

# **Physik**

# **Abiturvorbereitungen**

**SIMON SURE**

**ABITUR 2022**

**VERSION 1.0**

# Vorwort

---

Moin

Dieses Skript erstelle ich zur individuellen Vorbereitung auf das Abitur 2022. Es kann gerne zur persönlichen Abiturvorbereitung genutzt werden. Die Veränderung oder Verbreitung der Datei ist nicht gestattet.

Der unten aufgeführte Download-Link kann jedoch gerne weitergegeben werden. Dort findet sich immer die neuste Version des Skripts. Bis zum Ende des Abiturs ist mit regelmäßig Korrekturen zu rechnen. Bei Anregungen, Feedback und Verbesserungsvorschlägen bitter unter unten angegebener Web-Adresse eine Nachricht senden.

Zum aktuellen Zeitpunkt wird die Datei noch viele Rechtschreibfehler enthalten. Diese können auch gerne über den Feedback-Link gemeldet werden.

Keine Garantie für Vollständigkeit oder Korrektheit!

Simon

## Download-Link

<https://simonsure.com/education/abitur-2022/>

## Feedback-Link

<https://simonsure.com/contact/>

## To-Do Liste

- Inhaltsverzeichnis aktualisieren: Separation in die Blöcke Inhalte & Methodik auflösen
- Formeln & Größen strukturieren
- Relativitätstheorie
  - Teilchenbeschleuniger
  - Einflüsse der Gravitation auf die Zeitmessung
- Elektrizität
  - Milikan-Versuch
  - Überland-Leitungen
  - Energie im magnetischen Feld
  - Elektromagnetische Schwingungen
    - Stehende Wellen
    - Elektromagnetische Wellen: Energietransport und Informationsübertragung
    - Ringentladungsröhren
  - Elektromagnetische Wellen/Strahlung: Eigenschaften
- Quantenphysik
  - Versagen der klassischen Physik
  - Mikroobjekte und Quantentheorie
  - Plank'sches Wirkungsquantum
  - Wellen-/Teilchendualismus
    - Wellencharakter von Elektronen: Elektronenbeugungsröhre
    - Streuung und Beugung von Elektronen
    - De Broglie Hypothese
- Atom- & Kern- & Elementarteilchenphysik

- Röntgenstrahlung
- Ionisierende Strahlung in Technik & Medizin
- Kernfusion & Kernspaltung
  - Bindungsenergie
  - Massendefekt
  - Kettenreaktion
  - Pro & Contra
- C-14-Methode
- Detektoren
- Elementarteilchen & Wechselwirkungen
  - Kernkräfte
  - ...

# Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort	2
Download-Link	2
Feedback-Link	2
To-Do Liste	2
Inhaltsverzeichnis	4
Grundlagen	9
Größen	9
Formeln	9
Begriffe	9
Newton'sches Wert (inkl. Axiome)	9
Trägheitsprinzip	9
Aktionsprinzip	9
Reaktionsprinzip	9
Superpositionsprinzip	10
Geschwindigkeit & Beschleunigung	10
Gleichförmig geradelinige Bewegung	10
Gleichförmig beschleunigte Bewegung	10
Impulserhaltung	10
Energieerhaltung	10
Relativitätstheorie	11
Größen	11
Formeln	11
Klassische Geschwindigkeitstransformation (Galilei'sches Relativitätsprinzip)	11
Gedankenexperiment	11
Galilei-Transformation	11
Transformation von $x$ zu $x'$	11
Transformation von $x'$ zu $x$	12
Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	12
Michelson-Morley Interferometer	12
Die Relativitätspostulate	13
Relativitätsprinzip	13
Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	13
Problem der Gleichzeitigkeit	13
Zeitdilatation	13
Myonenerfall	14
Herleitung der Umrechnungsformel	14
Definition	15
Längenkontraktion	15
Berechnung	15

Definition	15
Zwillingsparadoxon	15
Teilchenbeschleuniger	16
Relativistische Massenzunahme	16
Bertozzi-Experiment	16
Dynamische Masse	16
Energie-Masse-Beziehung	16
Einfluss der Gravitation auf die Zeitmessung	16
Elektrik	17
Größen	17
Formeln	17
Eigenschaften elektrischer Ladungen und ihre Felder	19
Grundbegriffe	19
Ladungsträger	19
Ladungstrennung	19
Elektrische Feldstärke	19
Probeladung	19
Coulomb-Kraft	20
Elektrische Felder	20
(Potenzielle) Energie und Spannung im elektrischen Feld	20
Qualitative Betrachtung	20
Potenzial	21
Spannung	21
Elektrische Influenz	21
Elektroskop	21
Polarisation	21
Reibungselektrizität	22
Elektrostatistische Phänomene	22
Faraday'sche Käfig	22
Gewitter	22
Braun'sche Röhre	22
Elektrische Ladung und elektrischer Strom	23
Gleich- und Wechselstrom	23
Schaltungen	23
Kondensatoren	24
Energie im Kondensator	24
Flächenladungsdichte	25
Entladevorgang und Aufladevorgang	25
Milikan-Versuch - Bestimmung der Elementarladung	26
Eigenschaften von Magneten und ihre Felder	26
Paramagnete	26
Elementarmagnete	26
Ferromagnetismus - Magnetische Influenz	26
Kraftwirkung	26
Magnetfeld und Feldlinien	26
Magnetische Feldkonstante	27
Eigenschaften von Feldern	27
Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern	27
Magnetfeld eines Leiters	27
Leiterschaukelexperiment	27
Lorentz-Kraft	28
Definition von Ampere	28
Elektromagneten	28
Geschwindigkeitsfilter	29

Massenspektroskopie	29
Massenspektrograph	29
Magnetische Flasche	30
Elektronenmikroskop	30
Hall-Effekt & Hallsonde	30
Experiment: Stromwage	31
Experiment: Fadenstrahlrohr	32
Elektromagnetische Induktion	33
Ring-Versuch (zur Lenz'schen Regel)	34
Leiterschleife im Magnetfeld	34
Wirbelströme/Wirbelstromfelder	34
Magnet fällt durch ein Rohr	34
Waltenhofen'sches Pendel	35
Motoren	35
Linearmotor	35
Generatoren	36
Drehstromnetz	36
Lineargenerator	36
Transformatoren	37
Überland-Leitung	38
Energie des magnetischen Feldes	38
Selbstinduktion	38
Elektromagnetische Schwingungen und Wellen	38
Schwingungen	38
Harmonische Schwingungen	38
Gedämpfte harmonische Schwingung	39
Erzwungene Schwingung	39
Beispiel aus der Mechanik	39
elektrischer Schwingkreis (RLC-Kreis)	39
Funktionsweise	40
Mathematische Betrachtung	41
Gegenüberstellung zum mechanischen Pendel	42
Wellen	42
Charakteristische Größen	43
Effekte	43
Huygen'sches Prinzip	43
Eigenschaften	43
Interferenz	43
Versuch - Wellenwanne	45
Stehende Wellen	45
Hertz'scher Dipol	45
elektromagnetische Wellen/Strahlung	45
Stehende Wellen - Interferenz	46
Ausbreitung	46
Intensität	46
Totalreflexion	46
Maxwell'sche Theorie	46
Elektromagnetisches Spektrum	46
Farben & Spektren	46
Auflösungsvermögen optischer Instrumente	46
Polarisation	46
Licht	46
Doppelspalt	47
Gitter	47
Quantenphysik	49
Größen	49

Formeln	49
Licht und Elektronen als Quantenobjekte	49
Hallwachs-Versuch	49
Photoeffekt (lichtelektrischer Effekt)	50
Licht als Quantenobjekt	50
Versuch: Vakuum-Fotozelle (Gegenfeldmethode)	50
Plank'sches Wirkungsquantum	52
Welle-Teilchen-Dualismus und Wahrscheinlichkeitsinterpretation	52
Wellenfunktion	52
Linearer Potenzialtopf	52
Quantenphysik und klassische Physik	53
Mikroobjekte und Quantentheorie	54
Atom-, Kern-, und Elementarteilchenphysik	55
Größen	55
Formeln	55
Atomaufbau	56
Grundlagen	56
Nukleus	56
Nuklid	56
Nukleon	56
Isotop	56
Isobar	56
Ion	56
Atommodelle	56
Demokrit Modell (5. Jhdt. v. Chr.)	56
Dalton Modell (1808)	56
Thomson'sches Modell (1904)	56
planetarisches Modell (1904)	56
Rutherford Modell (1911)	56
Bohr'sches Modell (1913)	56
Orbitalmodell (1928)	57
Versuch: Rutherford	57
Kern Hülle Modell - Bohr'sches Atommodell	57
Wasserstoffatom	58
Versuch: Franck-Hertz	59
Potenzialtopfmodell des Atomkerns	60
Orbitalmodell des H-Atoms (Potenzialtopfmodell der Atomhülle)	60
Energieniveaudiagramm	61
Spektren	61
Versuch: Linienspektren	61
Resonanzabsorption	61
Versuch: Flammenfärbung	62
Ionisierende Strahlung	62
Ionisation	62
Dosimetrie	62
Arten ionisierender Strahlung	62
Detektoren	62
Geiger-Müller-Zählrohr	62
Nebelkammer	62
Ablenkung im elektrischen und magnetischen Feld	62
-Strahlung	63
-Strahlung	63
-Strahlung	63
Laser	63
Röntgenstrahlung	63

Spezifische Ionisationsvermögen	63
Einsatzmöglichkeiten in Medizin und Technik	63
Radioaktiver Zerfall	63
Allgemeines	63
Ursachen	64
Messung	64
Zerfallsarten	64
$\alpha$ -Zerfall	64
$\beta^+$ -Zerfall	64
$\beta^-$ -Zerfall	64
$\gamma$ -Zerfall	65
$\delta$ -Zerfall	65
Electron Capture (-Einfang)	65
Eigenschaften	65
Zerfallsgesetz	66
Halbwertszeit	66
Aktivität	66
Zusammenhang	66
Bestimmung der Halbwertszeit	66
Altersbestimmung: C14-Methode	66
Nuklidkarte	66
Zerfallsreihen und -gleichungen	67
Kernspaltung und Kernfusion	67
Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen	67
Methodik	68
Schreiben eines Versuchsprotokolls	68
Anfertigen einer Zeichnung eines elektrischen Schaltkreises	68



# Grundlagen

---

## Größen

- $[\lambda] = m$  (Wellenlänge)
- $[f] = \frac{1}{s} = Hz$  (Frequenz)
- $[v] = \frac{m}{s}$  (Geschwindigkeit)
- $[a] = \frac{m}{s^2}$  (Beschleunigung)
- $[F] = 1N = 1 \frac{kg \cdot m}{s^2}$  (Kraft)
- $[m]$

## Formeln

- $v = \lambda f$
- $F = m \cdot a$
- $p = m \cdot v$
- $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$
- $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
- $v = a \cdot t + v_0$

## Begriffe

### Emission

Als Emission wird das Aussenden/die Abgabe/die Erzeugung von Materie, Strahlung, Wellen und mehr bezeichnet. Als Beispiele können Röntgenemission, Schallemission, und Teilchenstrahlung genannt werden.

### Absorption

Als Absorption wird die Aufnahme von Wellen oder Teilchen durch einen absorbierenden Stoff bezeichnet.

## Newton'sches Wert (inkl. Axiome)

Die Newtonsche Axiome wurden 1687 von Isaac Newton formuliert. Sie beschreiben die drei Grundsätze der Bewegung.

### Trägheitsprinzip

Jeder Körper behält seine Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung so lange bei, bis er durch äußere Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern.

### Aktionsprinzip

Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so wird er in Richtung der Kraft beschleunigt. Die Beschleunigung ist dabei direkt proportional zur Kraft und indirekt proportional zur Masse des Körpers.

Die dazugehörige Formel  $F = m \cdot a$  wird als Grundgleichung der Mechanik bezeichnet.

### Reaktionsprinzip

Besteht zwischen zwei Körpern 1 und 2 eine Kraftwirkung, so ist die Kraft, die Körper 1 auf Körper 2 auswirkt, gleich der Kraft, die Körper 2 auf Körper 1 auswirkt. Umgangssprachlich auch Kraft gleich Gegenkraft (Action = Reactio).

## **Superpositionsprinzip**

Das Superpositionsprinzip beschreibt die Betrachtung zweier gleicher physikalischer Größen ohne gegenseitige Beeinträchtigung. Beide Größen werden unabhängig voneinander betrachtet. Ihre Überlagerung ergibt die Wirkung.

In der Mechanik gilt das Prinzip der ungestörten Überlagerung von Kräften. Wirken mehrere Kräfte, so addieren sich diese vektoriell zu einer resultierenden Kraft auf.

## **Geschwindigkeit & Beschleunigung**

To be completed. [missing]

### **Gleichförmig geradlinige Bewegung**

To be completed. [missing]

### **Gleichförmig beschleunigte Bewegung**

To be completed. [missing]

## **Impulserhaltung**

To be completed. [missing]

## **Energieerhaltung**

To be completed. [missing]

# Relativitätstheorie

---

## Größen

To be completed. [missing]

## Formeln

To be completed. [missing]

## Klassische Geschwindigkeitstransformation (Galilei'sches Relativitätsprinzip)

Zur Beschreibung von Bewegungen ist ein Bezugssystem notwendig. Dazu wird ein kartesisches Koordinatensystem gewählt (ein „normales“ Koordinatensystem).

Newtons erstes Axiom (Trägheitsprinzip) unterscheidet nicht zwischen ruhenden und gleichförmig geradlinig bewegten Systemen. Schließlich ist ein System auch gleichförmig geradlinig bewegt (ggb), wenn  $v = 0$  gilt. Somit ist ein Inertialsystem ein kartesisches Koordinatensystem/ (Bezugs)System, welches sich gleichförmig geradlinig bewegt. Dort gelten die Newton'schen Axiome. Alle Inertialsysteme sind bezüglich der mechanisch-physikalischen Gesetze aufgrund des ersten Newton'schen Axioms gleichberechtigt. Dass jedes Inertialsystem gleichberechtigt zur Beschreibung der Mechanik sei, wird Galilei'sches Relativitätsprinzip genannt.

### Gedankenexperiment

Fahre ein Wagen an einem Bahnsteig mit einer konstanten Geschwindigkeit. Im System eins (Bahnsteig) ruht der Bahnsteig. Im System zwei (Wagen) ruht der Wagen. Nun wird im Wagen eine Kugel fallen gelassen.

In System zwei ruht die Kugel zu Beginn. Dort fällt sie senkrecht zum Boden. In System eins bewegt sie Kugel zum Beginn entsprechend des Inertialsystems zwei mit einer konstanten Geschwindigkeit. Es wird eine Wurfparabel beobachtet.

Diese Überlegung verdeutlicht/bestätigt das Galilei'sche Relativitätsprinzip.

### Galilei-Transformation

Auf Grundlage des Galilei'schen Relativitätsprinzips können mechanisch-physikalische Größen zwischen zwei Inertialsystemen umgerechnet werden. Das Ruhende Bezugssystem wird mit  $S$  bezeichnet, das bewegte mit  $S'$ . Dabei werden die Koordinaten in  $S$  mit  $x, y, z$  beschrieben. Die Koordinaten in  $S'$  mit  $x', y', z'$ . Die Relativbewegung von  $S'$  wird durch die Geschwindigkeiten  $v_x, v_y, v_z$  definiert. Diese Größen können auch als Vektoren geschrieben werden. Es muss immer die verstrichene Zeit  $t$  angegeben werden.

#### Transformation von $S'$ zu $S$

Für den Ort gilt für die einzelnen Koordinaten:

$$x = x' + v_x \cdot t$$

$$y = y' + v_y \cdot t$$

$$z = z' + v_z \cdot t$$

Für den Ort gilt in Vektorschreibweise:

$$\vec{s} = \vec{s}' + \vec{v}_s \cdot t$$

Für die Geschwindigkeit gilt für die einzelnen Koordinaten:

$$v = v' + v_s$$

Für die Geschwindigkeit gilt in Vektorschreibweise:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_s$$

## Transformation von $S$ zu $S'$

Für den Ort gilt für die einzelnen Koordinaten:

$$x' = x - v_x \cdot t$$

$$y' = y - v_y \cdot t$$

$$z' = z - v_z \cdot t$$

Für den Ort gilt in Vektorschreibweise:

$$\vec{s}' = \vec{s} - \vec{v}_s \cdot t$$

Für die Geschwindigkeit gilt für die einzelnen Koordinaten:

$$v' = v - v_s$$

Für die Geschwindigkeit gilt in Vektorschreibweise:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_s$$

## Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Nach Newtons und Galileis Vorstellungen ist der Raum absolut. In diesem würden die Sonne und Sterne ruhen. Der Raum sei mit dem Äther gefüllt. In diesem würden sich Lichtwellen mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreiten. Aus den Galilei'schen Transformationsregeln folgt somit, dass man bei Relativbewegung in diesem Äther eine andere Lichtgeschwindigkeit messen müsste.

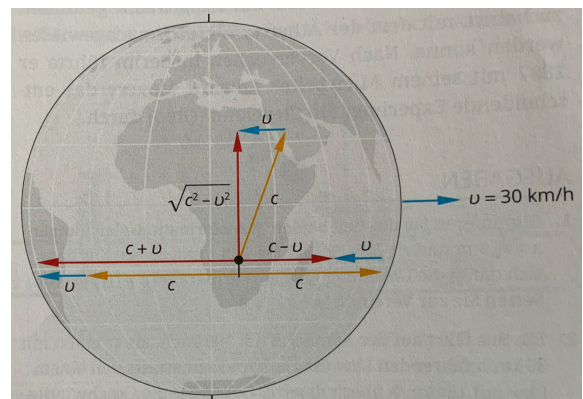
### Michelson-Morley Interferometer

Michelson und Morley wollten mit dem Michelson-Morley-Experiment den Äther nachweisen. Die nahmen an, dass (a) die Lichtgeschwindigkeit  $c$  im absoluten Raum konstant sei und (b) sich die

Erde mit der Geschwindigkeit  $30 \frac{km}{s}$  bewege. Somit müsste man auf der Erde eine unterschiedliche Lichtgeschwindigkeit messen.

Dazu entwickelten sie das Interferometer. Dieses besteht aus einer Lichtquelle, welche auf einen im  $45^\circ$  Winkel montierten halbdurchlässigen Spiegel leuchtet. An diesem wird das Lichtbündel geteilt und zeigt nun orthogonal auf je einen Spiegel. An orthogonalen Armen läuft das Licht zu den Spiegel, wird dort reflektiert und läuft wieder zurück. Am Ende werden die beiden Lichtbündel vom halbdurchlässigen Spiegel in ein Fernrohr gelenkt.

Beide Arme haben die Länge  $d$ . Der gesamte Aufbau wird erschütterungsfrei auf Steinplatte montiert, welche sich auf Quecksilber drehen kann. Wie aus der Abbildung hervorgeht, lassen sich die Laufzeiten für die beiden Arme berechnen:



$$t_1 = \frac{d}{c - v} + \frac{d}{c + v} = \frac{d(c + v)}{(c - v)(c + v)} + \frac{d(c - v)}{(c - v)(c + v)} = \frac{2dc}{c^2 - v^2} = \frac{2d}{c} \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{2d}{c} \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$t_2 = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c} \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2d}{c} \left( \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \right) = \frac{2d}{c} \frac{1 - \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}{1 - (\frac{v}{c})^2}$$

Mit  $c$  kann aus der Laufzeitdifferenz auch die Streckendifferenz berechnet werden:

$$\Delta s = c \cdot \Delta t = 2d \frac{1 - \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}{1 - (\frac{v}{c})^2}$$

Dieser Streckenunterschied entspricht einem Gangunterschied für eine Interferenz. Beim Drehen bzw. Verschieben des Interferometers verändert sich dieser Gangunterschied.

Mit  $v = 30 \frac{km}{h}$  und  $d = 11m$  ergibt sich  $\Delta s = 110nm$ , das etwa  $\frac{1}{4}$  der Wellenlänge von Licht entspricht. Die Veränderung der Interferenz müsste also deutlich sichtbar sein. Allerdings beobachteten Michelson und Morley keine Verschiebung der Interferenz.

Daraus konnte gefolgert werden, dass  $t_1 = t_2$  gelten muss - ansonsten wäre eine Verschiebung der Interferenz beobachtet worden.  $t_1 = t_2$  gilt, wenn  $d$  ebenfalls neu definiert wird:

$d\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}$ . Damit haben die Experimentoren den korrekten mathematischen Zusammenhang für die unten weiter erläuterten Relativitätsgesetze gefunden.

## Die Relativitätspostulate

Albert Einstein versuchte, die Ergebnisse des Michelson-Morley-Experiments zu erklären. Es sagte, dass der Äther nicht nachgewiesen werden könne, da er nicht existiere. Damit sei der absolute Raum hinfällig. Er hielt jedoch an der Vorstellung von Inertialsystemen fest und behauptete, dass diese nicht gleichberechtigt in Bezug auf alle physikalischen Gesetze seien. Letztlich müsste die Lichtgeschwindigkeit überall konstant sein. Er formulierte zwei Postulate:

### Relativitätsprinzip

Alle Inertialsysteme sind zur Beschreibung von Naturvorgängen gleichberechtigt. Die Naturgesetze haben in allen Inertialsystemen die gleiche Form.

### Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum hat in jedem Inertialsystem in allen Richtungen den Wert  $c$  - unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle.

Dies konnte einfach experimentell bestätigt werden. Durch das schnelle Bewegen einer Lichtquelle müsste  $v_{Licht} > c$  in einem ruhenden Inertialsystem gelten. Allerdings wurde  $v_{Licht} = c$  beobachtet. Somit gilt die Galilei-Transformation nur für  $v \ll c$ . Es ist eine relativistische Transformation notwendig. Diese wird Lorentz-Transformation genannt und wird durch die Formeln der Zeitdilatation und Längenkontraktion konkretisiert.

## Problem der Gleichzeitigkeit

Einstein stellte sich die Frage, wie Uhren synchronisiert werden könnten. Die Einstein-Synchronisation besagt, dass zwei Uhren an verschiedenen Orten synchronisiert werden, indem von ihrer geometrischen Mitte zwei Lichtsignale gleichzeitig ausgesendet werden, die bei ihrer Ankunft an den Uhren diese in Gang setzen.

Ein Gedankenexperiment zeigt jedoch, dass diese Vorstellung von Gleichzeitigkeit nicht funktioniert.

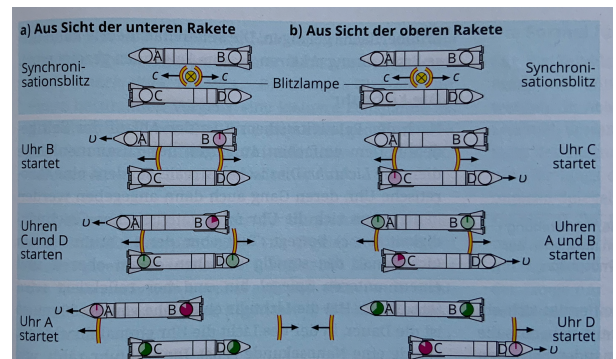
Bewegen sich zwei Raketen mit jeweils  $v = \frac{c}{2}$  als

Relativgeschwindigkeit und befindet sich am Bug und Heck jeweils eine Uhr, wird versucht diese mit einer Blitzlampe in der geometrischen Mitte zu synchronisieren, wenn die beiden Raketen nebeneinander sind. Aus Sicht von Rakete ein ergibt sich bei Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen eine andere Reihenfolge für die Aktivierung der Uhren. Folglich nehmen beide Raketen unterschiedliche Ereignisse als Gleichzeitigkeit wahr.

Daraus folgt das Prinzip der relativen Gleichzeitigkeit. Es besagt, dass nur in einem Inertialsystem ruhende Uhren in diesem synchronisiert werden können. Die Uhren in allen relativ dazu bewegten Systemen gehen nicht synchron.

## Zeitdilatation

Aus der Tatsache, dass sich Uhren in relativ bewegten Inertialsystemen nicht synchronisieren lassen folgt, dass die Dauer eines Ereignisses in zwei zueinander bewegten Inertialsystemen unterschiedlich gemessen wird.



## Myonenerfall

Das Myonenerfall-Experiment wurde von D. H. Frisch und J. H. Smith auf dem Mount Washington durchgeführt und verdeutlicht, dass die Zeit in unterschiedlichen Inertialsystemen unterschiedlich gemessen/wahrgenommen wird.

In der Atmosphäre der Erde zerfällt die Sonnenstrahlung teilweise. In ca.  $15\text{ km}$  Höhe zunächst in Pionen, in ca.  $10\text{ km}$  Höhe dann in Myonen. Diese Myonen sind Teilchen des Standardmodells, welche sich mit (nahezu) Lichtgeschwindigkeit bewegen. Sie sind instabil und zerfallen mit einer Halbwertszeit von ca.  $t_H = 1,52\ \mu\text{s}$ .

Mit  $c$  und der Halbwertszeit  $t_H$  lässt sich die Strecke berechnen, nach welcher sich die Myonenanzahl wiederholt halbieren müsste:  $\Delta s = v \cdot \Delta t \approx c \cdot 1,52\ \mu\text{s} = 456\text{ m}$ . In einer Höhe von  $10\text{ km}$  wurden jedoch ca.  $200\frac{\mu}{\text{m}^2\text{s}}$  und in einer Höhe von  $0\text{ km}$  ca.  $100\frac{\mu}{\text{m}^2\text{s}}$  gemessen. Die vorhergesagte „Halbierungsstrecke“ von  $456\text{ m}$  und die beobachtete von ca.  $10\text{ km}$  lassen sich nicht miteinander vereinigen. Es wird deutlich, dass die Myonen länger leben als angenommen. Für sie muss die Zeit langsamer vergehen.

Der Zusammenhang kann weiter untersucht werden. In  $2\text{ km}$  Höhe werden  $568\frac{\mu}{\text{h}}$  mit einem Szintillator gemessen und es gilt  $T_H = 1,52\ \mu\text{s}$ . Die Strecke bis  $0\text{ km}$  wird mit  $c$  in ca.  $6,39\ \mu\text{s}$  zurückgelegt. Durch einsetzen in das Zerfallsgesetz  $N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_H}}$  werden in  $0\text{ km}$  Höhe  $27\frac{\mu}{\text{h}}$  prognostiziert.

Stattdessen wurden in  $0\text{ km}$  Höhe jedoch  $412\frac{\mu}{\text{h}}$  detektiert. Durch Auflösen des Zerfallsgesetzes, erhält man eine Zerfallsdauer von  $\approx 0,7\ \mu\text{s}$ .  $\Delta t_0 \approx 0,7\ \mu\text{s}$  wird Eigenzeit genannt.  $\Delta t \approx 6,39\ \mu\text{s}$  wird Systemzeit genannt.

Die Überlegung des qualitativen Gedankenexperiments lassen sich somit auch experimentell und quantitativ nachweisen: Es existiert ein Unterschied der Zeitwahrnehmung in relativ bewegten Inertialsystemen. Die Umrechnung zwischen der System- und Eigenzeit erfolgt mit dem Lorentz-Faktor.

## Herleitung der Umrechnungsformel

Zur Herleitung der Formel und des Lorentz-Faktors stellt man sich eine Lichtuhr vor. Es werden zwei Spiegel gegenüber voneinander aufgebaut, zwischen welchen Licht als Takt der Uhr hin und her reflektiert wird.

Es wird der Lichtweg von einem zum anderen Spiegel betrachtet. Die Lichtuhr wird nun relativ zu einem Beobachter und System  $S$  bewegt. Für diesen verläuft der Lichtstrahl schräg entlang der Hypotenuse eines Dreiecks mit der Länge  $c \cdot \Delta t$ . Für einen Beobachter, der sich mit der Lichtuhr bewegt und im System  $S'$  befindet, verlaufen die Lichtstrahle senkrecht entlang einer Kathete des Dreiecks. Diese ist  $c \cdot \Delta t_0$  lang. Die Strecke der Bewegung von  $S'$  aus dem System  $S$  wird mit  $v \cdot \Delta t$  als andere Kathete angegeben.

In diesem rechtwinkligen Dreieck gilt nun:

$$\begin{aligned}(v\Delta t)^2 + (c\Delta t_0)^2 &= (c\Delta t)^2 \\ \Rightarrow v^2\Delta t^2 + c^2\Delta t_0^2 &= c^2\Delta t^2 \\ \Rightarrow c^2\Delta t_0^2 &= c^2\Delta t^2 - v^2\Delta t^2 \\ \Rightarrow c^2\Delta t_0^2 &= \Delta t^2(c^2 - v^2) \\ \Rightarrow \frac{c^2\Delta t_0^2}{c^2 - v^2} &= \Delta t^2 \\ \Rightarrow \frac{c\Delta t_0}{\sqrt{c^2 - v^2}} &= \Delta t\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Delta t_0 \frac{\sqrt{c^2}}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \Delta t$$

$$\Rightarrow \Delta t_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \Delta t$$

Somit gilt  $\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \Delta t_0 = \gamma \cdot \Delta t_0$  mit  $\Delta t_0$  als Eigenzeit und  $\Delta t$  als Systemzeit.  $\gamma$  wird

als Lorentz-Faktor bezeichnet.

### Definition

Eine in einem Inertialsystem  $I$  bewegte Uhr misst für einen Vorgang die Eigenzeit  $\Delta t_0$ , die kleiner ist als die von den ruhenden Uhren des Systems für den selben Vorgang gemessene Systemzeit  $\Delta t$ . Es gilt:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \Delta t_0 = \gamma \cdot \Delta t_0 \text{ mit } \gamma > 1.$$

Für  $\frac{v}{c} < 0,1$  gilt die Näherung  $\gamma = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2$ .

## Längenkontraktion

Aus den Berechnungen und Überlegungen zur Zeitdilatation folgt, dass auch bei Strecken ein relativistischer Effekt vorliegen muss. Würde die Strecke nicht kürzer werden, wäre für die Myonen aus dem Abschnitt Zeitdilatation  $v > c$  möglich.

### Berechnung

Grundsätzlich misst man mit einem bewegten Körper mit der Relativbewegung  $v$  eine Strecke, indem man  $v \cdot \Delta t$  rechnet. Allerdings ist schon bekannt, dass die System- und Eigenzeit unterschieden werden muss. Folglich muss auch zwischen der Eigenlänge  $l$  im ruhenden System und der Länge  $l_0$  im bewegten System in Bewegungsrichtung unterschieden werden.

Bereits bekannt ist:  $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$ . Zudem wird entsprechend vorausgehender Überlegung geschrieben:  $l = v \cdot \Delta t$  und  $l_0 = v \cdot \Delta t_0$ . Durch Einsetzen folgt:

$$l = v \cdot \Delta t_0 \cdot \gamma \Rightarrow l = l_0 \cdot \gamma$$

### Definition

Bewegt sich ein Körper mit der Relativgeschwindigkeit  $v$  in einem Inertialsystem  $I$ , so wird im bewegten System dessen Länge  $l_0$  in Bewegungsrichtung kürzer als die Eigenlänge  $l$  gemessen.

## Zwillingsparadoxon

Das Zwillingsparadoxon ist ein Gedankenexperiment, das einen scheinbaren Widerspruch in der speziellen Relativitätstheorie beschreibt. Es wird der Fall betrachtet, dass ein Organismus mit nahezu Lichtgeschwindigkeit zu einem fernen Planeten fliegt, an diesem umkehrt und wieder zurück zur Erde kommt. Für diesen bewegten Organismus müsste die Zeit langsamer verlaufen sein, er müsste als im Vergleich zu Organismen auf der Erde langsamer gealtert sein - bei Zwillingen wäre ein Altersunterschied feststellbar.

Die aufgeworfene Frage ist nun, wieso man das System nicht auch aus Perspektive des reisenden Organismus betrachten könne. Dann würde man die Organismen auf der Erde als bewegt ansehen und folglich müssten diese langsamer altern.

Bei dieser Kritik wird jedoch ein grundlegender Fehler gemacht. Es wird angenommen, dass beide Bezugssysteme, die der bewegten und ruhenden Organismen, gleichberechtigt sind. Dies ist jedoch nicht der Fall. Denn die Gesetze der speziellen Relativitätstheorie gelten nur in Inertialsystemen. Das Umkehren des bewegten Organismus stellt jedoch eine beschleunigte

Bewegung dar, wodurch sich das Bezugssystem ändert und die Perspektive der Organismen auf der Erde bestätigen lässt.

## Teilchenbeschleuniger

To be completed. [missing]

- Zyklotron
- Synchrotron

## Relativistische Massenzunahme

### Bertozzi-Experiment

Geladenen Teilchen werden in einem elektrischen Feld beschleunigt. In einem evakuierten Glasbolben werden Elektronen erzeugt, durch eine Lochanode konzentriert und mit  $U_B$  (Hochspannung) beschleunigt. Ein Oszilloskop misst die Geschwindigkeit der Elektronen.

Die den Elektronen zugeführte elektrische Energie  $E_{el}$  beträgt  $U_B \cdot Q =: U_B \cdot e$ . Sie kann in Form von kinetischer Energie  $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$  beobachtet werden. Aus der Gleichsetzung  $E_{el} = E_{kin}$

folgt:  $v = \sqrt{\frac{2U_B Q}{m}}$ . Mit einer Beschleunigungsspannung  $U_B = 0,5 \text{ MV}$  ergibt sich ca.  $4,19 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} > c$ . Dies ist jedoch unmöglich, da sich nichts schneller als Lichtgeschwindigkeit bewegen kann.

Die Realität zeigt, dass selbst bei  $U_B = 15 \text{ MV}$  nur eine Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit stattfinden. Erreicht wird diese jedoch nie. An der obigen Formel für  $v$  kann ausschließlich  $m$  verändert werden, woraus die dynamische Masse resultiert. Diese muss mit hohen Geschwindigkeiten zunehmen.

### Dynamische Masse

Bei  $v = 0$  kann die Ruhemasse  $m_0$  gemessen werden. Bei  $v > 0$  wird die dynamische Masse  $m(v)$  betrachtet. Die Begründung dafür liefert das Bertozzi-Experiment. Die Umrechnung zwischen  $m_0$  und  $m(v)$  erfolgt mit dem Lorentz-Faktor. Es gilt:  $m(v) = \gamma \cdot m_0$ .

Es kann auch die relativistische Massenzunahme  $\Delta m$  betrachtet werden. Für diese gilt  $\Delta m = m(v) - m_0$ .

## Energie-Masse-Beziehung

Mit seiner berühmten Formel  $E = m \cdot c^2$  hat Einstein die Masse-Energie-Äquivalenz postuliert. Dieser Zusammenhang kann zum Beispiel beim Prozess der Anihilation beobachtet werden, wenn sich ein Teilchen und sein Antiteilchen in elektromagnetische Strahlung umwandeln. Es kommt zur vollständigen Umsetzung ihrer Massen in elektromagnetische Strahlungsenergie.

In einem abgeschlossenen System muss für die Gesamtenergie  $E_{ges}$  somit folgendes gelten:

$$E_{ges} = m \cdot v^2 = m_0 \cdot \gamma \cdot c^2 = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} c^2$$

Durch die Näherungsgleichung für den Lorentz-Faktor für  $v \ll c$  folgt:

$$E_{ges} = m_0 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \cdot c^2 = \left(m_0 + \frac{m_0 v^2}{2c^2}\right) \cdot c^2 = m_0 c^2 + \frac{m_0 c^2 v^2}{2c^2} = m_0 c^2 + \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2 = E_0 + E_{kin}$$

Diese Rechnung verdeutlicht, dass die kinetische Energie eine Darstellung für die zusätzliche Massen-Energie bei geringen  $v$  ist.

## Einfluss der Gravitation auf die Zeitmessung

To be completed. [missing]

- Krümmung des Raumes



# Elektrik

---

## Größen

- $[I] = 1A = 1\frac{C}{s}$  (Strom; Stromstärke)
- $[U] = 1V$  (Spannung)
- $[R] = 1\Omega$  (Widerstand)
- $[P] = 1W = 1\frac{J}{s}$  (Leistung)
- $[Q] = 1C = 1A \cdot 1s = 1As$  (Ladung)
- $[C] = 1F$  (Kapazität)
- $[E] = 1J$  (Energie)
- $[E] = 1\frac{N}{C}$  (elektrische Feldstärke)
- $[\sigma] = 1\frac{C}{m^2}$  (Ladungsdichte)
- $[B] = 1T = 1\frac{Vs}{m^2}$  (Magnetische Flussdichte/Magnetfeldstärke)

To be completed. [missing]

## Formeln

- $P = U \cdot I$
- $U = R \cdot I$
- $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
- $E(\text{Energie}) = P \cdot t$
- $U = E(\text{Feld}) \cdot s$
- $E(\text{Feld}) = \frac{F}{Q}$
- $\Delta E(\text{Energie}) = F \cdot \Delta s = E(\text{Feld}) \cdot Q \cdot \Delta s$
- $I(t) = Q'(t) = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
- $W = \Delta E(\text{Energie})$
- $\varphi_{10} = \frac{W_{10}}{Q}$
- $U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{W}{Q} - \frac{W}{Q} = \frac{\Delta W}{q}$
- $W_{21} = q(\varphi_2 - \varphi_1) = qU_{21}$
- $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$
- $E_{el} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$  (el. Energie im Kondensator)
- Plattenkondensator

- $E_{el} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 V$  (el. Energie im Plattenkondensator)
- $W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 (Feld) A d$
- $p_e = \frac{\dot{W}}{V} = \frac{W}{A d} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 (Feld)$
- $F \cdot \Delta s = Q \cdot E(Feld) \cdot \Delta s = \Delta E (Energie)$
- $\sigma = \frac{Q}{A} = \epsilon_e E(Feld) = \epsilon_0 \frac{U}{d}$
- $E = \mu_r E_i$  (el. Feldstärke mit Dielektrikum)
- $\tau = R \cdot C$
- $Q_C(t) = C \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{RC} \tau})$  (Aufladen eines Kondensators)
- $Q_C(t) = C \cdot U \cdot e^{-\frac{1}{RC} \tau}$  (Entladen eines Kondensators)
- $I_C(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC} \tau}$  (Aufladen eines Kondensators)
- $I_C(t) = -I_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC} \tau}$  (Entladen eines Kondensators)
- $U = \frac{\Delta E}{Q} = \frac{Q \cdot E(Feld) \cdot \Delta s}{Q} = E(Feld) \cdot d$
- $C = \frac{Q}{U} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{D}$
- $C_{ges} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$  (Kapazität Parallelschaltung)
- $C_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$  (Kapazität Reihenschaltung)
- Radialelektrisches Feld
  - $E(Feld) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$
  - $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$
  - $W_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$
  - $W_{pot} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$
  - $\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2} = \epsilon_e E(Feld)$
- $F_{mag} = B \cdot I \cdot l$  (Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld)
- $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$  (Gesetz von Biot und Savart: Magnetfeld um einen Leiter)
- $F = \frac{\mu_0}{2\pi r} I^2$  (Kräfte zwischen zwei parallelen Leitern)
- $B = \mu_0 \frac{N}{l} I$  (Magnetfeld im Inneren einer Spule)
- $F_L = B \cdot v \cdot q$  (Lorentz-Kraft)
- $F_{el} = E \cdot q$  (elektrische Kraft)
- $U_H = v \cdot B \cdot d = \frac{1}{n \cdot e} \frac{I}{d} B = R_H \frac{I}{d} B$  (Hall-Spannung)
- $U = E \cdot \Delta s$  (Spannung)

- $v = \frac{E}{B}$  (Geschwindigkeitsfilter)
  - $F_Z = \frac{mv^2}{r}$  (Zentripetalkraft)
  - $\frac{m}{Q} = \frac{B \cdot r}{v}$  (spezifische Masse: Massenspektroskopie)
  - $U_{ind} = -N \cdot \Phi'$  (Induktionsgesetz)
  - $\Phi = A \cdot B$
  - $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$  (kinetische Energie)
  - $\varphi = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$
  - $\omega = \frac{2\pi}{T}$  (Winkelgeschwindigkeit)
  - $f = \frac{1}{T}$  (Frequenz und Umlaufzeit)
  - $U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$  (Sinusschwingung, Generator)
  - $U_0 = N \cdot B \cdot A \cdot \omega$  (Maximum, Sinusschwingung, Generator)
  - $U_{ind} = N \cdot B \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega$  (Induktionsspannung, Generator ?)
  - $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_1}{I_2}$
  - $E = P \cdot t$  (Energie, Leistung)
- To be completed. [missing]

## Eigenschaften elektrischer Ladungen und ihre Felder

Es existieren elektrische Ladungsträger. Eine Ladung  $Q$  wird mit  $[Q] = 1C = 1As$  angegeben. Für negative Ladungen gilt  $Q < 0$ , sie können durch Elektronen bzw. einen Elektronenüberschuss auftreten. Für positive Ladungen gilt  $Q > 0$ , sie können durch Protonen bzw. einen Elektronenmangel auftreten. Für neutrale Ladungen gilt  $Q = 0$ , sie entsprechen einem Ladungsgleichgewicht.

Für ein Elektron gilt die Elementarladung  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}C$ .

### Grundbegriffe

#### Ladungsträger

Ladungsträger sind Objekte, welche elektrische Ladungen - meist in Form von Elektronen - tragen. Die Gesamtladung eines Ladungsträgers setzt sich aus der Summe der elektrischen Teilladungen zusammen. Sind z. B. mehr negative als positive Teilladungen vorhanden, so ist der Ladungsträger negativ geladen. Stimmt die Anzahl der negativen und positiven Teilladungen überein, so ist der Ladungsträger neutral geladen.

#### Ladungstrennung

Dieser Begriff beschreibt die Räumliche Trennung von Ladungen, wie sie z. B. durch die elektrische Influenz oder elektrische Felder im Allgemeinen verursacht werden kann.

#### Elektrische Feldstärke

In vielen Formeln im Bereich der Elektrizität ist die elektrische Feldstärke  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$  enthalten. Sie ist in vielen Gleichungen als Faktor notwendig, um eine korrekte Einheitenbetrachtung durchführen zu können.

#### Probeladung

Mit einer Probeladung soll die Kraftwirkung auf einen Ladungsträger überprüft werden. Somit ist eine Probeladung ein elektrisch geladener Körper. Sein  $E$ -Feld ist jedoch sehr schwach - es kann in seiner Umgebung keine Bewegungen verursachen.

## Coulomb-Kraft

Es können Untersuchungen zu den Beziehungen von Kraft, Ladung und Abstand mit der Variablenkontrollstrategie durchgeführt werden. So werden zwei Zusammenhänge entdeckt:

(a) Die Kraft auf einen Ladungsträger und die Ladung dieses Ladungsträgers hängen proportional zusammen:  $Q \sim F$  bzw.  $\frac{Q}{F} = konst.$

(b) Umso größer der Abstand zweier Ladungsträger, umso kleiner ist die Kraftwirkung:  $F = \frac{1}{r^2}$ .

Grundsätzlich wird die Kraft zwischen zwei Ladungsträgern als Coulombkraft  $F_C$  bezeichnet. Die Kraft wie abhängig vom Abstand  $r$  der Ladungsträger und deren Ladungen  $q_1$  und  $q_2$ . Es gilt:

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Experimente haben gezeigt, dass sich gleichnamige Ladungen abstoßen und ungleichnamige Ladungen anziehen.

## Elektrische Felder

Es wird der Raumbereich betrachtet, indem dem elektrische Ladungen elektrische Kräfte erfahren. In diesem Bereich existiert ein elektrisches Feld, welches durch elektrische Ladungen verursacht wurde, denn jeder geladenen Körper ist von einem  $E$ -Feld umgeben. Die Kraftwirkung zwischen Ladungen wird mit elektrischen Feldern ( $E$ -Feld) erklärt. Befindet sich eine andere Ladung im elektrischen Feld einer Ladung, wirkt auf diese andere Ladung eine Kraft. Es gilt, dass die Kraftwirkung von (a) der Feldstärke  $E$  und (b) von der Ladung abhängt. Es gilt  $F_{el} = E \cdot Q$ . Das elektrische Feld  $E$  gibt also die Kraft pro Ladung an:  $E = \frac{F_{el}}{Q}$ . Die Feldlinien bzw. die Ausrichtung

des  $E$ -Feldes geben die Richtung der Kraft auf eine positive Probeladung an - sie beginnen an negativen Ladungen und enden an positiven Ladungen. Um die Krafrichtung zu bestimmen, kann eine Tangente an die Feldlinien gezeichnet werden. Diese Wirkung ist unabhängig von einem Medium.

Ergänzend ist hervorzuheben, dass elektrische Feldlinien auf Metalloberflächen immer senkrecht stehen. Denn würden sie schräg stehen, käme es sofort zu einer Bewegung der Elektronen in diesem Leiter, welche die Feldlinien gerade rücken würden.

### Radialsymmetrisches elektrisches Feld

Radialsymmetrische elektrische Felder werden durch geladene Punktladungen/Kugeln erzeugt. Sie erzeugen ein „strahlenförmiges“ Feld. Die Betrachtungen oben zur Coulomb-Kraft beziehen sich auf die radialsymmetrischen elektrischen Felder zweier Punktladungen.

Für die Feldstärke gilt:  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$ .

Für das Potenzial gilt:  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$ .

Für die Kraft gilt:  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ .

## (Potenzielle) Energie und Spannung im elektrischen Feld

### Qualitative Betrachtung

Es kann analog die potenzielle Energie der Mechanik betrachtet werden. Beim Bewegen entgegen der Kraftwirkung auf einen Körper (Anheben), wird die potenzielle Energie von diesem erhöht. Beim Bewegen mit der Krafrichtung auf einen Körper (Absenken), wird die potenzielle Energie von diesem verringert.

In der Elektrizität erfährt eine Ladung in Richtung eines Feldes eine Kraft. Ist die Ladung in diesem frei beweglich kann die Ladung beschleunigt werden, analog zur Beschleunigung eines Objektes in der Mechanik, wenn dieses nach dem Anheben losgelassen wird. Wird nun eine Ladung entlang dieser Feldlinien bewegt findet eine Ortsänderung statt. Einmal mit und einmal entgegen der Kraftwirkung. Folglich wird Arbeit verrichtet und es ändert sich die potenzielle Energie der Ladung. Es kann geschrieben werden: Jeder geladenen Körper hat in einem elektrischen Feld eine vom Ort abhängige potenzielle Energie.

Bei der Ortsänderung/Bewegung gilt die Wegunabhängigkeit. Jede Bewegung ist in eine zum Feld senkrechte und parallele Strecke aufteilbar. Von diesen beiden ist nur die zum Feld parallele zu wählen. Die senkrechte ist für die potenzielle Energie irrelevant. Somit ist die verrichtete Arbeit vom konkreten Weg der Elektronen unabhängig.

### Potenzial

Das Potenzial eines Punktes  $p_1$  kann nur in Verhältnis zu einem Referenzpunkt  $p_0$  bestimmt werden. Es Beschreibt den Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Energie auf dem Weg von Punkt  $p_0$  bis  $p_1$  und der Ladung  $Q$ . Es gilt:  $\varphi_{10} = \frac{E_{10}}{Q}$ .

Das Potenzial beschreibt also die Energie pro Ladung an einem gewissen Punkt im elektrischen Feld.

### Spannung

Als Energiedifferenz  $\Delta E = W$  wird die Änderung der Energie einer Ladung bei der Bewegung zwischen zwei Punkten betrachtet. Wird nun die Energiedifferenz pro Ladung betrachtet, kann auch die Differenz zweier Potenziale  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  betrachtet werden.

Als Spannung  $U$  ist die Differenz zweier Potenziale  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  bzw. die Energieänderung  $\Delta E$  der Ladung  $Q$  definiert. Somit gilt  $U = \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{E_2}{Q} - \frac{E_1}{Q} = \frac{\Delta E}{Q} = \frac{W}{Q}$ . Die Einheit ist

$$[U] = \frac{1J}{1C} = 1V \text{ (Volt)}.$$

Für die Energieänderung  $\Delta E = W$  gilt aus der Mechanik allgemein  $W = F \cdot \Delta s$ . Mit  $F = Q \cdot E$  gilt nun  $W = E \cdot Q \cdot \Delta s$ . Mit  $[W] = 1Nm = 1J$ . Wird diese Formel für  $W$  in die Formel für  $U$  eingesetzt, ergibt sich:  $U = \frac{E \cdot Q \cdot \Delta s}{Q} = E \cdot \Delta s$ .

Flächen gleichen Potenzials werden als Äquivalenzflächen bezeichnet. Diese Flächen sind orthogonal zu den Feldlinien des elektrischen Feldes.

### Elektrische Influenz

Die elektrische Influenz beschreibt die Trennung von Ladungen in einem leitenden Körper unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes. Die Influenz kann durch die Coulomb-Kraft erklärt werden. Denn abhängig von der Ladung von Ladungsträgern eines Körpers, wirkt in einem elektrischen Feld eine unterschiedliche Kraft auf diese und sie werden somit unterschiedlich bewegt. Es kommt zur Ladungstrennung.

### Elektroskop

Diesen Effekt nutzt das Elektroskop, um Ladungen nachzuweisen. Es ist nicht möglich zu sagen, ob eine Ladung positiv oder negativ ist, nur ob eine Ladung allgemein vorhanden ist.

Wie die Abbildung zeigt, verschieben sich beim Annähern einer Ladung aufgrund der elektrischen Influenz die Ladungen im Elektroskop. Durch die Konzentration gleichnamiger Ladungen im Zeiger und der Zeigerhalterung, wirkt die Coulomb-Kraft und der Zeiger schlägt aus.

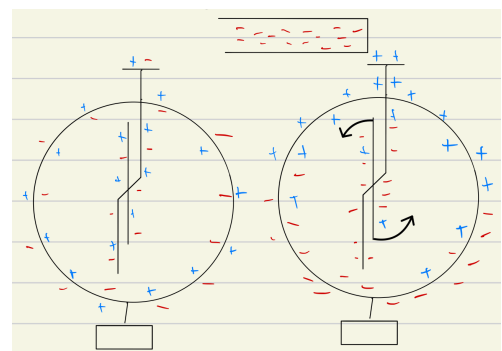
Wird das Elektroskop mit einer Ladung berührt, können sich die Ladungen zwischen dem herangeführten Ladungsträger und dem Elektroskop ausgleichen. Ist der Ladungsträger zunächst geladen liefert auch nach dem Ausgleich weiterhin ein Elektronenmangel oder -überschuss vor. Somit wird auch weiterhin ein Ausschlag des Elektroskopes sichtbar sein.

Wird nun allerdings das Elektroskop direkt im Anschluss mit einer gegennamigen Ladung berührt, so kann wieder ein Ladungsgleichgewicht hergestellt werden und der Ausschlag geht zurück.

Wird nun allerdings das Elektroskop direkt im Anschluss mit einer gegennamigen Ladung berührt, so kann wieder ein Ladungsgleichgewicht hergestellt werden und der Ausschlag geht zurück.

### Polarisation

Ein weiterer wichtiger Effekt ist die Polarisation, welche eng mit der elektrischen Influenz verbunden ist. Durch die Wirkung eines elektrischen Feldes kommt es in einem Nichtleiter zwar nicht zur Ladungsverschiebung, dennoch jedoch zur Ausrichtung elektrischer Dipole. Somit können auch Nichtleiter elektrisch wirken.



## Reibungselektrizität

Der Begriff Reibungselektrizität beschreibt die elektrische Aufladung von Körpern durch Reibung. Werden z. B. Seide und Glas aneinander gerieben, ist im Anschluss das Glas positiv und die Seide negativ geladen. Werden Fell und Kunststoff aneinander gerieben, ist im Anschluss der Kunststoff negativ und das Fell positiv geladen.

Dieser Effekt kann durch die unterschiedliche Elektronegativität der Körper erklärt werden. Beim Reiben werden die äußeren Elektronen aus den Oberflächen der aneinander geriebenen Körper gelöst. Die Elektronegativität beschreibt das Bindungspotenzial in Bezug auf Elektronen von Materialien. Ist die Elektronegativität unterschiedlich bindet eines der beiden Materialien die Elektronen nun besser, wodurch die Neuverteilung der Ladungen ungleich ist.

## Elektrostatische Phänomene

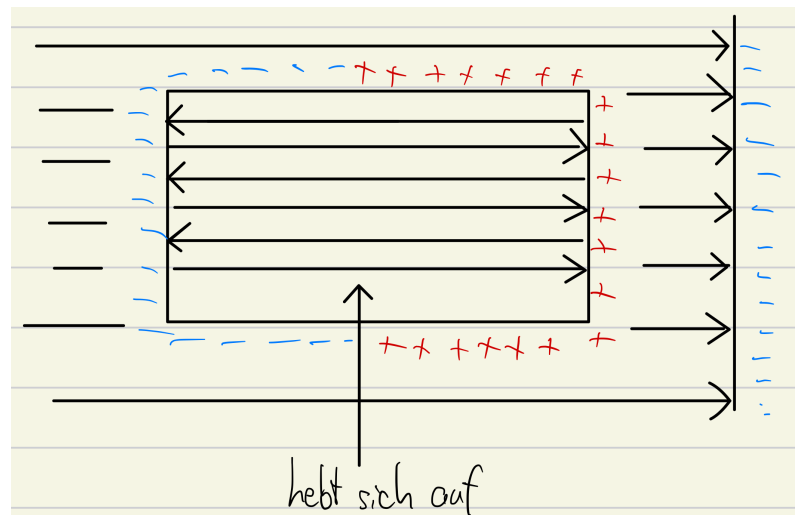
### Faraday'sche Käfig

Ein Faraday'scher Käfig ist ein Metallkäfig. Für ein Experiment zum Faraday'schen Käfig wird (a) ein sehr empfindlicher Indikator zum Nachweis eines elektrischen Feldes - z. B. Ein sehr empfindliches Elektroskop - benötigt und (b) ein geladener Körper - z. B. durch den Effekt der Reibungselektrizität erzeugt - benötigt. Der Indikator befindet sich im Metallkäfig. Der geladene Körper wird nun möglichst nah an den Körper herangeführt.

Es fällt auf, dass der Indikator trotz eindeutiger Annäherung einer elektrischen Ladung die Abwesenheit jeglicher Ladung anzeigt.

Dies ist durch die Wirkung der elektrischen Influenz auf den Metallkäfig zu erklären. Denn durch das Feld des angenäherten Ladungsträgers, verschieben sich im Metallkäfig die Ladungen. Wird z. B. Ein negativer Körper angenähert, werden die negativen Ladungen weggedrückt und die positiven Ladungen angezogen. Die Orientierung der Ladungen im Metallkäfig ist somit der des angenäherten Körpers genau entgegengesetzt. Nun erzeugen aber auch die Ladungen im Käfig ein elektrisches Feld. Da die Ladungen genau entgegengesetzt der des Ladungsträgers sind, ist auch das Feld genau zu dem des Ladungsträgers entgegengesetzt. Somit heben sich beide exakt auf - im Käfig selber wird folglich kein elektrisches Feld mehr festgestellt.

Es zeigt sich, dass sich elektrische Felder mit einem Metallkäfig (Faraday'scher Käfig genannt) abschirmen lassen.



### Gewitter

Ein Gewitter ist ebenfalls ein elektrostatisches Phänomen. Sind zwei Wolken stark elektrisch geladen, kann der Ladungsunterschied so groß werden, dass die Durchschlagfeldstärke der Luft überschritten wird. Der Ladungsunterschied ist so groß, dass die Spannung zwischen den Wolken den Widerstand der Luft überwindet. Dann kommt es zum Spannungsausgleich bzw. zur Entladung über einen Blitz. Diese Entladung bzw. dieser Ausgleich kann zum einen - wie häufig beschrieben - zwischen einer Wolke und dem Boden stattfinden. Ein Ausgleich zwischen zwei Wolken findet jedoch ebenfalls statt.

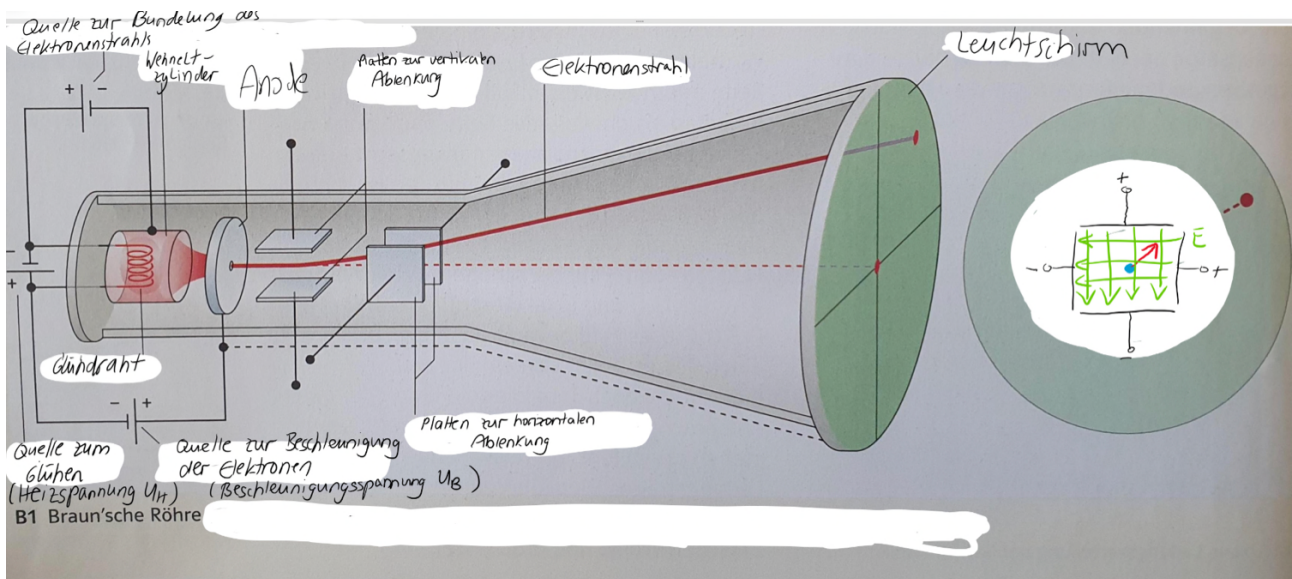
Die Ladung von Wolken kann selbstverständlich auch erklärt werden. Durch Luftströmungen kommt es zur Teilchenbewegung nach oben und unten. Durch die Wirkung des elektrischen Feldes der Erde werden die Teilchen zu Dipolen, es kommt zur Ionenbildung. Durch das Abstoßen von positiven bzw. negativen Ladungen kommt es zur Ansammlung negativer Ladungen im unteren und der Ansammlung positiver Ladungen im oberen Bereich.

Die Ladung von Wolken kann selbstverständlich auch erklärt werden. Durch Luftströmungen kommt es zur Teilchenbewegung nach oben und unten. Durch die Wirkung des elektrischen Feldes der Erde werden die Teilchen zu Dipolen, es kommt zur Ionenbildung. Durch das Abstoßen von positiven bzw. negativen Ladungen kommt es zur Ansammlung negativer Ladungen im unteren und der Ansammlung positiver Ladungen im oberen Bereich.

### Braun'sche Röhre

Mit der Braun'schen Röhre wird ein gebündelter und beschleunigter Elektronenstrahl gezielt abgelenkt.

Durch eine Heizspannung an einem Glühdraht werden Elektronen erzeugt (Glühelastischer Effekt). Im Wehneltzylinder werden diese konzentriert. Und durch das die Potenzialdifferenz zur



Luchanode, werden die Elektronen beschleunigt. Somit entsteht ein beschleunigter und gebündelter Elektronenstrahl.

Die Ablenkung findet an je zwei Plattenpaaren zur horizontalen und vertikalen Ablenkung statt. An den Platten ist je eine Spannung angeschlossen, sodass zwischen diesen ein elektrisches Feld entsteht. In diesem erfahren die negativ geladenen Elektronen eine Kraft, einmal horizontal und einmal vertikal. Somit kann in der Summe eine beliebige Ablenkung erreicht werden.

### Elektrische Ladung und elektrischer Strom

Materie besteht aus Atomen. Die positiv geladenen Atomrümpfe (Atomkerne - positive Ionen) sind fest verankert. In Materialien, welche Strom leiten können, können sich einzelne gelöste Elektronen jedoch nahezu frei bewegen. Diese Elektronen werden das Elektronengas genannt. Elektrischer Strom ist somit die Bewegung von Elektronen (negativer Ladungen).

Die Bewegung von Ladungen  $Q$  entspricht einer Ladungsänderung  $\Delta Q$ . Wird die Ladungsänderung pro Zeit betrachtet, ergibt sich der Strom bzw. die Stromstärke  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ . Die

Einheit des Stroms  $I$  ist  $[I] = 1 \frac{C}{s} = 1A$  (Ampere).

Die zeitabhängige Stromstärke  $I(t)$  kann als erste Ableitung der Ladung interpretiert werden:  $I(t) = Q'(t)$ . Ebenso kann die Ladung  $Q$  als Integral der Stromstärke  $I$  aufgefasst werden. Im

Intervall  $[t_1; t_2]$  mit  $n$  Schritten gilt:  $Q = \sum_{i=1}^n \Delta Q = \sum_{i=1}^n I_i \Delta t = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_n$ . Aus

$$n \rightarrow \infty \text{ folgt } Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

### Gleich- und Wechselstrom

Ferner ist zwischen Gleich- und Wechselstrom zu unterscheiden. Im Physik-Unterricht wird meist Gleichstrom betrachtet. Bei diesem bewegen sich die Elektronen durchgehend in einer Richtung.

Beim Wechselstrom, wie er z. B. aus der typischer Haushaltssteckdose austritt, wechselt sich die Bewegungsrichtung der Elektronen in einem gleichbleibende Rythmus um. In unserem Stromnetz wechselt die Fließrichtung des Stroms 100 Mal in der Sekunde entsprechend der Frequenz  $50Hz$ .

Bei Gleichstrom sind die Spannung  $U$  und der Strom  $I$  konstant. Beim Wechselstrom jedoch variabel: Sie kehren sich ständig um. Für den sinusförmigen Wechselstrom gelten:

$$U = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t + \Delta\varphi) \text{ und } I = \hat{I} \cdot \sin(\omega \cdot t + \Delta\varphi).$$

### Schaltungen

Grundsätzlich kann zwischen Reihen- und Parallelschaltungen unterschieden werden. Bei der Reihenschaltung werden mehrere Elemente hintereinander in einen Stromkreis eingebaut. Bei

einer Parallelschaltung teilt sich ein Leiter auf, sodass der Strom durch beide Elemente fließen kann, und vereint sich nur im Nachhinein wieder.

Bei der Reihenschaltung gilt:

- (a) Die Spannung an den Bestandteilen der Schaltung hängt vom Widerstand der jeweiligen Bestandteile ab und kann unterschiedlich sein.
- (b) Der Stromfluss durch alle Bestandteile ist identisch.

Bei der Parallelschaltung gilt:

- (a) Die Spannung an allen Bestandteilen der Schaltung ist identisch.
- (b) Der Stromfluss durch die Bestandteile der Schaltung hängt vom Widerstand der jeweiligen Bestandteile ab und kann unterschiedlich sein.

Diese Zusammenhänge entsprechen den Kirchhoff'schen Gesetzen. Das erste Kirchhoff'sche Gesetz ist die Knotenregel: In jedem Verzweigungspunkt eines Stromkreises ist die Summe der hinfließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme. Es gilt:  $I_{hin} = I_{ab}$ . Es kann die Analogie zu (b) der Parallelschaltung gezogen werden.

Das zweite Kirchhoff'sche Gesetz ist die Maschenregel: Die Summe aller Spannungen in einem Stoßkreis muss (Spannungsquellen eingeschlossen) immer 0 ergeben. Es gilt:

$$U_{Spannungsquelle} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n.$$

	Parallelschaltung	Reihenschaltung
<b>Stromstärke</b>	$I_{ges} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$	$I_{ges} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$
<b>Spannung</b>	$U_{ges} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$	$U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$
<b>Widerstand</b>	$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$	$R_{ges} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$
<b>Kapazität</b>	$C_{ges} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$	$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$

## Kondensatoren

In Kondensatoren kann Energie in einem elektrischen Feld gespeichert werden. In der Schule werden grundsätzlich Plattenkondensatoren betrachtet. Diese bestehen aus zwei gleich geformten Platten, welche parallel zueinander liegen. Die Außenseite der Platten sind Anschlusspunkte in einem Stromkreis.

Experimentell wird zunächst die Variablenkontrollstrategie für die folgenden Größen durchgeführt.

- Angelgte Spannung  $U$
- Ladung an den Kondensatorplatten  $Q$
- Größe der Kondensatorplatten  $A$
- Abstand der Kondensatorplatten  $d$

Bei der Betrachtung von  $Q$  und  $U$  zeigt sich, dass  $Q \sim U$  und somit  $\frac{Q}{U} = konst.$  Dieser für einen Kondensator konstante Wert wird  $C$  geschrieben und Kapazität genannt. Seine Einheit ist Farad  $[C] = 1 \frac{C}{V} = 1F$ .

Bei der Betrachtung von  $A$  und  $d$  zeigt sich, dass  $A \sim d$  und somit  $\frac{A}{d} = konst.$  Mit einem Vorfaktor  $k$  ist der Zusammenhang  $C = k \cdot \frac{A}{d}$  festzustellen. Für  $k$  kann folgender Wert identifiziert

werden:  $k = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ .

### Energie im Kondensator

Nun gilt es die im Kondensator gespeicherte Energie zu ermitteln. Dazu stellt man sich vor, dass der Kondensator durch das Übertragen einzelner Ladungen von einer zur anderen Platte aufgeladen wird. Wird die Ladung  $Q$  durch das elektrische Feld zwischen beiden Platten (durch die Spannung  $U$ ) bewegt, muss die Arbeit  $W = \Delta E = U \cdot Q$  verrichtet werden. Wird dieser



Vorgang häufig wiederholt, ergibt sich:  $\Delta E_{el} = \Delta E_1 + \Delta E_2 + \dots \Delta E_n$ . Während der Wert  $Q$  konstant bleibt, steigt die Spannung nach jeder Übertragung an, da bereits ein Ladungsunterschied besteht. Dieser wird immer weiter vergrößert. Somit muss für jede Übertragung auch zunehmend mehr Arbeit verrichtet werden.

Aus dem Zusammenhang  $Q \sim U$  folgt, dass die Spannung  $U$  proportional mit der Ladungsübertragung/-verschiebung ansteigt. Es kann das  $Q - U$ -Diagramm betrachtet werden.

Das Integral von diesem entspricht  $\Delta E_{el}$ . Und aufgrund des proportionalen Zusammenhangs gilt für das Integral  $E_{el} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot Q^2 \cdot \frac{1}{C}$ . Mit  $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$  und  $U = E \cdot d$  ergibt sich zudem:

$$E_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \right) (Ed)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r A E^2 d = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 V$$

Wird durch  $V$  geteilt ergibt sich die Energiedichte im homogenen elektrischen Feld  $E$ :

$$\varphi_e = \frac{E}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2.$$

### Flächenladungsdichte

Mit der Flächenladungsdichte wird die Konzentration von Ladungen auf einer Oberfläche/Platte angegeben - häufig in Bezug zu einem Plattenkondensator. Es gilt  $\sigma = \frac{Q}{A}$  mit der Einheit

$$[\sigma] = \frac{C}{m^2}. \text{ Alternativ kann die Flächenladungsdichte auch mit } \sigma = \frac{Q}{A} = \epsilon_0 \frac{U}{d} = \epsilon_0 E \text{ berechnet}$$

werden, wenn z. B. eine gekrümmte Oberfläche eines kugelförmigen Ladungsträgers vorliegt.

### Entladevorgang und Aufladevorgang

Eine Abbildung zeigt die Schaltskizze zum Messen der Spannung beim Auf- und Entladevorgang. Grundsätzlich wird ein Kondensator über einen Widerstand  $R$  auf- und entladen. Messungen zeigen, dass ein exponentieller Verlauf vorliegt. Sowohl das Auf- als auch das Entladen geschieht zunächst schnell und dann zunehmend langsamer.

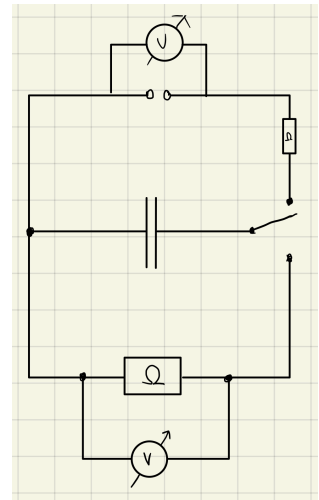
Mathematisch ist folgende Betrachtung durchzuführen: Da der Widerstand  $R$  und der Kondensator in Reihe geschaltet sind, ergibt sich

$$U_0 = U_R + U_C \text{ (mit } U = R \cdot I \text{ und } U = \frac{Q}{C})$$

$$= R \cdot I(t) + \frac{Q_C(t)}{C}$$

$$\Rightarrow I(t) = \frac{U_0}{R} - \frac{Q_C(t)}{C \cdot R}$$

$$\Rightarrow Q'_C(t) = \frac{U_0}{R} - \frac{Q_C(t)}{C \cdot R}$$



Bei dieser Gleichung handelt es sich um eine Differenzialgleichung. Lösungsansätze werden in der Schule nicht behandelt. Für den Aufladevorgang ergibt sich mit der Nebenbedingung  $Q_C(0) = 0$

jedoch:  $Q_C(t) = C \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{RC}t})$ . Für den Entladevorgang ergibt sich mit der

Nebenbedingung  $Q_C(0) = C \cdot U_0$ :  $Q_C(t) = C \cdot U_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$ .

Häufig wird die Zeitkonstante  $\tau = RC$  genauer betrachtet. Beim Endlageprozess gilt, dass die Spannung nach  $t = 5\tau$  auf 0,7% gesunken ist und der Kondensator somit praktisch entladen ist. Zum Aufladevorgang lassen sich folgende Formeln zusammenfassen:

- Vgl. Oben:  $Q_C(t) = C \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{RC}t})$

- Mit  $U = \frac{Q}{C}$ :  $U_C(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{RC}t})$

- Mit  $I(t) = Q'_C(t)$ :  $I_C(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$

- Mit  $U = R \cdot I$ :  $I_C(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$

Zum Entladevorgang lassen sich folgende Formeln zusammenfassen:

- Vgl. Oben:  $Q_C(t) = C \cdot U_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$

- Mit  $U = \frac{Q}{C}$ :  $U_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$

- Mit  $I(t) = Q'_C(t)$ :  $I_C(t) = -\frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$

- Mit  $U = R \cdot I$ :  $I_C(t) = -I_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$

## Milikan-Versuch - Bestimmung der Elementarladung

To be completed. [missing]

## Eigenschaften von Magneten und ihre Felder

### Paramagnete

Paramagneten besitzen zwei unterschiedliche Pole: einen Nordpol und einen Südpol. Zerteilt man einen Paramagneten, so entstehen zwei neue kleinere Magnete. Jeder der beiden neuen Magnete besitzt wiederum einen Nordpol und einen Spdpol. Magnetische Monopole existieren nicht.

### Elementarmagnete

Diese Gegebenheiten lassen sich durch Elementarmagnete erklären. Modellhaft kann ein Magnet immer weiter zerteilt werden, bis die kleinsten, unteilbaren Elementarmagnete erzeugt wurden. Auch diese haben jeweils einen Nord- und Südpol.

Beim Magnetisieren werden z. B. Die Elementarmagnete eines Stoffes ausgerichtet, sodass sie in der Summe ein Magnetfeld ergeben. Beim Entmagnetisieren durch Erhitzen oder Stöße wird die Struktur dieser Elementarmagnete aufgelöst. Durch die unstrukturierte Positionierung heben sie gegenseitig ihre Wirkung auf.

### Ferromagnetismus - Magnetische Influenz

Wenn man einen Magneten nahe an einen zuvor nicht magnetisches Eisenstück bringt, wird dieses zu einem Magneten - diesen Vorgang nennt man magnetische Influenz. Es ist durch das Ausrichten der Elementarmagnete im Eisenstück zu erklären. Beobachtet werden kann die magnetische Influenz bei ferromagnetischen Stoffen wie Eisen, Kobalt und Nickel.

Die magnetische Influenz kann genutzt werden, um (a) die magnetische Wirkung abzuschirmen. Durch einbringen einer Eisenplatte zwischen einem Magneten und einem Eisenstück, wird die anziehende Wirkung auf das Eisenstück z. B. unterbunden. Es ist jedoch auch möglich (b) bestehende Felder zu verstärken. Dieser wird häufig bei Elektromagneten genutzt, welche einen Eisenkern enthalten.

### Kraftwirkung

Grundsätzlich gilt, dass sich gleichartige Pole abstoßen und verschiedenartige Pole anziehen. Der Betrag der Kraft wächst mit der „Stärke“ der Magnetpole. Der Betrag der Kraft sinkt mit der Vergrößerung des Abstands zwischen den Magnetpolen. Die „Stärke“ eines Magnetpols bzw. des durch diesen erzeugten Feldes wird mit der magnetischen Flussdichte  $B$  angegeben.

### Magnetfeld und Feldlinien

Das Magnetfeld ist der Wirkungsbereich eines Magneten. Es beschreibt die Kraftwirkung auf einen anderen Magneten und wird auch  $B$ -Feld genannt. Magnetfelder können mit Feldlinienbildern dargestellt werden. Die Feldlinien verlaufen außerhalb von Magneten vom Nord- zum Spdpol und schneiden sich nicht.

Der Verlauf oder die Richtung der magnetischen Feldlinien eines Magneten wird dadurch bestimmt, wie sich Kleinen Kompassnadeln überall im magnetischen Feld jeweils ausrichten würden. Dieser Verlauf wird also durch den Magneten selbst festgelegt.

Beim Zeichnen eines Magnetfeldes werden Feldliniendiagramme verwendet. Meistens wird eine Situation betrachtet, in welcher das Magnetfeld in die Zeichenebene hinein oder aus dieser hinaus zeigt. Zeigt es hinein, werden „x“ gezeichnet. Zeigt es hinaus, werden „•“ gezeichnet. Die Dichte gibt jeweils die Stärke des  $B$ -Feldes an.

## Magnetische Feldkonstante

Eine essenzielle Größe zur Beschreibung von Magneten, Magnetfeldern und ihren Kräften ist die magnetische Feldkonstante  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$ . Sie ist Bestandteil der meisten Formeln.

## Eigenschaften von Feldern

Sowohl elektrische als auch magnetische Felder und ihre Darstellungen in Feldliniendiagrammen haben verschiedene Eigenschaften. Zunächst gilt die Eindeutigkeit des Feldes: In jedem Raumpunkt gibt es eine eindeutige Feldlinie. Folglich kann es keine Schnittpunkte von Feldlinien geben. Die Dichte der Feldlinien gibt dabei die Stärke des Feldes an. Die Orientierung der Feldlinien gibt die Ausrichtung des Feldes an.

Besondere Fälle sind das ...

- homogene Feld. In diesem ist Betrag und Richtung des Feldes im gesamten Bereich identisch. Die Feldlinien sind parallel, geradlinig und gleich dicht. In der Praxis gibt es in den Randbereichen oft Abweichungen von der Idealvorstellung.
- radialsymmetrische Feld. Betrag und Richtung des Feldes ist nicht überall identisch. In diesem Verlaufen die Feldlinien gerade auf einen Punkt zu oder von diesem Weg - die Richtung ist somit immer auf einen Punkt ausgerichtet. Zudem nimmt die Stärke des Feldes einheitlich mit zunehmendem Abstand vom Punkt ab.

## Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern

### Magnetfeld eines Leiters

Bewegte Ladungsträger erzeugen ein ringförmiges Magnetfeld, welches orthogonal zur Bewegungsrichtung des Ladungsträgers liegt. Bei stromdurchflossenen Leitern umgibt es somit den Leiter.

Für die Orientierung des magnetischen Feldes gelten die Faust-Regeln. Die Linke-Faust-Regel gilt für negative Ladungen. Die Rechte-Faust-Regel gilt für positive Ladungen. Es wird jeweils der Daumen in Bewegungsrichtung des Ladungsträgers ausgerichtet. Die Krümmung der restlichen zu einer Faust geformten Finger gibt die Orientierung des ringförmigen Magnetfeldes an.

Das Gesetz von Biot und Savart beschreibt die Stärke des magnetischen Feldes in Abhängigkeit vom Radius:  $B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi r}$ . Es gilt für lange und gerade Leiter.

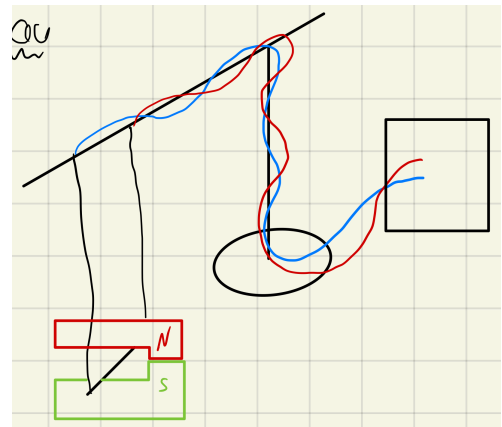
### Leiterschaukelexperiment

Die Abbildung zeigt den Aufbau des Experiments. Mit der Leiterschaukel können mehrere Phänomene beobachtet werden.

Zunächst kann die Lorentz-Kraft betrachtet werden. Zunächst wird eine Spannung an die Leiterschaukel angelegt. Die Leiterschaukel bewegt sich unmittelbar in den Magneten hinein oder aus ihm heraus. Eine Umkehrung der Stromrichtung führt zu einer Umkehrung der Bewegungsrichtung. Einer Erhöhung der Spannung führt zu einer stärkeren Bewegung.

Die Lorentz-Kraft erklärt dieses Experiment, Strom bewegte Ladungsträger sind. Und im Magnetfeld des Hufeisenmagneten wirkt auf diese eine Kraft, welche die Leiterschaukel bewegt.

Es könnte zudem statt eines Stromgerätes auch ein Strommessgerät angeschlossen werden. Durch händisches Bewegen der Leiterschaukel würden ebenfalls Ladungsträger im Magnetfeld bewegt. In diesem Fall würde eine Bewegung der Elektronen im Leiter verursacht, welche als Strom gemessen werden kann. Ein freies Schaukeln der Leiterschaukel würde als sinusförmige Wechselspannung detektiert. Dieser umgekehrte Effekt kann auch als ein Beispiel für die weiter unten erläuterte elektromagnetische Induktion gesehen werden.



## Lorentz-Kraft

Die Lorentz-Kraft beschreibt die Kraft, welche auf eine elektrische Ladung bei Bewegung durch ein Magnetfeld wirkt. Sie kann durch logische Überlegungen auf das Magnetfeld der bewegten Ladung zurückgeführt werden.

Im Unterricht wird jedoch maßgeblich die Formel  $F_L = v \cdot B \cdot Q$  thematisiert, welche mit den Hand-Regeln zusammenhängt. Für negative Ladungen gilt die Linke-Hand-Regel. Für positive Ladungen gilt die Rechte-Hand-Regel. Der Daumen wird entsprechend dem Bewegungsvektor der Ladung ausgerichtet. Der Zeigefinger entspricht der Ausrichtung des magnetischen Feldes. Der Mittelfinger gibt nun die Richtung der Lorentz-Kraft an. Der Betrag lässt sich mit obiger Formel berechnen. Dieser Ansatz funktioniert nur, wenn alle Vektoren orthonormal zueinander ausgerichtet sind. Andernfalls muss eine ergänzte Betrachtung durchgeführt werden. Es gelten:

$\vec{F}_L = \vec{v} \times \vec{B} \cdot Q$  und  $F_L = v \cdot B \cdot Q \cdot \sin(\alpha)$ , wobei  $\alpha$  dem Winkel zwischen  $v$  und  $B$  entspricht.

## Definition von Ampere

Das Ampere ist die Stärke desjenigen zeitlich konstanten elektrischen Stroms durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange Leiter, die im Vakuum einen Abstand von einem Meter haben und zwischen denen je 1 Meter Leiterlänge die Kraft von  $2 \cdot 10^{-7} N$  wirkt.

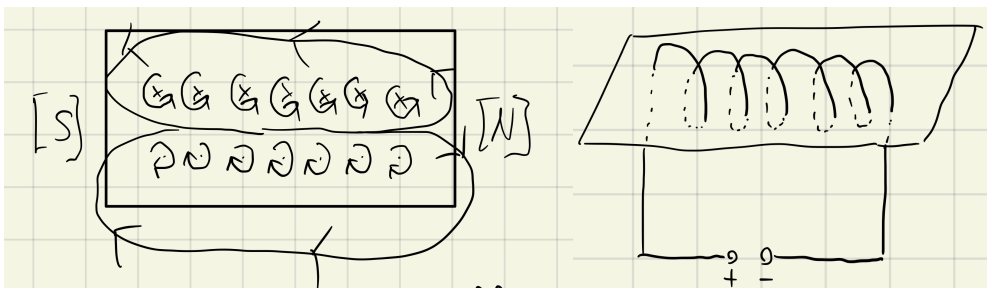
Aus der Stärke des Magnetfeldes  $B = \frac{F}{I \cdot \Delta s}$  ergibt sich  $F = B \cdot I \cdot \Delta s$ . Durch Einsetzen der

Stärke des Magnetfeldes um einen Stromdurchflossenen Leiter ergibt sich

$$F = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi r} \cdot I \cdot \Delta s = \frac{\mu_0}{2\pi r} \cdot I^2 \cdot \Delta s.$$

## Elektromagneten

Es ist bereits die Struktur des Magnetfeldes um einen Leiter bekannt. Diese wird beim Bau von Elektromagneten genutzt. Wird ein Leiter zu einer Leiterschleife aufgewickelt, entsteht um diese Leiterschleife ein torsoförmiges Magnetfeld. Werden viele Leiterschleifen zu einer Spule aufgewickelt, wird das Magnetfeld vergrößert. Die Abbildungen zeigen die Wicklung des Leiters, die um die einzelnen Bereiche entstehenden Felder, sowie das resultierende Gesamtfeld.



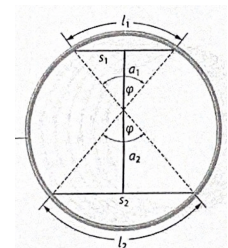
Im Inneren eines Elektromagneten bzw. im Inneren einer stromdurchflossenen Spule entsteht so ein homogenes Magnetfeld. Für dieses gilt der Zusammenhang  $B = \mu_0 \frac{N}{l} I$ , wobei  $N$  der Anzahl der Wicklungen,  $l$  der Länge und  $I$  dem Strom entspricht.

Die Entstehung des homogenen Magnetfeldes kann mit dem Strahlensatz begründet werden. In der rechten Abbildung wird durch das Leiterstück  $l_1$  das

Magnetfeld  $B_1 \sim \frac{l_1}{a_1}$  verursacht. Für  $l_2$  gilt  $B_2 \sim \frac{l_2}{a_2}$ . Für kleine  $\varphi$  gilt  $l \approx s$ . Es

folgen  $B_1 = \frac{s_1}{a_1}$  und  $B_2 = \frac{s_2}{a_2}$ . Mit dem Strahlensatz  $\frac{s_1}{a_1} = \frac{s_2}{a_2}$  ergibt sich, dass

$B_1 = B_2$ . Somit ist das magnetische Feld überall im Inneren der Spule identisch.

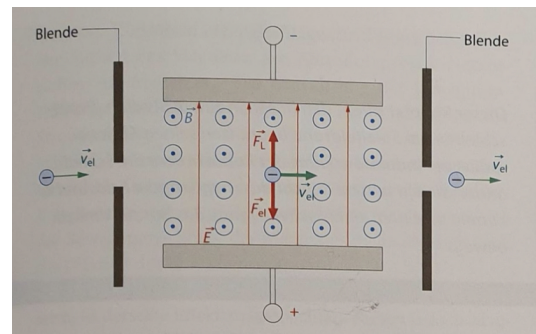


## Geschwindigkeitsfilter

Mit einem Geschwindigkeitsfilter werden elektrische Ladungen mit einer bestimmten Geschwindigkeit aus einer Menge elektrischer Ladungen herausgefiltert. Dies wird durch die Kombination eines elektrischen und magnetischen Feldes erreicht.

Ein elektrisches und ein magnetisches Feld stehen senkrecht aufeinander und bilden eine Ebene orthogonal zur Bewegungsrichtung der zu filternden Ladungsträger. Beide Felder müssen so ausgerichtet werden, dass die Lorentz-Kraft und die elektrische Kraft gegeneinander wirken. Alle Teilchen, auf die keine Gesamtkraft wirkt können den Aufbau gerade passieren. Für diese Ladungsträger gilt:

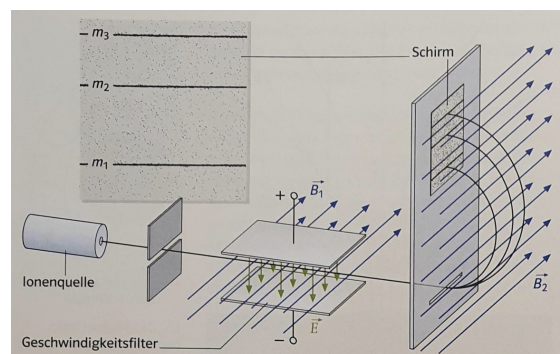
Für diese Ladungsträger gilt:  $F_{el} = F_L \Rightarrow Q \cdot E = Q \cdot v \cdot B \Rightarrow v = \frac{E}{B}$ . Alle Ladungsträger, welche diese Bedingung durch eine abweichende Geschwindigkeit nicht erfüllen, werden abgelenkt.



## Massenspektroskopie

Mit der Massenspektroskopie kann die Masse von Ladungsträgern bestimmt werden, wenn ihre Ladung bekannt ist. Zunächst wird der Geschwindigkeitsfilter genutzt, um nur Ladungsträger einer bestimmten Geschwindigkeit zu betrachten. Als Ladungsträger werden häufig Ionen betrachtet, da die Bestimmung ihrer Masse besonders interessant ist.

Diese Ionen mit einer bestimmten Geschwindigkeit treten durch einen schmalen Spalt in einem Schirm in den Bereich hinter diesem Schirm ein. Dort existiert ein Magnetfeld  $\vec{B}_2$ . Durch die Lorentz-Kraft werden die Ladungsträger somit orthogonal zu ihrer Bewegungsrichtung abgelenkt. Die Lorentz-Kraft wirkt als Zentripetalkraft einer Kreisbewegung bis die Ionen nach einem Halbkreis wieder auf dem Schirm auftreffen. Es gilt folgende Mathematische Beschreibung:



$$F_L = Q \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{r} = F_Z$$

$$\Rightarrow \frac{m}{Q} = \frac{Br}{v}$$

$$\Rightarrow \frac{m}{Q} = \frac{m \cdot Br}{m \cdot v}$$

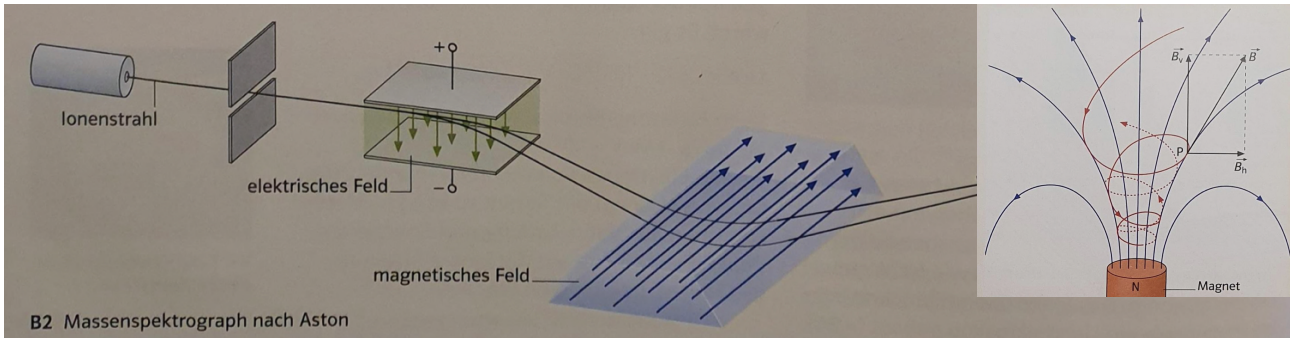
$$\Rightarrow r = \frac{m \cdot Br}{Q \cdot B}$$

Es zeigt sich, dass der Radius des Halbkreises mit der Masse des Ions zusammenhängt, da  $r \sim m$  gilt. Somit kann zunächst eine Sortierung am Schirm hinsichtlich der Masse durchgeführt werden. Ist zudem  $Q$  bekannt, kann  $m$  berechnet werden. In jedem Fall lässt sich jedoch die spezifische Masse  $\frac{m}{Q}$  bzw. spezifische Ladung  $\frac{Q}{m}$  ermitteln.

## Massenspektrograph

Der Massenspektrograph von F.W. Aston fokussiert Ionen mit gleicher spezifischer Ladung bzw. Masse an einem Ort - genau wie bei der Massenspektroskopie. Der Aufbau unterscheidet sich jedoch und zeichnet sich zudem durch die Geschwindigkeitsfokussierung und die Richtungsfokussierung aus.

Geladene Ionen werden unabhängig von ihrer Geschwindigkeit zunächst in ein elektrisches und anschließend in ein magnetisches Feld gelenkt. In beiden werden sie in unterschiedliche Richtungen abgelenkt. Durch die korrekte Wahl der Feldstärken und der Form des magnetischen Feldes gelingt es, dass alle Teilchen mit gleicher spezifischer Ladung bzw. Masse auch bei unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten und leicht unterschiedlichen Anfangsrichtungen in einem Punkt fokussiert werden.



B2 Massenspektrograph nach Aston

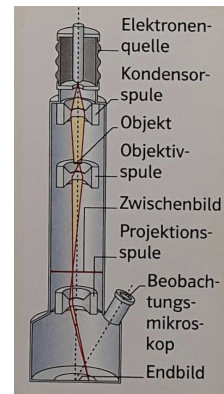
## Magnetische Flasche

Z. B. an einem Stabmagnete ist das  $B$ -Feld nicht orthogonal zur Bewegungsrichtung der Elektronen.  $B_h$  ist für die Bewegung nach oben und unten verantwortlich.  $B_v$  wirkt als Zentripetalkraft und Bestimmt somit den Radius der Kreisbahn. Da nahe den Polen  $B_v \gg B_h$ , treten enge Kreisbahnen auf und die Ladungsträger wechseln nur langsam ihre Bewegungsrichtung. Weiter entfernt von den Polen gilt jedoch  $B_v \ll B_h$ , sodass in großen Kreisbahnen eine vertikale Bewegung stattfindet und sich der Ladungsträger zum anderen Pol bewegt.

Insgesamt bewegen sich die Ladungsträger somit schraubenförmig zwischen zwei Polen hin und her. Sie sind in der magnetischen Flasche eingeschlossen. Dieser Effekt tritt unabhängig vom Pol des Magneten und dem Vorzeichen der elektrischen Ladung auf. Wird das Magnetfeld der Erde als magnetische Flasche betrachtet, ist es als Ursache für Polarlichter zu werten.

## Elektronenmikroskop

Mit einem Elektronenmikroskop können sehr kleine Strukturen visualisiert werden. Dazu werden Elektronen in den rotationssymmetrischen Feldern von Spulen, welche analog zu Linsen eines herkömmlichen Mikroskopes funktionieren, konzentriert. Die Funktionsweise der Konzentration kann man dem Prinzip der Magnetischen Flasche begründet werden.



Ein gebündelter Elektronenstrahl trifft nun auf ein Objekt. An jedem Punkt des Objektes werden die Elektronen nun in einem unterschiedlichen Verhältnis absorbiert, reflektiert oder durchgelassen. Die durchgelassenen Elektronen werden durch die Projektionsspule auf dem Schirm räumlich aufgetrennt. Die räumlichen Differenzen werden so vergrößert. Auf dem Endbild kann somit beobachtet werden, wo wie viele Elektronen durchgelassen werden werden. Folglich sind Bilder von Elektronenmikroskopen auch Schwarz-Weiß Bilder. Sämtliche Farbdarstellungen wurden im Nachhinein coloriert.

Mit Elektronenmikroskopen kann eine Auflösung von  $10^{-9}m$  erreicht werden.

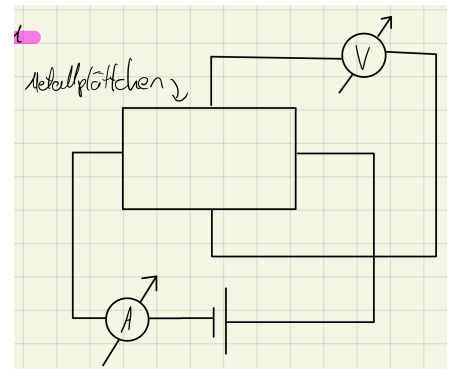
## Hall-Effekt & Hallsonde

Der Hall-Effekt und entsprechende Hall-Sonden stellen ein Verfahren zum Messen der Stärke von  $B$ -Feldern dar. Diese Technik findet Anwendung in Elektromotoren, Signalgebern, Magnetfeldkameras, der Winkel-/Geschwindigkeitsmessung, Computertastaturen, digitalen Kompassen und mehr.

Die benötigten Materialien sind eine Spannungsquelle, ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein dünnes Metallplättchen, genauer ein Halbleiter.

Im Zentrum der Schaltung befindet sich das Metallplättchen, welches an zwei Schaltkreise angeschlossen ist. An zwei gegenüberliegenden Seiten sind in Reihe geschaltet das Amperemeter und die Spannungsquelle angeschlossen. An den beiden anderen gegenüberliegenden Seiten ist ebenfalls in Reihe ein Voltmeter angeschlossen.

Nun wird ein konstanter Strom an der Spannungsquelle angelegt und mit dem Amperemeter kontrolliert. Veränderungen der Spannung am Voltmeter sollten dokumentiert werden. Denn



es zeigt sich, dass bei Abwesenheit eines Magnetfeldes die Spannung  $0V$  beträgt. Bei Annäherung eines Magneten kommt es jedoch zu einem Spannungsausgang. Der Betrag der Spannung hängt dabei von der Orientierung des Magneten bzw. des von diesem erzeugten Magnetfeld ab. Zudem ist der Ausschlag vom Winkel des Magnetfeldes abhängig. Diese Beobachtungen können mit der Lorentz-Kraft und der elektrischen Kraft erklärt werden. Denn die Elektronen des Stromflusses werden abhängig vom  $B$ -Feld des Magneten durch die Lorentz-Kraft in dem Metallplättchen zu den Polen des Spannungsmessgerätes verschoben. Durch Verweis auf die Lorentz-Kraft kann zunächst die Winkelabhängigkeit erklärt werden. Denn schließlich wirkt nur eine geringere Kraft, wenn das Magnetfeld nicht orthogonal ausgerichtet ist. Diese Ladungstrennung durch die Lorentz-Kraft führt zum Ausbilden einer Potenzialdifferenz, da die Bewegung der Elektronen entlang der Achse des Voltmeters energetisch aufwendig ist. Folglich liegt eine Spannung an. Diese Ladungstrennung findet so lange statt bis  $F_{el} = F_L$  gilt. Wenn eine konstante Spannung gemessen wird, muss dieses Kriterium erfüllt sein. Mathematisch ergibt sich:

$$F_{el} = F_L$$

$$\Rightarrow QE = QvB$$

$$\Rightarrow \frac{U_H}{b} = vB \text{ mit } b \text{ als Höhe des Plättchens entlang der Achse des Voltmeters}$$

$$\Rightarrow U_H = vBb = \frac{I}{nbde} Bd = \frac{1}{ne} \frac{I}{d} B = R_H \frac{I}{d} B$$

$v = \frac{I}{nbde}$  wird folgendermaßen begründet:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N}{bds} \text{ (Dichte der Ladungsträger mit } N \text{ als Anzahl der Ladungsträger)}$$

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{Ne}{t} = Ne \frac{v}{s}$$

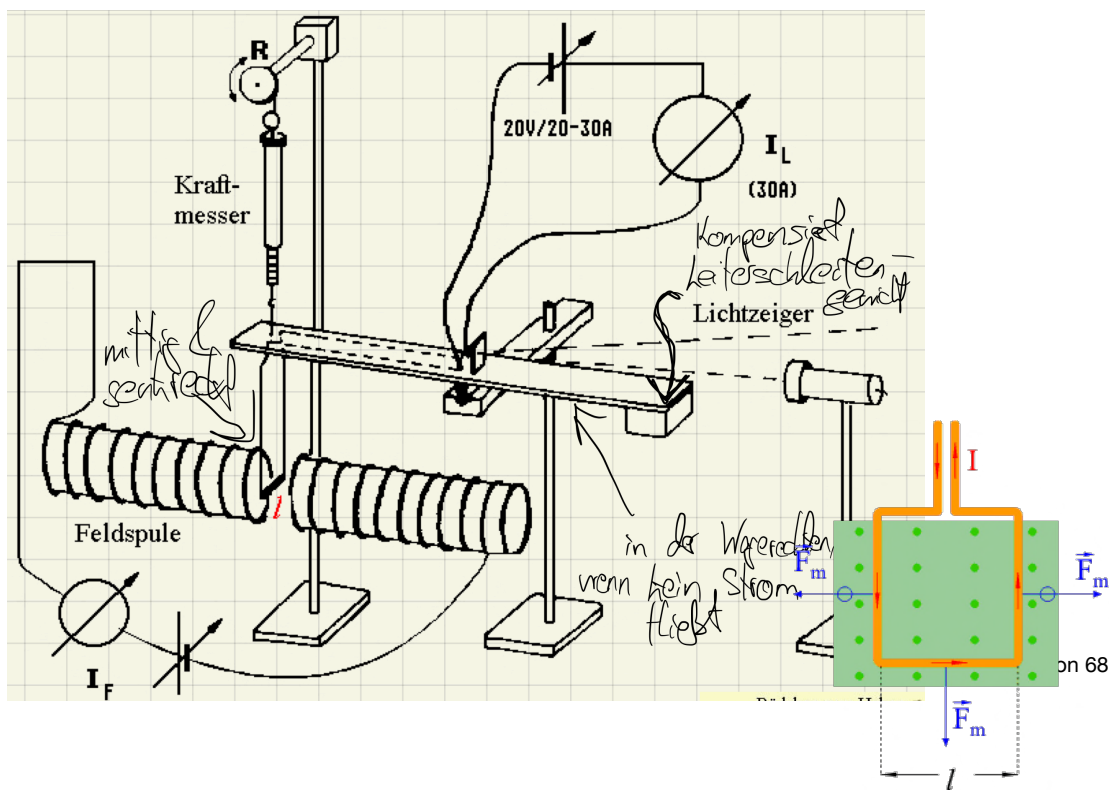
$$\Rightarrow v = \frac{I}{Ne} = \frac{I}{nbde}$$

$R_H$  wird Hall-Konstante genannt und ist eine materialabhängige Konstante.

### Experiment: Stromwage

Beim Stromwagenexperiment wird die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im magnetischen Feld ermittelt.

Dazu befindet sich eine Leiterschleife mit drei Seiten in einem magnetischen Feld zweier Feldspulen. Die Leiterschleife hängt an einem Kraftmesser. Die durch die Gravitation verursachte Kraft wird durch ein an einer Wage befestigtes Gegengewicht ausgeglichen.



Wird nun der Strom durch die Leiterschleife angeschaltet, wirkt entsprechend der Lorentz-Kraft eine identische Kraft nach rechts und links, sowie eine Kraft nach unten. (Vgl. Abbildung) Die Kräfte nach links und rechts heben sich auf. Die Kraft nach unten kann mit dem Kraftmesser bestimmt werden.

Im Aufbau sind die Größen  $l$  (Länge des die Kraft nach unten verursachenden Leiterstücks),  $I$  (Stromfluss durch die Leiterschleife) und  $B$  (Stärke des magnetischen Feldes) bekannt.  $F_m$  wird gemessen.

Die Variablenkontrollstrategie ergibt folgende Zusammenhänge:

$$F_m \sim I, F_m \sim l, B \sim \frac{F_m}{I \cdot l}$$

Für  $B$  kann so auch die Einheit hergeleitet werden:

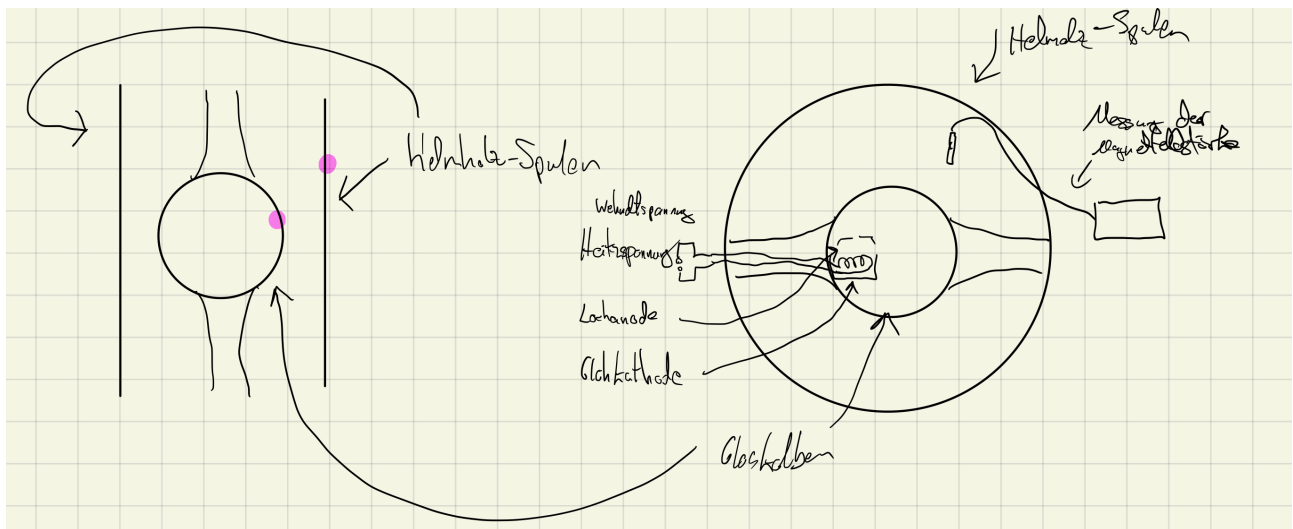
$$[B] = \frac{[F_m]}{[I] \cdot [l]} = 1 \frac{N}{Am} = 1 \frac{Nm}{Am^2} = 1 \frac{J}{Am^2} = 1 \frac{VA \cdot s}{Am^2} = 1 \frac{Vs}{m^2} = 1T \text{ (Tesla)}$$

### Experiment: Fadenstrahlrohr

Mit dem Fadenstrahlrohr-Experiment soll die Masse von Elektronen bestimmt werden.

Für den Aufbau wird ein Fadenstrahlrohr benötigt. Dieses besteht aus einem Glaskolben, welches mit einem Edelgas gefüllt ist, einem Glühdraht, eine Lochanode und ein Wehneltzylinder. An dem Glühdraht liegt die Heitzspannung an. Die Anoden-/Beschleunigungsspannung liegt am Glühdraht und der Lochanode an. Die Wehneltspannung liegt zwischen dem Wehneltzylinder und dem Glühdraht an.

Auf beiden Seiten des Fadenstrahlrohrs befinden sich zwei große Spulen, das Helmholtzspulenpaar. Diese Spulen sind an ein Spannungsgerät angeschlossen und das entstehende Magnetfeld wird mit einem Magnetfeldstärkesensor erfasst.



Bei der Durchführung werden nun alle Stromquellen angeschaltet. Während die Beschleunigungsspannung  $U_B$  variiert wird, wird das Fadenstrahlrohr beobachtet. Denn in diesem entsteht eine gefärbte Kreisbahn. Die Form dieser Kreisbahn wird primär durch die Anoden- und Helmholtzspulenspannung bestimmt.

Die Erklärung für diese Kreisbahn erfolgt mit der Lorentz-Kraft. Zunächst ist jedoch die Funktion der Lochanode, des Wehneltzylinders, des Glühdrahts sowie der anliegenden Spannungen zu klären. Durch die Heitzspannung treten aus dem Glühdraht Elektronen aus. Durch die am Wehneltzylinder anliegende Spannung werden diese in der Mitte des Zylinders auf einer Bahn konzentriert. Und durch die Spannung an der Lochanode findet eine Beschleunigung zur Lochanode statt. Letztlich wird so ein konzentrierter Elektronenstrahl erzeugt. Die kinetische Energie  $E_{kin}$  der Elektronen gewinnen diese durch die Beschleunigung mit der Beschleunigungsspannung  $U_B$ . Aufgrund der

Energieerhaltung gilt  $E_{kin} = E_{el} \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = Ue \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2Ue}{m}}$ .



Dieser Elektronenstrahl besteht selbstverständlich aus sich bewegenden Elektronen. Da das Fadenstrahlrohr orthogonal zu dessen Bewegungsrichtung mit einem Magnetfeld durchsetzt ist, wirkt auf diese Elektronen die Lorentz-Kraft. Trotz der beschleunigten Bewegung durch die Lorentz-Kraft bleiben Magnetfeld und Bewegungsrichtung der Elektronen weiterhin orthogonal. Und da die Lorentz-Kraft orthogonal zur Bewegungsrichtung wirkt, kann diese als Zentripetalkraft

interpretiert werden. Es gilt:  $F_L = F_Z \Rightarrow Bev = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow m = \frac{Ber}{v}$ . Wird für  $v$  die oben ermittelte Formel als Startgeschwindigkeit eingesetzt, ergibt sich  $m = \frac{Ber^2}{2U}$

Folglich kann die Masse des Elektrons berechnet werden, wenn die Stärke des Magnetfeldes und die Ladung eines Elektrons bekannt sind und der Radius der entstehenden Kreisbahn gemessen wird.

## Elektromagnetische Induktion

Unter elektromagnetischer Induktion versteht man das Auftreten eines elektrischen Wirbelfeldes bei Änderung des magnetischen Flusses. Durch Veränderung eines Magnetfeldes, entsteht orthogonal zu der Richtung dieses Feldes ein elektrisches Wirbelfeld. Ist ein elektrischer Leiter ringförmig um die Änderungsrichtung des magnetischen Feldes montiert, liegt das elektrische Wirbelfeld in diesem Leiter. Ein elektrisches Feld entspricht über einer Strecke einer Spannung. Somit fließt in diesem Leiter ein Strom. Es wurde ein elektrischer Wirbelstrom induziert.

Die Stärke des elektrischen Wirbelfeldes und des elektrischen Wirbelstroms hängt wie bereits erwähnt von der Änderung des magnetischen Flusses ab. Bisher ist nur der Begriff des magnetischen Feldes bekannt. Bei diesem ist die Richtung der Änderung (Zu-/Abnahme) sowie die Geschwindigkeit dieser Änderung relevant.

Zudem wird bei der Induktion häufig eine Wicklung mehrere Schleifen (eine Spule) um die Änderungsrichtung des magnetischen Feldes betrachtet. Experimente zeigen, dass die Anzahl der

Wicklungen  $N$  mit der induzierten Spannung zusammenhängt:  $\frac{N}{U} = konst. \Rightarrow U \sim -N$ .

Zudem hängt die induzierte Spannung mit der Stärke der Änderung des Magnetfeldes zusammen:

$$\frac{\Delta B}{U} = konst. \Rightarrow U \sim \Delta B.$$

Ein proportionaler Zusammenhang gilt ebenfalls für die Fläche der Spule (eine Leiterschleife ist

eine einfache Spule mit einer Wicklung):  $\frac{A}{U} = konst. \Rightarrow U \sim A$ .

Setzt man diese Größen zusammen, ergibt sich  $U \sim -N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} \Rightarrow U \sim -N \cdot A \cdot B'$

Jedoch kann weiter beobachtet werden, dass bei einem magnetischen Feld mit einer konstanten magnetischen Feldstärke auch eine Änderung der Fläche  $\Delta A$  zu einer induzierten Spannung führt. Es wird festgestellt:  $U \sim B$  und  $U \sim \Delta A$ .

Betrachtet man diese Zusammenhänge, gilt  $U \sim -N \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot B \Rightarrow U \sim -N \cdot A' \cdot B$

Insgesamt ergibt sich, dass  $U = -N \cdot (B \cdot A' + B' \cdot A)$ . Ist entweder  $B$  oder  $A$  konstant, ergibt sich eine der obigen Formeln. Dieser Term kann auch umgeschrieben werden zu:

$$U = -N \cdot \frac{\Delta}{\Delta t}(A \cdot B) = -N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -N \cdot \phi'$$

Diese Formel wird als Induktionsgesetz bezeichnet.

Hier lässt sich auch der Begriff magnetischer Fluss erläutern. Denn der Magnetische Fluss  $\phi = A \cdot B$  steht der magnetischen Flussdichte als absolute Größe gegenüber.

Die obigen Formeln gelten nur für den Fall, dass die Spule orthogonal zur Magnetfeldänderung ausgerichtet ist. Ist dies nicht der Fall, wird der magnetische Fluss verringert und es gilt:

$\phi = A \cdot B \cdot \sin(\alpha)$ , wobei  $\alpha$  der Winkel zwischen der der Magnetfeldänderungsrichtung und der Ebene der Spule ist.

Insgesamt kann der magnetische Fluss somit folgendermaßen verändert und eine Spannung in eine Spule induziert werden:

- Veränderung der Stärke des Magnetfeldes

- Änderung des durch ein Magnetfeld durchsetzten Flächeninhalts im Inneren einer Spule
- Veränderung des Winkels zwischen Spule und Magnetflussänderung
- Bewegung einer Spule in einem inhomogenen Magnetfeld

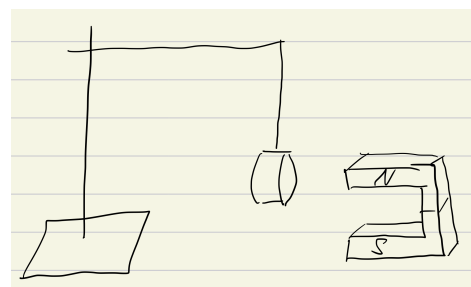
### Lenz'sche Regel

Oben wurden Formeln für die Berechnung der Induktionsspannung hergeleitet. Ist jedoch noch nicht geklärt, in welche Richtung der Strom letztlich fließt. Diese Frage lässt sich mit der Lenz'schen Regel beantworten. Sie sagt: Der Induktionsstrom wirkt seiner Ursache stets entgegen. Oder: Der Induktionsstrom ist so gerichtet, dass sein Magnetfeld der Änderung des Magnetfeldes in der Spule entgegenwirkt.

Diese Regel ist mit der Energieerhaltung zu begründen. So kann ein an einem Faden aufgehängter Metallring und ein in diesen eingeführter Magnet betrachtet werden. Die Lenz'sche Regel erklärt, warum sich der Metallring beim Einführen des Magneten mitbewegt. Würde der Induktionsstrom in die andere Richtung fließen, so würde sich der Ring (a) auf den Magneten zubewegen und so (b) die Magnetfeldänderung verstärkt werden. Letztlich würde dies zu einer unendlichen Verstärkung des Magnetfeldes führen. Der Ring würde unendlich beschleunigt werden, was der Energieerhaltung widerspricht.

### Ring-Versuch (zur Lenz'schen Regel)

Beim Ring-Versuch wird ein Hufeisenmagnet nacheinander mit je einem Pol in den aufgehängten Ring geführt und wieder herausgezogen. Die Geschwindigkeit der Bewegung wird variiert. Hufeisenmagnet und Ring sollten sich nicht berühren.



Unabhängig von der Wahl der Bewegungsrichtung (Herausziehen/Hineinschieben) und der Wahl des Pols des Magneten folgt der Ring der Bewegung des Magneten für eine kurze Zeit. Umso schneller die Bewegung des Magneten ist, umso stärker ist auch die Bewegung des Rings.

Dieser Versuch beschreibt die Überlegungen zur Energieerhaltung der Lenz'schen Regel. Durch Bewegen des Magneten wird eine Spannung im Ring induziert, da das inhomogene Magnetfeld des Hufeisenmagneten verschoben wird. Da eine Spannung im Ring induziert wurde, fließt in diesem auch ein Strom, welcher ein eigenes Magnetfeld erzeugt. Die Lenz'sche Regel besagt nun, dass dieses so ausgerichtet sein muss, dass es seiner verursachenden Kraft entgegenwirkt. Somit stößt sich der Ring von der verursachenden Kraft - dem Magneten ab. Eine detailliertere Begründung der wirkenden Kräfte findet sich bei dem ähnlichen Experiment zum Waltenhofen'schen Pendel.

### Leiterschleife im Magnetfeld

Häufig werden in Aufgaben einzelnen Leiterschleifen in Magnetfeldern betrachtet. Ist das Magnetfeld konstant wird meist die Leiterschleife aus diesem Magnetfeld gleichförmig herausbewegt. Da  $B' = 0$ , kann das Induktionsgesetz vereinfacht werden:  $U_{ind} = -N \cdot A' \cdot B$ .

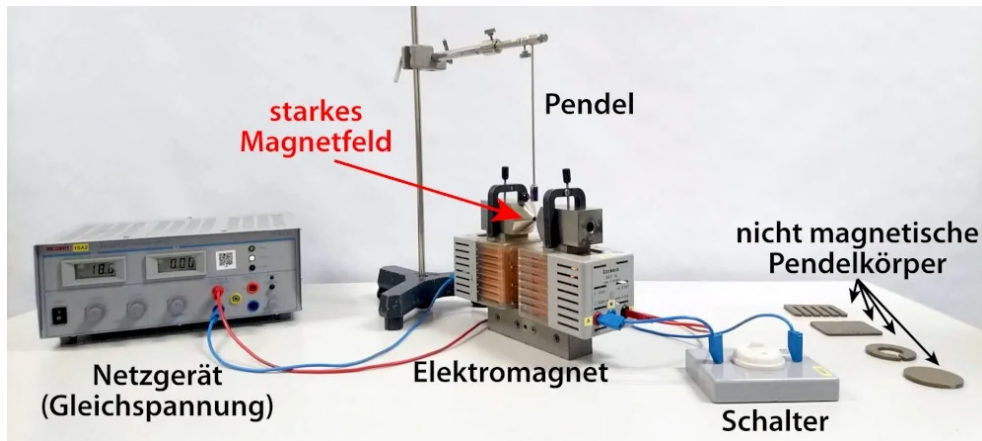
Die Änderung der Fläche  $A$  wird mit der Geschwindigkeit der Bewegung berechnet. Wird die Geschwindigkeit  $v$  mit der Länge der Seite, welche das Magnetfeld verlässt, multipliziert, ergibt sich eine Fläche pro Sekunden - eine Flächenänderung.

### Wirbelströme/Wirbelstromfelder

Die Begriffe der Wirbelfelder und der Wirbelströme sind bereits aus obigen Erläuterungen bekannt. Die Entstehung elektrischer Wirbelfelder durch Magnetfeldänderung wurde als Induktion beschrieben. Es können nun konkrete Versuche und Experimente betrachtet werden, bei welchen die entstehenden Wirbelfelder zu besonderen Effekten führen.

#### Magnet fällt durch ein Rohr

Es wird ein einfacher Stabmagnet betrachtet. Lässt man diesen durch ein einfaches PVC-Rohr fallen, gibt es keine Auffälligkeiten. Lässt man den Magneten jedoch durch ein Metallrohr fallen, fällt dieser nur gebremst bzw. langsamer. Dies lässt sich mit einem Wirbelstrom im Rohr erklären. Das Fallen des Magneten stellt eine Magnetfeldänderung dar. Wird das Rohr als Spule mit einer Wicklung betrachtet, ändert sich folglich der magnetische Fluss. Um den Magneten herum wird somit eine Spannung induziert und es fließt ein Strom. Entsprechend der Lenz'schen Regel muss das Magnetfeld dieses Stromes dem des Magneten entgegengesetzt sein. Und da sich gleiche Pole abstoßen, wirkt eine Kraft entgegen der Bewegungsrichtung des Magneten und der Magnet wird gebremst.



### Waltenhofen'sches Pendel

Es sind zwei Elektromagnete so aufzustellen und an ein Netzgerät anzuschließen, dass sich zwischen diesen ein homogenes magnetisches Feld bildet. Ein Pendelkörper wird so aufgehängt, dass es in diesem homogenen Feld hängt.

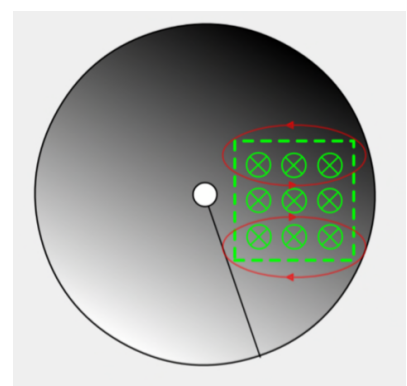
Lässt man die Elektromagneten ausgeschaltet, pendelt der Pendelkörper normal. Schaltet man die Elektromagneten an, wird der Pendelkörper beim Eintreten in das homogene Magnetfeld abgebremst. Die Bauform des Pendelkörpers hat keinen Einfluss auf den Effekt. Zudem muss der Pendelkörper nicht ferromagnetisch sein.

Das Abbremsen kann mit der Entstehung eines Wirbelstroms im Pendel erklärt werden. Schwingt der Pendelkörper in das Magnetfeld der Elektromagneten steigt der magnetische Fluss, denn die magnetische Feldstärke ist nahe der Elektromagnete größer. Der Anstieg des Flusses entspricht einer Flussänderung. Folglich wird eine Wirbelspannung im Pendelkörper induziert. Im plattenförmigen Pendelkörper fließt nun ein Strom. Nach der Lenz'schen Regel ist die Fließrichtung dieses Stromes so ausgerichtet, dass er seiner Ursache entgegenwirkt. Durch den Wirbelstrom entsteht also ein magnetisches Feld, welches dem des Elektromagneten im Pendelkörper entgegengesetzt ist. Außerhalb des Pendelkörpers ist die Ausrichtung jedoch identisch. Der Pendelkörper kann als ein Magnet mit einem Nord- und Südpol interpretiert werden. Der Nordpol des Pendelkörpers liegt am Nordpol des Elektromagneten und der Südpol am Südpol. Da sich gleichnamige Pole abstoßen, erfährt der Pendelkörper eine abbremsende Kraft.

Beim Rausschwingen nimmt der magnetische Fluss ab und die Richtung des Stromflusses im Pendelkörper ändert sich. Somit wirkt nun eine Kraft in die andere Richtung, welche den Pendelkörper auch beim Rausschwingen weiter abbremst.

### Eine rotierende Kreisscheibe

Entsprechend der Abbildung befindet sich ein Teil einer rotierenden Kreisscheibe in einem Magnetfeld. An den Randbereichen des Magnetfeldes wird in der Scheibe eine Spannung induziert. Durch die gleiche Argumentation wie beim Waltenhofen'schen Pendel kann erklärt werden, weshalb die Scheibe eine Kraft entgegen ihrer Bewegungsrichtung erfährt: Die Scheibe wird gebremst.



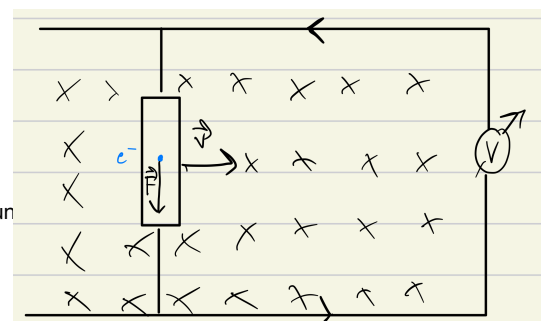
Dieser Effekt wird in bestimmten Bremstypen genutzt. Z. B. Hochgeschwindigkeitszüge nutzen solche Bremsen, um Verlustfreier (keine Bremsblöcke benötigt) und effizienter bei hohen Geschwindigkeiten zu bremsen.

### Motoren

To be completed. [missing]

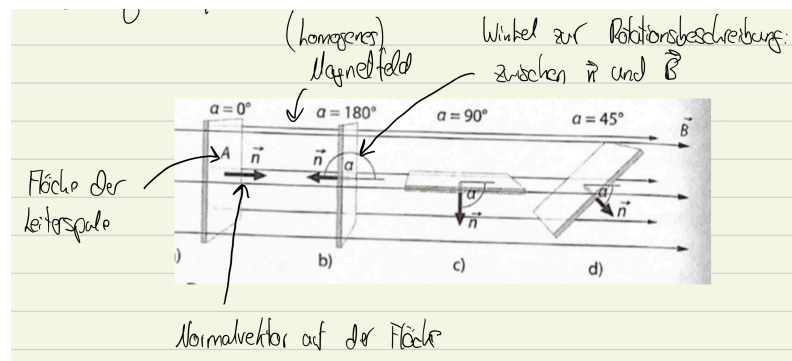
### Linearmotor

Der Linearmotor ist eine besondere Form des Motors. Bei diesem wird anders als üblich eine lineare Bewegung erzeugt. Zudem wird ein Linearmotor mit Gleichstrom betrieben, falls nicht sehr schnell die



Richtung wechselnde Bewegungen erwünscht sind.

Die Funktionsweise eines Linearmotors kann mit der Lorentz-Kraft erklärt werden. Die



resultierende Kraft auf das bewegbare Leiterstück lässt sich mit  $B = \frac{F}{Il} \Rightarrow F = BIl$  berechnen.

## Generatoren

Mit Generatoren nutzt man Induktion, um mechanische in elektrische Energie umzuwandeln. In einem typischen Generator wird eine Spule gleichförmig relativ zu einem Magnetfeld gedreht. Dadurch wird eine sinusförmige Wechselspannung induziert.

Schematisch ist der Aufbau in der Abbildung dargestellt. Da sowohl der Fläche  $A$  als auch die magnetische Flussdichte  $B$  konstant bleiben, ist der magnetische Fluss  $\Phi$  durch den Winkel definiert. Es gilt das oben erläuterte Induktionsgesetz:  $\Phi = A \cdot B \cdot \cos(\alpha)$ . Hier wird er  $\cos$  statt dem  $\sin$  verwendet, da der Winkel anders definiert ist.

Die Relativbewegung von Spule und Magnetfeld findet mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  statt. Für den Winkel  $\alpha$  gilt entsprechend den Gesetzen für Kreisbewegungen  $\alpha = \omega \cdot t$ . Somit resultiert für den magnetischen Fluss:  $\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t)$ . Für die Ableitung gilt:

$$\Phi' = B \cdot A \cdot -\sin(\omega \cdot t) \cdot \omega$$

Für die Induktionsspannung ergibt sich somit die folgende Sinusfunktion:

$$U_{ind} = -N \cdot \Phi' = N \cdot B \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \omega$$

Es wird deutlich, dass ein Generator eine Wechselspannung erzeugt. Es gilt die allgemeine Formel  $U = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$  mit  $\hat{U} = N \cdot B \cdot A \cdot \omega$ .

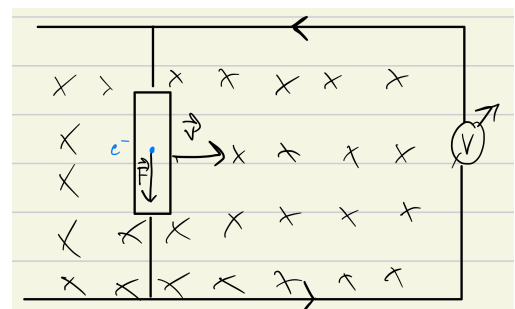
## Drehstromnetz

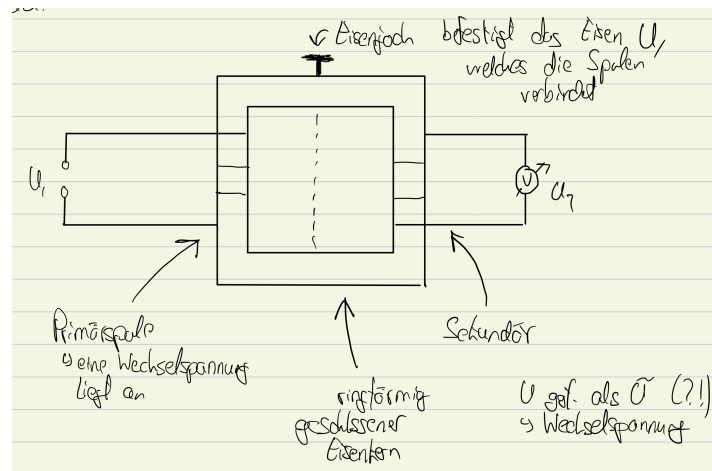
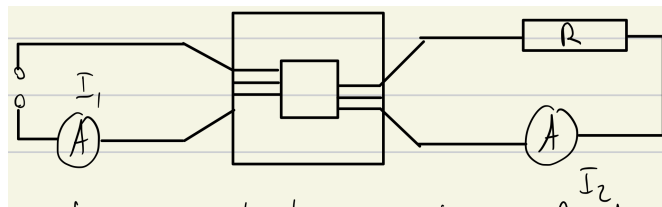
Auch das Stromnetz wird mit Wechselspannung betrieben. Es wird auch als Drehstromnetz beschrieben, da der Strom in Generators erzeugt wird. In sind die Spulen typischerweise stationär und der Magnet dreht sich. Zudem wird meist nicht nur eine Spule montiert, sondern drei voneinander unabhängige Spulen. Diese sind jeweils um  $120^\circ$  versetzt. Somit werden drei Spannungen induziert, zwischen welchen eine Phasendifferenz von  $\Delta\varphi = 120^\circ$  besteht.

Die drei Außenleiter werden  $L_1, L_2, L_3$  genant. Zudem existiert ein Null-Leiter  $N$ . Zwischen eine beliebigem Außenleiter  $L$  und dem Null-Leiter  $N$  liegt durchschnittlich die Spannung  $230V$  an. Zwischen zwei Außenleitern liegt durchschnittlich die Spannung  $400V$  an.

## Lineargenerator

Ein besonderer Generator ist der Lineargenerator. Bei diesem wird durch Bewegn eines Leiters nicht der Winkel sondern die Fläche einer Leiterschleife verändert. Die Entstehung eines Stromes kann einerseits mit dem Induktionsgesetz und andererseits mit der Lorentz-Kraft erklärt werden. Die Verbindung beider Betrachtungsbereiche wird somit besonders verdeutlicht. Zudem ist hervorzuheben, dass ein Lineargenerator beim konstanten Bewegn in eine Richtung eine





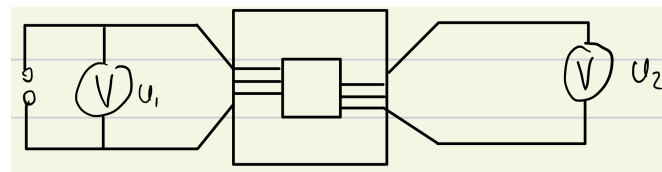
Gleichspannung und keine Wechselspannung erzeugt.

## Transformatoren

Transformatoren haben das Schaltzeichen und dienen der Umwandlung von Spannungen. Sie basieren auf dem Induktionsgesetz und sind folgendermaßen aufgebaut:

Der Eisenkern besteht aus vielen dicht gepressten Schichten. So soll die Entstehung von Wirbelströmen in diesem gehemmt werden, um die „Verluste“ von Energie zu minimieren.

Zunächst muss erwähnt werden, dass Transformatoren ausschließlich mit Wechselspannung betrieben werden können. Schließlich basieren sie auf Induktion und diese tritt nur bei einer Änderung des magnetischen Flusses auf - hier ändert sich die magnetische Feldstärke durch die Verwendung von Wechselstrom. So versucht man sich einem idealen Transformator anzunähern. Ein solcher idealer Transformator, bei welchem keine „Verluste“ durch Widerstand, Wärme, Wirbelströme etc. auftreten ist praktisch jedoch unmöglich.



$U_1 = U_{\sim p}$  wird Primärspannung genannt. Es handelt sich um eine Wechselspannung, welche in der Primärspule einen Wechselstrom verursacht. Dieser führt wiederum zu einem sich ständig auf- und abbauenden sowie umpolenden Magnetfeld. Aufgrund seiner Form und der Verstärkung durch den Eisenkern befindet sich dieses Magnetfeld ebenfalls in der Sekundärspule. Da sich die Änderung des Magnetfeldes auch periodisch umkehrt, wird in der Sekundärspule folglich ebenfalls eine Wechselspannung induziert.

Experimentell lässt sich für den unbelasteten Transformator folgender Zusammenhang nachweisen:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ . Es gilt, dass die Primär- die Sekundärspannung bestimmt.

Für den belasteten Transformator gilt, dass die Sekundärstromstärke die Primärstromstärke bestimmt. Dies wird mit  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$  beschrieben.

Abschließend sollte eine Energiebetrachtung bei Transformatoren durchgeführt werden. Grundsätzlich gilt, dass  $E = P \cdot t$ . Mit  $P = U \cdot I$  folgt:

$$U_p I_p t = U_s I_s t \Rightarrow U_p I_p = U_s I_s \Rightarrow \frac{U_p}{U_s} = \frac{I_s}{I_p}. \text{ Und mit } U \sim I \text{ gilt auch } \frac{U_p}{U_s} = \frac{I_p}{I_s}.$$

## Überland-Leitung

Ziel: Strom über lange Strecken mit weniger Verlust transportieren.

To be completed. [missing]

## Energie des magnetischen Feldes

To be completed. [missing]

## Selbstinduktion

Das Phänomen der Selbstinduktion tritt bei einer einzelnen Spule auf. Wird an diese Spule ein Netzgerät angeschlossen, fließt ein Strom durch diese Spule. Wie bereits bekannt ist, ist eine Spule ein Elektromagnet. Im inneren der Spule entsteht also ein Magnetfeld. Während sich dieses Magnetfeld aufbaut, ändert sich selbstveränderlich die Stärke des Magnetfeldes. Eine Magnetfeldänderung in einer Spule bedeutet jedoch, dass in dieser eine Spannung induziert wird. Die Lenz'sche Regel besagt, dass die induzierte Spannung ihrer Ursache entgegengesetzt sein muss. Somit wird eine Gegenspannung induziert, welche die das Magnetfeld verursachende Spannung hemmt. Da somit nur eine geringere Spannung wirkt, wird der Stromfluss in der Spule gehemmt. Diese Hemmung kann jedoch nicht beliebig lange erfolgen, da bei einem konstanten Strom keine Magnetfeldänderung mehr auftritt und die hemmende Wirkung nicht mehr existiert. Insgesamt steigt der Stromfluss durch eine Spule beim Anschalten des Stroms nur allmählich auf einen stabilen Wert an.

Beim Ausschalten kann analog begründet werden, dass der Strom nicht schlagartig ausgeht, sondern noch „nachfließt“. Die Stromstärke nimmt exponentiell ab.

Für die induzierte Spannung  $U_i$  gilt:

$$\begin{aligned} U_i &= -N \cdot \Phi' = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -N \cdot A \cdot \frac{\Delta(\mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I)}{\Delta t} = -N \cdot A \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \\ &= -\mu_0 \cdot \frac{A \cdot N^2}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \end{aligned}$$

Der Faktor  $L = \mu_0 \cdot \frac{A \cdot N^2}{l}$  ist materialspezifisch und wird Induktivität genannt. Es gilt:

$$U_i = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}. \text{ Für die Einheit der Induktivität } L \text{ gilt: } [L] = \frac{[U_i]}{[\frac{\Delta I}{\Delta t}]} = 1 \frac{V}{\frac{A}{s}} = 1 \frac{Vs}{A} = 1H \text{ (Henry).}$$

## Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

To be completed. [missing]

- Elektromagnetische Wellen: Energietransport und Informationsübertragung
- Ringentladungsröhren

## Schwingungen

Schwingungen sind periodische Vorgänge. Das bedeutet, dass nach einer Zeit  $T$  - in Sekunden  $s$  angegeben - wiederholt der gleiche (Bewegungs)Zustand - vektoriell betrachtet - erreicht wird. Die Zeit  $T$  wird als Periodendauer bezeichnet. Die Anzahl der Wiederholungen in einer Zeiteinheit wird als Frequenz  $f$  geschrieben, mit  $[f] = \frac{1}{s} = 1Hz$ . Es gilt  $f = \frac{1}{T}$ .

Wird ein schwingendes Objekt in seinem Ruhezustand beobachtet, hat es die Auslenkung 0. Er befindet sich in der Ruhelage. Während einer Schwingung kommt es zu Abweichungen von dieser Auslenkung - denn die Schwingung findet um die Ruhelage statt. Die maximale Abweichung von der Ruhelage bei einer Schwingung wird als maximale Auslenkung bezeichnet. Sie wird auch maximale Elongation genannt.

Jedes Objekt, welches schwingen kann, wird als Oszillator bezeichnet.

## Harmonische Schwingungen

Schwingungen werden als harmonisch bezeichnet, wenn sie durch eine  $\sin$  Funktion beschrieben werden können. Mit der maximalen Elongation  $\hat{y}$ , der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  (gibt die

Geschwindigkeit der Schwingung an) und der Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  (zeitliche Verschiebung der Schwingung) gilt die folgende Formel:

$y(t) = \hat{y} \cdot \sin(\omega \cdot t + \Delta\varphi)$ , wobei  $y$  die zeitabhängige Elongation angibt. Für die Kreisfrequenz bzw. Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  gilt:  $\omega = 2\pi f$ .

Harmonische Schwingungen treten immer dann auf, wenn die rückführende Kraft  $F_{Rueck}$  proportional zur Elongation ist:  $F_{Rueck} \sim y$ . Die Rückführende Kraft wirkt auf den Oszillator, wenn dieser von seiner Ruhelage abweicht und „versucht“ die Ruhelage wieder herzustellen.

### **Gedämpfte harmonische Schwingung**

Zuvor wurden ausschließlich ungedämpfte Schwingungen betrachtet. Diese können nur bei Gedankenexperimenten bzw. theoretischen Überlegungen auftreten, da sie verlustfrei sind.

Gedämpfte Schwingungen zeichnen sich jedoch dadurch aus, dass es beim Schwingen des Oszillators „Verluste“ gibt, bzw. Energie z. B. in Form von Wärme abgegeben wird. Diese Abgabe von Energie hemmt die Schwingung, da dem System Energie entzogen wird.

Für freie Schwingungen gilt: Die maximale Elongation verringert sich zunehmend.

Für erzwungene Schwingungen (Erläuterung unten) gilt: Die maximale Elongation verringert sich zunehmend und es wird ggf. die Resonanzkatastrophe verhindert.

Mathematisch kann die gedämpfte harmonische Schwingung folgendermaßen beschrieben werden:  $y(t) = \hat{y} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \cos(\omega \cdot t + \Delta\varphi)$ .  $\lambda$  definiert dabei die Stärke der Dämpfung.

### **Erzwungene Schwingung**

Dabei handelt es sich um einen Sonderfall der angeregten harmonischen Schwingung. Dem Oszillator wird periodisch Energie zugeführt - er wird periodisch angeregt. Entscheidend für das Verhalten des Oszillators sind dabei die Erregerfrequenz  $f_e$  und die Eigenfrequenz  $f_0$ . Die Eigenfrequenz eines Objektes kann ermittelt werden, indem die Frequenz des frei schwingenden Objektes erfasst wird. Die Erregerfrequenz entspricht der Frequenz der periodischen Energiezuführung.

Gilt  $f_e \ll f_0$  (niedrigfrequenter Bereich) ist die Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  zwischen der anregenden Schwingung und der Schwingung des Oszillators nahezu 0. Zudem sind die Amplituden ebenfalls nahezu gleich groß.

Gilt  $f_e = f_0$  (Resonanzfall) beträgt die Phasendifferenz  $\Delta\varphi \approx \frac{\pi}{2}$ . Es wird die Schwingung des

Oszillators verstärkt. Somit ist auch die Amplitude des Oszillators größer als die der Anregung. Es kann zu Resonanzkatastrophe kommen, wenn die zugeführte Energie beliebig ansteigen kann. Das System seine Stabilitätsgrenzen überschreitet und kollabiert.

Gilt  $f_e \gg f_0$  (hochfrequenter Bereich) beträgt die Phasendifferenz  $\Delta\varphi \approx \pi$ . Die Amplitude des Erregers ist höher als die des Oszillators, da sich die Anregungen des Erregers gegenseitig wieder aufheben.

### **Beispiel aus der Mechanik**

Das mechanische Pendel wird bereits in der Unterstufe thematisiert und schafft ein intuitiveres Verständnis als der unten erläuterte elektrische Schwingkreis. Es wird ein Gewicht an einer Feder aufgehängt. Wird dieses Gewicht angestoßen beginnt es zu schwingen. In der Ruhelage wirken auf das Gewicht die Gravitation  $F_G = m \cdot a(t)$  und die Zugkraft der Feder  $F_{sp} = -D \cdot s(t)$ . Es

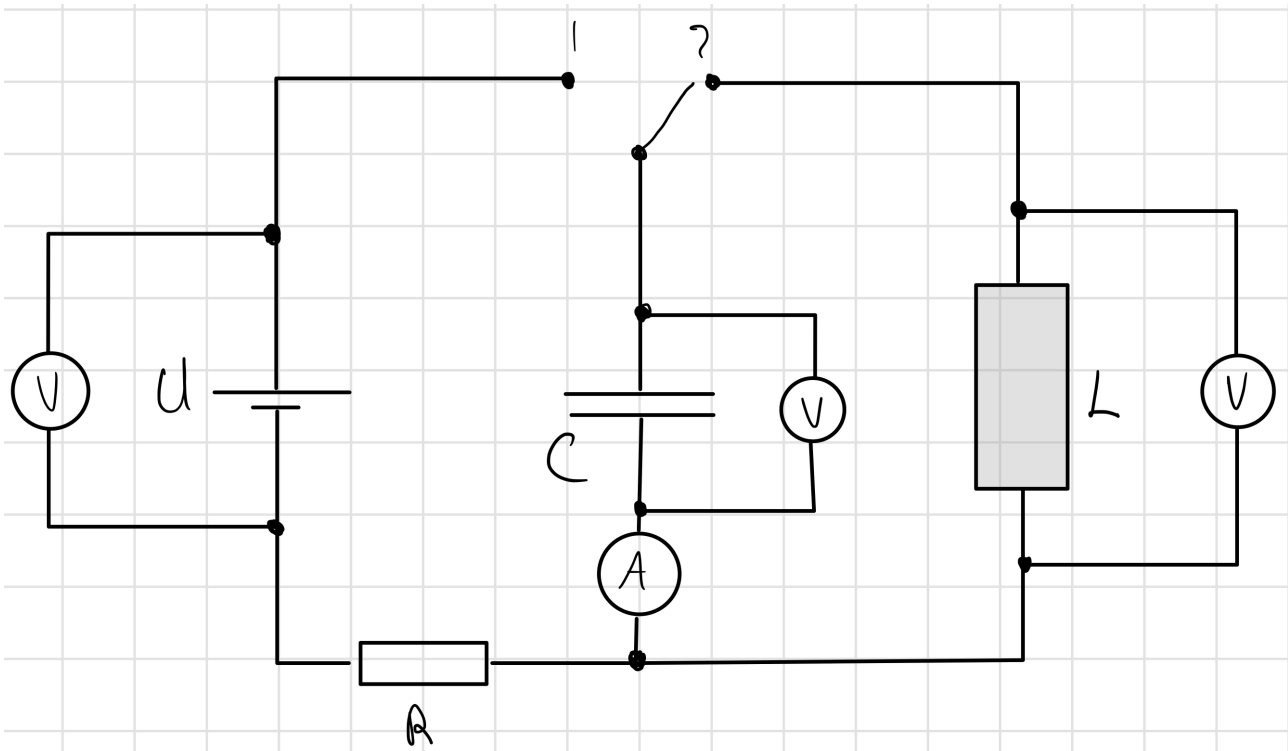
gilt  $F_G = F_{sp} \Rightarrow m \cdot a(t) + D \cdot s(t) = 0 \Rightarrow s(t) + \frac{m}{D} \frac{\Delta^2 s}{(\Delta t)^2} = 0$ . Mit der Randbedingung

$s(0) = 0$  ergibt sich  $s(t) = \hat{s} \cdot \sin(\omega \cdot t)$  mit  $\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$ .

### **elektrischer Schwingkreis (RLC-Kreis)**

Der elektrische Schwingkreis wird aufgrund seiner Bauart auch RLC-Kreis genannt. Denn er besteht aus einem Widerstand  $R$  (?), einer Spule mit der Induktivität  $L$  und einem Kondensator mit der Kapazität  $C$ . Er ist folgendermaßen aufgebaut:

Es werden zwei Stromkreise betrachtet. Der Linke Kreis wird betrachtet, wenn der Schalter in Position eins liegt. Dann wird der Kondensator über den Widerstand  $R$  mit der Spannung  $U$  aufgeladen. Der Rechte Kreis wird betrachtet, wenn der Schalter in Position zwei liegt. Nur der



rechte Kreis ist der eigentliche Schwingkreis. Der linke Teil ist ausschließlich für die praktische Durchführung - genauer zum Aufladen des Kondensators - notwendig.

#### Funktionsweise

- Zunächst wird der Kondensator über den linken Stromkreis aufgeladen. Im Anschluss liegt an diesem die maximale Spannung an, da die Ladung an den Kondensatorplatten maximal ist. Die im elektrischen Feld des Kondensators gespeicherte Energie ist somit ebenfalls maximal.
  - Elektrische Energie: maximal
  - Magnetische Energie: minimal ( $= 0$ )
  - Stromfluss: minimal ( $= 0$ )
  - Spannung und Ladung am Kondensator: maximal
  - Magnetfeldstärke: minimal ( $= 0$ )
- Nun wird der Schalter umgelegt und der eigentliche Schwingkreis „aktiviert“. Es kann ein Strom durch die Spule zwischen den Kondensatorplatten fließen. Der Kondensator entlädt sich. Durch den Stromfluss durch die Spule entsteht ein Magnetfeld. Es kommt zur Selbstinduktion und durch die induzierte Spannung wird der Stromfluss gehemmt. Die Hemmung des Stromflusses entspricht einer Umwandlung von elektrischer in magnetische Energie.
  - Elektrische Energie: wird abgebaut, in magnetische umgewandelt
  - Magnetische Energie: nimmt zu, aus elektrischer umgewandelt
  - Stromfluss: steigt
  - Spannung und Ladung am Kondensator: nehmen ab
  - Magnetfeldstärke: nimmt zu
- Nun ist der Kondensator vollständig entladen, er speichert keine Ladungen und Energie mehr. Es fließt nun jedoch der maximal Strom, weshalb das Magnetfeld vollständig aufgebaut ist und die Energie in diesem gespeichert ist.
  - Elektrische Energie: minimal ( $= 0$ )
  - Magnetische Energie: maximal
  - Stromfluss: maximal
  - Spannung und Ladung am Kondensator: minimal ( $= 0$ )
  - Magnetfeldstärke: maximal
- Da der Kondensator entladen ist, kann eigentlich kein Strom mehr fließen. Eine Reduzierung des Stromflusses führt jedoch ebenfalls zu einer Magnetfeldänderung. Und da die induzierte Spannung durch die Selbstinduktion der verursachenden Kraft entgegenwirken muss, bremst



die induzierte Spannung die Abnahme des Stromflusses. Die Verlangsamung der Abnahme des Stromflusses kann als Umwandlung von magnetischer in elektrische Energie interpretiert werden. Da der Strom also weiterfließt wird der Kondensator wieder aufgeladen.

- Elektrische Energie: steigt, da der Kondensator wieder aufgeladen wird
  - Magnetische Energie: sinkt, wird in elektrische umgewandelt
  - Stromfluss: sinkt
  - Spannung und Ladung am Kondensator: steigen
  - Magnetfeldstärke: nimmt ab
5. Im Letzten Schritt ist nun der Kondensator wieder vollständig aufgeladen. Allerdings ist die Polung anders als in Schritt 1 - abgesehen davon ist die Situation jedoch identisch.
- Elektrische Energie: maximal
  - Magnetische Energie: minimal (= 0)
  - Stromfluss: minimal (= 0)
  - Spannung und Ladung am Kondensator: maximal
  - Magnetfeldstärke: minimal (= 0)

Da die Situation grundsätzlich wie in Schritt eins ist, wiederholt sich nun dieser Ablauf in umgekehrter Richtung. Es wird deutlich, dass dieser Stromkreis immer wieder hin und her pendeln wird. Deswegen wird er als Schwingkreis bezeichnet - denn er schwingt.

### Mathematische Betrachtung

Für die Energie im elektrischen Feld gilt:  $E_{el} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2$ .

Für die Energie im magnetischen Feld gilt:  $E_{mag} = \frac{1}{2}LI^2$

Für die Spannung am Kondensator gilt:  $E_C = \frac{Q}{C}$

Für die Spannung an der Spule gilt:  $E_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Für die induzierte Spannung an der Spule gilt:  $E_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Nach dem Faraday'schen Gesetz gilt nun:

$$\begin{aligned} \oint \vec{E} d\vec{l} &= -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \\ \Rightarrow \oint \vec{E} d\vec{l} + L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} &= 0 \\ \Rightarrow \frac{Q}{C} + L \frac{\Delta I}{\Delta t} &= 0 \end{aligned}$$

Diese Formel wird im Unterricht häufig auch mit der Kirchhoff'schen Maschenregel begründet, nach welcher  $U_C + U_L = 0$  gelten muss. Diese Begründung ist genau gesehen jedoch nicht korrekt, da die Kirchhoff'sche Maschenregel ausschließlich für konstante elektrische Felder gilt.

Die obige Gleichung kann weiter umgeformt werden:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{Q(t)}{C} + L \frac{\Delta^2 Q(t)}{(\Delta t)^2} &= 0 \\ \Rightarrow Q + LCQ'' &= 0 \text{ (aufleiten führt zu:)} \\ \Rightarrow I + LCI'' &= 0 \end{aligned}$$

Hierbei handelt es sich um eine Differenzialgleichung, welche mit Schulwissen nicht gelöst werden kann. Mit den Randbedingungen  $Q(0) = U_0 \cdot C$  und  $I(0) = Q'(0) = 0$  ( $U_0$  als Aufladespannung des Kondensators) kann jedoch folgende Lösung für  $Q(t)$  angenommen werden:

$Q(t) = C \cdot U_0 \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{LC}} \cdot t\right)$ . Dies lässt sich vereinfachen:

$$Q(t) = \hat{Q} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \text{ mit } \hat{Q} = C \cdot U_0 \text{ und } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Mit  $C = \frac{Q}{U}$  ergibt sich auch:  $U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$ . Der Schwingkreis schwingt somit harmonisch.

Wegen  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  ergibt sich für  $T$ :  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ . Dies ist die Thomson'sche Schwingungsgleichung.

Durch Ableiten von  $Q(t)$  ergibt sich zudem eine Gleichung für den Strom  $I(t)$ . Es gilt:

$$I(t) = Q'(t) = C \cdot U_0 \cdot -\sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \omega_0 = C \cdot U_0 \cdot -\sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \sqrt{\frac{1}{LC}} = -\sqrt{\frac{C}{L}} \cdot U_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$$

### Gegenüberstellung zum mechanischen Pendel

Die Eigenschaften der Schwingung werden besonders deutlich, wenn man den elektrischen Schwingkreis einem mechanischen Pendel gegenüberstellt:

elektrisch	mechanisch
$E_{el} = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$	$E_{sp} = \frac{1}{2}Dr^2$
$E_{mag} = \frac{1}{2}LI^2$	$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$
$E_{el} + E_{mag} = konst.$	$E_{sp} + E_{kin} = konst.$
$U_C = \frac{Q}{C}$	$F_D = -D \cdot s$
$U_{ind} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$	$F_G = m \cdot a$
Spannung $U$	Elongation $s$
Stromstärke $I$	Geschwindigkeit $v$

### Wellen

Wellen sind die Ausbreitung einer Störung im Raum. Eine solche Störung kann die Elongation eines Oszillators bzw. seiner Abweichung von der Ruhelage sein. Die Charakteristika einer Welle sind ihre Maxima (Wellenberge) und Minima (Wellentäler).

Sind viele Oszillatoren im Raum gekoppelt, überträgt sich die Schwingung des einen auf den nächsten. Somit entspricht die Welle auch der Ausbreitung einer Schwingung. Alle Oszillatoren schwingen mit der gleichen Frequenz und der gleichen Amplitude. Oszillatoren mit einem bestimmten Abstand schwingen mit einer fester Phasendifferenz  $\Delta\varphi$ . Zwischen den einzelnen Oszillatoren wird Energie übertragen, ohne dass Masse transportiert wird. Ähnlich zur harmonischen Schwingung ist auch eine harmonische Welle definiert: Sie tritt auf, wenn die Oszillatoren der Schwingungskette jeweils mit ihrer Eigenfrequenz  $f_0$  schwingen. Letztlich sind in der Realität keine idealen Wellen möglich - es treten immer „Verluste“ bzw. Energieumwandlung in Wärme auf. Somit muss periodisch Energie zugeführt werden, wenn die Welle stabil sein soll.

#### Wellenarten

Es wird zwischen geraden Wellen und Kreiswellen unterschieden. Gerade Wellen breiten sich längs im Raum aus - sie gehen von einem geradenförmigen Erreger aus. Kreiswellen gehen von einem punktförmigen Erreger aus und breiten sich kreisförmig aus. Selbstverständlich können in der Praxis auch Mischformen dieser Arten auftreten. Diese werden in der Schule jedoch nicht (mathematisch) betrachtet.

Zudem muss zwischen Transversalwellen und Longitudinalwellen unterschieden werden. Sie unterscheiden sich durch die Positionierung von Ausbreitungsrichtung/Wellennormale und Elongation. Bei Longitudinalwellen findet die Störung im Raum längs der Ausbreitungsrichtung statt. Ein Beispiel sind Schallwellen. Bei Transversalwellen findet die Ausbreitung quer zur Ausbreitungsrichtung statt. Ein Beispiel sind Saitenwellen (Musikinstrumente). Wasserwellen besitzen sowohl die Komponenten einer Longitudinal- als auch einer Transversalwelle.

## Charakteristische Größen

Eine Welle kann mathematisch ähnlich wie eine Schwingung beschrieben werden. Zunächst können die Periodendauer  $T$  und die Frequenz  $f = \frac{1}{T}$  betrachtet werden. Diese Größen sind identisch wie bei einer Schwingung und können durch Beobachten eines Oszillators der Oszillatorkette ermittelt werden. Die Wellenlänge  $\lambda$  ist eine Strecke. Sie gibt die kürzeste Entfernung zwei Oszillatoren im gleichen Schwingungszustand bzw. zweier in Phase schwingender Oszillatoren an. Die maximale Elongation  $\hat{y}$  und Kreisfrequenz  $\omega$  sind bereits bekannt. Als ergänzende Größe ist noch die Geschwindigkeit  $v$  als Ausbreitungs-/Phasengeschwindigkeit der Welle gegeben. Sie wird mit  $v = \lambda f = \frac{\lambda}{T}$  berechnet.

Letztlich müssen die Begriffe Wellenfront und Wellennormale erläutert werden. Die Wellenfront ist die Oszillatorkette, in welcher alle Oszillatoren den identischen Schwingungszustand ohne Phasenverschiebung haben. Man könnte diese jeweils insgesamt als einen großen Oszillator interpretieren. Die Wellennormale beschreibt die Ausbreitungsrichtung der Welle. Sie steht orthogonal zur Tangente an der Wellenfront.

## Effekte

Bei der Ausbreitung von Wellen treten verschiedene Effekte auf.

Beugung beschreibt, dass Wellen in den geometrischen Schattenraum eines Hindernisses eintreten.

Reflexion beschreibt, dass Wellen beim Auftreten auf ein Hindernis reflektiert werden. Nach dem Huygen'schen Prinzip (unten erläutert) gilt: Beim Auftreten der Wellenfront auf ein Hindernis entstehen jeweils Elementarwellen. Die Einhüllende dieser Elementarwellen bildet die neue Wellenfront. Es gilt für die Wellennormale, dass der Einfallswinkel  $\alpha$  dem Reflexionswinkel  $\alpha'$  entspricht:  $\alpha = \alpha'$

Brechung beschreibt ebenfalls die Richtungsänderung einer Welle. Sie wird jedoch durch die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit verursacht. Denn dringt eine Welle z. B. in ein anderes Medium ein, so ändert sich dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Im neuen Medium breiten sich die Elementarwellen der an der Grenze aufgetroffenen Wellenfront nun langsamer oder schneller aus, sodass der restliche Teil der Welle „aufholen“ kann oder weiter „zurück fällt“. Dadurch

verschiebt sich die Wellennormale. Es gilt: 
$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

## Huygen'sches Prinzip

Das Huygen'sche Prinzip versucht die zuvor dargestellten Effekte zu erklären. Es besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle ist. Die Einhüllende dieser Elementarwellen ergibt zum nächsten Zeitpunkt die neue Wellenfront.

Die Elementarwellen sind jeweils Kreiswellen, welche von allen Punkten einer Wellenfront ausgehen. Die Einhüllende kann in einer komplexeren Überlegung auch auf die Überlagerung aller Elementarwellen zurückgeführt werden.

## Eigenschaften

Kohärenz: Haben zwei Wellen, die von einem Erreger ausgehen, eine konstante Phasendifferenz, spricht man von kohärenten Wellen.

Prinzip der Überlagerung: Wellen durchdringen sich gegenseitig, ohne sich selbst oder einander dabei zu verändern. Ihre Überlagerung kann jedoch in Form von Interferenz beobachtet werden.

## Interferenz

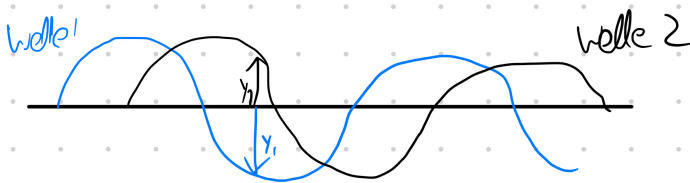
Überlagern sich mehrere Wellen gleicher Frequenz ungestört, spricht man von Interferenz. In einem Punkt des Wellenfeldes, in dem sich mehrere Wellen überlagern, addieren sich die Auslenkungen (Elongationen) ihrer Schwingungen.

Verlaufen zwei Wellen in Phase und sind kohärent, können sie einen gemeinsamen Punkt mit einem Gangunterschied erreichen. Dieser Gangunterschied  $\Delta s$  definiert die Interferenzerscheinungen. Der Gangunterschied steht im Verhältnis zur Phasendifferenz:

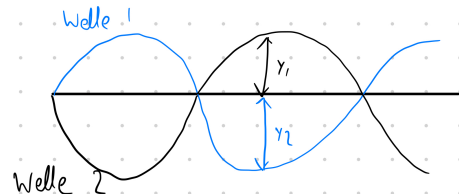
$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta s}{\lambda} = p_1 - p_2.$$

Bei der konstruktiven Interferenz kommt es zur maximalen Verstärkung. Es gelten  $\Delta s = k \cdot \lambda$  und  $\varphi = 2\pi k$  mit  $k \in \mathbb{N}^0$ . Die Maxima und Minima beider Wellen liegen genau übereinander und verstärken sich entsprechend des Prinzips der Überlagerung.

Bei der destruktiven Interferenz kommt es zur maximalen Abschwächung. Es gelten  $\Delta s = (k - \frac{1}{2})\lambda = (2k - 1)\frac{\lambda}{2}$  und  $\varphi = \pi(2k - 1) = 2\pi(k - \frac{1}{2})$  mit  $k \in \mathbb{N}$ . Die Maxima und Minima liegen genau nicht übereinander und heben sich gegenseitig durch Addition auf. Selbstverständlich sind auch Mischformen beider Arten möglich, diese werden hier jedoch nicht näher betrachtet.



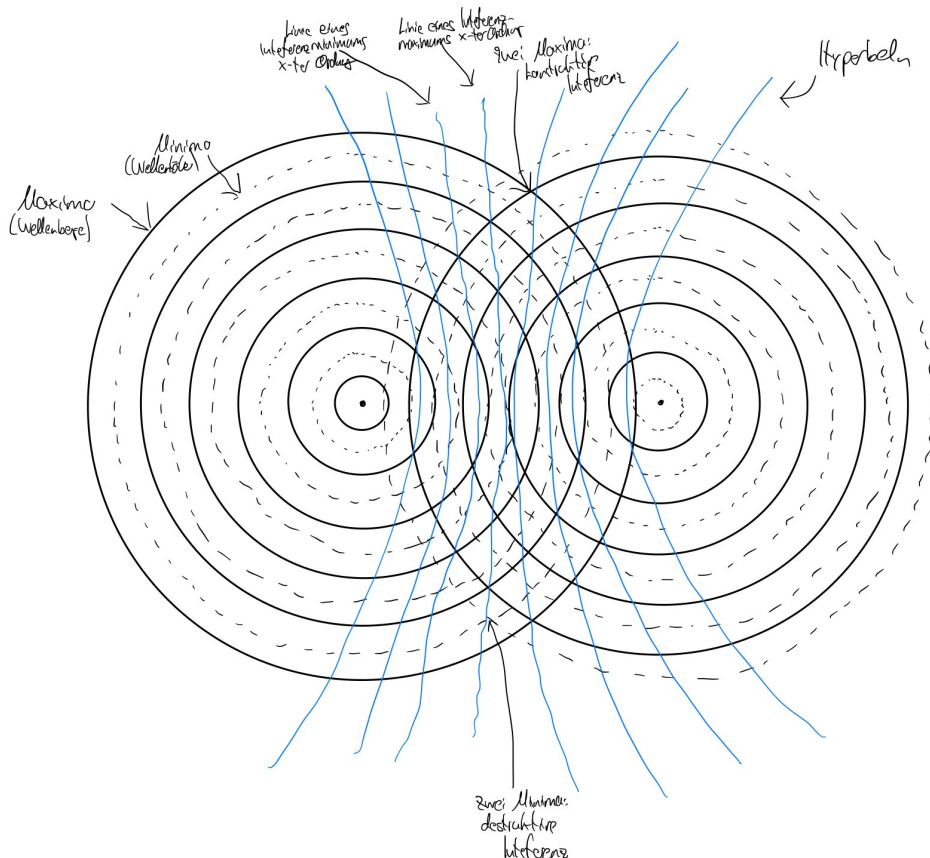
Mischform aus destruktiver und konstruktiver Interferenz



Destruktive Interferenz

Die Variable  $k$  gibt die Ordnung des Minimums oder Maximums an.

Interferenzerscheinungen können in Interferenzfiguren dargestellt werden. Von zwei Erregern gehen Wellen aus. Wellenberge werden als durchgezogene Linien und Wellentäler als gestrichelte Linien dargestellt. Kreisförmige Wellen werden somit mit abwechselnd gestrichelten und durchgezogenen Linien dargestellt. Dort wo zwei durchgezogene Linien aufeinander treffen, kommt es zur konstruktiven Interferenz. Bei zwei gestrichelten Linien zur destruktiven Interferenz. Werden die Wellenfronten verfolgt, können mehrere Punkte Interferenz bestimmter Ordnung identifiziert und zu einem Graphen verbunden werden. Bei zwei Kreiswellen entstehen so Hyperbeln für die Linien der Interferenzmaxima und -minima.



## Versuch - Wellenwanne

Eine Wellenwanne ist eine Apparatur, welche aus einer Wanne mit einem dünnen Wasserspiegel, einem Schirm, einem Spiegel und einer Strobotoskop-Lampe besteht. Durch die Lampe wird von oben auf die Wasseroberfläche geleuchtet. Unter dem Becken reflektiert der Spiegel das Licht auf einen Schirm. So werden die Wasserwellen sichtbar.

In der Wellenwanne werden verschiedene Erreger positioniert. Diese erzeugen Wellen. Auf dem Schirm kann das Verhalten der Wellen beobachtet werden: Ihre Ausbreitung, die Überlagerung, Interferenz etc. Zusätzlich können verschiedene Hindernisse installiert werden. Diese können z. B. nur ein kleines Loch haben um Brechung zu demonstrieren. Oder durch Veränderung der Wassertiefe können die Wasserwellen gebrochen werden.

Werden zwei punktförmige Erreger betrachtet, erzeugen diese zwei Kreiswellen. Beide breiten sich ungestört voneinander aus. (Prinzip der ungestörten Überlagerung) Beim Aufeinandertreffen kann die Überlagerung jedoch in Form einer verstärkten oder abgeschwächten Elongation beobachtet werden. (Interferenz)

## Stehende Wellen

To be completed. [missing]

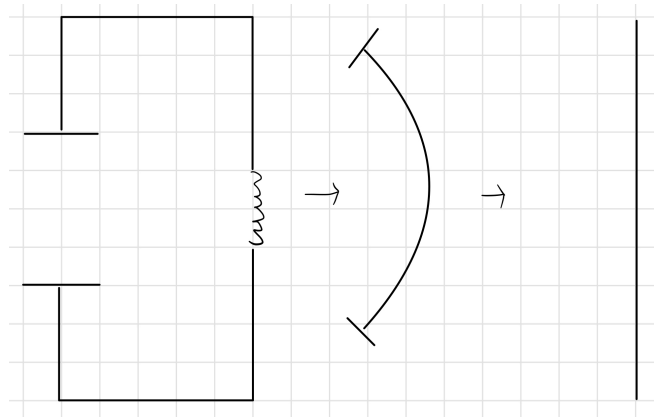
## Hertz'scher Dipol

Es überlegt werden, wie man die Eigenfrequenz des Schwingkreises beeinflussen kann. Es wurde die Thomson'sche Schwingungsgleichung  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  hergeleitet. Es gelten:  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  und

$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ . Die (Kreis)Frequenz kann maximiert werden, indem  $\sqrt{LC}$  minimiert wird. Für  $L$  gilt

$L = \mu_0\mu_r \frac{N^2 A}{l}$  und für  $C$  gilt  $C = \epsilon_0\epsilon_r \frac{A}{d}$ . Folglich kann  $L$  minimiert werden, indem  $N$  minimiert

wird. Und  $C$  kann minimiert werden, indem  $d$  maximiert wird. Baut man den elektrischen Schwingkreis nun so um, dass die Anzahl der Wicklungen der Spule minimiert und der Abstand der Kondensatorplatten maximiert wird, ergibt sich folgende Veränderung:



Der entstehende Metallstab wird Hertz'scher Dipol genannt.

## Experiment

Es wird ein Schwingkreis zur Schwingung angeregt. An einen Hertz'schen Dipol ist ein Leuchtmittel angeschlossen. Der Hertz'sche Dipol wird nun an den Schwingkreis angenähert und wieder von diesem entfernt. Es kann beobachtet werden, dass das angeschlossene Leuchtmittel zunehmend intensiver leuchtet je geringer der Abstand zwischen dem Schwingkreis und dem Hertz'schen Dipol ist.

## elektromagnetische Wellen/Strahlung

Bisher wurde der elektrische Schwingkreis hinsichtlich seiner Schwingung untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich abwechseln ein elektrisches und magnetisches Feld auf- und wieder abbaut. In gewisser Weise schwingen somit auch das magnetische bzw. elektrische Feld. Zudem wurde beim Experiment mit dem Hertz'schen Dipol festgestellt, dass ein elektrischer Schwingkreis zu diesem Energie übertragen kann.

Dieser Effekt wird auf die Elektromagnetische Strahlung zurückgeführt. Wie bereits gennt, erzeugt ein elektrischer Schwingkreis abwechselnd ein elektrisches und magnetisches Feld. Entscheidend ist nun, dass diese Felder nicht stationär sind - sie sind also räumlich nicht an den Schwingkreis gebunden. Stattdessen breiten Sie sich im raum aus. Aus der elektrischen und der magnetischen Schwingung werden im Raum somit wellen. Und da beide nur zusammen auftreten, bezeichnet man ihr auftreten als elektromagnetische Strahlung/Wellen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Felder im Vakkum beträgt die Lichtgeschwindigkeit  $c$  statt.

### Stehende Wellen - Interferenz

Wie bei jeder anderen Welle auch, tritt auch bei elektromagnetischer Strahlung Interferenz auf. Dies kann z. B. mit dem Auftreten von stehenden Wellen begründet werden.

Lecher Leitungen

To be completed. [missing]

### Ausbreitung

Anders als die bisher betrachteten Wellen besteht die elektromagnetische Welle jedoch aus zwei Komponenten: Einer magnetischen und einer elektrischen Welle. Die Überlegungen am Hertzschen Dipol wird deutlich, dass das elektrische und magnetische Feld orthogonal aufeinander stehen. Mit der linken-Hand-Regel gilt: Der Mittelfinger gibt die Ausbreitungsrichtung an, der Daumern die Richtung der positiven Elongation der magnetischen Schwingung und der Zeigefinger die Richtung der positiven Elongation der elektrischen Schwingung. Es gilt der Zusammenhang  $E = B \times c$ . (Das Kreuzprodukt der Vektoren  $B$  und  $c$  bei einer vektoriellen Betrachtung führt zum orthogonalen Vektor  $E$ .)

### Intensität

Letztlich ist die Intensität des Lichtes  $S$  definiert. Es gilt:  $S = \frac{1}{s\mu_e} \hat{E} \hat{B} = \frac{1}{s\mu_e} \hat{E} \frac{\hat{E}}{c} = \frac{1}{s\mu_e c} \hat{E}^2$ . Für

die Einheit gilt  $[S] = \frac{W}{m^2}$ .

### Totalreflexion

To be completed. [missing]

### Maxwell'sche Theorie

To be completed. [missing]

### Elektromagnetisches Spektrum

To be completed. [missing]

### Farben & Spektren

To be completed. [missing]

### Auflösungsvermögen optischer Instrumente

To be completed. [missing]

### Polarisation

To be completed. [missing]

## Licht

Bei der klassischen Betrachtung werden Lichtstrahlen betrachtet. Für diese gelten das Reflexionsgesetz  $\alpha = \beta$  (Einfallswinkel gleich Reflexionswinkel) und Brechungsgesetz  $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12} = \frac{c_1}{c_2}$ . Der Faktor  $n$  ist materialspezifisch. Gilt  $n > 1$ , sind die Lichtgeschwindigkeit und Wellenlänge des Lichtes in diesem Medium geringer. Im Vakuum gilt für die Lichtgeschwindigkeit grundsätzlich  $c = 299792458 \frac{m}{s} \approx 2,99 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ .

Allerdings weist das Strahlenmodell von Licht Grenzen auf. Fällt Licht durch einen Spalt mit der Breite  $d$  können verschiedene Effekte beobachtet werden. Diese werden in der Formel  $\sin(\alpha_1) = \frac{\lambda}{d}$  ausgedrückt.  $\alpha_1$  ist der Brechungswinkel. Für  $d \gg \lambda$  gilt  $\alpha_1 \rightarrow 0$ , das

Strahlenmodell ist anwendbar. Für  $d > \lambda$  kommt es bereits zur beobachtbaren Ablenkung von Licht. Es entsteht kein Perfekter Strahl. Und für  $d < \lambda$  gilt  $\alpha_1 \rightarrow$  groß. Das Strahlenmodell ist nicht mehr anwendbar.

Stattdessen wird Licht nun als elektromagnetische Welle identifiziert. Dementsprechend gelten für Licht nun auch die bereits bekannten Eigenschaften von Wellen. Es ist dabei besonders auf Interferenz zu verweisen, welche am Doppelspalt und Gitter auftritt.

### Doppelspalt

Vor einem Doppelspalt wird eine Lichtquelle (meist Laser) aufgestellt. Hinter dem Doppelspalt befindet sich ein Schirm. Nach dem Strahlenmodell müssten dort zwei Lichtstreifen sichtbar werden. Tatsächlich wird jedoch ein Streifenmuster mit abwechselnd beleuchteten und unbeleuchteten Streifen sichtbar. In der Mitte ist die Lichtintensität der beleuchteten Streifen am größten. Dieses Muster ist ein Interferenzmuster mit abwechselnd konstruktiver und destruktiver Interferenz. So wird auf den Wellencharakter von Licht geschlossen. Denn dieses Phänomen kann mit Interferenzeffekten bzw. Beugung und Brechung erklärt werden. Wird Licht am Doppelspalt untersucht, gelten die in der Abbildung dargestellten geometrischen Zusammenhänge.

Wie bereits bekannt wird Interferenz durch einen Gangunterschied  $\Delta s$  mehrerer Wellen verursacht, welche sich entweder destruktiv aufheben oder konstruktiv verstärken (Mischformen bleiben unbeachtet). Wie die Abbildung zeigt, hängt der Gangunterschied  $\Delta s$  vom Winkel des gebeugten Lichtes ab. Es gilt:  $\Delta s = d \cdot \sin(\alpha)$ .

Allgemein gilt für konstruktive Interferenz, dass der Gangunterschied  $\Delta s = n \cdot \lambda$  mit  $n \in \mathbb{N}^0$  sein muss.

Für destruktive Interferenz gilt  $\Delta s = (n - \frac{1}{2})\lambda$  mit  $n \in \mathbb{N}$ .

Ist ein Doppelspaltversuch aufgebaut, kann  $a$  und  $e$  einfach ermittelt werden. Zur Vereinfachung nimmt man an, dass  $l \approx e$  und somit  $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha)$  da  $e \gg a$  angenommen werden kann.

Nun können die zuvor ermittelten Gleichungen für  $\Delta s$  für die konstruktive Interferenz gleich gesetzt werden:  $d \cdot \sin(\alpha) = n \cdot \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{d \cdot \sin(\alpha)}{n} \approx \frac{d \cdot \tan(\alpha)}{n} = \frac{d \cdot a}{n \cdot e}$ . Eigentlich muss

jedoch  $\lambda = \frac{d \cdot a_n}{n \cdot e}$  geschrieben werden, da  $a$  von dem gewählten Maximum  $n$  abhängt. Die

Formel kann weiter zu  $\lambda = \frac{d \cdot \Delta a}{e}$  vereinfacht werden, wobei  $\Delta a$  dem Abstand zweier Maxima

entspricht und mit  $\frac{a_n}{n}$  berechnet werden kann. Dies ist möglich, da alle Maxima den gleichen

Abstand zu ihren Nachbarn haben:  $\Delta a = a_{n+1} - a_n = \frac{\lambda(n+1)e}{d} - \frac{\lambda ne}{d} = \frac{\lambda e}{d}$ .

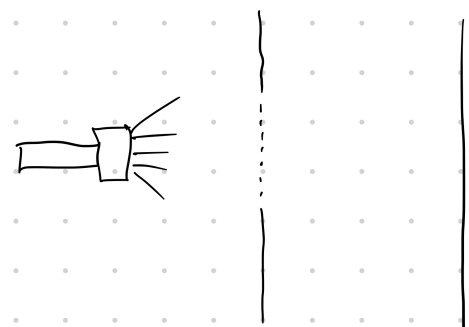
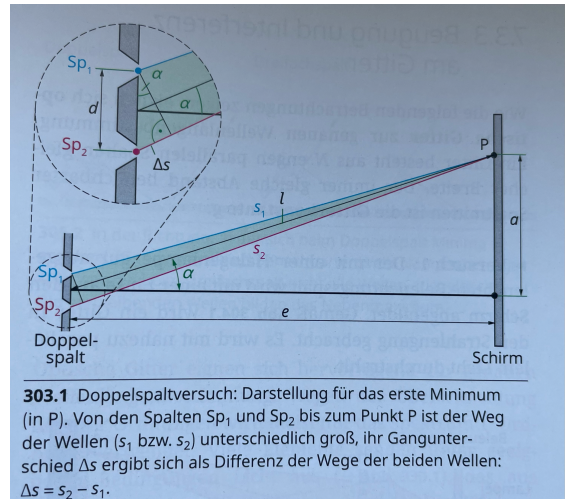
Die Formel kann auch so umgestellt werden, dass der Spaltabstand  $d$  berechnet wird:  $d = \frac{\lambda e}{\Delta a}$ .

### Gitter

Ferner kann auch das Verhalten von Licht an optischen Gittern untersucht werden. Der Unterschied zum Doppelspalt besteht darin, dass die Anzahl der Spalte deutlich größer ist. Es erlaubt jedoch die Wellenlänge  $\lambda$  mit einer höheren Genauigkeit zu bestimmen. Zudem gilt, je kleiner der Abstand  $g$  benachbarter Spalte, desto größer ist die Auflösung.

Häufig wird vor dem Gitter noch eine Linse montiert, damit das Licht nahezu parallel auf das Gitter fällt.

Strahlt die Lichtquelle weißes Licht, spaltet das Gitter das



Spektrum des Lichtes auf: Es zerlegt das Licht in seine einzelnen Frequenzen, welche der Mensch alle Farben wahrnimmt. Auf dem Schirm werden farbige, nach außen breiter werdende Bänder in den Spektralfarben sichtbar. Die Spektralfarben wiederholen und überlappen sich. Strahlt die Lichtquelle monochromatisches Licht (Licht mit einer festen Wellenlänge bzw. Frequenz), dann wird ein Spaltbild sichtbar und es können die Spektrallinien dieses Lichtes im Interferenzmuster identifiziert werden. Es wird deutlich, dass das Spektrum, welches bei der Verwendung von weißem Licht sichtbar wird, letztlich nur die Kombination sämtlicher Spektren von monochromatischem Licht ist.

Beim Aufbau eines Gitterexperimentes sind die folgenden Größen relevant:

- Gitterkonstante  $g$  (Abstand benachbarter Spalte)
- Wellenlänge  $\lambda$
- Entfernung von Schirm und Gitter  $e$
- Abstand des  $n$ -ten Maximums zum Lot  $a_n$
- Winkel zwischen der Geraden zum  $n$ -ten Maximum und dem Lot
- Ordnung des Maximums  $n$
- Anzahl der parallelen der Spalte des Gitters  $N$

Die Analyse der Interferenz wird als Vielstrahlinterferenz bezeichnet. Konstruktive Interferenz tritt auf, wenn Elementarwellen von allen Spalten auf einen Punkt  $P$  des Schirmes treffen. Analog zum Doppelspalt gilt für den Gangunterschied zweier benachbarter Spalte:  $\Delta s = \sin(\alpha) \cdot g$ . Tritt zwischen zwei benachbarten Spalten ein Gangunterschied  $\Delta s = n \cdot \lambda$  für konstruktive Interferenz auf, so tritt dieser wegen konstantem Spaltabstand auch bei allen anderen Spaltpaaren auf. Der Gangunterschied zwischen nicht benachbarten Spalten ist dann ein Mehrfaches von  $n \cdot \lambda$  und erfüllt weiterhin das Kriterium für konstruktive Interferenz. Für die Maxima gilt  $\sin(\alpha_n) = \frac{n \cdot \lambda}{g}$ .

Im Unterschied zum Doppelspalt führt nur eine leichte Abweichung vom Kriterium für Interferenz zu sehr verschiedenen Gangunterschieden, da sich die Fehler über mehrere Spalte aufsummieren. Somit heben sich diese Hauptmaxima deutlich stärker ab. Umso größer  $N$  gewählt ist, desto stärker ist dieser Effekt. Bei großen  $N$  ist der Bereich zwischen den Hauptmaxima nahezu schwarz.

Gleichzeitig treten jedoch Nebenmaxima. Denn durch die größere Anzahl an Überlagerungen kommt es nicht immer zur vollständigen Auslöschung aller Lichtwellen. Umso mehr Spalte  $N$ , desto mehr Nebenmaxima existieren. Diese haben jedoch eine deutlich geringere Leuchtintensität als die Hauptmaxima.

Für die Berechnung der Wellenlänge aus dem Abstand zweier Hauptmaxima gilt analog zum

Doppelspalt  $\lambda = \frac{g \cdot \Delta a}{\sqrt{e^2 + a_n^2}}$ . Hier wurde jedoch die Näherung  $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha)$  nicht

vorgenommen, sodass die Formel etwas komplizierter und präziser ist.



# Quantenphysik

---

## Größen

- $\psi(\vec{r}, t)$  (Wellenfunktion)
- $h$  (Planck'sches Wirkungsquantum)
- $n$  (Hauptquantenzahl)
- $\psi''(x) + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E_{ges} - E_{pot})\psi(x) = 0$  (zeitunabhängige Schrödingergleichung)

## Formeln

- $hf = E$  (Energie-Frequenz Äquivalenz)
- $f\lambda = c$  (im Vakuum, und annähernd auch in Luft)
- $\lambda_n = \frac{h}{p_n}$  (de-Broglie-Wellenlänge)
- $|\psi(\vec{r}, t)|^2 \cdot \Delta V$  (Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Quantenobjektes im Raumvolumen  $\Delta V$  um  $\vec{r}$ )
- $\psi_n(x) = A \cdot \sin(k_n \cdot x)$  (Lösung der Schrödingergleichung für den eindimensionalen Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden) mit  $a = \sqrt{\frac{2}{a}}$ ,  $k_n = \frac{n\pi}{a}$  und  $n = 1, 2, \dots$
- $a = n \frac{\lambda_n}{p}$  (Kriterium für Stehende Wellen im linearen Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden der Länge  $a$ )
- $E_n = -\frac{h^2}{8ma^2}n^2$  (Energiezustand im linearen Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden)
- $E_1 = -\frac{h^2}{8ma^2}$  (Nullpunktenergie im linearen Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden)
- $\Delta E = E_m - E_n = \frac{h^2}{8ma^2}(n^2 - m^2)$  (Energieänderung im linearen Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden von  $m$  auf  $n$ )

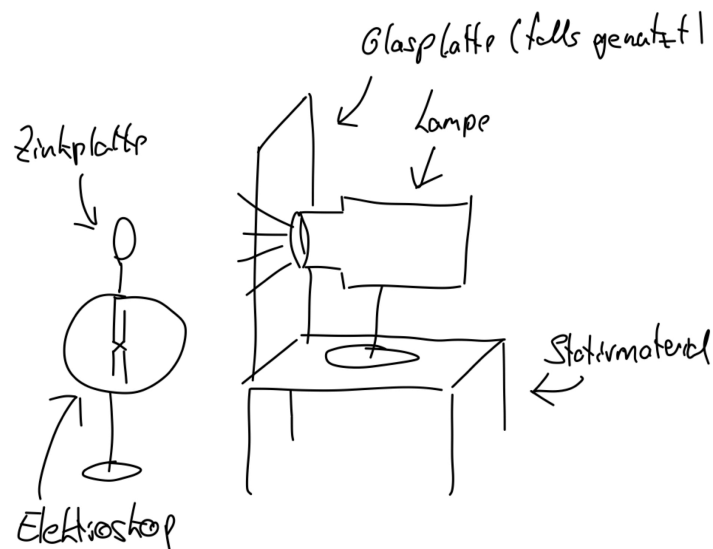
## Licht und Elektronen als Quantenobjekte

### Hallwachs-Versuch

Die Abbildung zeigt den Aufbau des Hallwachs-Versuches.

Auf einem Elektroskop ist eine Zinkplatte montiert, von welcher mit Schmirgelpapier die Oxidschicht (Rost) entfernt wurde. Die Zinkplatte wurde elektrisch aufgeladen (PVC-Rohr und Katzenfell). Auf die Zinkplatte werden zwei Lampen ausgerichtet, eine Weißlichtlampe und eine Gasentladungslampe, genauer eine Hg-Dampflampe (Quecksilber). Zusätzlich ist eine Glasplatte bereitzuhalten, welche in einem Versuchsteil zwischen Lampe und Zinkplatte geführt wird.

Im Versuchsteil eins wird die Zinkplatte mit der Weißlichtlampe beleuchtet. Die Leuchtintensität unter der Abstand der Lampe wird variiert. Alle Operationen werden auch mit dem Glas zwischen der Lampe und der Zinkplatte durchgeführt. Es können keine Veränderungen am Elektroskop oder an anderen Materialien festgestellt werden.



Im Versuchsteil zwei wird die Zinkplatte nun mit der Quecksilber-Dampflampe beleuchtet. Der Abstand und die Leuchtintensität werden variiert. Es wird beobachtet, dass sich das Elektroskop langsam entlädt. Die Variation des Abstands hat keinen nennenswerten Effekt.

Im Versuchsteil drei wird der Versuchsteil zwei mit der Glasplatte zwischen Lampe und Zinkplatte wiederholt. Erneut kann keine Veränderung am Elektroskop oder an anderen Materialien festgestellt werden.

Die im Versuchsteil zwei beobachtete Entladung des Elektroskopes bzw. der Zinkplatte kann nur durch die Abgabe von Elektronen von letzterer begründet werden, da das Elektroskop nach den Vorbereitungen negativ geladen war und somit ein Überschuss von Elektronen gegeben war. Des Weiteren wird deutlich, dass diese Elektronenabgabe durch das direkte Licht der Quecksilberlampe bedingt war. Da Quecksilberlampen im Vergleich zu Weißlichtlampen neben sichtbarem Licht auch UV-Sicht abstrahlen, ist zu vermuten, dass das UV-Licht für die Abgabe der Elektronen und die Entladung des Elektroskopes ursächlich ist. Dass die Entladung nicht nach dem Einbringen der Glasscheibe zu beobachten ist, wird durch die filternde Eigenschaft der Glasscheibe begründet. Das UV-Licht kann die Glasscheibe im Gegensatz zum sichtbaren Licht nicht durchdringen. Der Unterschied zwischen sichtbarem und UV-Licht ist die Wellenlänge bzw. Frequenz des Lichtes bei Betrachtung des Wellenmodells für Licht. Die geringere Wellenlänge bzw. höhere Frequenz entspricht einem höheren Energiegehalt des UV-Lichtes. Für die Loslösung von Elektronen aus der Zinkplatte scheint somit ein gewisses Energiepotenzial notwendig zu sein. In Bezug auf das Wellenmodell ist jedoch verwunderlich, dass eine Variation der Lichtintensität nicht zu einer Variation der Entladung des Elektroskopes geführt hat. Dies wäre eigentlich zu erwarten, da mehr Energie auf die Oberfläche der Zinkplatte auftreten müsste. Folglich ist das Wellenmodell für Licht zu hinterfragen und es wird auf das Quantenmodell von Licht geschlossen.

### **Photoeffekt (lichtelektrischer Effekt)**

Im Hallwachs-Versuch wurde der Photoeffekt beobachtet. Er beschreibt, dass Elektronen durch Bestrahlung mit Licht aus einem Metall herausgelöst werden können. Dabei muss die Energie des Lichts (der einzelnen Photonen) mit der Austrittsenergie übereinstimmen. Eine nähere Erläuterung dieser Begriffe und Zusammenhänge folgt unten.

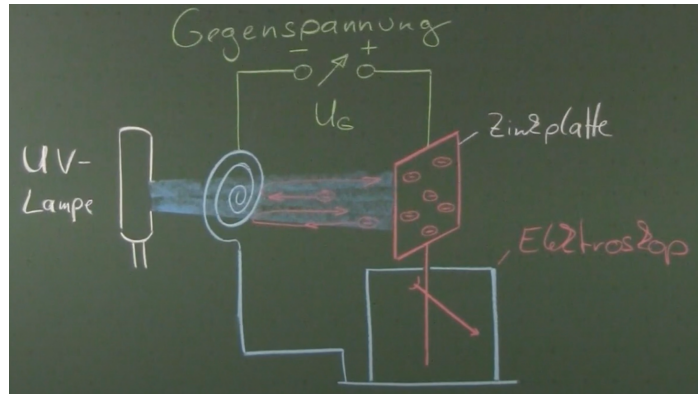
### **Licht als Quantenobjekt**

Als Folge des Hallwachs-Versuches kann man Licht als Quantenobjekt identifizieren. Licht würde somit nur als Welle sondern auch quantisiert betrachtet werden können. Man sagt, dass Licht bestehe aus Photonen. Die Frequenz des Lichtes entspricht dabei der Energie der einzelnen Photonen. Die Intensität der Lichtes beeinflusst nicht die Energie dieser Photonen sondern ausschließlich dessen Anzahl.

### **Versuch: Vakuum-Fotozelle (Gegenfeldmethode)**

Der Versuch mit der Gegenfeldmethode zur Vakuum-Fotozelle basiert auf dem Hallwachs-Versuch. Es wird nun jedoch als Ergänzung die Energie der aus der Zinkplatte herausgeschlagenen Elektronen bestimmt.

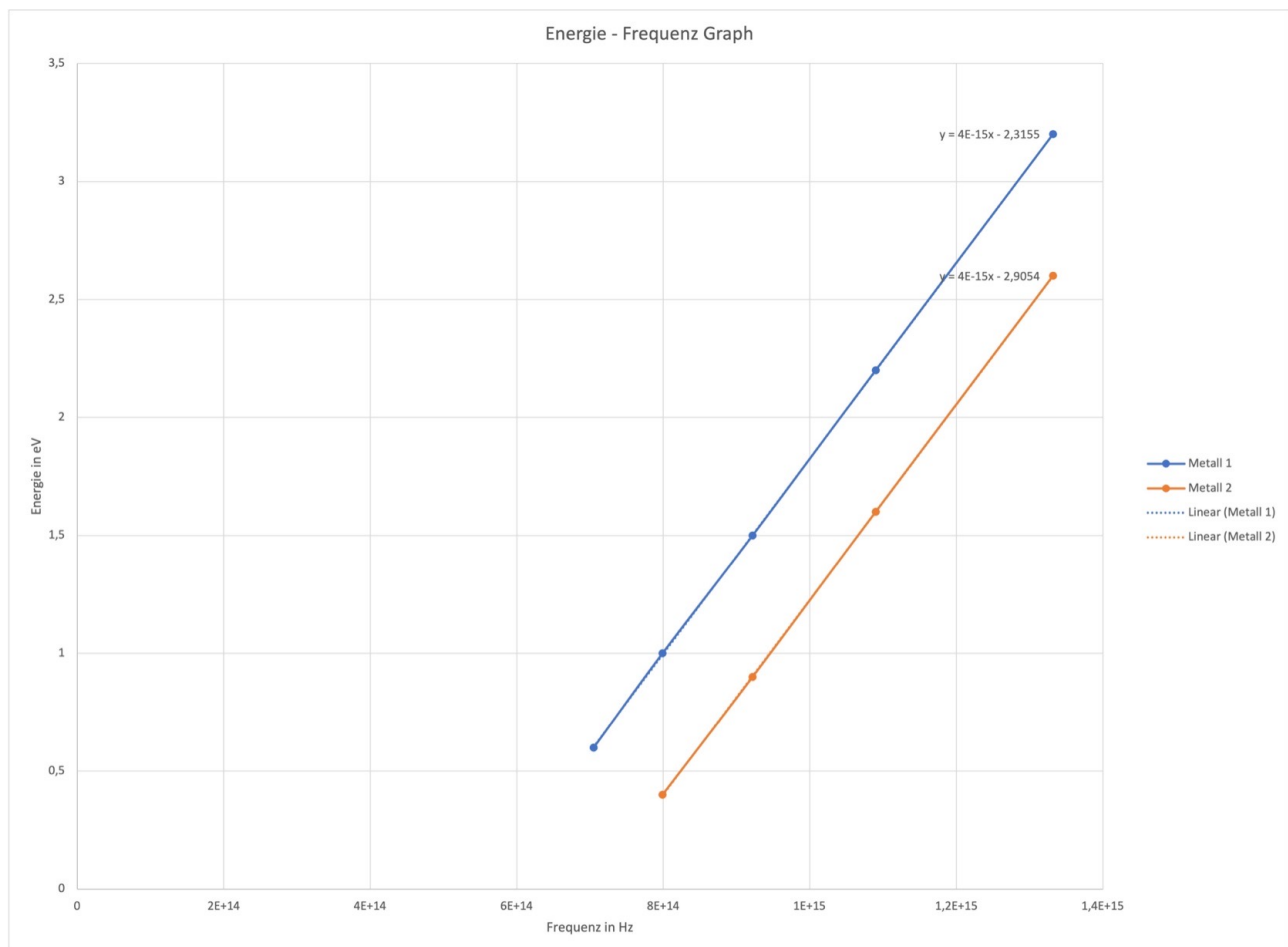
Dazu befindet sich in einer Photozelle zusätzlich zu einer Zinkplatte eine Leiterschleife. Beide werden mit der Gegenspannung  $U_G$  verbunden. Die aus dem Material „ausgeschlagenen“ Elektronen müssen sich nun energetisch aufwendig gegen die Spannung zur Leiterschleife, damit ein Strom fließen kann. Dieser Stromfluss wird gemessen.



Bei einer gegebenen Lichtquelle, welche bestimmtes monochromatisches Licht aussenden, wird die Spannung so lange erhöht, bis kein Strom mehr fließt. Die elektrische Energie im Bereich zwischen Leiterschleife und Zinkplatte muss an der Grenze identisch mit der maximalen kinetischen Energie der Elektronen sein.

Es sind Messungen mit unterschiedlichen Lichtquellen (Frequenzen) durchzuführen. Es ergibt sich ein Graph, welcher einen linearen Zusammenhang zwischen der Frequenz des Lichtes und der kinetischen Energie der Elektronen nahelegt.

Es sind Messungen mit unterschiedlichen Lichtquellen (Frequenzen) durchzuführen. Es ergibt sich ein Graph, welcher einen linearen Zusammenhang zwischen der Frequenz des Lichtes und der kinetischen Energie der Elektronen nahelegt.



Diese linearen Graphen lassen sich mit folgender Funktion beschreiben:  $y = mx + b$ . Als Steigung wird  $4,17 \cdot 10^{-17} \text{ eVs} = 6,675 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  ermittelt. Dieser Wert wird  $h$  geschrieben und Plank'sches Wirkungsquantum genannt. Für die Einheitenrechnung gilt  $[h] = \frac{[E]}{[f]} = \frac{\text{J}}{\text{s}^{-1}} = \text{Js}$ .

Grundsätzlich schließt man aus diesem Experiment, dass für die Energie von Licht, genauer eines Photons, gilt:  $E_{ph} = h \cdot f$ . Hier werde die Energie dieser Photonen nun auf die Elektronen übertragen. Ein Teil der Energie der Photonen wird in kinetische Energie der Elektronen

umgewandelt. Ein Teil ist jedoch auch notwendig, um die Elektronen zunächst aus der Metalloberfläche der Zinkplatte herauszulösen. Der zuvor beschriebene lichtelektrische Effekt kann nur auftreten, wenn die Energie der Photonen mindestens der Austrittsenergie/-arbeit entspricht. In der obigen Darstellung wurde diese Austrittsarbeit als y-Achsenabschnitt von der linearen Gleichung subtrahiert. Es folgt somit als Gesamtgleichung  $E_{kin} = hf - W_A$  wobei  $W_A$  die Austrittsarbeit darstellt. Dies lässt sich noch vereinfachen zu  $E_{kin} = E_{ph} - E_A$ .

Weiter wird nun die Grenzfrequenz  $f_{Grenz}$  definiert:  $E_{kin}(f_{Grenz}) = 0$ . Sie stellt die Frequenz des Lichtes bzw. die Energie der Photonen dar, die mindestens benötigt wird, damit Elektronen herausgelöst werden können. Man kann auch schreiben:  $W_A = h \cdot f_{Grenz}$ .

## Plank'sches Wirkungsquantum

To be completed. [missing]

## Welle-Teilchen-Dualismus und Wahrscheinlichkeitsinterpretation

To be completed. [missing]

- Wellencharakter von Elektronen: Elektronenbeugungsröhre
- Streuung und Beugung von Elektronen
- De Broglie Hypothese

## Wellenfunktion

Die Wellenfunktion  $\psi$  („Psi“) beschreibt ein Quantenobjekt. Sie hat keine direkte physikalische Bedeutung. Das Quadrat ihres Betrags  $|\psi|^2$  kann jedoch als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit in einem Raumvolumen  $\Delta V$  um eine Koordinate  $\vec{r}$  zum Zeitpunkt  $t$  wird folgendermaßen beschrieben:  $|\psi(\vec{r}, t)|^2 \cdot \Delta V$

Wird nur die Wellenfunktion  $\psi(x)$  angegeben, handelt es sich um einen zeitunabhängigen stabilen Zustand. Die Wellenfunktionen stationärer Zustände lösen die zeitunabhängige Schrödinger-

Gleichung  $\psi''(x) + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E_{ges} - E_{pot})\psi(x) = 0$ , eine Differentialgleichung 2. Ordnung.

## Linearer Potenzialtopf

Der lineare Potenzialtopf dient der Beschreibung des Aufenthalts eines Teilchens in einem gewissen Raum. Zur Vereinfachung wird nur eine eindimensionale Betrachtung durchgeführt. Auf Grund dieser radikalen Vereinfachung können z. B. für Atome, welche selbstverständlich dreidimensional sind, keine sinnvollen Aussagen getroffen werden. Stattdessen dient der lineare Potenzialtopf eher zur Verdeutlichung des Prinzips. Alternativ zu einem Atom kann z. B. auch ein Molekül betrachtet werden, in welchem sich Elektronen bewegen können. Das Potenzialtopfmodell versucht (indirekt) die Antreffwahrscheinlichkeit von Elektronen entlang der Ausdehnung des Moleküls zu beschreiben.

Befindet sich ein Teilchen, meist Elektron, in einem Potenzialtopf der Länge  $a$  wird angenommen, dass das Teilchen immer in  $a$  sein muss. Weiterhin wird gesagt, dass innerhalb des Topfes keine Kräfte auf das Teilchen wirken. Es gelten  $E_{ges} = E_{kin}$  und  $E_{pot}(0) = E_{pot}(a) = 0$  und das Teilchen bewegt sich kräftefrei. An den Grenzen des Potenzialtopfes bei  $x = 0$  und  $x = a$  wird  $E_{pot} = \infty$ , also  $E_{pot}(0) = E_{pot}(a) = \infty$ .

Folgende Gleichung löst die Schrödinger-Gleichung für den oben beschriebenen eindimensionalen linearen Potenzialtopf mit unendlich hohen Wänden:  $\psi_n(x) = A \cdot \sin(k_n \cdot x)$  mit

$$a = \sqrt{\frac{2}{a}}, k_n = \frac{n\pi}{a} \text{ und } n = 1, 2, \dots, n \text{ ist die Quantenzahl.}$$

Ein Teilchen im Potenzialtopf wird durch eine Wellenfunktion  $\psi$  beschrieben. Im einfachsten Fall sind diese zeitunabhängig und somit stationär. Dies gilt vereinfachend z. B. für Atome. Damit stationäre Zustände erklärt werden können, wird angenommen, dass die Antreffwahrscheinlichkeit an bestimmten Orten zeitunabhängig Maximal oder Minimal sein muss. Dies ist durch stehende

Wellen gegeben, wie in der Lösung obigen der Schrödingergleichung  $\psi_n(x)$  bereits dargestellt. An den Knoten ist die Teilchenaufenthaltswahrscheinlichkeit null und an den Bäuchen maximal. Die Zahl der Knoten und Bäuche nimmt mit wachsendem  $n$  zu.

Damit auf der Länge  $a$  eine stehende Welle entsteht, muss für die Wellenlänge  $\lambda$  gelten  $a = n \frac{\lambda_n}{p}$ .

Mit  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Die Wellenlänge ist über die De-Broglie-Beziehung mit dem Impuls verknüpft  $\lambda_n = \frac{h}{p_n}$ . Für die kinetische Energie des Elektrons gilt  $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p_n^2}{2m}$  mit  $p = mv$ . Durch

Einsetzen folgt:  $E_n = E_{kin} = \frac{n^2 h^2}{8ma^2}$ . Diese Gleichung ergibt sich auch durch Einsetzen von  $\psi_n(x)$  in die Schrödingergleichung.

Für den Grundzustand  $n = 1$  gilt die von null verschiedene Energie, die sogenannte Nullpunktenergie  $E_1 = \frac{h^2}{8ma^2}$ .

Es wird deutlich, dass die Energiezustände im Potenzialtopf in Abhängigkeit von der Hauptquantenzahl  $n$  gequantelt sind. Eine Energieänderung  $\Delta E = E_m - E_n = \frac{h^2}{8ma^2}(m^2 - n^2)$  kann durch Absorption oder Emission geschehen.

Dabei gilt, dass jeder Energiezustand maximal von zwei Teilchen eingenommen werden kann.

Ein auf der Länge  $a$  eingeschlossenes Teilchen der Masse  $m$  besitzt die diskreten Energieniveaus  $E_n = \frac{h^2}{8ma^2}n^2$  mit  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Die Quantelung der Energie ergibt sich aus dem Wellenmodell.

Im Potenzialtopf führt die Aufnahme bzw. Abgabe des Energiebetrags  $\Delta E$  zu einer Zustandsänderung  $\Delta E = E_m - E_n = \frac{h^2}{8ma^2}(m^2 - n^2)$ .

Das Potenzialmodell kann verbessert werden, indem ein eindimensionaler Potenzialtopf der Breite  $a$  mit endlich hohen und endlich dicken Wänden betrachtet wird. Teilchen, deren Gesamtenergie über der Topfkante des Potenzialtopfs liegt, können sich im gesamten Ortsbereich bewegen. Es handelt sich um freie Teilchen.

Gebundene Teilchen können den Topf als klassische Teilchen nicht verlassen. Ihre Gesamtenergie ist geringer als die potenzielle Energie der Kante. Aber die quantenmechanischen Zustandsfunktionen besitzen hinter bzw. an den endlich hohen Wänden keine Knoten. Somit ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit dort zwar gering, jedoch nicht null. Das Eindringen eines Quantenteilchens in die Wand bzw. das Verlassen des Topfes wird als Tunneleffekt bezeichnet. Dieser Effekt ist vor allem für den  $\alpha$ -Zerfall der radioaktiven Strahlung relevant.

## Quantenphysik und klassische Physik

- Versagen der klassischen Physik

# Mikroobjekte und Quantentheorie

# Atom-, Kern-, und Elementarteilchenphysik

---

## Größen

- $A$  (Massenzahl)
- $Z$  (Protonen-, Kernladungs-, Ordnungszahl)
- $N$  (Neutronenzahl)
- $E_{H,1} = -2,18 \cdot 10^{-18} J = -13,6 eV$  (Grundzustandsenergie Wasserstoffatom)
- $\frac{E_B}{A}$  (spezifische Bindungsenergie)
- $R = \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3} = 3,2898 \cdot 10^{15} Hz$  (Rydberg Frequenz)
- $[A] = 1 Bq = \frac{1}{1s}$  (Aktivität: Becquerel)

## Formeln

- $L_n = n \frac{h}{2\pi}$  mit  $n = 1, 2, 3, \dots$  (erstes Bohr'sches Postulat)
- $\Delta E_{m,n} = E_m - E_n = hf$  (zweites Bohr'sches Postulat)
- $L = r_n m_e v_n$  (Bahndrehimpuls)
- $E_n = -\frac{1}{8} \frac{m_e e^4 Z^2}{\epsilon_0^2 h^2 n^2} = E_1 \cdot \frac{1}{n^2} = -R \cdot h \cdot \frac{1}{n^2}$  (Energieniveau für eine Quantenzahl  $n$ )
- $\Delta E = \frac{m_e e^4 Z^2}{8 \epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$  (Energieänderung bei Bahnänderung von  $m$  auf  $n$  beim Bohr'schen Atommodell)
- $f = C \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)$  (Balmer-Serie)
- ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 H^{2+} + \gamma$  ( $\alpha$ -Strahlung)
- ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e + \nu_e$  ( $\beta^+$ -Strahlung)
- ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}_e$  ( $\beta^-$ -Strahlung)
- ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z x + \gamma$  ( $\gamma$ -Strahlung)
- ${}^A_Z X + {}^0_{-1} e \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$  (Electron Capture)
- $N(t) = N(0) \cdot \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$  (Zerfallsgesetz)
- $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} = -\frac{\ln(\frac{1}{2})}{T_{1/2}}$

$$A = \left| \frac{\Delta A}{\Delta t} \right| = |\dot{N}| \text{ (Aktivität)}$$

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) \text{ (Aktivität und Zerfall)}$$

# Atomaufbau

## Grundlagen

### Nukleus

... ist der Kern eines Atoms.

### Nuklid

... beschreibt eine bestimmte „Konfiguration“ eines Nukleus. Er ist charakterisiert durch die Anzahl von Protonen und Neutronen. Ein Nuklid wird durch die Schreibweise  ${}^A_Z X$  angegeben.  $X$  ist das Elementsymbol.  $Z$  ist die Protonenzahl, auch Ordnungszahl genannt. Und  $A$  ist die Massenzahl. Mit der Neutronenzahl  $N$  gilt:  $A = Z + N$ .

Die Anzahl der Protonen kann gerade oder ungerade sein. Die Kombination dieser Zahlen führt zu unterschiedlichen Eigenschaften des Nuklids. Es wird zwischen folgenden Nuklidtypen unterschieden: *gg*, *gu*, *ug* und *uu*.

### Nukleon

... ist der Sammelbegriff für die Bestandteile des Nukleus: Protonen und Neutronen. Sie bestehen wiederum aus kleineren Elementarteilchen, den Quarks.

### Isotop

... bezeichnet eine Variation eines Atoms, wobei sich die Neutronenzahl  $N$  unterscheidet. Als Varianten des Wasserstoffs existieren z. B. Protium  ${}^1_1 H$ , Deuterium  ${}^2_1 H$  und Tritium  ${}^3_1 H$ .

### Isobar

... bezeichnet Nuklide mit der gleichen Massenzahl  $A$ .

### Ion

... bezeichnet ein Atom, welches Elektronen abgegeben hat und nun positiv geladen ist. Hat es Elektronen aufgenommen und ist nun negativ geladen, heißt es Anion.

## Atommodelle

Atome wurden früher als die kleinsten Bestandteile der Materie angenommen. Heute wissen wir, dass es noch kleinere Bestandteile gibt. Die folgenden Modelle wurden zur Erklärung experimentell beobachteter Eigenschaften aufgestellt. Nach neuen Erkenntnissen wurden die Modelle immer wieder angepasst.

### Demokrit Modell (5. Jhdt. v. Chr.)

Annahme, dass kleine Festkörper - die Atome - unsere Materie formen würden.

### Dalton Modell (1808)

Es gebe unteilbare Elementarteilchen - die Atome - mit einer spezifischen Masse. Die Eigenschaften dieser seien ursächlich für die Eigenschaften chemischer Reaktionen.

### Thomson'sches Modell (1904)

Es wurde postuliert, dass Atome teilbar sind. Sie bestünden aus Elektronen und positiven Ladungen, welche gleichmäßig im Atom verteilt seien. Nach außen hin ist das Atom so neutral geladen. Die negativen Ladungsträger sind in die positiven eingebettet. Auch die Masse ist gleichmäßig verteilt. Das Modell wird auch Rosinenkuchenmodell genannt.

### planetarisches Modell (1904)

Ähnlich der Konstellation von Planeten, sei eine positive Kugel von Elektronen umgeben. Der Kern sei im Vergleich zur den Elektronen massereich. Die Elektronen würden Energie abstrahlen.

### Rutherford Modell (1911)

Es existiere ein kleiner, positiver, massereicher Atomkern. Um diesen befinde sich eine Hülle von Elektronen.

### Bohr'sches Modell (1913)

Die Annahme eines positiv geladenen, massereichen Kernes wird übernommen. Als Ergänzung würden sich die Elektronen allerdings auf Kreisbahnen bewegen, wodurch die Energieniveaus der Elektronen gequantelt sei. Denn jede Bahn entspreche einem bestimmten Energieniveau.



### Orbitalmodell (1928)

Das Orbitalmodell folgt aus der Schrödinger-Gleichung. Bedingt durch Umgebungsfaktoren (Kernkräfte, Anziehung von Elektron und dem positiven Kern, ...) existiert eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Position des Elektrons. Die Orbitale geben die wahrscheinlichen Aufenthaltsregionen des Elektrons an. Elektronenbahnen im Sinne des Bohr'schen Atommodells existieren nicht mehr. Die unterschiedlichen Orbitale stehen weiterhin mit unterschiedlichen Energieniveaus in Beziehung.

### Versuch: Rutherford

Beim Rutherford'schen Streuversuch strahlt ein in Bleiabschirmung geschütztes radioaktives Präparat  $\alpha$ -Strahlung auf eine dünne Goldfolie (mehrere 1000 Atomlagen dick). Die Goldfolie befindet sich mittig in einer runden Anordnung aus Detektoren für radioaktive Strahlung (Szintillationszähler). Auf Basis des Thomson'schen Atommodells wurde erwartet, dass alle  $\alpha$ -Teilchen die dünne Metallfolie unabgelenkt passieren. Entgegen der Erwartungen wurden einige wenige  $\alpha$ -Teilchen von der Folie sogar zurückgestreut.

Rutherford erklärte dies mit dem Rutherford'schen Atommodell. Durch eine Ladungs- und Massenkonzentration in der Mitte des Atoms kommt es intern zur Ladungstrennung. Nach außen bleibt das Atom jedoch neutral. Die meisten  $\alpha$ -Teilchen können die Goldfolie problemlos passieren, da der Großteil des Raumes keine Atomkerne enthält. Vereinzelt können die  $\alpha$ -Teilchen jedoch auf Atomkerne treffen und werden von diesen abgelenkt. Die Nähe am Kern bestimmt dabei die Stärke der Ablenkung. So können auch  $180^\circ$  Ablenkungen erklärt werden.

### Kern Hülle Modell - Bohr'sches Atommodell

Das Bohr'sche Atommodell ist eine Ergänzung zum Rutherford'schen Atommodell, um die Energiequantelung der Elektronen und die Stabilität der Atome zu erklären. Ist historisch gesehen das erste Modell, welches sich von einer rein klassischen Sichtweise löst. Es können mit ihm viele physikalische Phänomene erklärt werden, aber es widerspricht der Quantenphysik, in der der Bahnbegriff keinen Sinn ergibt.

Das erste Bohr'sche Postulat ist die Quantenbedingung. Es besagt, dass sich Elektronen nur auf bestimmten stationären Kreisbahnen mit festgelegten Radien um den Kern strahlungsfrei bewegen. Jede Bahn entspricht einem Energieniveau, welches sich aus der kinetischen Energie des Elektrons und der potenziellen Energie des Elektron-Atomkern-Systems zusammensetzt. Nahe am Kern ist die kinetische Energie des Elektrons groß, die potenzielle Energie jedoch um ein Vielfaches kleiner. Entfernt vom Kern ist die kinetische Energie gering, die potenzielle Energie jedoch um ein Vielfaches größer. Somit haben Bahnen näher am Kern ein geringeres Energieniveau. Die Bahnen sind durch den Bahndrehimpuls  $L = r m_e v$  bestimmt. Er kann nur ganzzahlige Vielfache von  $\frac{h}{2\pi}$  annehmen:  $L_n = n \frac{h}{2\pi}$ .  $n$  ist die Quantenzahl und bestimmt die Bahn.

Das zweite Bohr'sche Postulat ist die Frequenzbedingung. Da nur stationäre Bahnen erlaubt sind, müssen Übergänge der Elektronen zwischen diesen zur Aufnahme bzw. Abgabe bestimmter Energiebeträge führen. Allgemein gilt, dass beim Übergang eines Elektrons von einer stationären Bahn mit der Quantenzahl  $m$  und der Energie  $E_m$  zu einer anderen mit der Quantenzahl  $n$  und der Energie  $E_n$  der Energiebetrag  $\Delta E_{m,n} = E_m - E_n$  emittiert oder aufgenommen wird. Für die Emission eines Photons bei einem Bahnübergang gilt:  $\Delta E_{m,n} = hf$ .

Die Energie  $E_n$  eines Atoms mit einem Elektron auf einer Bahn  $n$  ist die Summe aus kinetischer und potenzieller Energie  $E_n = E_{kin} + E_{pot}$

Für  $E_{kin}$  gilt  $E_{kin} = \frac{1}{2} m_e v_n^2$ .

Für  $E_{pot}$  gilt  $E_{pot} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r_n} = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$  mit  $Q_1 = -e$  und  $Q_2 = Ze$  für verschiedene Kernladungszahlen  $Z$ .

Um  $E_n$  zu bestimmen, müssen  $v_n$  und  $r_n$  ermittelt werden.

Für eine Kreisbahn des Elektrons mit dem Radius  $r$  und der Geschwindigkeit  $v$  ist eine Zentripetalkraft  $F_z = m_e v^2 / r$  erforderlich. Diese Kraft entspricht der Coulombkraft  $F_C = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ .

Somit:

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \Rightarrow r m_e v^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0}$$

Nach dem ersten Bohr'schen Postulat gilt  $r_n m_e v_n = L = n \frac{h}{2\pi}$ . Somit:

$$L v_n = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \Rightarrow v_n = \frac{Ze^2}{2\epsilon_0 h n}$$
 mit  $n = 1, 2, 3, \dots$

Und

$$r_n = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2 Z^2} n^2 \text{ mit } n = 1, 2, 3, \dots$$

Es folgt weiter:  $E_{kin,n} = \frac{1}{2} m_e \frac{Z^2 e^4}{4\epsilon_0^2 h^2 n^2} = \frac{m_e e^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$  mit  $n = 1, 2, 3, \dots$

Nun kann auch  $E_{pot,n}$  berechnet werden:  $E_{pot,n} = -\frac{m_e e^4 Z^2}{4\epsilon_0^2 h^2 n^2}$ .

Für  $E_n$  gilt  $E_n = \frac{1}{8} \frac{m_e e^4 Z^2}{\epsilon_0^2 h^2 n^2} - \frac{1}{4} \frac{m_e e^4 Z^2}{\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{1}{8} \frac{m_e e^4 Z^2}{\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = E_1 \cdot Z^2 \cdot \frac{1}{n^2}$

Werden die Werte von  $E_n$  für  $n = 1, 2, 3, \dots$  entlang der  $y$ -Achse eines Diagramms aufgetragen, entsteht ein Energieniveauschema.

Die Emission eines Photons bedeutet nun, dass das Atom von einem Zustand mit hoher Energie  $E_m$  in einen Zustand geringer Energie  $E_n$  mit  $m > n$  wechselt und dabei die Energie  $\Delta E = E_m - E_n$  mit einem Photon emittiert:

$$\Delta E = \frac{m_e e^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R \cdot h \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Mit  $hf = \Delta E$  gilt für  $f$ :

$$f = \frac{m_e e^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Wichtig ist, dass die obigen Beschreibungen nur für Atome mit einem Elektron gelten. Bei Mehrelektronenatomen wird die Energie durch die Hauptquantenzahl  $n$  und in geringem Maße durch die Nebenquantenzahl  $l$  bestimmt. Statt  $Z$  ist dann mit der effektiven Kernladungszahl  $Z_{eff}$  zu rechnen.

### Wasserstoffatom

Für Wasserstoff mit  $Z = 1$  gelten folgende spezifischen Formeln/Gesetzmäßigkeiten.

Der Bohr'sche Radius  $r_1 = 5,29 \cdot 10^{-11}m$ .

$$E_n = -\frac{1}{8} \frac{m_e e^4}{\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -13,6eV \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$E_1 = -2,18 \cdot 10^{-18}J = -13,6eV$$

Die Formel für  $f$  hat dieselbe Struktur wie die Balmer-Formel des Wasserstoffspektrums  $f = C \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ . Die oben gefundene Formel für  $f$  zeigt für  $n = 2$  nicht nur die gleiche Form,

sondern liefert auch genau die beobachteten Frequenzen der Balmer-Serie des Wasserstoffs.  $C$  wird in der Balmer-Formel Rydberg-Konstante  $R$  genannt. Mit obiger Formel lässt sie sich auch

$$\text{aus Naturkonstanten berechnen: } R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} = 3,2898 \cdot 10^{15} Hz.$$

### **Versuch: Franck-Hertz**

Das Ziel des Franck-Hertz Versuches ist der Nachweis der Energiequantelung der Hüllenelektronen von Atomen, wie durch das Bohr'sche Atommodell postuliert.

#### Aufbau

Es wird eine Gasröhre betrachtet: Eine mit Gas gefüllte geschlossene Glasröhre. An einem Ende befindet sich ein Glühwendel. Am anderen Ende befindet sich ein Auffänger. Näher am Auffänger ist zwischen beiden Komponenten ein Gitter eingebaut. An der Glühwendel liegt eine Heizspannung an. Zwischen dem Glühwendel, auch Kathode genannt, und dem Gitter liegt eine Beschleunigungsspannung an. Zwischen dem Gitter und dem Auffänger liegt eine entgegengesetzte und deutlich kleinere Gegenspannung an. Sämtliche Ströme und Spannungen werden gemessen.

#### Durchführung

Zum Beginn wird die Gegenspannung auf einen festen Wert eingestellt, z. B. 1 V. Die Heizspannung wird ebenfalls eingeschaltet, sodass Elektronen aus dem Glühwendel austreten. Sie wird nicht mehr verändert. Ebenfalls muss auf eine geeignete Temperatur in der Röhre für den richtigen Dampfdruck geachtet werden. Dieser ist Materialabhängig. Nun wird die Beschleunigungsspannung langsam von 0 V erhöht. Dabei ist in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung der Messwert des Stromes am Auffänger zu notieren. Auch sollten visuelle Veränderungen dokumentiert werden.

#### Beobachtung

Ein Beschleunigungsspannung-Strom Graph zeigt einen Anstieg der Spannung am Strommessgerät. Dieser erfolgt jedoch nicht kontinuierlich, sondern in Wellen. Bei zunehmender Beschleunigungsspannung wechselt die Spannung am Strommessgerät in regelmäßigen Abständen regelmäßig zwischen einem jeweils höheren Maximum und einem ebenfalls ansteigenden Minimum. Es gibt ebenfalls visuelle Auffälligkeiten. In der Gasröhre sind Lichtstreifen mit regelmäßigen Abständen zu beobachten. Mit höheren Beschleunigungsspannungen steigt die Anzahl der Lichtstreifen. Die Anzahl der Lichtstreifen korreliert mit der Anzahl der Maxima im oben angesprochenen Spannung-Strom Graph.

Der entstehende Spannung-Strom Graph wird auch Franck-Hertz-Kurve genannt.

#### Auswertung

Wenn sich die Elektronen auf Grund der Beschleunigungsspannung vom Glühwendel zum Gitter durch das Gas bewegen, kann es entweder zu elastischen oder inelastischen Stößen kommen. Bei elastischen Stößen verlieren die Elektronen im Regelfall keine Energie. Bei inelastischen Stößen gibt das Elektron genau die Anregungsenergie der Gasatome ab.

Bei geringen Beschleunigungsspannungen reicht die Elektronenenergie nicht aus, damit diese Energie an die Gasatome abgeben können. Somit steigt der gemessene Strom, da die Elektronen die Gegenspannung überwinden können. Dementsprechend gelten diese Beobachtungen auch erst, wenn die Beschleunigungsspannung größer als die Gegenspannung ist. Wird die Beschleunigungsspannung erhöht, wird diese Energiegrenze jedoch überschritten und die Elektronen werden durch inelastische Stöße mit Gasatomen abgebremst. Somit haben die Elektronen nicht mehr genug Energie, um die Gegenspannung zu überwinden. Der Strom fällt ab. Wird die Beschleunigungsspannung weiter erhöht, können die Elektronen nach ihrem Zusammenstoß wieder beschleunigt werden, sodass ihre Energie ausreicht, um die

Gegenspannung zu überwinden. Bei einer weiteren Erhöhung, können sie nun jedoch mehrmals mit Gasatomen kollidieren und haben nicht mehr genug Energie um die Gegenspannung zu überwinden. Diese beiden Phasen wechseln auch bei weiter steigenden Beschleunigungsspannungen. Die Anzahl der Lichtstreifen hängt mit der Anzahl der Möglichen inelastischen Stöße zusammen, da jeder Lichtstreifen eine Zoner inelastischer Stöße anzeigt. Dies erklärt die Beziehung zwischen der Anzahl der Maxima und der Anzahl der Lichtstreifen.

Insgesamt ist somit gezeigt, dass die Energie der Hüllenelektronen von Atomen gequantelt ist. Sie können, wie durch die Maxima und Minima sowie Lichtstreifen angezeigt, nur bestimmte Energiepakete aufnehmen.

#### Berechnung

Die Energiedifferenz bzw. Anregungsenergie der Elektronen kann aus der Spannungsdifferenz zwischen zwei Maxima berechnet werden. Es gilt:  $\Delta E = \frac{\Delta U_B \cdot e}{N_{Maxima} - 1}$ .

### **Potenzialtopfmodell des Atomkerns**

Die Nukleonen eines Atomkernes sind bezüglich ihrer Aufenthaltsorte auf diesen beschränkt. Im Inneren des Kernes können sie sich ohne Zusammenstöße frei im Potenzial bewegen. Diese Situation entsteht durch die Kernkraft, welche die Abstoßung der Protonen aufhebt. Im inneren des Potenzials bzw. des Kernes sind die Kräfte ausgeglichen. An den Rändern des Kernes bzw. des Potenzials existieren jedoch starke Kräfte, die nach innen wirken. Dies entspricht dem Potenzialanstieg an den Wänden. Ursächlich für diese ist die stark begrenzte Reichweite der Kernkräfte. Da die Nukleonen mittels einer Wellenfunktion modelliert werden können, existieren nach dem Konzept des linearen Potenzialtopfes nur diskrete stabile Energieniveaus. Diese müssen vom niedrigsten beginnend besetzt werden. Nach dem Pauli-Prinzip für Quantenobjekte gibt es nur maximal zwei Nukleonen auf einem Energieniveau.

Der Zustand höchster Energie entspricht der Fermi-Energie  $E_F \approx 26 \text{ MeV}$ . Der Zustand niedrigster Energie entspricht der Bindungs- und Separationsenergie  $\approx -34 \text{ MeV}$ .

Die spezifische Bindungsenergie  $\frac{E_B}{A}$  ist bei voller Besetzung der Energieniveaus am größten.

Stabile Zustände sind durch eine minimale Energie gekennzeichnet. Die Emission radioaktiver Strahlung bedeutet, dass ein Nukleon in einen Zustand geringerer Energie übergeht. Die charakteristischen Energiewerte der radioaktiven Strahlung lassen sich als Übergänge zwischen den Energieniveaus deuten.

### **Orbitalmodell des H-Atoms (Potenzialtopfmodell der Atomhülle)**

Die dreidimensionale Schrödinger-Gleichung wird mit  $E_{pot} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$  (noch zu verifizieren!) gelöst.

$\psi_{nlm}(x, y, z)$  beschreibt die Elektronenzustände und ist durch die vier Quantenzahlen charakterisiert. Die Hauptquantenzahl  $n$  kennzeichnet das Energieniveau;  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Diese werden auch mit  $K, L, M, \dots$  bezeichnet. Die Neben- oder Drehimpulsquantenzahl  $l$  charakterisiert die Winkelabhängigkeit der räumlichen Verteilung der Auftreffwahrscheinlichkeit;  $l = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$ . Die entsprechenden Zustände werden auch mit  $s(l = 0), p(l = 1), d(s = 2), f(s = 3)$  etc. bezeichnet. Die Orientierungsquantenzahl oder magnetische Quantenzahl  $m$  unterscheidet winkelabhängige Auftreffwahrscheinlichkeiten bezüglich ihrer Orientierung im Raum bei gleichem Wert von  $l$ . Es gilt:  $m = -l, -(l - 1), \dots, -1, 0, 1, \dots, (l - 1)$ . Die

Spinquantenzahl  $s$  beschreibt eine Eigenschaft des Elektrons;  $s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$ .

Orbitale sind durch das Quantenzahlentripel  $(nlm)$  festgelegt. Für sie sind gewisse Aufenthaltswahrscheinlichkeiten definiert. An Knotenflächen ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit null. Ihre Anzahl wächst mit zunehmender Quantenzahl.

Häufig werden nur Atome mit einem Elektron betrachtet. Natürlich gibt es aber auch Atome mit 2 oder mehr Hüllenelektronen, diese sind durch die 4 Quantenzahlen beschrieben. Bei der Besetzung von „Elektronenpositionen“ das das Pauli-Prinzip (Ausschlussprinzip) zu beachten.

Es besagt, dass in einem Atom keine zwei Hüllelektronen in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen dürfen.

Zu jeder Hauptquantenzahl  $n$  existieren somit  $2n^2$  Zustände.

## Energieniveaudiagramm

Ein Energieniveaudiagramm dient der Darstellung von Energieänderungen, z. B. von Elektronen eines Atomes. Auf der  $y$ -Achse wird die Energie eingetragen. Die  $x$ -Achse kann Größen wie den Raum oder die Zeit abbilden. Sie muss allerdings keine Größe darstellen, sodass mehrere Energieänderungen parallel betrachtet werden können.

## Spektr

In Lichtquellen wird ein Stoff durch Zufuhr von Energie zur Emission von Licht veranlasst. Das Emissionsspektrum glühender fester und flüssiger Körper ist ein kontinuierliches Spektrum. Das Emissionsspektrum leuchtender Gase ist ein diskretes Spektrum, siehe „Versuch: Linienspektren“. Das Spektrum des Lichts, das atomare Gase emittieren, besteht aus einzelnen Linien, die für das jeweilige Element charakteristisch sind. Die Atome geben Energie gequantelt ab (quantenhafte Emission). Atome können die Energiequanten absorbieren, welche sie auch emittieren. Die Energie dieser Quanten (Photonen) muss exakt übereinstimmen.

### Versuch: Linienspektren

Eine Gasentladungsröhre befindet sich mittig vor einer Messlatte, auf welche in einem festen Abstand eine Kamera ausgerichtet ist. Direkt vor der Kameralinse befindet sich ein Gitter. Auf dem Kamerabild finden sich senkrechte Striche. Diese variieren je nach Gas in der Gasentladungsröhre bezüglich Anzahl, Farbe und Position. Die Verortung einer Farbe hängt jedoch fest mit der Position auf dem Bild zusammen.

Wie bereits bekannt, treten an Gittern bei Quantenobjekten Interferenzeffekte auf. Licht wird in seine einzelnen Frequenzen aufgespalten. Das Kamerabild zeigt also die einzelnen Bestandteile des Lichtes einer Gasentladungsröhre. Allgemein lässt sich sagen, dass Spektrallinien scharf voneinander getrennte Linien des elektromagnetischen Spektrums sind. Ein bestimmtes Spektrum, auch Linienspektrum genannt, setzt sich aus verschiedenen Spektrallinien zusammen.

Das Auftreten von Linienspektren kann mit dem Bohr'schen Atommodell erklärt werden. In einer Gasentladungsröhre werden durch hohe Spannungen die Elektronen der Atome mit Energieaufwand auf andere Bahnen versetzt. Da diese Zustände jedoch instabil sind, fallen die Elektronen wieder zurück. Dabei geben sie abhängig von der Energiedifferenz der Bahnen gequantelt Energie in Form von Lichtquanten frei. Dies entspricht den unterschiedlichen Frequenzen auf dem Kamerabild, da bereits die Analogie zwischen der Frequenz von Licht und dem Energiebetrag der einzelnen Lichtquanten bekannt ist. Da die Belegung der Bahnen bei verschiedenen Atomen unterschiedlich ist, unterscheidet sich auch die emittierte Energie hinsichtlich Frequenz-/Farbverteilung.

Für die Spektren des Wasserstoffatoms fand Johann Jakob Balmer eine Formel, welche die Wellenlängen der Spektrallinien beim Wasserstoff zu berechnen gestattet. Die Formel lautet

$$f = C \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ wobei } C \text{ die Rydberg-Konstante } R \text{ mit } R = 3,2898 \cdot 10^{15} \text{ Hz ist. Für}$$

$n = 3, 4, 5, 6$  lassen sich mit der Beziehung  $\lambda = \frac{c}{f}$  die Wellenlängen der sichtbaren Spektrallinien

des Wasserstoffs berechnen. Die Serie dieser Linien heißt nach ihrem Entdecker Balmer-Serie.

Wird der Wert 2 in der Formel durch  $n$  ersetzt, lässt sich für  $n = 1$  die Lyman, für  $n = 3$  die Paschen, für  $n = 4$  die Brackett und für  $n = 5$  die Pfund-Serie benennen.

### Resonanzabsorption

Die Resonanzabsorption bezeichnet die für ein Atom charakteristische Absorption bestimmter Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums. Wird ein Stoff (meist Gas) mit weißem Licht - also Photonen - bestrahlt, kann dieses Licht die Elektronen der Atome des Stoffes anregen und auf eine höhere Bahn heben. Aufgrund seiner Bahnkonfiguration absorbiert ein Atom jedoch nur das zu den Energieniveaus der Elektronen passende Licht. Aus dem einfallenden Licht wird so das für das Atom charakteristische Linienspektrum absorbiert. Es entsteht ein Absorptionsspektrum. Das Linienspektrum bei Absorption und Emission ist auf Grund des gleichen zu Grunde liegenden Prozesses identisch.

Es muss hinzugefügt werden, dass die angeregten Elektronen wieder auf ihre alte Bahn zurückfallen. Denn der energetisch höher Zustand ist nicht stabil. Dabei wird die aufgenommene

Energie wieder abgegeben. Die Abstrahlung geschieht jedoch in alle Richtungen und kann so die Absorption des gerichteten Lichtes nicht ausgleichen.

Absorptionsspektren können z. B. In der Astronomie genutzt werden, um Elemente zu identifizieren. Wird Licht eines fernen Sternes detektiert, können in diesem ggf. Absorptionslinien festgestellt werden. Können diese Absorptionslinien auf ein Absorptionsspektrum eines bestimmten Stoffes zurückgeführt werden, kann ein Element zwischen Emission und Detektion des Lichtes identifiziert werden. Durch die Rotverschiebung kann zudem aus der Verschiebung eines Absorptionsspektrums auf die Entfernung des absorbierenden Stoffes geschlossen werden. Im Sonnenspektrum können die Fraunhofer-Linien gemessen werden, welche nach ihrem Entdecker benannt sind. Diese entstehen durch Absorption von Licht in der Atmosphäre der Sonne und der Erde. So können Rückschlüsse auf die Zusammensetzung beider Atmosphären geschlossen werden.

### **Versuch: Flammenfärbung**

Es wird ein Spektrometer (ein Gerät zur Aufzeichnung von Spektren) auf die farneutrale Flamme eines Bunsenbrenners ausgerichtet. In die Flamme des Bunsenbrenners wird eine Salzprobe eingebracht. Das Spektroskop zeigt abhängig vom Salz ein gewisses Spektrum an. Auch ein Beobachter kann eine charakteristische Farbe sehen. Die für den Beobachter sichtbare Farbe stellt die Wahrnehmung des Spektrums durch das menschliche Auge dar.

Durch die Erhitzung in der Flamme des Bunsenbrenners wird das Material der Salze thermisch angeregt, wodurch Elektronen auf eine höhere Bahn angehoben werden. Beim Zurückfallen wird der für die Bahndifferenz charakteristische Energiebetrag in Form von Spektrallinien emittiert. Diese Emission von Licht wird als Flammenfärbung detektiert.

## **Ionisierende Strahlung**

Wenn eine Strahlung Atome ionisieren kann, wird diese als ionisierende Strahlung bezeichnet.

### **Ionisation**

Ionisation beschreibt die Entfernung von Elektronen aus einem Atom. Somit ist das Elektron nachher stärker positiv geladen als vorher. In der Chemie wird das Anlagern von Elektronen an ein Atom unterschieden und als Rekombination bezeichnet. So entsteht ein negativ geladeneres Atom. Ist das Atom im Anschluss an die Ionisation positiv geladen, wird es als Ion bezeichnet. Ist es jedoch positiv geladen, wird es als Anion bezeichnet.

Die hier betrachtete Ursache für Ionisation ist die ionisierende Strahlung. Jedoch gibt es auch noch weitere Ursachen, wie die Feldionisation, Autoionisation, Stoßionisation und Temperaturionisation.

### **Dosimetrie**

Beim Strahlenschutz sind die folgenden fünf Aspekte besonders zu beachten:

- Abschirmung
- Aufenthaltsdauer verringern
- Abstand halten
- Aktivität verringern
- Aufnahme vermeiden

### **Arten ionisierender Strahlung**

Die bekanntesten Arten ionisierender Strahlung sind radioaktive Strahlung und Röntgenstrahlung. Die Röntgenstrahlung wird unten in diesem Abschnitt detailliert erläutert. Radioaktive Prozesse werden in einem folgenden Abschnitts thematisiert.

### **Detektoren**

To be completed. [missing]

#### **Geiger-Müller-Zählrohr**

#### **Nebelkammer**

### **Ablenkung im elektrischen und magnetischen Feld**

Abhängig von der Art der ionisierenden Strahlung, kann es zu einer Ablenkung im elektrischen und magnetischen Feld kommen.  $\gamma$ - und Röntgenstrahlung sind beides Photonenströme. Diese werden durch keine der beiden Feldarten beeinflusst.

$\alpha$ ,  $\beta^+$  und  $\beta^-$  Strahlung sind jedoch elektrisch geladen und besitzen eine Masse. Sie Wechselwirken also in Feldern.

### **$\alpha$ -Strahlung**

${}^4_2\text{H}^{2+}$  hat eine zweifach positive Ladung. Gleichzeitig ist die Masse mit  $4u$  jedoch relativ groß, sodass die spezifische Ladung (Ladung pro Masse) eher gering ist. Somit kommt es in einem elektrischen Feld zu einer leichten Ablenkung zu negativen Ladungsträgern. In einem magnetischen Feld ist die Kraftwirkung durch die Lorentz-Kraft bedingt. Sie wirkt orthogonal zur Bewegungs- und Feldrichtung und kann mit der rechten Hand Regel für positive Ladungsträger ermittelt werden. Zeigt das Feld aus einer Ebene heraus und bewegt sich das  ${}^4_2\text{H}^{2+}$  nach rechts, so wirkt die Kraft nach vorne. Auch hier ist die Kraft auf Grund der geringeren spezifischen Ladung kleiner als bei den anderen Strahlungsarten.

### **$\beta^+$ -Strahlung**

${}^0_{+1}e$  haben eine einfach positive Ladung und eine sehr kleine Masse. Im Vergleich zu  $\alpha$ -Teilchen, ist die spezifische Masse somit deutlich größer. Somit sind die Ablenkungseffekte ebenfalls deutlich größer. Die Richtung der Kraftwirkung ist jedoch identisch wie bei der  $\alpha$ -Strahlung, da auch eine positive Ladung vorliegt. In elektrischen Feldern also zu negativen Ladungen und in magnetischen Feldern wie oben beschrieben.

### **$\beta^-$ -Strahlung**

${}^0_{-1}e$  haben eine einfach negative Ladung und eine sehr kleine Masse. Die spezifische Ladung ist der negative Wert der  $\beta^+$ -Strahlung. Der Betrag der spezifischen Ladung ist somit ebenfalls deutlich größer als der der  $\alpha$ -Strahlung. Somit ist auch die Stärke der Ablenkung merklich größer. Durch die negative Ladung wirken die Kräfte jedoch in die entgegengesetzte Richtung. In elektrischen Feldern wirken die Kräfte zu positiven Ladungen. In einem magnetischen Feld ist die Kraftwirkung durch die Lorentz-Kraft bedingt. Sie wirkt orthogonal zur Bewegungs- und Feldrichtung und kann mit der linken Hand Regel für negative Ladungsträger ermittelt werden. Zeigt das Feld aus einer Ebene heraus und bewegt sich das  ${}^0_{-1}e$  nach rechts, so wirkt die Kraft nach hinten.

### **Laser**

Stimulierte Emission tritt auf, wenn ein Photon mit passender Energie auf ein Atom in einem angeregten Zustand trifft. Ein durch spontane Emission erzeugtes Photon stimuliert das angeregte Atom zur Emission eines Photons. Für die Funktion eines Lasers ist die Besetzungsinversion entscheidend, bei der sich mehr Atome im angeregten Zustand als im Grundzustand befinden. Durch Rückkopplung erzeugt die stimulierte Emission eine intensive und nahezu parallele und kohärente Strahlung.

### **Röntgenstrahlung**

To be completed. [missing]

- Röntgenröhre, -spektrum
- Bragg'sche Bedingung (Versuch)
- Strukturanalyse Drehkristallmethode

### **Spezifische Ionisationsvermögen**

Das spezifische Ionisationsvermögen gibt die Ionisationswirkung pro Wechselwirkungsereignis an. Die spezifische Ionisationsvermögen von  $\alpha$ -Strahlung,  $\beta$ -Strahlung und  $\gamma$ -Strahlung verhalten sich ungefähr wie  $10^4 : 10^2 : 1$ .

### **Einsatzmöglichkeiten in Medizin und Technik**

To be completed. [missing]

- Bildgebungsverfahren

## **Radioaktiver Zerfall**

### **Allgemeines**

Radioaktive Zerfälle beschreiben bestimmte Veränderungen (Zerfälle) des Nukleus von Nukliden. Für Zerfälle gilt  $\sum \text{Ruhemasse}_{\text{vorher}} = \sum \text{Ruhemasse}_{\text{nachher}} + E_{\text{kin/ph}}$ . Ein Nuklid zerfällt nicht und ist stabil, wenn keine Zerfallsreaktion möglich ist.

## Ursachen

Bei der Ursache radioaktiver Strahlung ist zwischen terrestrischer und extraterrestrischer Strahlung zu unterscheiden. Extraterrestrische Strahlung ist z. B. Höhenstrahlung. Auch ohne die Verwendung radioaktiver Präparate können radioaktive Zerfälle detektiert werden. In anderen Worten: In unserer Umgebung ist natürliche radioaktive Strahlung zu finden. Diesen Effekt nennt man den Nulleffekt. Die Stärke dieses Effekts wird durch die Nullrate, die Zählrate ohne radioaktives Präparat an einem Ort angegeben.

Ein radioaktives Präparat wird in Skizzen folgendermaßen dargestellt:



## Messung

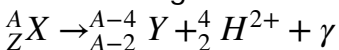
Radioaktivität wird durch die Zählrate erfasst. Sie gibt die Anzahl der detektierten Zerfälle pro Sekunde an:  $\frac{Imp}{s}$  bzw.  $\frac{1}{s}$ , wobei *Imp* für die Impulse steht. Für die effektive Zählrate bei einer Messung gilt:  $Zaehlr\ddot{a}te = Zaehlr\ddot{a}te_{gemessen} - Nullrate$

Zudem kann die Aktivität einer radioaktiven Probe angegeben werden. Die Aktivität gibt die Anzahl der Zerfälle in einer Probe in einem bestimmten Zeitintervall an. Es gilt  $[A] = 1Bq = \frac{1}{1s}$ . Eine veraltete Einheit ist Curie. Die Abnahme der Aktivität einer Probe durch Zerfall wird durch folgende Gleichung beschrieben:  $A(t) = A(0) \cdot \frac{1}{2}^{\frac{t}{T_{1/2}}}$ , wobei  $A(0)$  der Aktivität bei  $t = 0$  entspricht.

## Zerfallsarten

### $\alpha$ -Zerfall

Beim  $\alpha$ -Zerfall sendet der Nukleus  ${}^4_2H^{2+} = {}^4_2\alpha$  Teilchen mit hoher  $E_{kin}$  aus. Der Zerfallsprozess lässt sich folgendermaßen beschreiben:



Das Potenzialtopfmodell des Atomkerns erklärt, dass die Heliumkerne der  $\alpha$ -Strahlung positiv geladen sind. Sie werden vom Kern abgestoßen, sobald sie außerhalb der Reichweite der Kernkräfte sind. Sie erhalten dann kinetische Energie durch das Feld der Ladungen  $E = \frac{Q_1Q_2}{4\pi r\epsilon_0}$

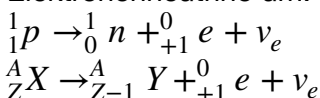
wobei  $Q_1 = 2e$  ( $\alpha$ -Teilchen) und  $Q_2 = Z \cdot e$  (Ladung des neu entstandenen Kerns). Die in echt gemessene Energie ist jedoch wesentlich kleiner. Diese Diskrepanz kann durch die Betrachtung der Heliumkerne als Quantenobjekte gelöst werden. Vereinen sich im Kern zwei Protonen und zwei Neutronen zu einem Heliumkern, so wird dabei Energie frei. Das Energieniveau ist größer als null. Für die Wellenfunktion des Heliumkerns existiert eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit außerhalb des Kerns größer null. So kann die Barriere „durchtunnelt“ werden. Der Effekt des Durchdringens einer Energiebarriere wird als Tunneleffekt bezeichnet. Heliumkerne der  $\alpha$ -Strahlung sind Quantenobjekte, sie können Energiebarrieren durchdringen.

### $\beta$ -Zerfall

Beim  $\beta$ -Zerfall muss zwischen  $\beta^+$  und  $\beta^-$  unterschieden werden.

#### $\beta^+$ -Zerfall

Beim  $\beta^+$ -Zerfall wandelt sich ein Proton im Kern in ein Neutron, ein Positron, und ein Elektronenneutrino um. Es werden das Positron und das Elektronenneutrino abgestrahlt. Es gilt:



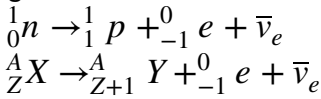
Das Potenzialtopfmodell des Atomkerns erklärt, dass unter dem höchsten besetzten Niveau der Protonen ein freies Energieniveau der Neutronen liegt. Wenn sich nun ein Proton unter



Aussendung eines Positrons (eines „positiv geladenen Elektrons“) in ein Neutron umwandelt, kann der Kern Energie abgeben. Er erreicht einen stabileren Zustand.

### $\beta^-$ -Zerfall

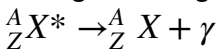
Beim  $\beta^-$ -Zerfall wandelt sich ein Neutron im Kern in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Elektronenneutrino um. Es werden das Elektron und das Anti-Elektronenneutrino abgestrahlt. Es gilt:



Das Potenzialtopfmodell des Atomkerns erklärt, dass sich unterhalb des höchsten besetzten Niveaus der Neutronen ein unbesetztes Niveau für Protonen befindet. Der Kern gibt Energie ab, wenn sich ein Neutron unter Aussendung eines Elektrons in ein Proton umwandeln kann und das freie Niveau besetzt.

### $\gamma$ -Zerfall

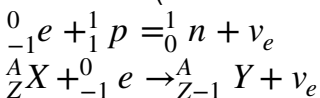
Beim  $\gamma$ -Zerfall wird hochenergetische elektromagnetische Strahlung abgegeben. Dabei verändern sich  $A$ ,  $Z$ ,  $N$  und  $X$  des Nuklids nicht. Der Energiezustand verändert sich jedoch. Der  $\gamma$ -Zerfall ist häufig eine Begleiterscheinung von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfall.



Das Potenzialtopfmodell des Atomkerns erklärt, dass ein Neutron oder Proton aus einem höheren Energiezustand in freies, energetisch tieferes Niveau übergeht. Dabei wird  $\gamma$ -Strahlung emittiert.

### Electron Capture ( $K$ -Einfang)

Als Electron Capture (EC) bzw. Elektroneneinfang wird die Fusion eines Elektrons mit einem Proton beschrieben. Wie durch das Orbitalmodell für Atome erklärt werden kann, existiert für Elektronen (besonders für die der  $K$ -Schale) eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Kern. Es gilt:



### Eigenschaften

Die Eigenschaften radioaktiver Strahlung unterscheiden sich je nach Strahlungsart. Ganz allgemein gilt, dass die Zählrate mit zunehmender Entfernung von einem radioaktiven Präparat abnimmt. Zudem kann die Zählrate durch Abschirmung verringert werden. Die Effektivität der Abschirmung ist dabei durch die Dicke des Objektes, sowie das Material bedingt. Materialien mit höherer Masse bzw. Dichte schirmen besser ab. Blei eignet sich besonders gut.

Die folgende Tabelle gibt einen detaillierteren Überblick:

Eigenschaft	$\alpha$ -Zerfall	$\beta^-$ -Zerfall	$\beta^+$ -Zerfall	$\gamma$ -Zerfall
Identität	Heliumkerne	Elektronen	Positronen	Elektromagnetische Strahlung
Geschwindigkeit	Ca. 10 % von $c$	Ca. 90 % von $c$	Ca. 90 % von $c$	Lichtgeschwindigkeit $c$
Ablenkbarkeit im Magnetfeld	Nur schwer ablenkbar (relativ kleine spezifische Ladung)	Leicht ablenkbar (relativ hohe spezifische Ladung)	Leicht ablenkbar (relativ hohe spezifische Ladung)	Nicht ablenkbar
Spezifisches Ionisationsvermögen	Sehr hoch	mittel	mittel	Gering
Reichweite in Luft	Einige Zentimeter	Einige Meter	Einige Meter	Sehr weit
Abschirmung möglich durch	Papier	Einige Millimeter dickes Aluminium	Einige Millimeter dickes Aluminium	Dickes Blei
Energiespektrum	diskret	kontinuierlich	kontinuierlich	Diskret

## Zerfallsgesetz

Das Zerfallsgesetz beschreibt die Zahl  $N(t)$  der nach der Zeit  $t$  noch vorhandenen radioaktiven Kerne.  $\lambda$  ist die Zerfallskonstante.  $N(0) = N_0$ .

$$N(t) = N(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\text{Für } t = T_{1/2} \text{ gilt auch } \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} = -\frac{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}{T_{1/2}}$$

### Halbwertszeit

Die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  eines Nuklids gibt an, in welcher Zeit 50 % der Zerfälle geschehen. Existieren anfänglich  $N(0) = 100\%$  der potenziell zerfallenden Kerne, existieren nach  $t$  Sekunden nur noch  $N(t)$  der Kerne.

### Aktivität

Die Zahl  $\Delta N$  der Zerfälle pro Zeit  $\Delta t$ .

$$A = \left| \frac{\Delta A}{\Delta t} \right| = |\dot{N}|$$

$$[A] = \frac{1}{s} = 1Bq \text{ (Becquerel)}$$

### Zusammenhang

$$A(t) = \lambda \cdot N(t)$$

### Bestimmung der Halbwertszeit

Praktisch kann die Halbwertszeit eines Nuklids durch Messverfahren ermittelt werden. Da die Zahl der Zerfälle mit der Aktivität einer Probe kausal verknüpft ist, kann die Zählrate während des Zerfalls eines Elements beobachtet werden. Die Zeitspanne, über die sich die Anzahl der registrierten Impulse halbiert, ist als Halbwertszeit zu identifizieren.

Kann aus Zeitgründen (sehr lange Halbwertszeiten) nicht gewartet werden, bis 50 % der Zerfälle stattgefunden haben, kann auch festgehalten werden, welcher Anteil der Kerne nach  $t_1$  noch

vorhanden ist. Sie der Anteil  $i$  nach dem Zeitintervall  $\Delta t$  noch vorhanden, so gilt:  $i = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{\Delta t}{T_{1/2}}}$ .

Diese Gleichung kann gelöst werden zu:  $T_{1/2} = \frac{\Delta t}{\log_{\frac{1}{2}}(i)}$

### Altersbestimmung: C14-Methode

Wahrscheinlich nicht prüfungsrelevant.

### Nuklidkarte

In der Nuklidkarte werden die bekannten Nuklide dargestellt. Sie enthält mehr Informationen und Bestandteile als das Periodensystem. Entlang der vertikalen Seite ist die Ladungszahl  $Z$  aufgetragen, welche unten geringer als oben ist. Entlang der horizontalen Seite ist die Neutronenzahl  $N$  aufgetragen, welche rechts größer als links ist. Somit sind alle Nuklide eindeutig zu verorten. Neben  $N$  und  $Z$  können auch  $A$ ,  $X$ ,  $T_{1/2}$ , Abstrahlungsenergien, Zerfallsart und die Wahrscheinlichkeitsverteilung bei mehreren Zerfallsarten abgelesen werden. Besonders hervorzuheben ist, dass stabile Elemente ebenfalls eingetragen und entsprechend (farblich, meist schwarz) gekennzeichnet sind. Eine Zeile enthält Isotope. Dies sind durch ihre identische Kernladungszahl charakterisiert.

Bei allen bekannten Nukliden kann eine Krümmung des Streifens erkannt werden, sodass es zur Abweichung von der Gerade  $N = Z$  kommt. Dies wird durch eine steigende Anzahl von Neutronen zur Kompensation einer steigenden Coulombkraft bei steigender Protonenzahl verursacht.

## Zerfallsreihen und -gleichungen

Die Zerfallsgleichungen wurden bereits bei den jeweiligen Zerfällen oben aufgeführt. Zerfallsreihen sind die Abfolge mehrere Zerfälle. Zunächst kann die Zerfallsgleichung für ein Ausgangs-Nuklid angegeben werden. Im Anschluss kann die Zerfallsgleichung für das resultierende Nuklid angegeben werden. Dieser Prozess kann wiederholt werden, bis ein stabiles Element erreicht wird. Eine solche Abfolge nennt sich Zerfallsreihe.

## Kernspaltung und Kernfusion

To be completed. [missing]

## Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen

To be completed. [missing]

- Elementarteilchen
  - Kernbausteine: mit Standardmodell Aufbau, Quarks, Effekte
  - Kernkräfte: Austauschteilchen vs. Felder (Feynman-Graphen)
  - Teilchenumwandlungen: Unschärferelation, Energie-Masse-Äquivalenz
  - Aktuelle Forschung & Fragen: Higgs-Teilchen, Dunkle Materie, dunkle Energie

# Methodik

---

## **Schreiben eines Versuchsprotokolls**

To be completed. [missing]

## **Anfertigen einer Zeichnung eines elektrischen**

## **Schaltkreises**

To be completed. [missing]