden. Dazu wird zunächst die Anzahl n der abgelösten Fotoelektronen aus der Fotostromstärke I berechnet. Es gilt

$$\frac{n}{t} = \frac{I}{e}.$$

n = Anzahl der abgelösten Fotolelektronen
t = Zeit
I = gemessene Fotostromstärke
e = Elementarladung

Die Anzahl N der auf die Fotokatode treffenden Photonen ist aber größer, da nicht jedes Photon ein Elektron ablöst. Die Quantenausbeute $\frac{n}{N}$ kann aus dem Verhältnis von Fotostromstärke I und auf die Fotokatode treffendem Strahlungsfluß φ bestimmt werden.

$$\frac{I}{\varphi} = \frac{n \cdot e}{N \cdot h \cdot f}; \qquad \frac{n}{N} = \frac{I \cdot h \cdot f}{\varphi \cdot e}$$

h = Plancksches Wirkungsquantum
f = Frequenz des Lichts

Die experimentelle Bestimmung des Strahlungsflusses φ ist schwierig. Man kann jedoch eine Näherungsbeziehung verwenden. Die Empfindlichkeit der Fotokatode für weißes Licht, angegeben in $\mu A\ lm^{-1}$ ist zahlenmäßig annähernd gleich der Empfindlichkeit in $mA\ W^{-1}$ für Licht im Maximum der Spektralkurve. Die Empfindlichkeit der verwendeten Fotokatode kann aus Tabellen entnommen werden. Daraus kann der Quotient I/φ und damit die Quantenausbeute n/N bestimmt werden.

Beispiel

Im Maximum 1. Ordnung wurde im violetten Bereich eine Fotostromstärke $I = 50$ nA gemessen. Dann ist

$$\frac{n}{t} = \frac{5 \cdot 10^{-8}\,A}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\,A\,s}$$

$$\frac{n}{t} = 3 \cdot 10^{11}\,s^{-1}.$$

Die Empfindlichkeit der verwendeten Fotokatode betrug 33 μA lm^{-1}. Im Maximum der spektralen Empfindlichkeit ($\lambda = 420$ nm) ist daher

$$\frac{I}{\varphi} \approx 33 \frac{\text{mA}}{\text{W}}.$$

Die Quantenausbeute beträgt demzufolge:

$$\frac{n}{N} = 33 \frac{\text{mA}}{\text{W}} \cdot \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda}; \qquad (c = 3 \cdot 10^8 \ \text{m s}^{-1})$$

$$\frac{n}{N} \approx 0{,}1 \ .$$

Bei dem vorliegenden Beispiel liegt also die Anzahl der in jeder Sekunde auf die Fotokatode treffenden Photonen in der Größenordnung von 10^{12}. (Eine genauere Angabe wäre nur bei Verwendung von monochromatischem Licht mit der Wellenlänge 420 nm sinnvoll.)

Versuch 2

Statt der Fotozelle wird ein Lichtzählrohr zum Nachweis der Strahlung verwendet. Das betriebsbereite Zählrohr, auf dem sich eine mit einem 2 mm breiten Spalt versehene Lichtschutzkappe befindet, wird vor dem Linienspektrum entlanggeführt. Dabei steht der Spalt parallel zu den Linien und ist der Lichtseite zugekehrt. In den Maxima tritt im Lautsprecher ein heftiges Prasseln auf, das in den Minima verschwindet.
Eine geeignete Lichtschutzkappe kann leicht aus Pappe oder schwarzem Papier hergestellt werden. Zählrohre, bei denen das Licht von allen Seiten Zutritt hat, erhalten eine Kappe mit einem Spalt, der parallel zur Zählrohrachse verläuft.
Zählrohre mit einer Graphitschicht als Katode, bei denen das Licht nur von vorn Zutritt hat, benötigen eine Kappe, die auf ihrer Vorderfläche ein Loch von 3 mm Durchmesser besitzt.

Bemerkungen

1. Die Versuche können auch mit einem Reflexionsgitter durchgeführt werden.
2. Bei Versuch 1 kann statt Fotozelle und Meßverstärker auch ein FSEV mit Mikroamperemeter verwendet werden.

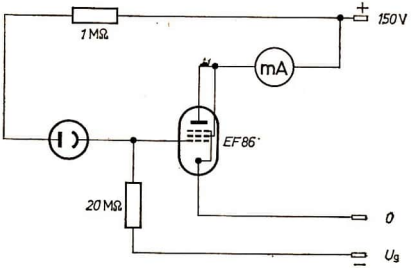


Abb. 9.3.1./1
Verstärkerschaltung zum Messen des Fotostromes

3. Steht bei Versuch 1 kein Meßverstärker zum Messen der Fotostromstärke zur Verfügung, so kann die Schaltung nach Abbildung 9.3.1./1 verwendet werden.
   Als Meßbereich des Demonstrationsstrommessers werden 2 mA oder 5 mA gewählt. Bei verdunkelter Fotozelle wird die einem Stromversorgungsgerät entnommene Gitterspannung so eingestellt, daß der Arbeitspunkt der Röhre am Beginn des geradlinigen Teils der I_a-U_g-Kennlinie liegt. Das ist bei einer Anodenspannung von $U_a = 150$ V bei $U_g \approx -3$ V der Fall. Danach wird der Zeiger des Strommessers durch Betätigung der Nullpunkteinstellung auf den Nullpunkt der Skale gestellt. Die Versuchsanordnung ist jetzt zur qualitativen Demonstration der Maxima und Minima des Interferenzmusters bereit.
   Zur Eichung der Verstärkerschaltung wird bei verdunkelter Fotozelle die I_a-U_g-Kennlinie der Röhre aufgenommen. Dabei genügt es, wenn die Anodenstromstärke in Skalenteilen des verwendeten Demonstrationsstrommessers angegeben wird. Die Gitterspannung wird am Stromversorgungsgerät variiert. Aus der Kennlinie kann die Gitterspannung U_g entnommen werden, die zu einer bestimmten Stromstärke bei belichteter Fotozelle gehört. Diese Spannung setzt sich aus der am Stromversorgungsgerät fest eingestellten Vorspannung U_1 und aus dem durch den Fotostrom am Gitterableitwiderstand hervorgerufenen Spannungsabfall $\Delta U = I \cdot R_g$ zusammen. $U_g = U_1 + \Delta U$.
   Die Stärke des Fotostromes beträgt dann $I = (U_g - U_1)/R_g$.
4. Wird in Versuch 2 ein behelfsmäßig präpariertes Geiger-Müller-Zählrohr verwendet (vgl. Bem. V 9.2.1.), so dürfen keine Glaslinsen benutzt werden, da sonst die wirksame UV-Strahlung absorbiert wird. In diesem Fall wird die Versuchsanordnung wie in V 4.2.3. gewählt.

9.3.2. Polarisation und Photonenhäufigkeit

Zu Versuch 1

1. Quecksilberspektrallampe mit Drossel und Gehäuse (siehe V 4.2.2.)
2. 2 Polarisationsfilter
3. Lochblende (3 mm bis 5 mm ∅)
4. optische Bank (100 cm) mit 4 Reitern
5. Vakuumfotozelle mit Cäsium-Antimon-Katode
6. Meßverstärker mit Demonstrationsstrommesser
7. Stromversorgungsgerät (100 V —)
8. Widerstand (1 MΩ)

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4., außerdem

9. Zählgerät (z. B. Polydigit mit Zählrohradapter)
10. Lichtzählrohr

Methodischer Hinweis

Auch dieser Versuch zeigt, daß das Verhalten des Lichts mit nur einer der Modellvorstellungen Teilchen oder Welle nicht ausreichend beschrieben werden kann. Die Abhängigkeit der Strahlungsflußdichte vom Winkel zwischen den Polarisationsebenen von Polarisator und Analysator stimmt mit den Aussagen des Wellenbildes überein. Die Registrierung des Lichts mit Fotozelle oder Lichtzählrohr ist nur mit der Quantennatur der Strahlung erklärbar.

Versuch 1

Mit der Lochblende wird ein Strahlenbündel des Lichts der Quecksilberspektrallampe ausgeblendet. In den Strahlengang werden im Abstand von 10 cm die beiden Polarisationsfilter gestellt. Das von den Filtern durchgelassene Licht trifft auf die Katode der Fotozelle. Fotozelle, Widerstand, Gleichspannungsquelle und Meßverstärker werden in Reihe geschaltet. Die Fotozelle wird mit einer Spannung von 100 V betrieben. Dann wird die Polarisationsebene des als Analysator dienenden Polarisationsfilters kontinuierlich verändert. Dabei ändert sich der Ausschlag des Strommessers. Stehen die Polarisationsebenen zueinander senkrecht, so ist die Stärke des Fotostromes Null, bei Parallelstellung hat sie ihr Maximum. Die Anzahl der Lichtquanten, die die Anordnung passieren, hängt also vom Winkel zwischen den Polarisationsebenen von Polarisator und Analysator ab.

Versuch 2

Versuchsaufbau und Durchführung entsprechen Versuch 1. Statt der Fotozelle wird ein betriebsbereit angeschlossenes lichtempfindliches Zählrohr in den Strahlengang gebracht. Die Anzahl der registrierten Impulse hängt vom Winkel zwischen den Polarisationsebenen von Polarisator und Analysator ab.

Bemerkung

Vergleiche Bem. 4 V 9.3.1.!

9.4. Beugung von Röntgenstrahlen

9.4.1. Das Laue-Verfahren

1. Schulröntgenröhre mit Stromversorgung und Abschirmung
2. Laue-Kammer
3. Lochblende Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Metallzylinder (z. B. Messing 2 cm ∅; 3 cm Höhe)
4. Röntgenfilm
5. Entwickler für Röntgenfilm
6. Fixiersalz für Röntgenfilm
7. Natriumthiosulfatkristalle
8. durchsichtiges Klebeband

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 9.0.4.!
2. Die Herstellung eines Laue-Diagramms kann während einer Unterrichtsstunde erfolgen. Zu Beginn wird die Kammer justiert. Als Belichtungszeit genügt bei maximaler Spannung eine halbe Stunde. Die Entwicklung erfolgt 10 Minuten lang in einer Entwicklerdose. Nach kurzer Zwischenwässerung fixiert man wenige Minuten. Das noch ungewässerte, nasse Bild wird mit dem Tageslichtschreibprojektor projiziert.

Versuchsaufbau

Der Metallzylinder wird axial mit einem Bohrer von 1 mm Durchmesser durchbohrt und gemäß Abbildung 9.4.1./1 vor der Austrittsöffnung der Strahlenquelle befestigt, so daß ein dünnes Röntgenstrahlenbündel austritt. Danach befestigt man mittels Klebeband einen gut ausgebildeten Natriumthiosulfatkristall von 1 mm

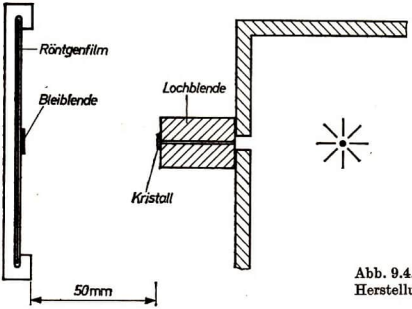


Abb. 9.4.1./1
Herstellung eines Laue-Diagramms

Dicke so vor der Blende, daß er in seinem mittleren Teil von Röntgenstrahlen durchsetzt wird. In die Laue-Kammer wird in der Dunkelkammer Röntgenfilm eingelegt. Man befestigt sie nach Abbildung 9.4.1./1 in 5 cm Entfernung von dem Kristall. Es ist günstig, wenn sie zur Abschirmung der ungebeugten Röntgenstrahlen in ihrer Mitte eine 1 mm dicke Bleiblende von 1 cm Durchmesser besitzt, die zur Justierung mit einem Stück Fluoreszenzschirm beklebt ist.

Versuch

Man justiert die Kammer so, daß die ungebeugten Röntgenstrahlen in ihrer Mitte auftreffen. Danach setzt man sie eine halbe Stunde lang den Strahlen aus, wobei die Anodenspannung bei einer Stromstärke von einigen Milliampere möglichst hoch gewählt werden sollte. Der Röntgenfilm wird in der Dunkelkammer nach Vorschrift entwickelt, zwischengewässert, fixiert und gewässert (vgl. V 6.1.1.). Die Abbildung 9.4.1./2 zeigt ein auf diese Weise erhaltenes Laue-Diagramm. Es besteht aus vielen, gesetzmäßig angeordneten Interferenzflecken. Die nicht völlig symmetrische Anordnung der Interferenzflecke resultiert sowohl aus Fehlern im Bau des Kristalls als vor allem aus einer nicht ganz symmetrischen Lage des Raumgitters bezüglich des Röntgenstrahlenbündels.

Bemerkungen

1. Außer Natriumthiosulfat eignen sich u. a. Kristalle von Natriumsulfat und Natriumchlorid. Regelmäßig ausgebildete Kristalle von einigen Millimetern Kantenlänge erhält man, wenn Natriumthiosulfat oder Natriumsulfat mit etwas destilliertem Wasser erwärmt wird, bis sich alles Salz gelöst hat. Nach Abkühlen wird die Lösung mit einigen kleinen Kristallen geimpft, die sehr schnell auf die gewünschte Größe heranwachsen.

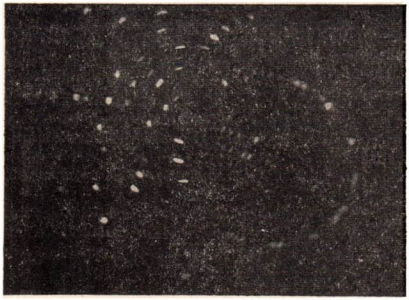


Abb. 9.4.1./2
Laue-Diagramm eines Natriumthiosulfatkristalls
(Anodenspannung 30 kV, Stromstärke 3 mA, Bestrahlungszeit 1h)

2. Anstelle der Laue-Kammer kann im einfachsten Falle ein Kopierrahmen benutzt werden. Dazu wird die Glasplatte entfernt, der Röntgenfilm doppelt in schwarzes Papier eingewickelt und im Kopierrahmen festgeklemmt. In die Mitte des schwarzen Papiers klebt man eine 1 mm dicke Bleiplatte von 1 cm Durchmesser, auf der ein Stück Fluoreszenzschirm angebracht ist.

9.4.2. Das Debye-Scherrer-Verfahren

1. Schulröntgenröhre mit Stromversorgung und Abschirmung
2. Debye-Scherer-Kammer mit Motor
3. Lochblende Ⓢ (siehe V 9.4.1.)
4. Debye-Scherrer-Film
5. Entwickler für Röntgenfilm
6. Fixiersalz für Röntgenfilm
7. Kupferdraht (1 mm ∅; 5 cm lang)
8. kleiner Fluoreszenzschirm

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MB 9.0.4.!
2. Die Herstellung eines Debye-Scherrer-Diagramms kann während einer Unterrichtsstunde erfolgen (vgl. MH Nr. 2 V 9.4.1.).

Versuchsaufbau

Die Debye-Scherrer-Kammer wird an der Röntgenanlage befestigt, so daß die Röntgenstrahlen durch die Blende hindurch in die Kammer gelangen (Abb. 9.4.2./1). Danach bringt man ein kurzes Stück Kupferdraht so in der Mitte der Kammer an, daß es nach Einschalten des Motors axial rotiert. Man überzeugt sich zunächst bei geöffneter Kammer davon, daß Drahtachse und Rotationsachse überein-

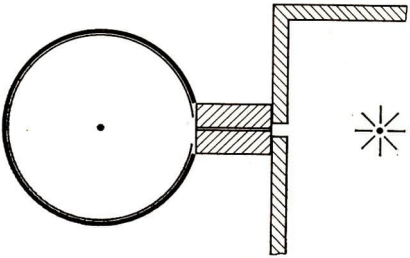


Abb. 9.4.2./1
Herstellung eines
Debye-Scherrer-Diagramms

stimmen und daß die Röntgenstrahlen den Draht treffen (Fluoreszenzschirm!). Weiterhin sorgt man dafür, daß kein Licht in die Kammer gelangen kann.

Versuch

Der Film wird im völlig dunklen Raum eingelegt und die Kammer verschlossen. Dabei darf die gegenseitige Lage aller Teile nicht verändert werden. Die Röntgenanlage und der Motor werden eingeschaltet. Bei höchstmöglicher Anodenspannung wird die Stromstärke auf einige Milliampere eingestellt. Nach einer Belichtungszeit von einer Stunde wird der Röntgenfilm in der Dunkelkammer nach Vorschrift entwickelt, zwischengewässert, fixiert und gewässert. Die Abbildung 9.4.2./2 zeigt ein auf diese Weise erhaltenes Debye-Scherrer-Diagramm. Die Interferenzstreifen sind symmetrisch zum Röntgenstrahlenbündel angeordnet.

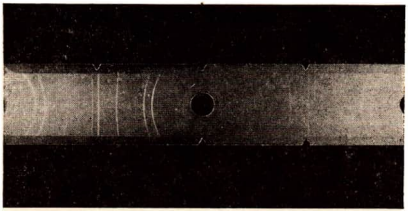


Abb. 9.4.2./2
Debye-Scherrer-Diagramm
eines Kupferdrahts
(Anodenspannung 30 kV,
Stromstärke 3 mA,
Bestrahlungszeit 1 h)

Bemerkungen

1. Anstelle von Kupfer können auch Drähte anderer Metalle Verwendung finden. Weiterhin sind zylindrische Stäbchen aus feingepulverten, zusammengeklebten Kristallen geeignet.
2. Eine Debye-Scherrer-Kammer läßt sich auf einfache Weise selbst herstellen. Dazu kann z. B. eine lichtundurchlässige runde Plastdose (Fußbodenwachs!) von 5 cm bis 10 cm Durchmesser Verwendung finden. Der Metalldraht wird axial auf dem Boden angeklebt. Infolge der guten Durchlässigkeit der Plaste für Röntgenstrahlen kann in der Regel auf eine Eintrittsöffnung verzichtet werden. Es ist lediglich erforderlich, die Kammer so anzubringen, daß sich der mittlere Teil des Metalldrahtes in der Mitte des Röntgenstrahlenbündels befindet (Fluoreszenzschirm!). Nach Einlegen des Filmes im völlig dunklen Raum sollte die Dose gut verschlossen und an der Verschlußstelle ein Streifen lichtundurchlässiges Klebeband aufgeklebt werden.

Anhang

Hinweise zum Umgang mit radioaktiven Strahlungsquellen, Röntgenröhren und Quellen ultravioletten Lichts

Der Umgang mit radioaktiven Strahlungsquellen wird durch die Strahlenschutzverordnung (SSVO) vom 26. November 1969 (GB Teil II, Nr. 99, S. 627), die erste Durchführungsbestimmung (1. DB) zur Strahlenschutzverordnung vom 26. November 1969 (GB Teil II, Nr. 99, S. 635), sowie das Atomenergiegesetz vom 28. März 1964 und die Strahlenschutzbauartzulassung 111 072 geregelt.
Danach dürfen Personen aus der Bevölkerung radioaktive Quellen, die innerhalb der Freigrenze liegen, ohne besondere Genehmigung verwenden.
Die Freigrenze wird in der 1. DB für alle radioaktiven Isotope entsprechend ihrer Radiotoxizität festgelegt. Für die in der Schule verwendeten Quellen gelten dabei folgende Werte:

Radionuklid	Radiotoxizitätsgruppe	Freigrenze in kBq
Natrium-22	3	370
Kobalt-60	3	370
Krypton-85	4	3700
Cäsium-137	3	370
Blei-210 (Ra-D)	1	3,7
Radon-220	3	370
Radium-226	1	3,7
Plutonium-239	1	3,7
Americium-241	1	3,7

Es ist 1 Bg $\approx$ 27 pCi.

Radionuklid	Freigrenze in kg
Thorium[1]) nat	1
Uran[2]) nat	1

[1]) 1 g natürliches Thorium enthält 4,07 kBq Thorium-232, 4,07 kBq Thorium-228 und verschiedene Anteile von Thorium-227, Thorium-231 und Thorium-234.

[2]) 1 g natürliches Uran enthält 12,2 kBq Uran-238, bis zu 12,2 kBg Uran-234 und bis zu 0,56 Bq Uran-235.

Für die individuelle Strahlenbelastung von Personen werden die Kategorien A, B und C festgelegt. Außerdem wird die unterschiedliche Strahlenverträglichkeit des Körpers durch eine Gruppeneinteilung I. bis IV. charakterisiert. Die Kategorie C erfaßt einzelne Personen oder kleine Personengruppen aus der Bevölkerung. Für sie gelten folgende Grenzwerte der maximalen Strahlenbelastung (bezogen auf 12 Monate):

I. Gruppe: Gesamtkörper, Gonaden und blutbildendes System: 5 mSv*

II. Gruppe: Augenlinsen, Magen-Darm-Kanal, Leber, Milz, Nieren, Lunge, Muskeln, Fettgewebe und andere Organe, die nicht zu Gruppe I und III gehören:
15 mSv

III. Gruppe: Knochen, Schilddrüse, Haut:
30 mSv

IV. Gruppe: Hände, Unterarme, Füße: —

*(1 Sv = 100 rem)

Für die Schulstrahlungsquelle mit der größten spezifischen Gammastrahlenkonstante (Kobalt-60; $A = 1{,}85 \cdot 10^5$ Bq) ergibt sich im Abstand von 1 m eine Expositionsleistung von

$$\frac{X}{t} = 2{,}52 \cdot 10^{-18} \frac{\mathrm{A\,m^2}}{\mathrm{Bq\,kg}} \cdot \frac{1{,}85 \cdot 10^5\,\mathrm{Bq}}{1\,\mathrm{m^2}}$$

$$\frac{X}{t} = 4{,}66 \cdot 10^{-13} \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{kg}}.$$

Bei diesem Abstand ist etwa eine Ganzkörperbestrahlung möglich. Der zulässige Wert beträgt $1{,}435 \cdot 10^{-11}$ A kg^{-1}. Daraus ergibt sich, daß die Expositionsleistung der Schulstrahlungsquellen weit unter dem für eine Ganzkörperbestrahlung zugelassenen Wert liegt.
Bei Abstandsverkürzung auf 0,1 m erhöht sich die Expositionsleistung auf $4{,}66 \times 10^{-11}$ A kg^{-1}. Allerdings ist dann nur noch ein kleiner Teil des Körpers erfaßbar.
Trotzdem sollte beim Umgang mit den Schulstrahlungsquellen genau so verfahren werden, wie mit Quellen größerer Aktivität.

Es gelten folgende **Grundregeln**:

1. **Strahlungsquellen stets unter Verschluß aufbewahren!**
2. **Abschirmungen verwenden!**
3. **Abstand ist der beste Strahlenschutz.**
4. **Strahlungsquellen müssen gegen mechanische Zerstörung geschützt werden. Vorgeschrieben ist eine regelmäßige Kontrolle der Aktivität.**
5. **Über die Verwendung der radioaktiven Quellen sollte in einem Buch Protokoll geführt werden.**
6. **Aufbewahrungsort und Meßplätze sind mit dem Strahlenwarnschild zu kennzeichnen.**

Bei Röntgenröhren ist die Gefährdung im Vergleich zu den radioaktiven Schulstrahlungsquellen wesentlich größer. Aus diesem Grunde ist der Betrieb von Röntgenröhren jeder Art ohne Abschirmeinrichtung im Unterricht verboten. Das gilt sowohl für die Röntgenröhren mit kalter Katode als auch für solche mit Glühkatode. Röntgenröhren dürfen nur unter Verwendung von Abschirmeinrichtungen betrieben werden, deren Bauart vom Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung zugelassen wurde und die mit dem entsprechenden Bauartzulassungszeichen gekennzeichnet sind. Die vom Hersteller angegebenen Betriebsbedingungen sind unbedingt einzuhalten.
Bei der Arbeit mit Röntgenstrahlen sollten folgende Grundregeln beachtet werden:

1. **Die Lage der Austrittsöffnung für Röntgenstrahlen wird so gewählt, daß sich weder der Lehrer noch die Schüler im Strahlungsbereich befinden.**
2. **Die Austrittsöffnung sollte nur so groß gewählt werden, wie für das jeweilige Experiment erforderlich ist.**
3. **Möglichkeiten zusätzlicher Abschirmung sollten genutzt werden.**
4. **Die Durchstrahlung menschlicher Körperteile ist verboten, zu durchstrahlende Gegenstände sind an einem Stativ zu befestigen.**
5. **Der Abstand zwischen Röntgenröhre und Schüler ist möglichst groß zu wählen. Experimente mit größerer Versuchsdauer sind außerhalb des Unterrichtsraumes durchzuführen.**
6. **Die Betriebsspannung der Röhre ist nicht höher zu wählen, als es für die Versuchsdurchführung unbedingt erforderlich ist. Gleiches gilt für die Versuchsdauer.**
7. **Experimente mit Röntgenstrahlen dürfen nur vom Lehrer durchgeführt werden.**

Ultraviolette Strahlen stellen in erster Linie eine Gefahr für die Augen des Experimentierenden dar, bei Bestrahlungszeiten in der Größenordnung von Minuten sind auch Schädigungen der Hautzellen möglich. Sehstörungen können besonders deshalb leicht auftreten, weil es sich in der Regel um Lichtquellen hoher Leuchtdichte handelt und die Experimente im abgedunkelten Raum (dunkeladaptiertes Auge mit geöffneter Pupille) durchgeführt werden.
Folgende Grundregeln sollten bei der Arbeit mit ultraviolettem Licht beachtet werden:

1. **Es sind nur Lichtquellen mit Lichtschutzgehäuse zu verwenden. (Dieses wirkt bei Hochdruck- und Höchstdrucklampen gegebenenfalls gleichzeitig als Splitterschutz.)**
2. **Versuche mit Gashochdruck- und Gashöchstdrucklampen dürfen nur vom Lehrer durchgeführt werden.**
3. **Die Lampen sollten nur betrachtet werden, wenn keine Spannung anliegt. Im Bedarfsfalle sind die Augen durch Rotfilter oder Schweißerbrillen sorgfältig zu schützen.**
4. **Die Lage der Lichtaustrittsöffnung wird so gewählt, daß Lehrer und Schüler nicht von ultravioletter Strahlung getroffen werden.**

Register

Absorption, Alpha- 163, 178, 182f.
—, Beta- 164, 189
—, Gamma- 164,198 f.
—, Selbst- 191
Alphaspektroskopie 178, 214
Alphastrahlen 143f., 164, 191
—, Reichweite der 183
Anregung von Atomen 112
Anwendung der Radionuklide 202, 207
Äquidensiten 136f.
Atomdurchmesser 61, 63f.
Auflösungszeit 152f.
Autoradiogramm 133, 135ff.

Betaabsorption 164, 189
Betarückstreuung 193
Betaspektroskopie 164, 184ff., 188, 214
Betastrahlen 141, 156, 191ff.
Beugung von Röntgenstrahlen 225
Brownsche Bewegung 15f., 21ff., 31, 33ff., 37

Comptoneffekt 132, 197

Debye-Scherrer-Verfahren 227
Defektoskopie 208
Detektoren 132, 158
Diffusion 15f., 31, 35ff.
Diffusionsnebelkammer 133, 141
Doppelspaltexperiment 212, 215, 217
Dosimetrie 203

Elektrizitätsleitung in Luft 54
Elementarladung, elektrische 61, 84, 89f.
Energiebändermodell 108
Expansionsnebelkammer 133, 139f.
Expositionsleistung 203, 205

Fadenstrahlrohr 67f., 72
Faradaysche Konstante 61, 91
Feldelektronenmikroskop 16, 42f.
Fluoreszenz 123ff.
Flüssigkeitsmodell 34ff.
Frank-Hertz-Versuch 95, 109, 111
Füllstandsmessung 209

Galtonsches Nagelbrett 163, 165, 167
Gammaabsorption 164
Gammaspektroskopie 164, 196, 198
Gammastrahlen 156
—, Reichweite der 200
Gauß-Verteilung 167f.
Geiger-Müller-Zählrohr 132, 134, 148ff., 157
Gerät für kinetische Gastheorie 31
Glimmlampe, Löschspannung einer 53f.
—, Zündspannung einer 53f.
Graukeilspektroskopie 179

Halbleiterdetektor 135, 159
—, Sperrschichtdicke 159
Halbwertszeit 163, 170, 172f.
Hall-Effekt 44ff., 48, 164
Halogenzählrohr 134, 147, 150
Häufigkeitsverteilung 162f., 165, 167
Helmholtz-Spule 67f., 70, 72, 75ff.
Hofmannsches Wasserzersetzungsgerät 91f.

Ionengeschwindigkeit 51f.
Ionenleitung des Glases 48
Ionenwanderung 49
Ionisationskammer 144ff.
Ionisationsstrom 144, 146
Isodosen 204

Katodenstrahlröhre 72, 77
Kernreaktion 177
kinetische Gastheorie, Gerät für 31
Koinzidenzmessung 220
Konstante, Faradaysche 61, 91
—, Loschmidtsche 61, 63f.
Kristallgittermodelle 30

Laue-Verfahren 225
Lichtbogen 95, 99f., 102

lichtelektrischer Effekt 114ff., 122
Linienspektrum 94ff., 99, 102ff.
Loschmidtsche Konstante 61, 63f.
Löschspannung einer Glimmlampe 53f.
Lösen von Stoffen 17f.
Luftkissenaufsatz 39

magnetische Feldstärke 48, 69f., 72
Millikan-Kammer 87ff.
Modellversuch zur Brownschen Bewegung 32f., 37f., 41
– zur Diffusion 32, 38, 41
– zur thermischen Bewegung 39, 41
Moleküldurchmesser 61ff.
Molekülmasse 18

Nagelbrett, Galtonsches 163, 165, 167
Nulleffekt 143, 146, 152

Ölfleckversuch 20, 61, 65

Perrinsche Röhre 112
Plancksches Wirkungsquantum 114, 118, 120ff.
Plasmaquelle 99, 101ff.
Poisson-Verteilung 167
Polydigit mit Zählrohradapter 158, 168, 170, 173
Positronenstrahlen 192

Quecksilberdampfhöchstdrucklampe 104, 108 125
Quecksilberspektrallampe 122, 124
Quecksilberspektrum 104, 107

radioaktive Kontaminationen 207
– Strahlungsquellen 231
Radioaktivität der Atmosphäre 205
Radionuklide, Anwendung der 202, 207
Reichweite der Alphastrahlen 183
– der Gammastrahlen 200
Resonanzfluoreszenz 114f., 127
Röntgenstrahlen 233
–, Beugung der 225

Selbstabsorption 191
Spektrallampe 94f., 103, 105
Spektralröhren 94, 96ff.
Spektroskopie, Alpha- 214
–, Beta- 164, 184ff., 188, 214
–, Gamma- 164, 196, 198
–, Graukeil- 179
Sperrschichtdicke eines Halbleiterdetektors 159
spezifische Ladung des Elektrons 60f., 67, 69, 72, 74, 77, 81, 83
Spinthariskop 15, 154
Stokessches Gesetz 125
Strahlen, Alpha- 143f., 164, 191
–, Beta- 156, 191f.
–, Gamma- 156
–, Röntgen- 233
Strahlenschutz 203
Strahlenschutzverordnung 231
Strahlungsquanten 218, 220
Streuung 44f., 56, 58
– der Gammastrahlen 201
Szintillationszähler 134, 152, 155ff., 180, 188

Teilbarkeit, begrenzte 20
– der Stoffe 15f.
thermische Bewegung 25, 30
Thermodiffusion 26ff.
Thyratron 109, 111
Totzeit 133, 152f.
Trennrohr 26ff.
Tribolumineszenz 154

ultraviolettes Licht 234
– Spektrum 106
Umkehr der Natriumlinie 114, 129f.

Verbreiterung der Spektrallinien 107
Verdunsten von Stoffen 19
Verdünnen von Lösungen 18
Verfahren, Debye-Scherrer- 227
–, Laue- 225
Verteilung, Gaußsche- 167f.
–, Häufigkeits- 162f., 165, 167
–, Poisson- 167

Wasserstoffspektrum 97
Welle-Teilchen-Dualismus 211, 215, 221
Wulf-Elektroskop 116, 144ff.

Zählrohr, Geiger-Müller- 132, 134, 148ff., 157
Zählrohradapter 158, 168, 170, 173
Zerkleinern von Stoffen 17
Zündspannung einer Glimmlampe 53f.
Zylinderspule 70ff., 77f.