

ABITURSTOFF

PHYSIK

ELEKTROSTATIK

MAGNETISCHES FELD

ELEKTROMAGNETISCHE SCHWINGUNGEN

OPTIK

RELATIVITÄTSTHEORIE

WÄRMELEHRE

ATOMPHYSIK

KERNPHYSIK

Elektrostatik.....	5
Physikalische Größen, Definitionen und Gesetze der Elektrizitätslehre.....	5
Elektrische Stromstärke und elektrische Ladung.....	5
Kondensator.....	6
Die elektrische Feldstärke.....	7
Arbeit im elektrischen Feld.....	7
Das elektrische Potential.....	8
Spannung und Potentialdifferenz.....	8
Elektrische Verschiebungsdichte.....	8
Das radialsymmetrische Feld – das Cloulombsche Gesetz.....	8
Materie im elektrischen Feld.....	9
Energie im elektrischen Feld.....	9
Faradayschen Gesetze der Elektrolyse.....	10
Millikansche Öltröpfchenversuch – Elementarladung.....	10
Bewegung von Elektronen im homogenen elektrische Feld.....	11
Das magnetische Feld.....	13
Wichtige Begriffe.....	13
Kraft auf stromdurchflossene Leiter.....	13
Kraft auf bewegte Ladungsträger.....	13
Elektromagnetische Induktion – 1. Teil.....	13
Halleffekt.....	13
Bewegung geladener Teilchen im homogenen Magnetfeld.....	13
- Fadenstrahlrohr.....	13
- Zyklotron.....	14
Magnetfelder langer Spulen.....	15
Die elektromagnetische Induktion – 2. Teil.....	15
Das Lenzsche Gesetz.....	15
Wechselstrom.....	16
Selbstinduktion.....	16
Induktivität.....	16
Kondensator und Spule.....	17
Energiedichte.....	17
Elektromagnetische Schwingungen und Wellen.....	18
Wechselstromkreis.....	18
Elektromagnetischer Schwingkreis.....	19
Erzwungene ungedämpfte Schwingungen.....	19
Elektromagnetische Dipolschwingung.....	20
Elektromagnetische Strahlung.....	21
Wellennatur der elektromagnetischen Strahlung.....	21
Mikrowellen (Zentimeterwellen).....	22

Optik.....	24
Beugungs- und Interferenzversuche mit Licht.....	24
- Zweiquelleninterferenz - Versuch von Pohl.....	24
Mehrfachspalt – optisches Gitter.....	25
Polarisation.....	26
Das elektromagnetische Spektrum.....	26
- Röntgenstrahlung.....	27
Relativitätstheorie.....	28
Grenzgeschwindigkeit.....	28
Relativistischer Impuls – Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse.....	28
Relativistische Energie – Äquivalenz von Masse und Energie.....	28
Wärmelehre.....	30
Grundlagen/ -begriffe.....	30
Molekülgröße und Avogadrokonstante.....	30
Ideales Gas.....	31
- Versuch von Stern.....	33
Atomphysik.....	34
Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt).....	34
Lichtquanten-Hypothese.....	35
Compton-Effekt.....	36
Materiewelle.....	37
- Interferenz bei Elektronenstrahlen (Davisson/Germer).....	37
- Die de-Broglie-Wellenlänge.....	37
- Debye-Scherrer-Streuung.....	38
- Möllenstedt-Versuch.....	38
Dualismus Welle-Teilchen.....	38
- Versuch von Taylor.....	38
Das Heisenbergsche Unschärfeprinzip/ -relation.....	39
Entwicklung der Atommodelle.....	39
Quantenhafte Emission und Absorption.....	40
- Serienformel des Wasserstoffspektrums.....	41
- Termschema.....	41
- Franck-Hertz-Versuch.....	41
Das Atommodell von Bohr.....	42
Quantenmechanisches Atommodell.....	44
Belege für den Schalenaufbau.....	45

Kernphysik.....	46
Grundlegende Eigenschaften.....	46
Diskrete Energiestufen.....	46
Massendefekt und Bindungsenergie.....	47
Radioaktive Strahlung.....	47
Komponenten der natürlichen radioaktiven Strahlung.....	50
Reichweite radioaktiver Strahlung.....	50
Absorptionsgesetz von β - und γ -Strahlung.....	51
Wirkung auf den Menschen.....	51
Radioaktiver Zerfall.....	52
Freie Neutronen.....	54
Kernreaktionen.....	54
Modellvorstellung der radioaktiven Zerfälle.....	56
Kernenergietechnik.....	57
Ausblick auf die Elementarteilchenphysik.....	59
Quellen.....	61

A) Elektrostatik

I. Physikalische Größen, Definitionen und Gesetze der Elektrizitätslehre

1. Kirchhoffschen Gesetze (FS S.39f)

- $R = \frac{U}{I}$

- $R = \zeta \cdot \frac{l}{A}$

(1) Parallelschaltung - Knotenregel: $I = I_1 + I_2 + I_3$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

(2) Reihenschaltung: Maschenregel: $U = U_1 + U_2 + U_3$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

2. Stromarbeit und elektrische Leistung (FS S.39f)

(1) $W_{el} = U \cdot I \cdot t$

(2) $Q = I \cdot t$

(3) $W_{el} = U \cdot Q$

(4) $P_{el} = \frac{W_{el}}{t}$ (FS S.13)

(5) $P_{el} = U \cdot I$

II. Elektrische Stromstärke und elektrische Ladung

1. Stromstärke als Basisgröße

(1) Einheit (FS S.77)

(2) Gleichheit

(3) Vielfachheit

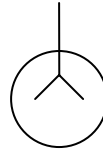
2. Die elektrische Ladung als abgeleitete Größe

(1) Definition (FS S.39)

(a) $Q = I \cdot t$

$$(b) \Delta Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

(2) Messung



- (a) Elektrometer
- (b) Galvanometer
- (c) Messverstärker

(3) Eigenschaften

- (a) Leitung sitzt auf der äußeren Oberfläche
- (b) Elektrischer Strom ist fließen elektrischer Ladung
- (c) Elektrische Influenz bei Leitern: Ladungstrennung in Doppelplatten
- (d) Elektrische Influenz bei Nichtleitern: Ladungsverschiebung

III. Kondensator

1. Definition

Eine Anordnung aus zwei isoliert aufgestellten Leitern. (Sonderfall: zweiter Leiter ist die Erde)

2. Kapazität (FS S.43f)

(1) Definition: $C = \frac{Q}{U}$, Einheit: $[C] = 1 \frac{As}{V} = 1 \text{ F (Farad)}$

(2) Abhängigkeit von den Abmessungen: $C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$

ϵ_0 elektrische Feldkonstante/ absolute Dielektrizitätskonstante

(3) Schaltungen (FS S.44)

(a) Parallelschaltung: $C = C_1 + C_2 + C_3$

(b) Serienschaltung: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

IV. Die elektrische Feldstärke

1. Definition:

Ein elektrisches Feld ist ein Raum, in dem auf geladene Körper Kräfte ausgeübt werden.

2. elektrische Influenz:

Ein zunächst neutraler Körper wird im elektrischen Feld zum elektrischen Dipol.

3. Feldlinien:

(1) Feldlinien statischer Felder beginnen und enden stets auf Ladungen. Die Feldlinienrichtung ist definitionsgemäß von der positiven zur negativen Ladung festgelegt. Man sagt auch: Positive Ladungen sind Quellen, negative Ladungen sind Senken des elektrischen Feldes.

(2) Auf Leitern treffen Feldlinien immer senkrecht auf.

(3) Feldlinien schneiden sich nicht.

(4) Je dichter die Feldlinien in einem Gebiet verlaufen, desto stärker ist dort die Kraftwirkung.

4. elektrische Feldstärke (Versuche mit Drehwaage): $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$; $[E] = 1 \frac{N}{As}$

Es gilt: $E = E_1 + E_2$ (FS S.45)

V. Arbeit im elektrischen Feld

1. Ergänzungen zur physikalischen Arbeit: Feldarbeit (FS S.13, S.41)

(1) Konstante Kraft: $W_{12} = \vec{F} \circ \vec{s}_{12} = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}_{12}| \cdot \cos[\angle(\vec{F}; \vec{s}_{12})]$

$$W_{12} = Q \cdot \vec{E} \circ \vec{s}_{12}$$

(2) Nicht konstante Kraft: $W_{12} = \int_{p_1}^{p_2} F(s) ds$

2. potentielle Energie: $\Delta E_p = -W_{Feld}$

VI. Das elektrische Potential

Die Potentialdifferenz der Potentiale φ_1 und φ_2 zwischen den Punkten P_1 und P_2

beträgt $\varphi_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E}(s) ds$ (FS S. 42). Wählt man einen Punkt P_0 (Bezugspunkt) mit

dem Potential $\varphi_0 = 0$, so ist das Potential aller anderen Punkte festgelegt:

$\varphi_1 = \varphi_0 + \varphi_{10}$. Das elektrische Feld kann auch durch Potentiale beschrieben werden.

Punkte gleichen Potentials liegen im Feld auf Äquipotentialflächen, diese stehen senkrecht zu den Feldlinien.

VII. Spannung und Potentialdifferenz (FS S.42)

$$1. \quad \varphi_{12} = \frac{W_{12}}{Q} = E \cdot \Delta l$$

$$2. \quad \text{Sonderfall: Wenn } \Delta l \text{ gleich dem Plattenabstand } d: \varphi_{12} = E \cdot d$$

$$3. \quad \varphi_{12} = U; \text{ Einheit: } [\varphi_{12}] = [U] = \frac{Nm}{C} = V$$

Die Potentialdifferenz zwischen zwei Kondensatorplatten ist also identisch mit der Spannung zwischen den Platten.

VIII. Elektrische Verschiebungsdichte (FS S.42f)

$$\bullet \quad D = \frac{Q_i}{A_i}$$

$$\bullet \quad \vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \text{ (Grundgleichung des elektrischen Feldes)}$$

IX. Das radialsymmetrische Feld – das Coulombsche Gesetz

1. Feldstärke im Feld einer Punktladung

Eine positive Punktladung Q_1 wird von einer Kugelschale des Radius r umgeben. Aus Symmetriegründen verteilt sich die Influenzladung auf der

Kugelfläche gleichmäßig: $D = \frac{Q_1}{4 \cdot \Pi \cdot r^2}$. Da $\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$ folgt:

$$E = \frac{Q_1}{4 \cdot \Pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}.$$

2. Kraft auf eine Punktladung (FS S.41)

Da $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$ und nur das Feld von Q_1 eine Kraft auf Q_2 ausübt, folgt:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \Pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}$$

3. Potential im radialsymmetrischen Feld (FS S.41)

Mit $\varphi_\infty = 0$ folgt: $\varphi_1 = \frac{Q_1}{4 \cdot \Pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_1}$

4. Kapazität:

Mit $C = \frac{Q}{U}$ und $E = \frac{Q_1}{4 \cdot \Pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}$ folgt durch $U_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E}(s) ds$

$$C = \frac{4 \cdot \Pi \cdot \varepsilon_0}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

Mit $r_2 \longrightarrow \infty$ folgt $C = 4 \cdot \Pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_1$

X. Materie im elektrischen Feld

Durch Einführen eines Isolators zwischen die Belege eines Kondensators wird

dessen Kapazität vergrößert: $C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$ (ε_r heißt relative

Dielektrizitätskonstante). Ebenso folgt: $E_{\text{vak}} = \varepsilon_r \cdot E_{\text{diel}}$ und daraus:

$$D_{\text{diel}} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{\text{diel}}.$$

XI. Energie im elektrischen Feld (FS S.43)

1. Energieinhalt eines geladenen Kondensators

$$W_{\text{ges}} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = \frac{Q^2}{2 \cdot C} = \frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot C$$

Mit $C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$ und $U = E \cdot d$ folgt: $W_{ges} = \frac{1}{2} \cdot E \cdot D \cdot V$

2. Energiedichte: $w_e = \frac{W_{ges}}{V} = \frac{1}{2} \cdot E \cdot D$

XII. Faradayschen Gesetze der Elektrolyse

1. $m = \ddot{A} \cdot Q$

2. Abscheidung von 1kmol eines z-wertigen Stoffes:

$$Q = z \cdot 9,6494 \cdot 10^7 C$$

Folgerung: Für die Ladung eines z-wertigen Ions ergibt sich entsprechend:

$$Q = z \cdot \frac{9,6494 \cdot 10^7 C}{N_A} = z \cdot e$$

→ Ladung: Nur ganzzahlige Vielfache von der Elementarladung e !?!

XIII. Millikansche Öltröpfchenversuch – Elementarladung

1. Versuchsaufbau

In ein mit einem Mikroskop beobachteten beleuchteten Kondensator werden mit einem Zerstäuber Öltröpfchen gebracht, dadurch werden sie geladen.

(1) Schwebemethode: Öltröpfchen werden in einem Schwebezustand gebracht, d.h. $F_{el} = G$

Nachteile:

- Kleiner Radius schwer zu sehen
- Brownsche Bewegung erschwert Schwebezustand

(2) Gleichfeldmethode: Öltröpfchen werden durch Umpolung der Spannungsquelle zum Steigen und Sinken gebracht, dabei muss die Reibungskraft $F_r = 6 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot r \cdot v^*$ (Stokessche Gesetz, FS S.30) beachtet werden.

Ansatz:

$$(a) \text{ Sinken: } F_r = G + F_{el}$$

$$(b) \text{ Steigen: } F_{el} = G + F_r$$

Ergebnis:

Alle Ladungen sind als ganzzahlige Vielfache der Elementarladung e darstellbar.

XIV. Bewegung von Elektronen im homogenen elektrische Feld

1. Parallel zu den Feldlinien

(1) Entgegengesetzt zur Feldlinienrichtung:

Das Elektron wird mit der Beschleunigung $a = \frac{F}{m} = \frac{e \cdot E}{m} = \frac{e \cdot U}{d \cdot m}$

konstant beschleunigt. Mit dem Zeit-Weg-Gesetz (analog: senkrechter

Wurf) $s(t) = v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2$ und Zeit-Geschwindigkeits-Gesetz

$v = v_0 + a \cdot t$ (FS S.11) folgt $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 + e \cdot U$ oder

$$\Delta E = e \cdot U$$

→ Beim Durchlaufen der Spannung U gewinnt das Elektron die kinetische Energie $e \cdot U$

(2) In Feldrichtung:

Das Elektron wird mit der Beschleunigung $a = -\frac{e \cdot U}{d \cdot m}$ konstant

gebremst.

2. Senkrecht zu den Feldlinien (Elektrisches Querfeld)

Es gelten folgende Gesetze (analog: waagrechter Wurf, FS S.18):

(1) Zeit-Weg-Gesetz: $x = v_0 \cdot t$ und $y = \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot t^2$

(2) Zeit-Geschwindigkeits-Gesetz: $v_x = v_0$ und $v_y = a_y \cdot t$

Mit $a = \frac{e \cdot U}{d \cdot m}$ erhält man aus 1.1 in 1.2 eingesetzt, die Bahngleichung:

$$y = \frac{e \cdot U}{2 \cdot m \cdot d} \cdot \frac{1}{v_0^2} \cdot x^2, \text{ also eine Parabelbahn.}$$

Darstellung z.B. in der Elektronenstrahlröhre (Anwendung: Oszilloskop).

B) Das magnetische Feld

I. Wichtige Begriffe:

1. Magnetische Influenz: Ferromagnetische Stoffe werden in näherer Umgebung von Magneten selbst zum Magneten.
2. Feldlinien: Nordpol - Südpol
3. Stromdurchflossener Leiter → Magnetfeld (Feldrichtung: Rechte-Faust-Regel, Daumen technische Stromrichtung [+ nach -])

II. Kraft auf stromdurchflossene Leiter

Magnetische Flussdichte: $B = \frac{F_m}{I \cdot l}$ (FS S.45) (Richtung: Rechte-Hand-Regel)

Messgerät: Hallsonde

III. Kraft auf bewegte Ladungsträger

Leiterschaukel: Durch Bewegung des Leiters wirkt eine Kraft auf den Leiter, es

fließt Strom. → Lorenzkraft: $F_L = \frac{F_m}{N} = q \cdot v \cdot B$ (FS S. 46)

IV. Elektromagnetische Induktion – 1. Teil

Es kommt durch die Lorenzkraft zu einer Ladungstrennung im Leiter, eine Spannung U wird aufgebaut. Im Gleichgewichtsfall gilt: $F_e = F_L$, d.h. eine Spannung von $U = l \cdot v \cdot B$ wird induziert, die Induktionsspannung U_{ind} .

V. Halleffekt (FS S.46)

Wir ein stromdurchflossener Leitersenkrecht zur Stromrichtung von einem Magnetfeld durchsetzt, so tritt zwischen zwei gegenüberliegenden

Anschlussstellen eine Spannung auf, die Hallspannung: $U_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot e \cdot d}$

VI. Bewegung geladener Teilchen im homogenen Magnetfeld

1. Fadenstrahlrohr – Bestimmung von $\frac{e}{m}$

(1) Versuchsaufbau: In einer sonst gut evakuierten Glasröhre befindet sich ein Wasserstoffgas sehr geringen Drucks. In die Glasröhre sind

eine Glühkathode und eine Anode mit Loch eingeschmolzen. Die Glüh elektrisch freigesetzten Elektronen werden durch die Spannung zwischen der Kathode und der Anode beschleunigt und treten durch das Loch in der Anode dahinter senkrecht zu den Feldlinien in ein Magnetfeld der Flussdichte B ein. Dort regen sie die Wasserstoffatome an, die bei der Rückkehr in den Grundzustand Licht aussenden. So wird eine Kreisbahn der Elektronen sichtbar.

(2) Ansatz: Es gilt also: $F_Z = F_L$, d.h. man kommt auf die spezifische

Ladung des Elektrons von:
$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{r^2 \cdot B^2}.$$

2. Anwendungen:

(1) Zyklotron

(a) Versuchsaufbau: Zwei halbkreisförmige, durch Schlitz getrennte und gegeneinander isolierte Metall Dosen, die sogenannten Duanden, werden von einem starken homogenen Magnetfeld senkrecht durchsetzt. Eine hochfrequente Wechselspannung erzeugt ein elektrisches Feld im Duandenzwischenraum. Geladene Teilchen, beschreiben unter dem Einfluss des Magnetfeldes in jedem Duanden einen Halbkreis und werden jedes Mal wenn sie den Duandenzwischenraum durchqueren, durch das elektrische Feld beschleunigt. Mit zunehmender Teilchengeschwindigkeit werden die Bahnradien größer. Hat ein Teilchen die gewünschte Geschwindigkeit erreicht, so kann es durch die Ablenkvorrichtung aus dem Zyklotron herausgeführt werden. Die Umlaufdauer T hängt dabei nicht von der Geschwindigkeit ab.

(b) Ansatz: $F_Z = F_L$

(2) Massenspektrometer

(a) Thomson

(b) Aston

VII. Magnetfelder langer Spulen (FS S.46)

Im Inneren einer langen Spule ist das Magnetfeld homogen (Messungen durch Hallsonde). Versuche ergeben: $B \sim I$ und $B \sim \frac{N}{l}$ (Windungsdichte), d.h.

$B = \mu_0 \frac{I \cdot N}{l}$ (μ_0 Induktionskonstante). Man bezeichnet $\frac{I \cdot N}{l}$ als magnetische

Feldstärke H , d.h. $B = \mu_0 H$.

Bei endlich langen Zylinderspulen ist diese magnetische Feldstärke etwas

komplizierter: $H = \frac{I \cdot N}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot R^2}{l^2}}}$

VIII. Die elektromagnetische Induktion – 2. Teil

Induktion tritt auch ohne Leiterbewegung auf. Man führt als neue Größe den magnetischen Fluss Φ ein, wobei gilt: $\Phi = B \cdot A$. Der induzierte Spannungsstoß

ist dann: $\int_{t_1}^{t_2} U(t) dt = -N_i \cdot \Delta \Phi$ (FS S.47)

IX. Das Lenzsche Gesetz

Der Induktionsstrom ist so gerichtet, dass er die Ursache, der er seine Entstehung verdankt, zu hemmen sucht.

Versuche

1. Thomsonscher Ringversuch
2. Waltenhofensches Pendel: Wirbelstrombremsung

X. Wechselstrom (FS S.49)

1. Erzeugung sinusförmiger Wechselspannung

Eine rechteckige Spule wird in einem homogenen Magnetfeld gedreht, man erhält die induzierte Spannung $U_i = U_0 \cdot \sin(\omega t)$ mit $U_0 = \omega \cdot \Phi$.

2. Effektivwerte

$$(1) I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

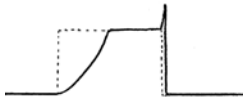
$$(2) U_{eff} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

3. Messung von Wechselströmen/ Wechselspannung

(1) Drehspulinstrumente (Gleichrichter)

(2) Hitzdrahtinstrument (Zeigerausschlag von Stromrichtung unabhängig)

XI. Selbstinduktion



Während normalerweise der Strom sofort beim Einschalten einsetzen würde, steigt der Strom langsamen an, der induzierte Strom versucht also der angelegten Spannung entgegen zu wirken. Auch beim Ausschalten tritt ein ähnliches Phänomen auf, die Spannung steigt zunächst kurz an und fällt dann rasch. Auch hier versucht die induzierte Spannung den Strom aufrecht zu erhalten.

XII. Induktivität (FS S.47f)

$$1. L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{l}; \text{ Einheit: } [L] = \frac{Vs}{A} = H \text{ (Henry)}$$

$$2. U_{ind} = -L \frac{dI}{dt}$$

$$3. \text{Reihenschaltung: } L = L_1 + L_2 + L_3$$

$$4. \text{Parallelschaltung: } \frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

XIII. Kondensator und Spule

1. Energie

$$(1) \text{ Kondensator: } W_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \text{ (FS S.43)}$$

$$(2) \text{ Spule: } W_{el} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \text{ (FS S.48)}$$

2. Ein- und Ausschaltvorgang (Diagramm: FS S.44)

$$(1) \text{ Kondensator: } I = C \frac{dU}{dt}$$

$$(2) \text{ Spule: } U_{ind} = -L \frac{dI}{dt}$$

XIV. Energiedichte (FS S.48)

$$W_{ges} = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot V = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

$$\rightarrow w_m = \frac{W_{ges}}{V} = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0}$$

C) Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

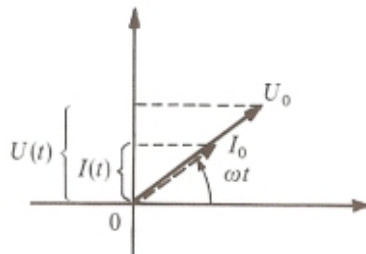
I. Wechselstromkreis (FS S.50)

1. Widerstand $X = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \frac{\frac{U}{\sqrt{2}}}{\frac{I}{\sqrt{2}}} = \frac{U}{I} = R$

2. Strom und Spannung sind in Phase: $U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

3. Zeigerdiagramm:



4. Kondensator

Wir dauernd ge- und entladen, es fließt Strom: Der Wechselstrom eilt der am Kondensator anliegende Wechselspannung in der Phase um $\Delta\varphi = \frac{\Pi}{2}$

voraus. Für den Wechselstromwiderstand X_C gilt:

$$X_C = \frac{U}{I} = \frac{U}{C \cdot \omega \cdot U} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

5. Spule

Der Wechselstrom eilt der an der Spule anliegenden Spannung nach. Bei der idealen Spule tritt eine Phasenverschiebung von $\Delta\varphi = -\frac{\Pi}{2}$ ein. Der

Wechselstromwiderstand liegt hier bei $X_L = \frac{U}{I} = \omega \cdot L$.

II. Elektromagnetischer Schwingkreis (FS S.51f)

Nach einmaliger Energiezufuhr tritt im System reale Spule - Kondensator eine freie gedämpfte elektromagnetische Schwingung auf. Die Parallelschaltung von Kondensator und Spule bezeichnet man als elektromagnetischen Schwingkreis.

Mit $U(t) = U_m + U_R + U_{el}$ und $I(t) = \dot{Q}(t)$ folgt:

$$(1) \text{ Differentialgleichung: } L\ddot{Q} + R\dot{Q} + \frac{Q}{C} = 0$$

Mit $Q(t) = Q_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$ in $L\ddot{Q} + \frac{Q}{C} = 0$ (ungedämpft: $R \rightarrow 0$) folgt:

$$(2) \text{ Schwingungsdauer: } T = 2 \cdot \Pi \cdot \sqrt{L \cdot C} \text{ (Thomson-Formel)}$$

Mit $Q(t) = Q_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$ in $W_{ges}(t) = W_{el} + W_m = \frac{1}{2}CU^2 + \frac{1}{2}LI^2$ folgt:

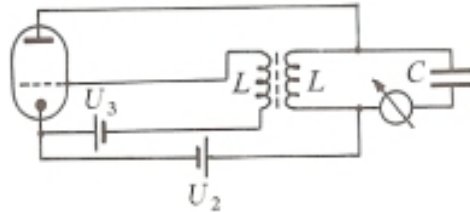
$$(3) \text{ Energie: } W_{ges}(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}$$

III. Erzwungene ungedämpfte Schwingungen:

Resonanz: Frequenz f eines Erregers gleich der Eigenfrequenz f_0

1. Serienresonanz: Das System Spule-Kondensator wird bei Anlegung einer Wechselspannung mit der Frequenz $f = f_0$ „durchlässig“, es fließt Strom.
2. Parallelresonanz: Wird an ein parallel geschaltetes Spule-Kondensator-System eine Wechselspannung mit der Frequenz $f = f_0$ geschaltet, kann es im Schwingkreis zu wesentlich höheren Strom kommen als in der Hauptleitung.
3. Rückkopplung: Eine in das magnetische Wechselfeld eines Schwingkreises gebrachte Spule erzeugt eine Induktionsspannung, die gleichphasig zur Erregerspannung ist. Daher kann man diese Spannung als Erregerspannung verwenden, eine äußere Erregerspannung kann damit entfallen (Selbststeuerung des Schwingkreises).

4. Meißnerschaltung: Durch phasenrichtige Rückkopplung der am Schwingkreis gewonnenen Spannung auf das Gitter einer Triode entsteht eine selbstschwingende Anordnung.



5. Tonfrequenzbereich: Mit geeignet gewähltem L und C liegt die Eigenfrequenz im Tonfrequenzbereich:

- (1) Röhrenschtaltung
- (2) Transistorschaltung

6. Induktive Kopplung

- (1) Teslatransformator

IV. Elektromagnetische Dipolschwingung

Um noch größere Frequenzen zu bekommen werden L und C verkleinert: Spule des Schwingkreises hat nur noch eine Windung (UHF-Bügel) und der Kondensator ist nur noch zwischen Anode und Gitter in der Triode. Der angekoppelte Empfänger ist nun ein aufgebogener Schwingkreis, es liegt ein offener Schwingkreis vor (Hertzscher Dipol): Resonanz wird durch Einstellung der Länge des Dipols erreicht.

Momentanbilder:

- (1) $t=0$: Dipolenden geladen \rightarrow E-Feld

durch Induktion:

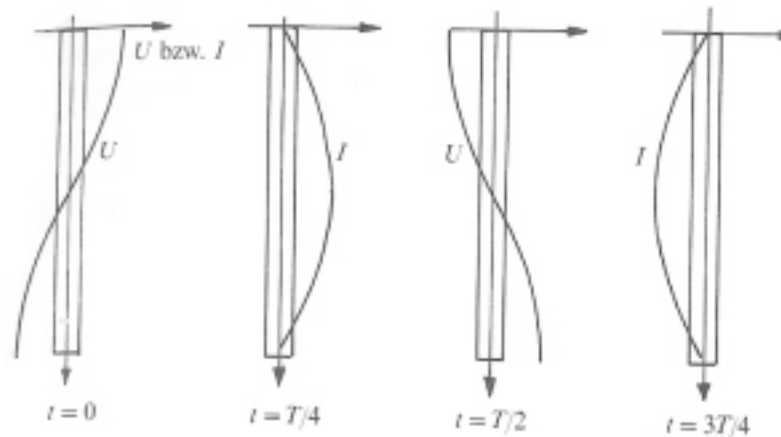
- (2) $t = \frac{T}{4}$: Strom \rightarrow B-Feld

durch Induktion:

- (3) $t = \frac{T}{2}$: Dipolenden (andersherum) geladen \rightarrow E-Feld

durch Induktion:

$$(4) t = \frac{3T}{4} : \text{Strom (andersherum)} \rightarrow \text{B-Feld}$$



Auch in größeren Entfernungen zeigt das Strommessgerät Strom an: Aus Versuchen kann man also schließen, dass der Dipol Energien in Form von elektrischen und magnetischen Feldern in den Raum hinaus abstrahlt:

V. Elektromagnetische Strahlung

1. In jedem Raumpunkt steht der elektrische Feldvektor auf dem magnetischen Feldvektor senkrecht.
2. Richtungsabhängigkeit: Auf geradlinigem Weg zum Dipol ist der Empfang maximal, mit höherer Entfernung wird dies geringer. Je höher die Abweichung von dem geradlinigen Weg desto schwächer ist der Empfang der Strahlung.

VI. Wellennatur der elektromagnetischen Strahlung

Wellenausbreitungsgeschwindigkeit: $c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$ (FS S.23)

Kennzeichen von Wellen – Reflexion, Brechung, Überlagerung/ Interferenz, Beugung und spezifische stehende Wellen – sind ein Hinweis auf die Wellennatur eines Phänomens.

VII. Mikrowellen (Zentimeterwellen)

1. Erzeugung: durch ein Klystron.
2. Wellennatur (Hertzsche Versuche):
 - (1) Durchlässigkeit: Es gibt Stoffe, die für die Strahlung durchlässig sind und solche die wenig oder nicht durchlässig sind, es liegt dann eine stehende Welle vor (Phasenverschiebung von Π).
 - (2) Reflexion: An ebenen Metall- und Glasoberflächen werden Licht und elektromagnetische Wellen nach dem gleichen Gesetz reflektiert.
 - (3) Brechung: An verschiedenen durchlässigen Medien werden Licht und Mikrowellen gebrochen.
 - (4) Bündelung: Beim Durchgang durch Glaslinsen werden Licht und elektromagnetische Wellen gebündelt.
→ Licht, eine elektromagnetische Welle?
3. Polarisation: Hertzsches Drahtgitter → Die vom Dipol ausgesandte elektromagnetische Welle ist linear polarisiert.
4. Verschiebungsstrom:

Es sieht so aus, als würde sich ein Strom durch den Kondensator bewegen: $I = A \cdot \varepsilon \cdot \frac{dE}{dt}$ → Verallgemeinerung des Induktionsgesetzes:

Jedes zeitlich veränderliche elektrische Feld wird von einem magnetischen Wechselfeld umschlossen und umgekehrt. Die Richtung von \vec{B} hängt davon ab ob das \vec{E} -Feld zu oder abnimmt:
5. Kopplung als Ursache

Eine Schwingung breitet sich dadurch aus, dass die schwingenden Teilchen die folgenden Teilchen zum Schwingen bringen, d.h. bei der elektromagnetischen Welle: Ein elektrisches Wechselfeld induziert ein magnetisches Wechselfeld, dieses wiederum ein elektrisches Wechselfeld, usw.

6. Übertragung von Informationen durch Amplitudenmodulation

7. Zweiquelleninterferenz

(1) Bedingungen:

(a) Gleiche Frequenz

(b) Gleiche Schwingungsrichtung

(c) Gleichphasigkeit

(d) Abstand konstant

(e) Gleichzeitige Schwingung mit etwa gleicher Amplitude

(2) Gangunterschied $\Delta s = b \cdot \sin \alpha$ (FS S.25)

(a) Maxima: $\Delta s = k \cdot \lambda$

(b) Minima: $\Delta s = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

(3) Zweiquelleninterferenz tritt auch bei Schallwellen auf

8. Beugung und Interferenz am Doppelspalt

An den zwei Spalte entsteht Beugung: Diese zwei „entstanden“ Wellen sind zwei gleichfrequente, gleichphasige Elementarwellen. Man erhält das bekannte Interferenzmuster der Zweiquelleninterferenz. Der Doppelspalt dient zu Wellenlängenmessung von Mikrowellen.

9. mehrfache Reflexion

Durch mehrfache Reflexion entstehen mehrere phasengleiche von virtuellen Sendern ausgesendete Wellen, bei denen Interferenz auftritt:

(1) konstruktive Interferenz: $2d = k\lambda$

(2) destruktive Interferenz: $2d = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

D) Optik

I. Beugungs- und Interferenzversuche mit Licht

1. Wellenlängenbestimmung durch Doppelspaltversuch

Gangunterschied $\Delta s = b \cdot \sin \alpha$ und Maxima bei $\Delta s = k \cdot \lambda$ lässt mit

$\tan \alpha = \frac{d}{a}$ und Kleine-Winkel-Näherung ($\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \alpha$) auf eine

Wellenlänge $\lambda = \frac{b \cdot d}{a \cdot k}$ schließen.

2. Interferenz von nicht kohärentem Licht

Licht wird von Atomen oder Molekülen ausgesandt. Beim Laser werden geeignete Atomsorten verwendet, er erzeugt kohärentes Licht (gleichzeitig, phasengleich). Das Glühlicht hingegen erzeugt inkohärentes Licht, es besteht keine Phasenbeziehung. Durch Einengung des ausgesendeten Lichtes, durch den Kohärenzspalt, kann man nahezu kohärentes Licht erzwingen.

3. Interferenz durch Beugung

Durch den Youngschen Doppelspalt-Versuch und verschiedenen Farbfiltern erkennt man, dass monochromatisches, sichtbares Licht eine Wellenlänge von 400nm – 800nm hat, d.h. verschieden Farben mit verschiedenen Wellenlängen und Frequenzen.

4. Zweiquelleninterferenz - Versuch von Pohl

Durch Reflexion an Vorder- und Hinterseite eines dünnen Glimmerplättchens entstehen zwei phasengleiche Wellen, von zwei virtuellen Lichtquellen, bei denen Interferenz auftritt: Das Interferenzbild besteht aus kreisförmige angeordneten Maxima und Minima:

$\Delta s = 2d \cdot \cos \alpha$ (Analogon: Bragg-Beziehung, FS S.57)

5. Beugung am Einfachspalt (FS S.25)

$$(1) \text{ Maxima: } \Delta s = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

(2) Minima: $2d = k\lambda$

(3) Huygenssche Prinzip: Jeder Punkt eines Spaltes kann als Ausgangspunkt einer Elementarwelle betrachtet werden.

II. Mehrfachspalt – optisches Gitter

1. Einfach Theorie

Von jedem Einzelspalt gehen Elementarwellen aus. Die sich ausbreitenden Wellen bilden eine zum Gitter nahezu parallele Wellenfront.

Die Intensität ist das Amplitudenquadrat.

2. Maxima (FS S.57)

(1) Hauptmaxima: $\Delta s' = k\lambda$

(2) Nebenmaxima: Bei der Beugung an N Spalten treten zwischen zwei aufeinander folgende Hauptmaxima jeweils N-1 Minima und N-2 Nebenmaxima auf.

(3) Mit zunehmender Spaltzahl N wächst die Intensität der Hauptmaxima, während ihre Breite abnimmt

3. Wellenlängenmessung

(1) Gitterkonstante b (Spaltmitte-Spaltmitte)

$$(2) \lambda = \frac{b \cdot d_k}{a \cdot k}$$

(3) Farben:

(a) Violett: 390...425nm

(b) Blau: 425...485nm

(c) Grün: 485...555nm

(d) Gelb: 555...595nm

(e) Orange: 595...615nm

(f) Rot: 615...770nm

4. verschiedene Spektren

(1) Mit Hilfe des Gitters können nun auch andere Lichtquellen untersucht werden. Während Glühlicht ein kontinuierliches Spektrum bekommt, bekommt z.B. Quecksilberdampflicht ein Linienspektrum. Auch Bandenspektren (Teile des kontinuierlichen Spektrums) können erfasst werden.

(2) Linienspektrum: Für entsprechende Atomsorten im Gas charakteristisch → nützt man für die Spektralanalyse

(3) Beugung: Blaues Licht wird am wenigsten, rotes Licht am stärksten abgelenkt.

(4) Brechung am Prisma: Rotes Licht wird am wenigsten, blaues Licht am meisten abgelenkt.

5. Auflösungsvermögen $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$:

Hauptmaxima können gerade noch getrennt beobachtet werden, wenn

$$\text{das Auflösungsvermögen } \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \leq k \cdot N .$$

III. Polarisation

1. Absorption: Polarisationsfolie
2. Reflexion: Brewsterwinkel

IV. Das elektromagnetische Spektrum

1. Infrarotstrahlen

Auf der Seite des roten Lichtes gibt es noch Strahlung: Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung), $\lambda \geq 800\text{nm}$

Nachweis mit einer Thermosäule (mehrere Thermoelemente in Reihe geschaltet: Durch Erwärmung eines Kupferdrahtes entsteht nachweisbarer Thermostrom).

2. Ultraviolettstrahlung

Mit einem Zinksulfidschirm stellt man jenseits von violetterem Licht weitere Strahlung fest, es handelt sich um UV-Strahlung, $\lambda \leq 400\text{nm}$

3. Röntgenstrahlung

(1) Aufbau der Röntgenröhre: Aus der Kathode austretenden Elektronen werden im Feld zwischen der Kathode und der Antikathode beschleunigt. Dabei wird von der Antikathode sehr kurzwellige elektromagnetische Strahlung (Röntgenstrahlung) emittiert.

$$(10^{-14}\text{m} \leq \lambda \leq 10^{-8}\text{m})$$

(2) Nachweis: Fluoreszenzschirm, Schwärzung einer Photoplatte, Zählrohr

(3) Spektren: Das Wellenlängenspektrum setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, dem kontinuierlichen Bremsspektrum und das charakteristische Röntgenspektrum (Linienspektrum).

(4) Wellenlängenmessung: Durch ein eindimensionales Reflexionsgitter oder die Braggsche Drehkristallmethode: Durch Reflexion von Röntgenstrahlung einer Wellenlänge (durch Zirkonfilter) an verschiedenen Kristallschichten tritt Interferenz bei einem bestimmten Glanzwinkel α_k auf: $k \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \alpha_k$ (FS S.57)

E) Relativitätstheorie (FS S.54)

I. Grenzggeschwindigkeit

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit c stellt eine obere Grenzggeschwindigkeit für die Bewegung materieller Körper dar. Die klassische Beziehung für die kinetische Energie $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ ist bei hohen Geschwindigkeiten ($v \geq 0,1 \cdot c$) nicht gültig.

II. Relativistischer Impuls – Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse

1. Versuche ergeben, dass die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ bei steigender Geschwindigkeit abnimmt, die Elementarladung aber Geschwindigkeitsunabhängig ist, daraus folgt, dass die Elektronenmasse mit steigender Geschwindigkeit zunimmt:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad m_0 \text{ ist die}$$

Masse bei $v=0$ (Ruhemasse)

2. Aus $p(v) = m(v) \cdot v$ folgt der relativistische Impuls: $p(v) = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

III. Relativistische Energie – Äquivalenz von Masse und Energie

1. Verallgemeinerung des 2.Newtonschen Axioms:

$$\text{Kraftstoß} = \text{Impulsänderung, d.h. } F = \frac{dp}{dt} = \dot{p} \quad (\text{FS S.15})$$

2. kinetische Energie: $E_{kin}(v) = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2$

3. Zusammenhang zwischen der Kraft F und Beschleunigung $a = \frac{dv}{dt} = \dot{v}$:

$$F(v) = \frac{m_0}{\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^3} \cdot a$$

4. Gesamtenergie E – Einsteinsche Masse-Energie-Beziehung:

$$E = m \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5. Daraus folgt das auch Teilchen mit der Ruhemasse und der Geschwindigkeit $v=0$ noch Energie haben, die so genannte Ruheenergie:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$

6. daraus folgt auch $E_{kin} = E - E_0$ d.h. wiederum: $E_{kin}(v) = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2$

7. Energie-Impuls-Beziehung: $E^2 = E_0^2 + c^2 p^2$

F) Wärmelehre

I. Grundlagen/ -begriffe

1. Brownsche Bewegung
2. Feldelektronenmikroskop

(1) Aufbau:

Ein evakuierter Glaskolben mit Einkristallspitze (Wolfram) als Kathode und Wolframwendel als Anode, dort befindet sich ein Bariumvorrat. Bei Hochspannung zwischen der Kathode und der Anode tritt, welche durch den Glückelektrischen Effekt Elektronen an der Kathode freisetzt, die durch das starke elektrische Feld radial beschleunigt werden und die mit einer speziellen Schicht überzogene Innenseite des Kolbens zum Leuchten bringen.

(2) Ergebnis:

Man sieht die Struktur der Moleküle.

3. relative Atommasse A_r / Molekülmasse M_r
4. Atomare Masseneinheit $1u := 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (FS S.79)
5. Avogadrokonstante/ Lohschmidtsche Zahl: $N_A = 6,022 \cdot 10^{26}$ (FS S.80),
d.h. 1 kmol eines Stoffes entsprechen $6,022 \cdot 10^{26}$ Teilchen

II. Molekülgröße und Avogadrokonstante

1. Abschätzung mit Öltröpfchenversuch

(1) Beschreibung: Eine Wasseroberfläche wird mit Bärlappsporen bestreut, darauf wird ein Tröpfchen aus Ölsäure ($\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$) und Leichtbenzin aufgebracht. Das Öl verdrängt diese feine Schicht. Eine monomolekulare Schicht entsteht.

(2) Abschätzung des Atomradius: Das Volumen V des Tröpfchen ist bekannt, der Radius R des Fleckes wird gemessen. Nachdem man eine monomolekulare Schicht annimmt (Test: Doppeltes Volumen,

doppelte Fläche) ist die Dicke der Schicht $d = 2 \cdot r_{mol}$. Mit $d = \frac{V}{A}$ folgt

der Radius $r_{mol} = \frac{V}{2\Pi R^2}$. Wenn man annimmt, dass die Ölsäure aus

54 gleichgroßen Atomen besteht, d.h. $V_{mol} = 54 \cdot V_{atom}$, folgt mit

$$V = \frac{4}{3} \cdot \Pi \cdot r^3, \text{ dass } r_{mol}^3 = 54 \cdot r_{atom}^3, \text{ d.h. } r_{atom} = \frac{r_{mol}}{\sqrt[3]{54}}.$$

(3) Abschätzung der Avogadrokonstante: Wenn zwischen den Molekülen keine Zwischenräume wären kann man annehmen, dass

$$N = \frac{A}{A_{mol}} = \frac{R^2 \cdot \Pi}{r_{mol}^2 \cdot \Pi} = \frac{R^2}{r_{mol}^2}. \text{ Da } N \text{ Teilchen die Masse des Ölflecks}$$

haben und N_A Teilchen die relative Molekülmasse M_r verhält sich

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m_{öl}}{M_r}. \text{ D.h. mit } \zeta = \frac{m}{V} \text{ folgt: } N_A = \frac{R^2 \cdot M_r}{r_{mol}^2 \cdot V \cdot \zeta}$$

2. Aus der Faraday-Konstante, d.h. die „Ladung zur Abscheidung eines Kilomols eines 1-wertigen Stoffes“ (2.Faradaysche Gesetz), mit der

$$\text{Elementarladung } e, \text{ folgt } N_A = \frac{F}{e} \text{ (FS S.45).}$$

3. N_A mit Hilfe der Röntgenspektroskopie: genaueste Methode

$$\text{Bei einem idealen Einkristall ist } N_A = \frac{\text{Atommasse}}{\text{mittlere Atommasse}} = \frac{M_r}{\zeta \cdot d^3}, \text{ wobei}$$

die Gitterkonstante d durch die Braggsche Drehkristallmethode bestimmt werden muss.

III. Ideales Gas (FS S.35f)

1. Allgemeines Gasgesetz: Für eine abgeschlossene Gasmenge ist

$$\frac{p \cdot V}{T} \text{ konstant.}$$

2. Gase, die dem allgemeinen Gasgesetz gehorchen, bezeichnet man als ideale Gase. Gase, die diesem Gesetz nicht gehorchen, heißen reale Gase.

3. universelle Gasgleichung: $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$
4. Vergleich mit realen Gasen: Bei konstanten Temperaturen nimmt bei kleiner werdenden Volumen der Druck des Gases ab einem bestimmten Druck nicht mehr zu, das Gas wird flüssig. Ist es komplett verflüssigt steigt der Druck sehr rasch ins Unendliche. Bei größer werdenden Temperaturen wird der „konstante Verlauf“ immer kleiner bis hin zu einem einzigen Punkt (kritischer Punkt) und sogar danach ohne, der Isothermenverlauf ist danach wie bei idealen Gasen.

5. Grundgleichung der kinetischen Gastheorie: $p = \frac{1}{3} \cdot \zeta \cdot \overline{v^2}$ wobei $\overline{v^2} = 1,18 \cdot v^2$ (mittleres Geschwindigkeitsquadrat)

6. Die kinetische Deutung der Temperatur: Mit $p = \frac{1}{3} \cdot \zeta \cdot \overline{v^2}$ und der

Gasdichte $\zeta = \frac{m_{gas}}{V} = \frac{N \cdot m_{atom}}{V}$ kommt man zu

$$p = \frac{N}{V} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{m_{atom}}{2} \cdot \overline{v^2} \Leftrightarrow p \cdot V = N \cdot \frac{2}{3} \cdot \overline{E_{kin}} . \quad \text{Mit der universellen}$$

Gasgleichung kommt man auf die mittlere kinetische Energie eines

Teilchens in Abhängigkeit der Temperatur: $\overline{E_{kin}} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$

(1) Lichtmühle

(a) Beschreibung: In einer evakuierten Glaskugel ist ein vierarmiges Flügelrädchen, drehbar gelagert und einseitig geschwärzt, angebracht. Es wird mit Licht bestrahlt und fängt an sich in die blanke Richtung zu drehen.

(b) Ergebnis: Da die schwarzen Flächen stärker erwärmt werden, erhöht sich deren Energie. Auftreffende Gasmoleküle erhalten einen größeren Impuls, die schwarze Fläche demnach einen größeren Rückstoss als die Blanke.

(2) Versuch von Stern

(a) Beschreibung: In einem hochevakuierten Gefäß befindet sich ein mit Silber überzogener Platindraht der so elektrisch geheizt wird, dass das Silber verdampft. Die Silberatome treten radial nach allen Seiten aus, und zwar mit der Geschwindigkeit, die ihnen bei der Temperatur des verdampften Silbers zukommt. Durch eine schmale Blende wird ein feiner Strahl von Silberatomen ausgeblendet, der bei ruhender Apparatur den im Abstand a von der Blende und r vom Platindraht eingesetzten Schirm an der Stelle S_0 schwärzen würde. Zur Messung der Atomgeschwindigkeit lässt man die ganze Apparatur um den Platindraht mit der Frequenz f rotieren. Die Bahn eines Atoms scheint gekrümmt, der Strahl wird also scheinbar um die Strecke Δs abgelenkt.

(b) Ergebnis: Da $\frac{\Delta s}{2 \cdot \Pi \cdot r} = \frac{\Delta t}{T}$ und $v = \frac{a}{\Delta t}$ kommt man mit

$$T = \frac{1}{f} \text{ auf die Atomgeschwindigkeit: } v = \frac{a \cdot 2 \cdot \Pi \cdot r \cdot f}{\Delta s} \text{ d.h.}$$

nicht alle Atome haben dieselbe Geschwindigkeit.

7. Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung: Die Wahrscheinlichste Geschwindigkeit nimmt mit steigender Temperatur zu, mit steigender Molekülmasse ab.

G) Atomphysik

I. Lichtelektrischer Effekt (Photoeffekt)

1. Ein negativ geladener Leiter wird durch Licht entladen, es werden Elektronen abgelöst. Die Wellenlänge muss allerdings kürzer sein als eine Grenzwellenlänge λ_g , deren Wert von dem bestrahlten Material abhängt. Der Photostrom ist dann direkt proportional zu pro Zeiteinheit zugefügter Energie.
2. Nachweis des Photoeffekts und der Grenzwellenlänge durch den Versuch von Lenard: Durch ein Quarzfenster tritt UV-Licht in den evakuierten Glaskolben und danach auf eine negativ geladene Platte (Kathode). Das ausgelöste Elektron wird bis zur Anode beschleunigt und tritt durch ein Loch in der Anode in ein Magnetfeld ein. Es bewegt sich dort auf einer Kreisbahn bis zum Faradayschen Käfig, in dem es aufgefangen wird.

3. Vakuumphotozelle

(1) Aufbau: In einem evakuierten Glaskolben sind eine Kathodenschicht (Material mit niedriger Austrittsarbeit) und eine ringförmige Anode angebracht. Sie reagiert auf sichtbares Licht, da die Grenzwellenlänge im Infrarotbereich ist.

(2) Ergebnis

(a) Kinetische Energie der Photoelektronen von der Intensität der auftreffenden Strahlung unabhängig

(b) Trägheitsloses Einsetzen.

- Widerspruch zur klassischen Physik: Eine Schätzung der Zeit mit Leistungsansatz:

$$P = \frac{A_{\text{querschnitt}} \cdot P_{\text{eff}}}{4 \cdot \Pi \cdot r^2} \text{ und daraus folgender Zeit } \Delta t = \frac{W_a}{P} \text{ ist}$$

um einiges größer als eine Sekunde.

(3) Gegenfeldmethode

Bei der Gegenspannung U_g werden gerade diejenigen Elektronen abgebremst, die mit der kleinstmöglichen Arbeit abgebremst, die mit der kleinstmöglichen Arbeit abgelöst werden und senkrecht aus der Photokathode austreten. Mit der Gegenfeldmethode bestimmt man daher die maximale kinetische Energie der Photoelektronen

$$E_{kin_{max}} = e \cdot U_g .$$

II. Lichtquanten-Hypothese

1. Einsteinsche Deutung des Photoeffekts

(1) Lichtquanten/ Photonen: Energie des Lichts ist nicht kontinuierlich über den Raum verteilt sondern in einer endlichen Zahl von Energiequanten lokalisiert.

(2) Energie: Jedes monochromatisches Lichtquant der Frequenz f trägt die Energie $E_{photon} = h \cdot f$ wobei $h = \frac{W_a}{f_g}$ (Plancksches

Wirkungsquantum) (FS S.61)

(3) Intensiveres Licht bedeutet das Auftreten von mehr Lichtquanten, aber nicht energiereicheren.

(4) Ein Lichtquant gibt seine ganze Energie an ein Elektron ab, zur Ablösung ist mindestens eine für das Material charakteristische Ablösearbeit W_a zu verrichten: $E_{photon} = E_{kin} + W_a$ (FS S.61)

2. Kurzwellige Grenze des kontinuierlichen Röntgenspektrums

(1) Die kinetische Energie der Elektronen geht zum einen an der Antikathode in Wärme Q über und löst eines oder mehrere Röntgenquanten aus: $e \cdot U = Q + h \cdot f_1 + h \cdot f_2 + \dots$

(2) Photonen maximaler Energie werden frei, wenn ein Elektron genau ein Photon erzeugt ohne dass dabei Wärme entsteht, d.h.

$$e \cdot U = h \cdot f_g \text{ und damit die kurzwellige Grenze: } f_g = \frac{e \cdot U}{h} \text{ (FS S.61)}$$

3. Teilcheneigenschaften des Photons

(1) Widerspruch zur Wellentheorie: Licht hat auch Impuls:

$$p = \frac{E_{\text{photon}}}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda} \text{ (FS S.61)}$$

(2) Vergleicht man die relativistische Impuls-Energie-Beziehung mit dem Impuls eines Photons, folgt dass bei $m_0=0$ beide Gesetze übereinstimmen, d.h. ein Photon hat keine Ruhemasse bzw. es gibt keine ruhenden Photonen. Aus $E = mc^2$ folgt die Masse eines

$$\text{Photons: } m = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2} = \frac{p}{c} \text{ (FS S.61).}$$

(3) Frequenzverschiebung im Gravitationsfeld: Beim Fall nimmt Masse und Frequenz zu, da $E = m \cdot g$ beim Fall zunimmt.

III. Compton-Effekt

Beim Auftreffen auf Materie tritt Streuung von Röntgenstrahlung unter allen Winkeln auf. Die Wellenlänge vergrößert sich dabei (Absorber schwächt gestreute Strahlung stärker als einfallende Strahlung).

1. Streuversuche von Compton:

(1) Bei gleich bleibenden Streumaterial:

(a) Neben λ (Primärstrahlung) tritt auch noch eine größere Wellenlänge ($\lambda + \Delta\lambda$) auf.

(b) Der Unterschied $\Delta\lambda$ nimmt mit zunehmendem Streuwinkel δ zu.

(c) Die Intensität der langwelligeren nimmt auf Kosten der kurzwelligeren Strahlung mit dem Streuwinkel zu.

(2) Abhängigkeit vom Streumaterial:

(a) Wellenlängenänderung $\Delta\lambda$ ist vom Streumaterial unabhängig

(b) Mit wachsender Ordnungszahl nimmt die Intensität der Primärstrahlung zu

2. Wellenlängenänderung $\Delta\lambda$

Modellvorstellung: Das Photon führt einen elastischen Stoß mit einem freien, anfangs ruhenden Elektron aus.

Ansatz: Mit der Energiebilanz $E + E_e = E' + E'_e$ und der Impulsbilanz

$p_e'^2 = p^2 + p_e'^2 - 2 \cdot p \cdot p_e' \cdot \cos \delta$ (Kosinussatz) in Verbindung mit der

Energie-Impuls-Beziehung für das Elektron ($E_e'^2 = E_e'^2 - c^2 p_e'^2$) und für

das Photon ($E = p \cdot c$ bzw. $E' = p' \cdot c'$) kommt man auf die

Wellenlängenänderung beim Compton-Effekt: $\Delta\lambda = \lambda_c \cdot (1 - \cos \delta)$ mit

$\lambda_c = \frac{h}{m_0 \cdot c} = \frac{h \cdot c}{E}$ (FS S.61). Die Wellenlängenänderung ist bei

„Rückwärtsstreuung“ ($\delta = 180^\circ$), d.h. die vollständige Abgabe der Energie

an ein Elektron, $\Delta\lambda = 2\lambda_c$. Bei $\lambda = \lambda_c$ ist die Photonenmasse gleich der

Ruhemasse der Elektronen.

IV. Materiewelle

1. Interferenz bei Elektronenstrahlen

Davisson/ Germer: Es werden nicht in alle Richtungen Elektronen gleich stark reflektiert. Es scheint eine Interferenz aufzutreten.

2. Die de-Broglie-Wellenlänge (FS S.62)

Fasst man Elektronen als Welle auf lassen sich die Interferenzmuster erklären: Für materielle Teilchen gilt derselbe Zusammenhang zwischen

Impuls und Wellenlänge wie für Photonen: $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$.

3. Debye-Scherrer-Streuung

Bragg-Versuch mit Pulver statt Kristall, daher ist kein Glanzwinkel notwendig, denn ein auftreffender Strahl findet stets kleine Kristalle unter geeignetem Glanzwinkel.

4. Möllenstedt-Versuch

(1) Aufbau: Elektronen treten aus einer nahezu punktförmigen Elektronenquelle (Sonde) aus und werden im elektrischen Feld zwischen einem positiv geladenen Faden und geerdeten Feldgrenzen so abgelenkt, als kämen sie von zwei virtuellen Sonden.

(2) Ergebnis: Es entsteht auf einem Schirm ein Interferenzmuster, d.h. Elektronen haben Welleneigenschaften.

(3) Anwendung - Unabhängigkeit der Elementarladung von der Geschwindigkeit: Mit $F_L = F_z$ kommt man mit der de-Broglie-

Wellenlänge auf $e(U) = \frac{h}{\lambda \cdot B \cdot r}$.

V. Dualismus Welle-Teilchen

Doppelspaltversuch mit Elektronen ergibt eine Welleneigenschaft, denn die Gesamtamplitude lässt sich durch Addition der Einzelamplituden (unter Berücksichtigung der Phasendifferenz) erreichen, während bei Teilchen die Gesamtintensität durch Addition der Einzelintensitäten bekommt.

1. Versuch von Taylor

(1) Interferenz ist nicht durch das gleichzeitige Vorhandensein vieler Photonen in der Versuchsanordnung bedingt.

(2) Es werden nur ganze Photonen registriert.

(3) Der Auftreffort und Weg eines einzelnen Photons (Elektrons) kann nicht vorhergesagt werden.

(4) Aus den Auftrefforten vieler Photonen (Elektronen) ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, eine Intensitätsverteilung nach der klassischen Wellentheorie (Interferenz).

2. Verzicht auf Determinismus in der Quantenmechanik

(1) Keines der anschaulichen Modelle „Welle“ und „Teilchen“ beschreibt das wirkliche Verhalten von Licht bzw. Elektronen umfassend.

(2) Die Quantenmechanik liefert grundsätzlich nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über den Ort von Mikroteilchen in einer gegebenen Versuchsanordnung. Über das Verhalten einzelner Mikroteilchen können keine Aussagen gemacht werden. Der Begriff „Bahn eines Teilchens“ verliert im atomaren Bereich seinen Sinn.

VI. Das Heisenbergsche Unschärfeprinzip/ -relation

Ort und Impuls eines Teilchens können nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$

VII. Entwicklung der Atommodelle

1. Thomsons – „Rosinenkuchenmodell“:

Elektronen sind in eine positive Massenkugel eingebettet.

2. Lenard – Absorption von Elektronen durch Atome

- Elektronen können Metallfolien mit einer Dicke x von mehreren Tausend Atomdurchmessern durchdringen: $N(x) = N_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$
(N_0 : Anzahl der auf die Metallfolie auftreffenden Elektronen, N : Anzahl der ungestreut durch die Folie gehenden Elektronen, α : Absorptionskoeffizient)
- Lenardsche Massenabsorptionsgesetz: $\alpha \sim$ Dicke des Steumaterials.

- α nimmt mit zunehmender Elektronengeschwindigkeit stark ab.

Ergebnis:

(1) Das Atomvolumen ist nur zu einem sehr kleinen Bruchteil mit Materie erfüllt. Der Rest des Atoms ist praktisch masselos, aber erfüllt von elektrischen Kraftfeldern der positiven und negativen Ladungen.

(2) Je größer die Masse eines Atoms ist, desto größer ist die Elektronenzahl und die positive Ladung

3. Rutherford – Streuung von α -Teilchen an Atomkernen

(1) Ergebnis:

(a) Die meisten Teilchen durchdringen die Folie unabgelenkt.

(b) Die Teilchenzahl hinter der Folie nimmt mit wachsendem Streuwinkel rasch ab.

(2) Atommodell

(a) Der Kern ist der Sitz der positiven Ladungen, vom Betrag $Z \cdot e$, und nahezu der gesamten Masse des Atoms.

$$(r_{\text{kern}} \approx 10^{-14} \text{ m})$$

(b) Die Elektronen umgeben den Kern, so dass das Atom nach außen hin neutral erscheint. Die Elektronenhülle bestimmt den Radius des Atoms ($r_{\text{atom}} \approx 10^{-10} \text{ m}$)

(c) Damit die Elektronen, auf die Coulombkräfte wirken, nicht in den Kern stürzen, müssen sie in Bewegung sein. Kreisbahn:

$$F_Z = Z \cdot F_{\text{Coulomb}}$$

VIII. Quantenhafte Emission und Absorption

1. Prismenspektrum

(1) Linienspektrum

(2) Bandenspektrum

(3) Kontinuierliches Spektrum

2. Emissionsspektrum des Wasserstoff – Serienformel des

Wasserstoffspektrums: $\frac{1}{\lambda} = R_H \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$ mit $n_2 \geq n_1 + 1$ (FS S.63):

- Lyman-Serie (UV-Licht): $n_1 = 1$
- Balmer-Serie (sichtbares und UV-Licht): $n_1 = 2$
- Paschen-Serie (IR-Strahlung): $n_1 = 3$
- Brackett-Serie (IR-Strahlung): $n_1 = 4$
- Pfund-Serie (IR-Strahlung): $n_1 = 5$

(1) Termschema: Ordnet man nach der Beziehung

$E_{\text{photon}} = E_{\text{vorEmission}} - E_{\text{nachEmission}}$ den beobachteten Wellenlängen der Spektrallinien die entsprechenden Energiedifferenzen zu, so ergibt sich ein Termschema.

(2) Ritzsches Kombinationsprinzip: Atome können alle Energien abgeben/ aufnehmen die sich als Unterschied der Energieniveaus ergeben.

3. Resonanzabsorption/-fluoreszenz: Die Absorption und anschließende Emission von Licht gleicher Frequenz bezeichnet man als Resonanzfluoreszenz. Im Photonenbild entspricht dies der Absorption eines Lichtquants geeigneter Energie und der anschließenden Emission eines Lichtquants gleicher Energie durch das angeregte Atom.

4. Franck-Hertz-Versuch:

(1) Aufbau: Eine gut evakuierte Triode mit einem Tropfen Quecksilber in einem Ofen erhitzt, dadurch erhöht sich der Druck des Quecksilbers auf ca. 20hPa. Zwischen der Auffängerelektrode und der Gitteranode wird eine Gegenspannung von ca. 1V angelegt. Der an der Auffängerelektrode eintreffende Strom wird gemessen. Die

Beschleunigungsspannung zwischen der Glühkathode und der Gitteranode wird kontinuierlich hoch geregelt.

(2) Ergebnis: Periodisch wiederkehrende Strommaxima und –minima

(3) Deutung: Es sind laufend elastische Stöße zwischen den Elektronen und Quecksilberatomen vorhanden, alle Elektronen kommen an der Auffängerelektrode an, der Strom steigt erst bei Erreichen einer bestimmten Energie erfolgt ein inelastischer Stoß, das Elektron kommt nicht mehr an der Auffängerelektrode an, der Strom sinkt wieder. Durch weitere Erhöhung der Beschleunigungsspannung ergeben sich weitere periodische Strommaxima und –minima → Portionierte Energie in Atomen

5. Elektronenleitung im Hochvakuum: Da die Stoßpartner fehlen zeigt sie einen völlig anderen Verlauf: Sie steigt langsam an, da eine Elektronenwolke den Austritt hemmt. Diese Elektronenwolke wird nach und nach abgebaut. Ist sie verschwunden, erreichen alle Elektronen die Anode, eine weitere Erhöhung der Spannung ist nicht möglich. (Kennlinie einer Vakuumdiode).

IX. Das Atommodell von Bohr

1. Bohrschen Postulate (FS S.63)

(1) Energie eines Atoms kann nur ganz bestimmte diskrete Werte annehmen. Der Umlauf auf den Bohrschen Bahnen erfolgt strahlungsfrei. Die auf diesen bahnen kreisenden Elektronen unterliegen der Quantenbedingung: $2 \cdot \Pi \cdot m_e \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot h$

(2) Geht ein Atom von einer höheren auf eine niedrigere Quantenbahn, so wird der freiwerdende Energiebetrag als Strahlung der Frequenz f abgegeben, wobei gilt: $\Delta E = h \cdot f$

2. Berechnung der Bahnradien und –geschwindigkeiten für das Eielektronensystem der Kernladungszahl Z

Aus dem Ansatz $F_Z = F_{Coulomb}$ mit der Quantenbedingung

$2 \cdot \Pi \cdot m_e \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot h$ kommt man auf den Radius und die Geschwindigkeit auf der n-ten Quantenbahn:

$$\bullet \quad r_n = \frac{h^2 \cdot \epsilon_0}{\Pi \cdot m_e \cdot Z \cdot e^2} \cdot n^2, \text{ d.h. } \boxed{r_n \sim n^2}$$

$$\bullet \quad v_n = \frac{e^2 \cdot Z}{2 \cdot h \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{n}, \text{ d.h. } \boxed{v_n \sim \frac{1}{n}}$$

3. Diskrete Elektronenenergien

(1) Kinetische Energie: $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_n^2 = R_H \cdot h \cdot c \cdot \frac{Z^2}{n^2}$

(2) Potentielle Energie:

$$E_{pot} = W_{\infty, r_n} = \int_{\infty}^{r_n} -QEdr = \dots = -2 \cdot R_H \cdot h \cdot c \cdot \frac{Z^2}{n^2}, \text{ d.h.}$$

$$\boxed{E_{pot} = -2 \cdot E_{kin}}$$

(3) Gesamtenergie: $E_{ges} = E_{pot} + E_{kin} = -R_H \cdot h \cdot c \cdot \frac{Z^2}{n^2}$

(=Bindungsenergie) (FS S.64)

4. Energie-Termschema

5. Bohrsches Korrespondenzprinzip: Im Bereich großer Quantenzahlen korrespondiert die klassische Näherung mit der Beobachtung.

6. Wasserstoffähnliche Eielektronensysteme: Ionen mit nur einem Elektron:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot Z^2 \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

7. Mängel

(1) Postulate nicht theoretisch nicht begründet

(2) Keine detaillierte Aussage über Strahlung (Intensität) möglich

(3) Feinstrukturen können mit der Bohrschen Theorie nicht verstanden werden

(4) Beobachten bei Mehrelektronensysteme stimmen nicht mit der Modellrechnung überein

(5) Definierte Bahnen und gleichzeitig diskrete Geschwindigkeiten widersprechen der Heisenbergschen Unschärferelation

X. Quantenmechanisches Atommodell

1. Linearer Potentialtopf

Jede „Versuchsanordnung“, die den Aufenthaltsraum eines Teilchens begrenzt, führt zu einem Spektrum diskreter Energien.

Es gilt. Aus der de-Broglie-Wellenlänge folgt $v = \frac{h}{m \cdot \lambda}$. Mit $l = n \cdot \frac{\lambda}{2}$, d.h.

$\lambda = \frac{2 \cdot l}{n}$, folgt mit $E_{ges} = E_{kin}$ (da $E_{pot} = 0$): $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{h \cdot n}{2 \cdot m \cdot l} \right)^2$, d.h.

$$E = \frac{h^2}{8 \cdot m \cdot l^2} \cdot n^2$$

2. Nullpunktenergie für n=1: $E = \frac{h^2}{8 \cdot m \cdot l^2}$

Durch das Vorhandensein einer Nullpunktenergie ist die Stabilität der Atome begründet.

3. Orbitale des H-Atoms: Räume wo sich Elektronen Wahrscheinlichkeitsgemäß aufhalten

4. Quantenzahlen:

(1) Hauptquantenzahl (=Quantenbahnen): $n=1,2,3,\dots$

(2) Nebenquantenzahlen: $l \in [0; n[$

(3) Magnetische Quantenzahl: $m \in]-l; l[$

(4) Spin-Quantenzahl: $s \in \{-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\}$

XI. Belege für den Schalen Aufbau

1. Ionisierungsenergie: Ionisierungsenergie zeigt eine Struktur (Maxima bei den Edelgasen) → Beleg für Schalen

2. Röntgenemission und -absorption: Neben der Bremsstrahlung tritt auch eine materialabhängige charakteristische Strahlung auf: Werden Elektronen in der Röntgenröhre genügend beschleunigt schlagen sie Elektronen aus der K- oder K-Schale. Die Lücken werden durch Elektronen aus höheren Bahnen wieder gefüllt, wobei Röntgen-Quanten emittiert werden, es gilt:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot (Z - 1)^2 \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ d.h. für die } K_{\alpha}\text{-Linie: } \frac{1}{\lambda} = \frac{3}{4} \cdot R \cdot (Z - 1)^2 \text{ (FS S.64)}$$

Es gibt auch charakteristische Röntgenabsorption: Die Energie der K-, L-, M-, ... Absorptionskanten ist gleich der Bindungsenergie der Elektronen in der K-, L-, M-, ... Schale.

3. Energie-Termschema, Schmelztemperatur, ... belegen Schalen Aufbau

H) Kernphysik

I. Grundlegende Eigenschaften

1. Positive Kernladung: $Z \cdot e$
2. Kernradius - Streuversuche
 - (1) Mit Elektronen (Rutherford, vgl. 3.Sem)
 - (2) Mit Neutronen: $r_k = r_0 \cdot \sqrt[3]{A}$ (r_0 Protonenradius, A Massenzahl)
3. Kernmasse – Massenspektrometer von Thomson, Aston
4. Kanalstrahlen = positive Ionen
5. Isotope: Chemisch gleichartige Atome unterschiedlicher Masse (Neutronenzahl), [H+ = Deuterium]
6. Kernaufbau: Protonen, Neutronen und Elektronen
7. Kernkräfte
8. Potentialtopfmodell

II. Diskrete Energiestufen

1. Unelastische Protonenstreuung an Kernen

Auch bei elastischer Streuung können Protonen, im Gegensatz zu Elektronen, Energie auf einen Kern übertragen (Rückstoß, Kern wird beschleunigt).
2. Quantenhafte Emission von Energie durch Kerne: γ -Strahlung.

Angeregte Kerne senden γ -Strahlen (diskrete Linien), bei Fall von höheren auf geringere Energieniveaus, aus. Anregungsmöglichkeiten:

 - (1) unelastische Stöße
 - (2) α - β -Zerfall
 - (3) Kernspaltung
 - (4) Absorption eines geeigneten γ -Quants (Kernresonanzabsorption)

Auch für Kerne gilt das Ritzsches Kombinationsprinzip.

3. Energiebilanz $E_k^* = E_k + E_\gamma$

E_γ ist geringfügig kleiner als die Anregungsenergie E_k^* wegen des unvermeidlichen Rückstoßes des Kerns (Impulserhaltung): E_k ist die kinetische Energie des Kerns.

III. Massendefekt und Bindungsenergie (FS S.65)

1. Massendefekt: $\Delta m = Z \cdot (m_e + m_p) + N \cdot m_n - m_a$

2. Bindungsenergie: $B = \Delta m \cdot c^2$

3. mittlere Bindungsenergie pro Nukleon: $\frac{B}{A}$

4. Vergleich der mittleren Bindungsenergie aller Elemente zeigt, dass Energiegewinnung bei leichten Kernen durch Kernverschmelzung und bei schweren Kernen durch Kernspaltung begünstigt ist.

IV. Radioaktive Strahlung

1. Nachweis

(1) Ionisationskammer

Zwischen einem zylindrischen Gefäß (Außenelektrode) und die davon isolierte Innenelektrode, die das Präparat trägt, wird Hochspannung angelegt. Der Ionisationsstrom nimmt nach und nach einen Sättigungswert an, der ein direktes Maß für die radioaktive Strahlung ist.

(2) Zählrohr

Zylinderkondensator mit einem Edelgas gefüllt. Strahlung tritt durch ein Glimmerfenster oder durch eine sehr dünne Glaswand ein. Je nach Betriebsspannung unterscheidet man verschiedene Betriebsbereiche:

(a) Strahlung bildet Ladungsträger, die aber auf dem Weg zur Elektrode zu wenig Energie aufnehmen um das Edelgas zu ionisieren. (Ionisationskammer)

(b) Die Feldstärke ist so groß, dass die N_0 gebildeten Ladungsträger hohe Geschwindigkeiten erreichen. Durch Stöße mit den Atomen des Edelgases entstehen $a \cdot N_0$ weitere Ionen. (a in diesem Bereich konstant: Proportionalitätszähler)

(c) Neben den Sekundärelektronen werden nun auch Photonen gebildet. Durch Photoeffekt werden weitere Elektronen gebildet, das ganze Zählrohr wird entladen: Jedes radioaktive Teilchen löst nur noch eine Glimmerentladung aus, d.h. es werden nur Teilchen registriert, ist also unabhängig von der Primärionisation. Die maximale Zählrate ist von der Impulsdauer abhängig, d.h. die Glimmerladung muss möglichst bald erlöschen: Das Löschen wird erreicht durch

- positive Raumladung (schwächt die Feldstärke),
- einen hohen Zählrohrwiderstand (Totzeit) und
- Zusatz organischer Substanzen, z.B. Alkohol (Begrenzung der Photonen).

(3) Fotografisches Verfahren

(4) Nebelkammer

Durch kurzen Unterdruck wird das Gasgemisch aus Wasser und Spiritus abgekühlt und somit übersättigt. Dies verursacht eine Kondensation des Dampfes in Form kleiner Nebeltröpfchen, die durch Kondensationskeime, insbesondere Ionen begünstigt wird.

(5) Blaskammer

(6) Szintillationszähler

2. Kernphysikalische Messungen

(1) Nulleffekt: Auch ohne radioaktive Präparate treten Impulse auf: Höhenstrahlung (kosmische Strahlung) und terrestrische Strahlung.

(2) Zählstatistik: Registrierte Impulse sind stets durch zufällige Mikroereignisse verursacht.

3. Messung von γ -Energien

(1) Absorptionsmechanismen

(a) Photoeffekt

Elektronen aus der Hülle werden herausgeschlagen, das γ -Quant verschwindet. Mit steigender Ordnungszahl nimmt der Photoeffekt zu, mit steigender γ -Energien ab: Bis 0,5MeV dominiert der Photoeffekt.

(b) Comptoneffekt

γ -Quant verliert nur zum Teil seine Energien. Die Wahrscheinlichkeit nimmt bei höheren Ordnungszahlen zu. Der Comptoneffekt dominiert gegenüber anderen Effekten im Bereich zwischen 0,5MeV und 5MeV.

(c) Paarbildung

Ist die Energie eines γ -Quant höher als $2 \cdot m_0 c^2$ (1,02MeV) ist es möglich, dass im Coulombfeld eines Kerns ein Elektron-Positron-Paar entsteht. Ab 5MeV dominiert die Paarbildung.

Hinweis: Trifft ein Positron auf ein Elektron so tritt Paarvernichtung auf, beide Teilchen verschwinden, es entstehen mind. zwei γ -Quanten.

V. Komponenten der natürlichen radioaktiven Strahlung

1. Teilchenladung – Identifizierung der α -, β - und γ -Komponente

Strahlung:	α -Strahlung	β -Strahlung	γ -Strahlung
Teilchenart:	He^{++}	e^-	kurzwellige elektromagnetische Strahlung
Reichweite:	einige Zentimeter	größer	groß
Ionisationsvermögen:	hoch	gering	sehr gering
Spektrum:	diskret	kontinuierlich	-

2. Zerfallsreihen (FS S.98f)

- (1) Thorium-Zerfallsreihe (4n-Serie)
- (2) Neptunium-Zerfallsreihe (4n+1-Serie)
- (3) Uran-Radium-Zerfallsreihe (4n+2-Serie)
- (4) Uran-Actinium-Zerfallsreihe (4n+3-Serie)

VI. Reichweite radioaktiver Strahlung

1. Vorüberlegung: Logarithmisches Papier

- (1) Doppelt-logarithmisches Papier

Jede Potenzfunktion ergibt eine Gerade (Steigung = Exponent)

- (2) Einfach logarithmisches Papier

Jede Exponentialfunktion ergibt eine Gerade

2. Abstandsgesetz für β - und γ -Strahlung

Annahmen:

- (1) Präparat punktförmig
- (2) Strahlung isotrop
- (3) Strahlung wird zwischen Präparat und Zählrohr nicht absorbiert
- (4) Jedes Quant wird nachgewiesen

→ Zählrate (Impulse pro Minute): $Z(r) \sim \frac{1}{r^2}$

3. Zusammenhang zwischen Energien und Reichweite bei α -Strahlung
Die α -Teilchen-Energie beträgt pro cm Reichweite ca. 1,5MeV
4. Zusammenhang zwischen Energien und Reichweite bei β -Strahlung
Absorption hängt nicht von der Stoffart sondern nur von der Flächenmasse ab.

VII. Absorptionsgesetz von β - und γ -Strahlung (FS S.67)

1. Impulsrate $Z(d) = Z_o \cdot e^{-\alpha \cdot d}$
2. Halbwertsdicke $d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\alpha}$

VIII. Wirkung auf den Menschen

1. Physikalische Primärreaktion: Ionisation von Atomen und Molekülen für zum Zerfall von Molekülverbänden, deren Funktionsfähigkeit dadurch in Frage gestellt wird.
2. Chemisch und biochemische Reaktion: Die gebildeten freien Radikale können sich zu toxischen Verbindungen zusammenschließen und den Primärschaden verstärken.
3. Biologische Reaktion: Der Körper hat die Fähigkeit geschädigte Zellen mit Hilfe eines Immunsystems zu eliminieren. Damit bleibt der Schaden ohne Konsequenzen. Wenn das Immunsystem geschwächt oder überfordert ist können genetische oder somatische Schäden auftreten.
4. Einflussfaktoren für die Strahlenwirkung:
 - (1) Dosis
 - (2) Strahlenart
 - (3) Räumliche Dosisverteilung
 - (4) Relative Strahlenempfindlichkeit
 - (5) Milieu- bzw. Umweltfaktoren

5. Somatische Frühschäden (nichtstochastische Schäden): Ausmaß der Schädigung nimmt mit Höhe der Strahlenbelastung zu (ab 7 Sv tödlich)

6. Somatische Schäden (75% der stochastische Schäden): Nicht die schwere sondern die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung nimmt mit der Dosis zu: Mögliche Spätschäden:

(1) Sterilität (ab 0,15 Sv)

(2) Krebs

7. Genetische Schäden (25% der stochastische Schäden): Mutation der Erbanlagen

8. Schutzmaßnahmen

(1) Abstand

(2) Abschirmung

(3) Kurze Bestrahlungszeit

(4) Vermeidung von Inkorporation

(5) Gefährdete Personen tragen Dosimeter.

(a) Ionisationsdosimeter

(b) Filmdosimeter

IX. Radioaktiver Zerfall (FS S.67)

1. Gesetze

(1) Energiedosis: $D = \frac{\Delta W}{\Delta m}$; $[D] = \frac{J}{kg} = Gy$ (Gray)

(2) Äquivalentdosis: $H = q \cdot D$; $[H] = \frac{J}{kg} = Sv$ (Sievert)

(3) Zerfallsgesetz: $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

(4) Halbwertszeit: $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

(5) Aktivität: $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$; $[A] = \frac{1}{s} = Bq$ (Becquerel)

2. Altersbestimmung mit Hilfe Radioaktiver Nuklide

(1) Mit der Halbwertszeit $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ in das Zerfallsgesetz

$$N_A(t) = N_A(0) \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{folgt:} \quad t = \frac{T_{\frac{1}{2}}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{N_A(0)}{N_A(t)}. \quad \text{Mit}$$

$$N_A(0) = N_A(t) + N_B(t) \quad \text{folgt:} \quad t = \frac{T_{\frac{1}{2}}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{N_B(t)}{N_A(t)}, \quad \text{somit muss nur mit}$$

Hilfe der Massenspektroskopie das Verhältnis $\frac{N_B(t)}{N_A(t)}$ bestimmt

werden.

(2) Uran-Blei-Methode: Aus dem Verhältnis von $\frac{N_{206Pb}}{N_{238U}}$ errechnet

man sich das Erdalter. Bestimmend ist hier die Halbwertszeit des ^{238}U . Es wird angenommen, dass ^{206}Pb zur Zeit $t=0$ nicht vorhanden war.

(3) C14-Methode: Das radioaktive C14 unterliegt dem β -Zerfall, wird aber aufgrund des Entstehungsprozessen durch die Kohlendioxid der Lufthülle ausgeglichen, es besteht ein konstantes Verhältnis von $\frac{N_{14C}}{N_{12C}}$. Stirbt ein Mechanismus wie kein CO_2 mehr aufgenommen, das

Verhältnis nimmt ab.

(4) Tritium-Methode: Da die Halbwertszeit nur 12,3 Jahre beträgt ist diese Methode nur für kürzere Zeitbestimmungen geeignet, z.B. Alter eines Weines.

3. Anwendung in anderen Gebieten

(1) Medizin: Indikator./Tracer-Technik (Funktionsfähigkeit der Schilddrüse), Therapie mit Radioisotope (radioaktives Jod zur Behandlung von Schilddrüsenerkrankungen)

(2) Geologie: Aufbau und Wanderung eines Gletschers (Radioaktiver Niederschlag (Kernwaffenexperimente, Tschernobyl) verursachen eine Eisschicht erhöhter Radioaktivität die durch Bohrungen festgestellt werden kann)

(3) Technik: Verschleiß-Messungen, Dickenmessung, Schweißnahtprüfung

(4) Pharmazie: Wirkungsweise von Medikamenten.

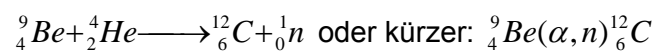
X. Freie Neutronen

1. Abbremsung von Neutronen (Moderation):

Neutronen sind durch elektrische und magnetische Felder nicht ablenkbar, nur im Wirkungsbereich der Kernkräfte können Neutronen beeinflusst werden. Materialien, dessen Kernmasse vergleichbar mit der Neutronenmasse ist, eignen sich gut zum Abbremsen (gute Moderatoren sind z.B. H₂O, D₂O, Graphit).

2. Erzeugung von freien Neutronen:

Neutronen können durch α -Bestrahlung von z.B. Berilium:



3. Nachweis von Neutronen

(1) Nachweis langsamer Neutronen: Zählrohr mit Bor (z.B. BF₃)

(2) Nachweis schneller Neutronen: Nachweis der Rückstoßkerne (H₂-gefülltes Zählrohr)

XI. Kernreaktionen

1. Elastische Streuung: $a + A \longrightarrow a + A$

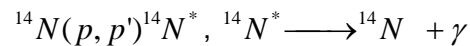
Das Geschoss verliert kinetische Energie, der beschossene Kern gewinnt kinetische Energie.

(1) Rutherfordstreuung: ${}^{197}\text{Au}(\alpha, \alpha){}^{197}\text{Au}$

(2) Neutronenstreuung: ${}^{60}\text{Co}(n, n){}^{60}\text{Co}$

2. Inelastische Streuung: $a + A \longrightarrow a' + A^*$

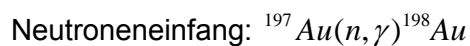
Das Geschoss verliert kinetische Energie, die u.a. zur Anhebung eines Nukleons auf ein höheres Energieniveau führt. Der angeregte Kern geht unter Abstrahlung eines Gamma-Quants in den Grundzustand über:



3. Direkte Reaktion mit Teilchenaustausch: $a + A \longrightarrow b + B$

Das Geschossteilchen wird vom Kern eingefangen. Die freiwerdende Energie wird auf ein anderes Teilchen übertragen, das den Kern wieder verlässt: ${}^{51}\text{V}(p, n){}^{51}\text{Cr}$

4. Compound-Reaktion: $a + A \longrightarrow X^* \longrightarrow b + B$

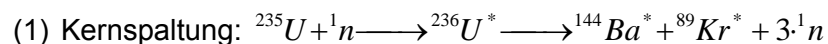


5. Kernphotoeffekt: $A + \gamma \longrightarrow b + B$

Der Kernphotoeffekt setzt erst bei einer Mindestenergie ein.



6. Stark exotherme Reaktionen:



Die beim Spaltungsprozess entstehenden Neutronen können wieder zur Spaltung verwendet werden. (Kettenreaktion)

(2) Kernfusion: Verschmelzung leichter Kerne

7. Energiebilanz:

Q-Wert einer Reaktion: $Q = (m_{A_0} \cdot c^2 + m_{a_0} \cdot c^2) - (m_{B_0} \cdot c^2 + m_{b_0} \cdot c^2)$, d.h.

der Q-Wert ist die Summe der Ruheenergien der Ausgangsnuklide abzgl. der Summe der Ruheenergien der Reaktionsprodukte. Die Reaktion ist exotherm wenn $Q > 0$ und endotherm wenn $Q < 0$.

XII. Modellvorstellung der radioaktiven Zerfälle

1. α -Zerfall

(1) Messung von α -Energien: Halbkreispektrometer

Ergebnis:

(a) Diskretes Energiespektrum (Linienspektrum)

(b) Hochenergetische Linien \rightarrow hohe Intensität

(c) Niederenergetische Linien \rightarrow geringe Intensität

(2) Voraussetzungen für den Alpha-Zerfall: $Z > 83$

(3) Unterschiedliche α -Energien bei demselben Mutterkern: α -Zerfälle sind von γ -Übergängen begleitet, es kann also sein, dass erst unter Emission von γ -Strahlung der Tochterkern in den Grundzustand übergeht.

(4) Tunneleffekt

2. β -Zerfall

(1) Das β -Spektrum: Nebelkammer

(a) Impuls:

- $$p = e \cdot B \cdot \frac{d}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2}}$$

- $$\Delta p = p \cdot \frac{\Delta r}{r}$$

(b) Zusammenfassung

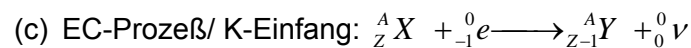
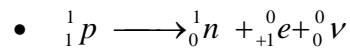
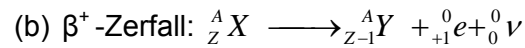
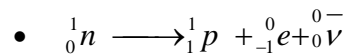
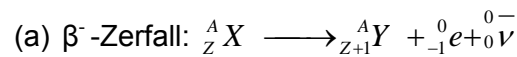
- kontinuierliches Spektrum

- $E_{kin,max} = 0,7 MeV$

- Am häufigsten: $E_{kin} = \frac{1}{3} E_{kin,max}$

(2) Probleme: Neutrinohypothese ${}^0_0\nu$

(3) Zerfallsarten:



3. Teilchen – Antiteilchen

(1) Elektron – Positron

(2) Neutron – Antineutron

(3) Proton – Antiproton

(4) Neutrino – Antineutrino

XIII. Kernenergietechnik

1. Kernspaltung

(1) Experimentelle Befunde:

(a) Spaltprodukte:

- Spaltung in zwei etwa gleichgroße Bruchstücke ist unwahrscheinlich
- Am häufigsten im Verhältnis 2:3, d.h. $A \approx 95$ und $A \approx 140$

(b) Spaltneutronen: Es entstehen prompte Neutronen und verzögerte Neutronen (0,75%), d.h. Neutronen die beim Zerfall von Kernbruchstücken entstehen. Diese verzögerten Neutronen sind von großer Bedeutung für die Regelung von Kernreaktoren.

(c) Energetische Bedingungen: $E_{kin} + E_B > E_a$

(d) Abhängigkeit der Spaltausbeute von der Neutronenenergie:
Wirkungsquerschnitt

(2) Grundlagen der Reaktorphysik:

(a) Kettenreaktion – Multiplikationsfaktor k

(b) Neutronen-Bilanz:

- Teil wird durch ${}_{92}^{235}\text{U}$ und ${}_{92}^{238}\text{U}$ eingefangen
- Schnelle Neutronen spalten ${}_{92}^{235}\text{U}$ und ${}_{92}^{238}\text{U}$, aber mit geringem Wirkungsquerschnitt.
- Neutronen abbremsen (Moderation)
- Spaltprodukte fangen Neutronen ein

(c) Aufbau de Reaktorkerns:

- Wasser als Moderator und Kühlung
- Mehrere Hundert Brennelemente: 64 Brennstäbe (Edelmetallrohre mit Uranoxidtabletten)
- Regelstäbe: neutronenabsorbierende Substanzen (z.B. Bor, Cadmium)

(d) Anfahren eines Reaktors

- Regelstäbe → keine Kettenreaktion
- Neutronenquelle

(e) Technische Ausführung von Kernreaktoren

- Siedewasserreaktor
- Druckwasserreaktor
- Brutreaktor

(3) Reaktorsicherheit, Entsorgung, Wiederaufbereitung

(a) Sicherheitsvorkehrungen

- Hüllrohre der Brennstäbe
- Reaktordruckbehälter aus Stahl

- Betonkammer: Strahlenabschirmung
- Sicherheitsbehälter aus Stahl
- Stahlbetonhülle
- Unterdruck

(b) Gefahren für die Umwelt

- Abwärme

(c) Wiederaufbereitung

- PUREX-Prozeß (Plutonium-Uranium-Reduktion und Extraktion) in Salpetersäure: Es entsteht Plutonium, Uran und Abfallstoffe.
- Abfallstoffe werden verglast.

2. Kernfusion: Verschmelzung leichter Kerne

Kernfusion tritt nur ein wenn die Coulombschen Abstoßungskräfte überwunden werden: Die leichten geladenen Kerne werden in einem Beschleuniger auf genügend hohe kinetische Energie gebracht. Man versucht heute die Fusion im so genannten Plasmazustand: Tokamak-Prinzip. Bis heute ist es jedoch noch nicht gelungen, Plasmen genügend hoher Temperatur und Dichte über ausreichend lange Zeit in einem Magnetfeld einzuschleifen.

Vorteile:

- (1) keine langlebigen radioaktiven Folgeprodukte
- (2) unerschöpfliche Vorräte an Deuterium in den Weltmeeren
- (3) direkte Energiegewinnung (MHD-Generator)
- (4) unkontrollierter Leistungsanstieg nicht möglich

XIV. Ausblick auf die Elementarteilchenphysik

1. Grundkräfte der Natur

- (1) Starke Wechselwirkung
- (2) Elektromagnetische Wechselwirkung

(3) Schwache Wechselwirkung

(4) Gravitationswechselwirkung

2. Kräfte durch Austausch von Teilchen: Quantenfeldtheorie

Es finden fortlaufend $p \leftrightarrow n + \Pi^+$ statt, man nennt sie deshalb virtuelle Pionen. Neben dem Proton sind auch andere Teilchen von einer Wolke virtueller Teilchen umgeben. Im Falle geladener Teilchen sind es virtuelle Photonen.

3. „Elementarteilchen-Zoo“

(1) Photonen

(2) Leptonen

(a) Neutrinos (ν_e und ν_μ)

(b) Elektronen

(c) Myonen ($Q = e$, aber $m = 207 \cdot e$)

(3) Hadronen;

(a) Mesonen

- Pionen
- Kionen

(b) Nukleonen

- Protonen
- Neutronen

(c) Hyperonen

4. Urbausteine der Materie: Quarks

Quellen

- Müller, Leitner, Mráz: Physik Leistungskurs, 1.Semester, „Elektrische und magnetische Felder“, Ehrenwirth Verlag . München 1988
- Müller, Leitner, Dilg, Mráz: Physik Leistungskurs, 2.Semester, „Elektromagnetische Schwingungen und Wellen, Wellenoptik, Relativitätstheorie“, Ehrenwirth Verlag . München 1995
- Müller, Leitner, Dilg: Physik Leistungskurs, 3.Semester, „Theorie der Wärme, Atomphysik“, Ehrenwirth Verlag . München 1996
- Müller, Leitner, Dilg: Physik Leistungskurs, 4.Semester, „Kernphysik“, Ehrenwirth Verlag . München 1995
- Lautenschlager, Horst: „Elektrisches und magnetisches Feld, Leistungskurs“, Stark Verlag, Freising 2001
- Lautenschlager, Horst: „Elektromagnetische Schwingungen und Wellen, Leistungskurs“, Stark Verlag, Freising 1998