



Physik II
Bachelorstudiengänge
Wirtschaftsingenieurwesen Physikalische Technologien,
Technische Orthopädie,

Prof. Dr. Hans-Christoph Mertins



Die Veranstaltung Physik II besteht aus dem Zusammenspiel der folgenden Komponenten:

Vorlesung: hier hören Sie die Grundlagen der Physik und lernen an Schauexperimenten die wichtigsten Effekte kennen. Dieses Script stellt den Stoff der Vorlesung dar, wobei die Beispielaufgaben in der Vorlesung vorgerechnet und von Ihnen nachgetragen werden müssen. Das Script ersetzt nicht den Besuch der Vorlesung, sondern soll Ihnen die Mitschrift ersparen. Die Vorlesung orientiert sich an den Büchern „Physik“ von Haliday, Resnick, Walker, VCH-Viley und „Prüfungstrainer Experimentalphysik“ von Mertins, Gilbert, Spektrum Akademischer Verlag Elsevier. Jeder Abschnitt der Vorlesung wird durch das entsprechende Kapitel des Buches „Prüfungstrainer Experimentalphysik“ noch einmal in Volltext zusammengefasst und anhand der Prüfungsfragen können Sie Ihr aktuelles Wissen schon während des Semesters und nicht erst vor der Prüfung testen.

Übung & Hausaufgaben: in den Übungen, den Tutorien und den wöchentlichen Hausaufgaben lernen Sie die Theorie in die Praxis umzusetzen und berechnen konkrete Anwendungen.

Praktikum: hier lernen Sie, wie das theoretische Wissen an Messgeräten und Maschinen im späteren Berufsalltag zum tragen kommt.

www.fh-muenster.de/physiklabor hier finden Sie alle wichtigen Informationen wie die Lösungen der Hausaufgaben, Praktikumsanleitungen, Formelsammlungen, die Bilder in höherer Auflösung und andere Hinweise.

Inhalt

Thermodynamik

1. Temperatur und Wärme
2. Ideales Gas
3. Wärme und Arbeit
4. Aggregatzustände
5. Entropie und Wärme
6. Wärmekraftmaschinen
7. Wärmetransport

Schall & longitudinale Wellen

1. Schallwellen
2. Schwebung

Wellenoptik

1. Elektromagnetische Wellen
2. Polarisierung
3. Beugung am Spalt und Gitter

Quantenmechanik

1. Photonen
2. Materiewellen
3. Wahrscheinlichkeitswellen
4. Elektronen im Potenzialtopf (optional)
5. Wasserstoffatom
6. Röntgenstrahlung
7. Laser

Festkörperphysik

1. Gitterstrukturen
2. Kristallbindungen
3. Energiebänder
4. Halbleiter
5. Festkörpermagnetismus

Thermodynamik

Studium der inneren Energie von Systemen mit extrem vielen Teilchen durch Mechanik der individuellen Teilchen praktisch nicht möglich. Besser ist die statistische Beschreibung des ganzen Ensembles durch neue Größen: Temperatur, Druck, Wärme.

1.1 Temperatur T

der menschliche Temperatursinn täuscht oft, z.B. Eisengeländer scheint im Winter kälter als Holz, da es mehr Wärme der Hand entzieht.

Temperatur T eines Gases wird über die kinetische Energie der Gas-Moleküle mit Masse m definiert. Betrachte nur Translation

individuelle Energie $E_j = \frac{1}{2}mv_j^2$ Energieaustausch durch Stöße untereinander
 => mittlere Energie $\langle E \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$
 $\underline{\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT}$ (Herleitung später)
 $k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltzmann-Konstante

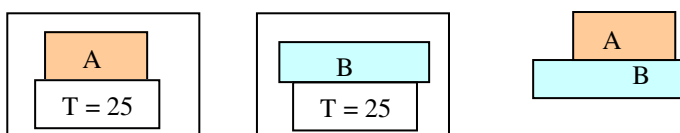
Temperatur [T] = K beachte: keine Grad-Zeichen bei Kelvin!
 Kelvin, SI-Basisgröße, man könnte T auch in Joule messen mit $k = 1$
 Minimal T = 0 K nie erreichbar, da $E > 0$, vollständig ruhige Atome unmöglich
 Maximal keine obere Grenze

FOLIE TEMP.

1.2. Nullter Hauptsatz

Exp. Thermoskop zeigen, d.h. Gerät, das Temp. anzeigt.

Temperaturmessung: Thermometer mit Objekt in Kontakt bringen und warten, bis beide im thermischen Gleichgewicht sind



Wenn sich zwei Körper A, B je im thermischen Gleichgewicht mit drittem Körper (Thermoskop) befinden, dann befinden sie sich auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.

„Jeder Körper hat eine Eigenschaft, die man Temperatur nennt.“
 Nullter Hauptsatz bildet die Grundlage zur Temperaturmessung.

Eingeführt ca. 1930, nach Entwicklung der Thermodynamik

1. 3. Temperaturmessung

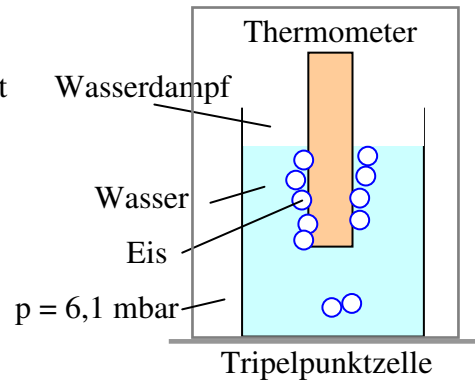
Definition der Temperaturskala durch ein reproduzierbares thermodynam. Phänomen, dem

Tripelpunkt: Eis – Wasser - Dampf im Gleichgewicht

$$T_3 = 273,16 \text{ K}, p_3 = 6,1 \text{ mbar}$$

$$1 \text{ Kelvin} = 1 / 273,16 \text{ te Teil}$$

der Differenz Tripelpunkt - Nullpunkt



Beachte: Kelvin ohne Gradzeichen

Kein Unterschied zwischen Temperatur und Temperaturdifferenz; je in Kelvin

Thermometer

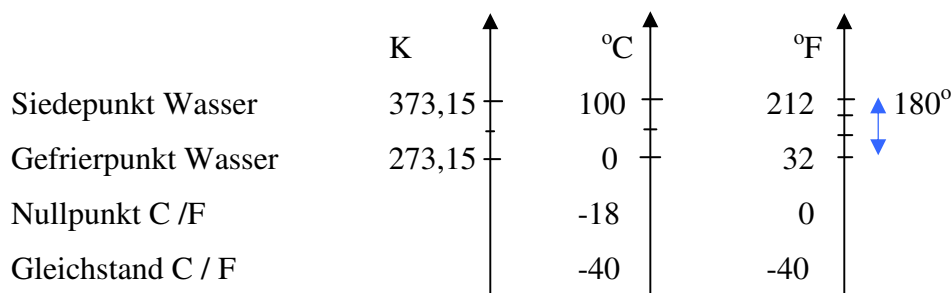
Direkteste Temperaturmessung wäre die Bestimmung der Molekülenergie $\langle E \rangle$ (Astrophysik)

$$T = \frac{2 \langle E \rangle}{3 k}$$

Technisch einfacher: Nutze Größen, die reproduzierbar von der Temperatur abhängen, wie:
 Volumen, Länge, Druck, elektrischer Widerstand

Celsius & Fahrenheit-Skalen

Celsius in Grad	Fahrenheit in Grad
Unterteilung: $1^\circ\text{C} = 1\text{K}$	$1^\circ\text{F} = 9/5^\circ\text{C}$
Nullpunkt $0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$	$0^\circ\text{C} = 32^\circ\text{F}$
$T_C = T - 273,15^\circ$	$T_F = 9/5 T_C + 32^\circ$



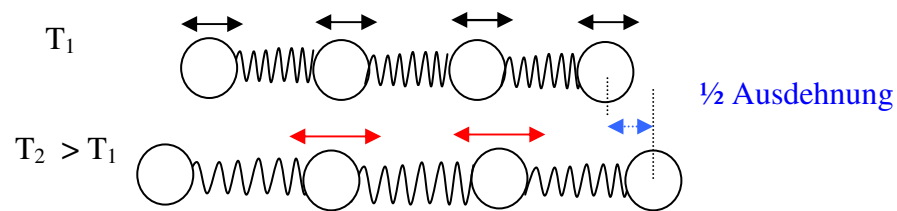
Beachte: Verwechsle nicht Temperatur mit Temperaturänderung

$10\text{ K} \neq 10^\circ\text{C}$, aber Temperaturunterschied von $\Delta T = 10^\circ\text{C} = 10\text{K} = 18^\circ\text{F}$

generell: Temperaturangaben in Kelvin!

1.4 Wärmeausdehnung

Durch Wärme wird dem Körper Energie zugeführt. Atome schwingen um Gleichgewichtslage. Mit wachsender Energie können die Atome stärker schwingen, d.h. gegen die Bindungskräfte bewegen, d.h. weiter voneinander entfernen. D.h. der Körper dehnt sich aus.



Wärmeausdehnung: meist unerwünscht

FOLIE SCHIENEN

Technisch vorbeugen: Dehnungsfuge durch Teer zwischen Betonplatten, Brückenbau

Längenausdehnung

Erhöht sich die Temperatur eines Stabes der Länge L um ΔT , so nimmt seine Länge zu um:

$$\underline{L(T) = L(T=0) \cdot (1 + \alpha \Delta T)} \quad \text{bzw.} \quad \Delta L = L \alpha \Delta T$$

$[\alpha] = 1/\text{K}$ Längenausdehnungskoeffizient

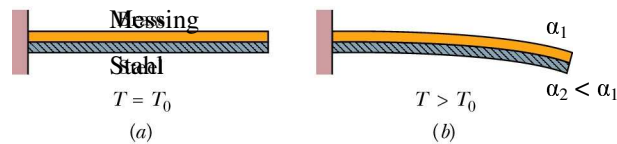
- Temperaturabhängig, aber bei $T \sim 300\text{K}$ nahezu temperaturunabhängig
- Materialabhängig

Material	Stahl	Messing	Beton	Glas	Invar (FeNi)
$\alpha = 10^{-6} / \text{K}$	11	19	12	9	0,7

Technische Bedeutung:

- Aufbau aus zwei Materialien => Zerstörung bei Temperaturänderung vermeiden
- Cerankochfelder, Ausdehnungskoeffizient muss klein sein
- Bimetallstreifen

Exp. Bimetallstreifen: Metalle mit unterschiedlichem α verklebt, z.B. Messing, Stahl
Verbiegung, Anwendung als Thermoschalter (Bügeleisen), Thermometer



Volumenausdehnung

Erhöht sich die Temperatur eines Körpers mit dem Volumen V um ΔT , so wächst es um

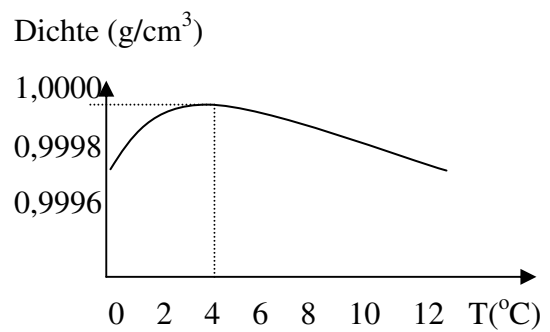
$\Delta V = V 3\alpha \Delta T$ folgt aus der Längenausdehnung

Wasser

verhält sich anders

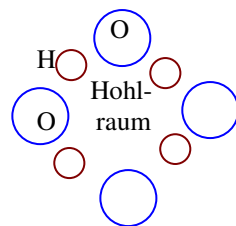
$T > 4^\circ\text{C}$: dehnt sich, denn $\alpha > 0$

$0 < T < 4^\circ\text{C}$: zieht sich zusammen, $\alpha < 0$



Eisstruktur

=> Kleinere Dichte,



Wasserstoffbrücken

FOLIE Eis

Eis (bei 0°C) $\alpha = -51 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ Eis wächst bei Abkühlung, für tiefere Temp. $\alpha > 0$

See friert an der Oberfläche zu, da Wasser / Eis mit $\sim 0^\circ\text{C}$ geringere Dichte hat als Wasser mit 4°C und daher oben schwimmt. Wäre dies nicht so, würde das schwerere Eis zum Seeboden absinken, und der See von unten zufrieren und wohl auch im Sommer nicht auftauen.

1.5 Temperatur & Wärme

- a) Stellt man heiße Suppe auf den Tisch, so kühlt diese ab.
- b) stellt man kalte Cola aus dem Kühlschrank auf den Zimmertisch, so wärmt sie sich auf.

Exp. 3 Thermometer für a) Raumtemp., b) Eiswasser, c) heißes Wasser

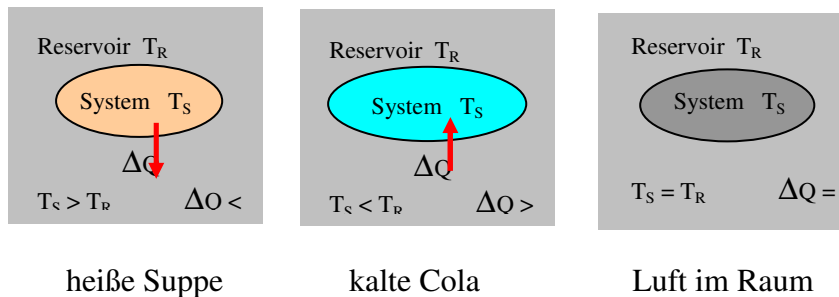
Mit Rechner messen, aufzeichnen und 90 min. laufen lassen

Modell:

System mit Temperatur T_S (Cola, Suppe, klein)

Reservoir mit Temp. T_R (Zimmer, groß, stabil gegenüber System)

Temperaturangleichung $T_S \Rightarrow T_R$ Energieaustausch zwischen Reservoir und System



Innere Energie besitzen die Atome eines Festkörpers, eines Fluids oder Gases in Form von Bindungsenergie und kinet. Energie, gemessen durch die Temperatur.

„**Wärme ΔQ** ist die zwischen einem System und dem Reservoir aufgrund des Temperaturunterschiedes ausgetauschte innere Energie. „

- Einheit $[\Delta Q] = \text{J}$ (Joule)
- ist *keine* intrinsische Eigenschaft des Körpers, das ist die Temperatur
- ist *kein* „Stoff“ der zwischen den Systemen fließt.

Exp. Lichtmühle: kinetische Energie der Atome steigt nach Energieaufnahme der Strahlung.

Kalorie (cal)

Altes Maß der Wärmemenge zur Temperaturerhöhung von 1g Wasser von 14,5°C auf 15,5°C

$$1 \text{ cal} = 4,1860 \text{ J}$$

Beachte $1 \text{ Cal} = 1 \text{ kcal}$ in der Ernährungswissenschaft (Kilo-Kalorie)

1.6.1 Wärmekapazität C

Proportionalitätskonstante zwischen aufgenommener/abgegebener Wärme Q und Temperaturänderung ΔT eines Körpers

$$\underline{\underline{\Delta Q = C \Delta T}} \quad \Delta T = (T_f - T_i)$$

$$[C] = \text{J} / \text{K}$$

Beachte: Begriff „Kapazität“ irreführend, da die Wärme nicht wie eine Substanz im Gefäß gespeichert wird. Wärmeeaufnahme heißt Energieaufnahme, kann beliebig fortgesetzt werden solange ΔT besteht, d.h. das „Gefäß“ läuft nicht über (kann aber schmelzen, verdampfen)!

1.6.2 Spezifische Wärme c

bezieht sich auf das Material des Körpers, d.h. die atomare Struktur und ihre Fähigkeit Energie in Form von Wärme aufzunehmen. Normiert auf die Masse m

$$\underline{\Delta Q = c m \Delta T}$$

$$[c] = \text{J} / (\text{kg K})$$

Bsp. Ganze Marmorplatte mit $m = 851 \text{ g}$ hat: $C = 749 \text{ J/K}$
 Marmor selbst hat $c = 880 \text{ J/(kg K)}$

Bsp. Wasser wurde benutzt um Kalorie zu definieren
 $\Rightarrow c = 1 \text{ cal/(g } ^\circ\text{C)} = 4190 \text{ J/(kg K)}$

Bsp. selbe Wärmemenge Q erwärmt 1 g von Stoff A um 3°C , 1 g von Stoff B um 4°C .
 Welcher Stoff hat größere spez. Wärme? A

Bsp. Material	Blei	Kupfer	Alu.	H ₂ O
Spez. W. c (J/(kg K))	128	386	900	4190

Beachte: Bei der Messung der spezifischen Wärme einer Substanz spielt der Prozeß der Wärmeübertragung eine Rolle (später genauer).

- i) konstanter Druck c_p
- ii) Konstantes Volumen c_v

1.6.4 Kalorimeter

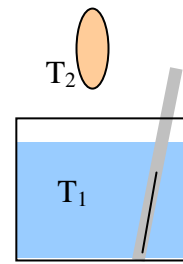
i) isoliertes Gefäß mit C_W enthält Wasser mit c_0 , Masse m_1 , T_1

ii) Probekörper wird im Wasserdampf erhitzt

$$m_2, T_2 = 100^\circ\text{C}, \text{ gesucht } c_2 = ?$$

iii) Probekörper in Kalorimeter (Wasser) legen

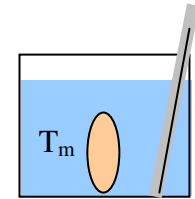
=> Mischungstemperatur T_m stellt sich ein



Energieerhaltungssatz: abgegebene = aufgenommene Wärme

$$\Delta Q_2 = c_2 m_2 (T_2 - T_m) = (c_0 m_1 + C_W)(T_m - T_1) = \Delta Q_1$$

$$c_2 = \frac{c_0 m_1 + C_W}{m_2} \frac{T_m - T_1}{T_2 - T_m}$$



2 Kinetische Gastheorie

Deutung der phänomenologischen Größen der Thermodynamik (Druck, Volumen, Temperatur) durch die Mechanik der das Gas bildenden Atome bzw. Moleküle.

2.1 Avogadro-Zahl N_A

da die Atome / Moleküle Grundlage des Modells bilden, müssen wir für diese ein Maß finden.

Ein Mol enthält N_A Einzelteilchen, das ist gleich der Anzahl N_A der Atome in 12g Kohlenstoff C^{12} .

$$\underline{N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ 1/mol}} \quad (\text{Avogadro (1776-1856), Loschmidt'sche Zahl})$$

Molvolumen $V_{\text{mol}} = 22,4 \text{ Liter}$

Molzahl $n = N / N_A$ Ein Gas mit N Teilchen besitzt n Mole

Molmasse $M = m N_A$ Masse von einem Mol

$m =$ Masse eines Atoms / Moleküls

2.2 Ideale Gase

wenn wir ein mikroskopisches Modell der Thermodynamik entwickeln wollen, müßten wir die Art der Atome, Moleküle des entsprechenden Gases (N_2 , O_2 , CO , H , He) berücksichtigen, insbesondere die atomaren Wechselwirkungen & Kräfte. Bei kleiner Dichte spielen diese aber keine Rolle mehr, da die Atome weit voneinander entfernt sind! Reale Gase => ideale Gase

Definition: ideales Gas:

- kein Eigenvolumen der Moleküle
- keine atomaren Anziehungs-Kräfte
- kleine Dichte, großer Abstand der Atome

Ideales Gasgesetz

$$\underline{pV = nRT} \quad n = \text{Molzahl}$$

$$R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol K}) \quad \text{Gaskonstante, für ideale Gase}$$

Boltzmannkonstante

$$k = R / N_A = (8,31 \text{ J mol}) / (6,02 \times 10^{23} \text{ mol K}) = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

=> $nR = Nk$

=> $\underline{pV = NkT}$ beachte Unterschiede in den Formen des idealen Gasgesetzes:

- i) Zahl n der Mole taucht auf
- ii) Zahl N der Moleküle taucht auf

Was ist ideal am idealen Gasgesetz ? Die einfache Form!

Exp. Luftballon in flüssig Stickstoff $V \sim T$

Exp. Luftballon expandiert unter der Vakuumglocke $V \sim 1/p$

2.3.1 Mittlere Molekülgeschwindigkeit

$v_{\text{rms}} = (\langle v^2 \rangle)^{1/2}$ (root mean square) mittleren Geschwindigkeit der Moleküle, ohne Richtungsangabe. Erst individuelle Geschw. v_j quadrieren, dann Mittelwert bilden => Vorzeichen entfällt, nur Beträge sind relevant

mit $pV = nRT$ (ideales Gasgesetz)

=> $v_{\text{rms}} = (3RT / M)^{1/2}$ (hier ohne Beweis, folgt nach längerer Rechnung)

Bsp. N_2 -Moleküle , $M = 0,028 \text{ kg/mol}$, $T = 300 \text{ K}$, $R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol K})$

$$v_{\text{rms}} =$$

Bsp. Welche Moleküle sind noch schneller ?

2.3.2 Brownsche Bewegung

Schwerere Schwebeteilchen von $1\mu\text{m}$ Durchmesser, $m = 10^{-15}\text{ kg}$ erreichen bei 300 K nur

$$v_{\text{rms}} = 3\text{ mm/s}$$

erstmalig mikroskopisch beobachtet von Brown (Botaniker) an Teilchen in Pflanzenzellen.

Moleküle laufen nicht auf geradlinigem Weg durch den Raum, sie nehmen Zick-Zack-Kurs.

Exp. Brownsche Bewegung unter dem Mikroskop sichtbar machen (Pflanzenzellen ?)

Effektiv zurückgelegter Weg eines Teilchens in Zeit Δt :

$$\langle x^2 \rangle = (kT / 6\pi r \eta) \Delta t \quad (\text{Einstein - Smoluchowski})$$

η = Viskosität

Brownsche Bewegung begrenzt oft Auflösungsvermögen:

- Elektronenbewegung beeinflusst elektr. Widerstand
- menschl. Hörvermögen, Trommelfellrauschen

2.3.3 Schallgeschwindigkeit

Hängt von der Geschwindigkeit der Moleküle im Gas ab. Schallwelle = Druckwelle, übertragen durch Stöße der Moleküle untereinander. Die Schallgeschwindigkeit (Ausbreitungsgeschw. der Druckwelle) muß immer kleiner als die Geschwindigkeit der Moleküle sein.

Exp. He-Gas in den Mund nehmen und sprechen => hohe Stimme

$$\text{Frequenz } f = v / \lambda$$

$$\text{Luft: } \sim \text{N}_2 \Rightarrow v_{\text{rms}} = 517\text{ m/s} \quad v_{\text{schall}} = 341\text{ m/s}$$

$$\text{He: } v_{\text{rms}} = 1370\text{ m/s} \quad v_{\text{schall}} = 965\text{ m/s}$$

Bsp. gegeben sind die Zahlen: 5, 11, 32, 67, 89. Bestimme:

$$\text{a) Mittelwert: } \langle n \rangle = (5 + 11 + 32 + 67 + 89) / 5 = 40,8$$

$$\text{b) rms-Größe } n_{\text{rms}} = (1/n * (5^2 + 11^2 + 32^2 + 67^2 + 89^2))^{1/2} = 52,1$$

2.3.4 Translationsenergie

mittlere kinetische Energie eines Moleküls im Gas; Geschw. kann sich nach Stoß ändern:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v_{\text{rms}}^2$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2} m (3RT / M) && \text{mit } M / m = N_A \\
 &= (3RT) / (2N_A) && \text{mit } k = R / N_A \\
 &= 3/2 kT
 \end{aligned}$$

=> Bei gegebener Temperatur T haben alle Moleküle in einem Gas die selbe mittlere kinetische Energie, unabhängig von ihrer Masse. Die Temperatur ist ein direktes Maß für die mittlere kinetische Energie der Gasmoleküle.

- Exp.** Glühwendel im Vakuum Wärmeleitung / Energieübertrag durch Stoß der Moleküle
- a) Glühwendel in Luft => Energieabgabe durch Stöße mit Luftmolekülen => T klein
 - b) Glühwendel in Vakuum => keine Energieabgabe durch Stöße => T groß => glüht

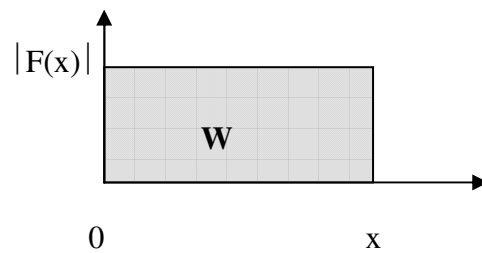
Einschub: Integrale

Beispiel: Arbeit durch veränderliche Kräfte

bisher: Kraft $F(x) = \text{konstant}$ über dem Weg x

$$W = \vec{F} \cdot \vec{x} = Fd, \quad \text{mit } \vec{F} \text{ parallel } \vec{x}$$

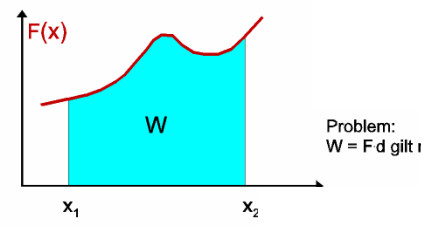
Interpretation: Fläche unter Kurve $F(x)$



neu: Kraft-Betrag $|F(x)|$ ändert sich mit dem Ort, aber Richtung konstant, F zeitlich konstant

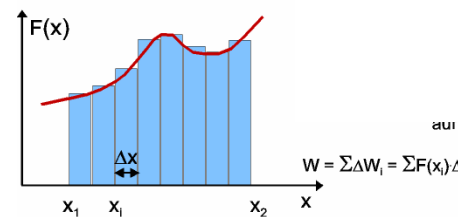
Bestimmung von Integralen

bekannt $g(x)$
 gesucht Integral $G(x) = \int_{x_1}^{x_2} g(x) dx$



Vorgehen:

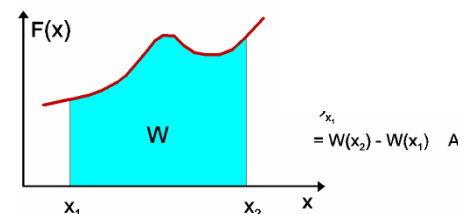
1. suche Stammfunktion $G(x)$ so dass Ableitung $dG(x)/dx = g(x)$



Ergebnis allgemein $G(x) + c$ $c = \text{Konstante}$
 denn $dG(x)/dx = g(x) + 0$

2. bestimmtes Integral $\int_{x_1}^{x_2} g(x) dx = G(x)|_{x_1}^{x_2} = G(x_2) - G(x_1)$

Deutung: Fläche unter der Kurve $g(x)$ im Bereich von x_1 bis x_2



Typische Integrale / Stammfunktionen

Suche eine Funktion, deren Ableitung die Funktion unter dem Integral ergibt

$$\int dx = x + c \quad c = \text{konstant wird zur Stammfunktion addiert}$$

$$\int a u(x) dx = a \int u(x) dx \quad \text{konst. Faktor herausziehen}$$

$$\int [u(x) + v(x)] dx = \int u(x) dx + \int v(x) dx \quad \text{Summen getrennt integrieren}$$

$$\int x^m dx = (x^{m+1})/(m+1) \quad m \neq -1$$

$$\int 1/x dx = \ln |x| \quad \text{Logarithmus}$$

$$\int e^x dx = e^x$$

$$\int \sin x dx = -\cos x, \quad \int \cos x dx = \sin x$$

3 Wärme & Arbeit

3.1 Arbeit

Wie werden im thermodynamischen Prozeß Wärme und Arbeit zwischen zwei Systemen ausgetauscht? Wichtig für alle Wärmekraftmaschinen. (siehe auch 2.2.1)

Ideales Gas im Zylinder

Zylinder thermisch isoliert

Kolben beweglich, (Fläche A)

variables Gewicht drückt auf Kolben

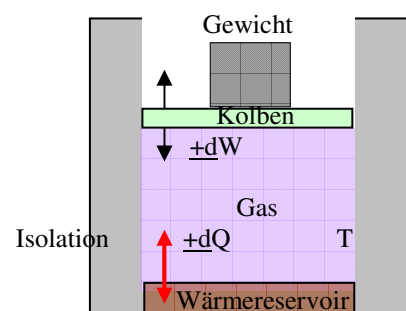
Wärmereservoir regulierbar, heizt / kühlt Gas

Anfangszustand i) p_i, V_i, T_i , Endzustand f) p_f, V_f, T_f

Prozeß läuft langsam ab, damit immer thermodynamisches Gleichgewicht herrscht !

Gas kann a) Wärme vom Reservoir aufnehmen ($dQ > 0$) oder abgeben ($dQ < 0$)

b) Arbeit leisten d.h. Kolben heben ($dW > 0$) oder senken ($dW < 0$)



Idealisierung: kleine Verschiebung dx des Kolbens \Rightarrow Kraft F auf Kolbenfläche A ist konst.

Arbeit dW durch Kolben:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{x} = p \, A dx = p \, dV$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{W = \int_{V_i}^{V_f} dW = \int_{V_i}^{V_f} p dV}} \quad \text{gesamte Arbeit, allgemeine Form}$$

\Rightarrow man muß $p(V,T)$ für den Prozeß kennen !

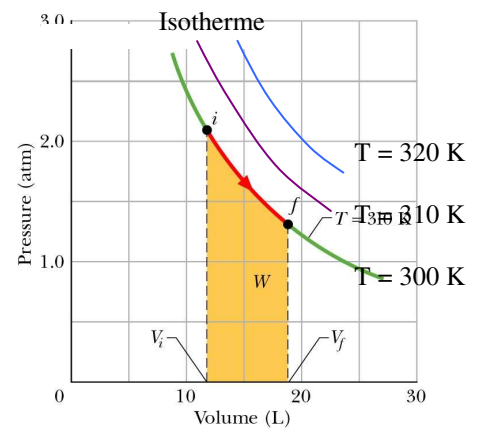
3.1.2 Arbeit auf einer Isothermen

Betrachte einen isothermen Prozeß (bei konstanter Temperatur T_1) eines idealen Gases.

Temperatur $T = \text{konstant}$

$$p = nRT \frac{1}{V} \quad (p \sim 1/V \text{ Gesetz von Boyle-Mariotte})$$

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV \\ &= nRT \int_{V_i}^{V_f} (1/V) dV \quad \text{da } T = \text{konst.} \\ &= nRT [\ln V]_{V_i}^{V_f} \quad \text{mit } \ln(a) - \ln(b) = \ln(a/b) \\ &= nRT \ln(V_f / V_i) \quad \text{Logarithmus zur Basis } e \end{aligned}$$



Exp. a) Ausgezogene Luftpumpe zuhalten und Luft langsam (isotherm) komprimieren

$$V_f < V_i$$

$$\Rightarrow \ln(V_f / V_i) < 0 \quad \Rightarrow W < 0$$

b) Kolben der Luftpumpe loslassen \Rightarrow Expansion der Luft

$$V_f > V_i$$

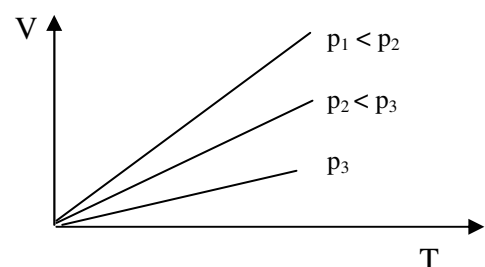
$$\Rightarrow \ln(V_f / V_i) > 0 \quad \Rightarrow W > 0$$

3.1.3 Arbeit auf einer Isobaren

Druck $p = \text{konstant}$

$$pV = nRT \quad (V \sim T \text{ Gesetz von Charles})$$

$$\Rightarrow W = \int_{V_i}^{V_f} p dV = p (V_f - V_i)$$

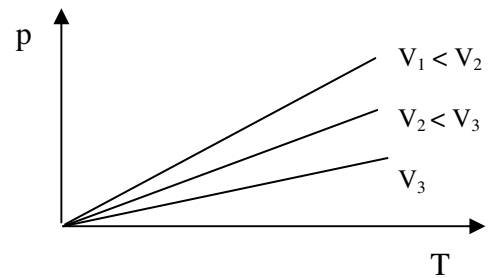


3.1.4 Arbeit auf einer Isochoren

Volumen $V = \text{konstant}$

$$pV = nRT \quad (p \sim T \text{ Gesetz von Gay-Lussac})$$

$$\Rightarrow W = \int_{v_i}^{v_f} p dV = 0 \quad (dV = 0)$$



Bsp. Ein Zylinder enthält 12 Liter bei 20°C und 15 bar. Die Temperatur steigt auf 35°C und Volumen sinkt auf 8,5 Liter. Welchen Druck besitzt das ideale Gas dann?

Lsg.

3.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

bei thermodynamischen Prozessen hängen verrichtete Arbeit W und ausgetauschte Wärme dQ vom Prozessweg ab. Aber $(dQ - dW)$ ist wegunabhängig; nur abhängig von Anfangs- & Endzustand. Deutet auf Erhaltungsgröße, die innere Energie des Systems hin

$$\underline{dE_{\text{int}} = dQ - dW} \quad (\text{erster Hauptsatz})$$

Die Änderung der inneren Energie ergibt sich aus der der Wärme (übertragene Energie) und der geleisteten Arbeit.

Also $dQ = dE_{\text{int}} + dW$ Zuführte Wärmeenergie teilt sich auf in:

a) $dE_{\text{int}} = 3/2 k dT = c_m dT$ Temperaturanstieg, kinetische Energie

b) $dW = p dV$ Druckarbeit

Vorzeichen: System (Gas) ist Bezugsunkt, also: E_{int} wird größer, wenn

a) Wärme (dem Gas) zugeführt wird

b) Arbeit am System verrichtet wird (z.B. Gas wird komprimiert)

Arbeit, die das System verrichtet $W > 0$, Arbeit, die am System verrichtet wird $W < 0$

Der 1.HS der Thermodynamik ist eine Erweiterung des Energie-Erhaltungssatzes der Mechanik auf nicht-isolierte Systeme, denn der Wärmeaustausch wird erfaßt.

3.3 Thermodynamische Prozesse

Anwendung des 1. HS auf thermodynamische Prozesse

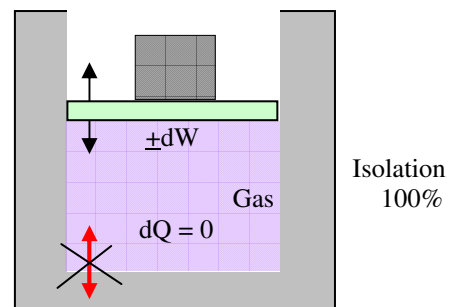
3.3.1 Adiabatisch $dQ = 0$

kein Wärmeaustausch System / Umgebung

- Zylinder 100% isoliert
- oder schneller Prozeß

$\Rightarrow dE_{int} = -dW$ (erster Hauptsatz)

einzigste Möglichkeit des Energieaustausches ist die Druckarbeit



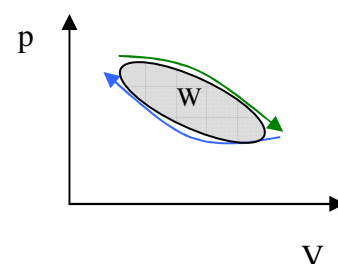
3.3.2 Isochor $dV = 0$

$\Rightarrow W = \int_{V_i}^{V_f} p dV = 0$ System kann keine Arbeit verrichten
 $dE_{int} = dQ$ nur die innere Energie ändert sich

3.3.3 Kreisprozeß

System kehrt nach Austausch von Arbeit und Wärme in den Anfangszustand zurück

$\Rightarrow dE_{int} = 0$
 $\Rightarrow dQ = dW$
 zugeführte Wärme wird in Arbeit umgewandelt
 \Rightarrow Wärmekraftmaschinen

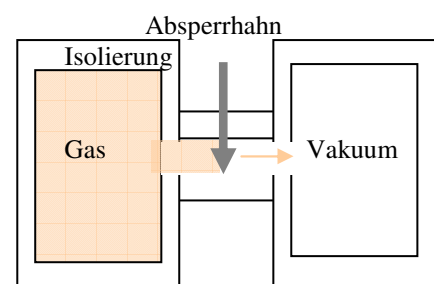


3.3.4 Freie Expansion

Bedingungen: a) adiabatisch $dQ = 0$

- b) $dW = 0$, Gas kann sich frei ausdehnen gegen Vakuum

$\Rightarrow dE_{int} = 0$



Prozess unterscheidet sich von vorhergehenden Prozessen:

- schnelle Ausdehnung, daher kein therm. Gleichgewicht
- Druck ist ortsabhängig => man kennt den Prozeßverlauf nicht
=> nur Anfangs / Endzustand im p(V)-Diagramm bekannt

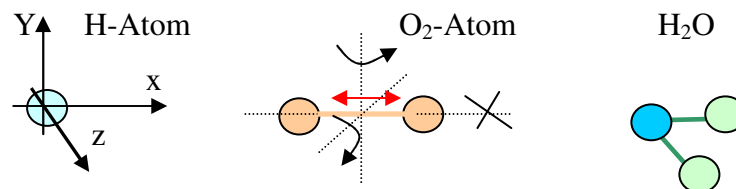
Beachte generell: die Arbeit ist immer von der Prozeßführung (Weg) abhängig!

Exp. Dampfmaschine

3.4 Molare Wärmekapazität

Ziel ist die Rückführung der inneren Energie auf die mechanische Energie eines Moleküls.

Die ist abhängig von der Zahl der möglichen Bewegungen, d.h. der Freiheitsgrade f



Zahl der Atome	1-atomig	2-atomig	mehr-atomig
a) Translation	3 Freiheitsgrade	3 Freiheitsgrade	3 Freiheitsgrade
b) Rotation	0	2	3
c) Schwingung	0	x	x

Gleichverteilungssatz der Energie:

Auf jeden Freiheitsgrad eines Moleküls entfällt im thermischen Gleichgewicht die gleiche mittlere Energie:

$$E_{\text{int}} = 1/2 kT \quad (\text{pro Molekül und pro Freiheitsgrad})$$

$$E_{\text{int}} = 1/2 RT \quad (\text{pro Mol})$$

Also $E_{\text{int}} = f/2 kT$ (Gesamtenergie pro Molekül mit f Freiheitsgraden)

Spezifische Wärme ist abhängig vom Prozeß der Wärmezufuhr:

3.4.1 Bei konstantem Volumen C_V

System ist thermisch isoliert

Wärmezufuhr dQ bewirkt - Temperaturerhöhung $T + dT$

- Druckerhöhung $p + dp$

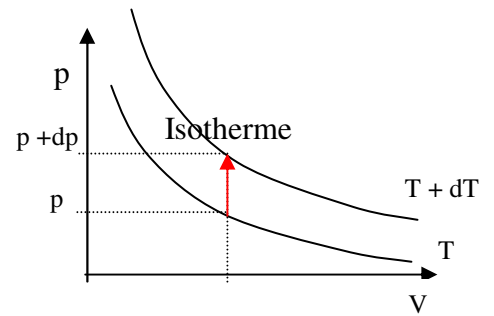
$$dQ = nC_V dT \quad (\text{für } n \text{ Mol})$$

C_V : molare Wärmekapazität, n : Anzahl der Mole

$$dE_{\text{int}} = nC_V dT - dW \quad \text{mit 1.HS, } dW = pdV = 0$$

$$\Rightarrow C_V = dE_{\text{int}} / ndT \quad \text{mit } dE_{\text{int}} = \frac{1}{2} f nk dT$$

$$\underline{C_V = \frac{1}{2} f R} \quad (\text{für 1 Mol } n = 1)$$



3.4.2 Bei konstantem Druck C_p

Q teilt sich auf in Temperaturerhöhung und Volumenausdehnung, mehr Wärme zur Temperaturerhöhung nötig ! $\Rightarrow C_p > C_V$

$$dQ = nC_p \Delta T$$

C_p : molare Wärmekapazität, n : Anzahl der Mole

$$dE_{\text{int}} = dQ - dW$$

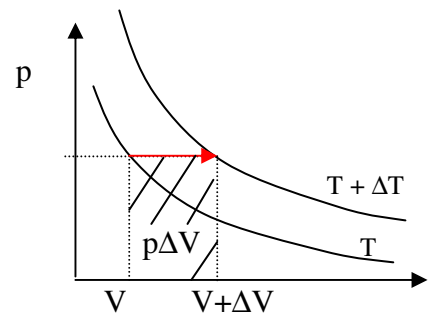
$$nC_V dT = nC_p dT - pdV \quad \text{mit } pdV = nRdT$$

$$\Rightarrow C_V = C_p - \frac{nRdT}{ndT}$$

$$\Rightarrow C_V = C_p - R$$

$$\Rightarrow \underline{C_p = (\frac{1}{2} f + 1)R} \quad (\text{für 1 Mol})$$

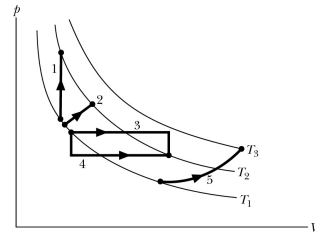
\Rightarrow Wärmekapazität folgt über die Freiheitsgrade aus der Mechanik der Moleküle



Molekül	Experiment (T=273K)			Theorie		
	C_V	C_p	Atome proMolekül	Freiheitsgrade	C_V	C_p
	J/(mol K)			f	J/(mol K)	
He	12,6	20,9	1	3	12,5	20,9
O ₂	21,0	29,3	2	5	20,9	29,3
CO ₂	25,1	32,9	3	6	25,0	33,4

Bsp. Ordne Prozesse nach der Änderung der inneren Energie (größte zuerst)

Lsg.



3.4.3 Zugang zur Atomphysik

Aus dem Verhältnis der Wärmekapazitäten

$$\gamma = C_p / C_v = (f + 2)/f$$

erhält man direkt Information über die atomare Struktur der Moleküle

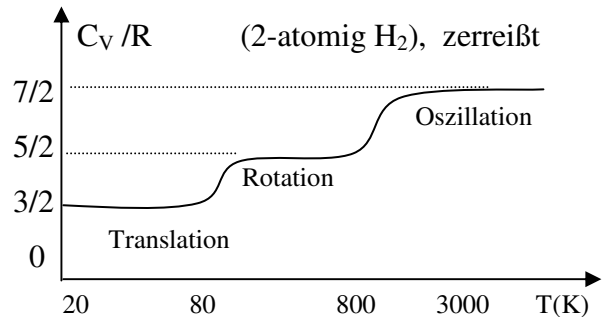
Gase mit $C_p / C_v = 5/3$ haben $f = 3 \Rightarrow$ einatomig

$C_p / C_v = 7/5$ $f = 5 \Rightarrow$ 2-atomig

$C_p / C_v = 8/6$ $f = 6 \Rightarrow$ 3 / mehratomig oder gewinkelt

Wärmekapazität ist selbst temperaturabhängig;

Freiheitsgrade können eingefroren sein.



3.5 Adiabatische Zustandsänderung

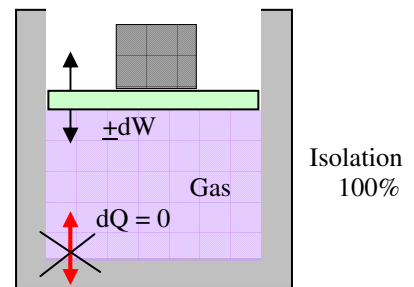
$dQ = 0$ d.h. kein Wärmeaustausch zwischen System und Umgebung während des Prozesses

wenn 100% isoliert oder schneller Prozess

Gilt für $p(V)$

$pV^\gamma = \text{konstant}$ (ohne Bew.)

$\gamma = C_p / C_v > 1$

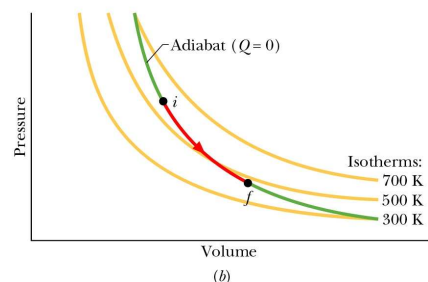


Gilt für $V(T)$

$nRT V^{\gamma-1} = \text{konstant}$

Adiabate $p = \text{konst} / V^\gamma$

Isotherme $p = \text{konst} / V^1$ (flacher als Adiabate)



Exp. Sektflasche, Wasserflasche, Coladose

Flasche steht leicht unter Druck und wird schnell geöffnet. Es bildet sich ein feiner Nebel über der Öffnung, zusätzlich zu den Sektspritzern.

Prozeß: Gasblase aus CO₂ und Wasser oben in der Flasche

Expansion $dV > 0$, da $p >$ Atmosphärendruck

Gas leistet Arbeit $dW = pdV$

Energiequelle: E_{int} $dW = dE_{int}$, $dQ = 0$ da adiabatisch, weil schnelle Expansion

Gastemperatur sinkt $dT = dE_{int} / (f/2 nk) \Rightarrow$ Gas kondensiert zu Nebel

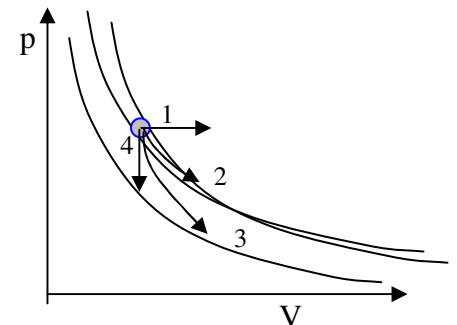
Generell: $T_i V_i^{\gamma-1} = T_f V_f^{\gamma-1}$

$T_f = T_i (V_i^{\gamma-1} / V_f^{\gamma-1})$ wegen $V_f > V_i \Rightarrow T_f < T_i$

Temperatur sinkt immer bei adiabatischer Expansion!

Zusammenfassung

Prozess	konst. Größe	Weg	Ergebnisse
Isobar	p	1	$W = pdV, Q = nC_p dT$
Isotherm	T	2	$Q = W = nRT \ln\{V_f/V_i\}, dE_{int} = 0$
Adiabatisch	$pV^\gamma, TV^{\gamma-1}$	3	$Q = 0, W = -dE_{int}$
Isochor	V	4	$W = 0, dE_{int} = nC_v dT$

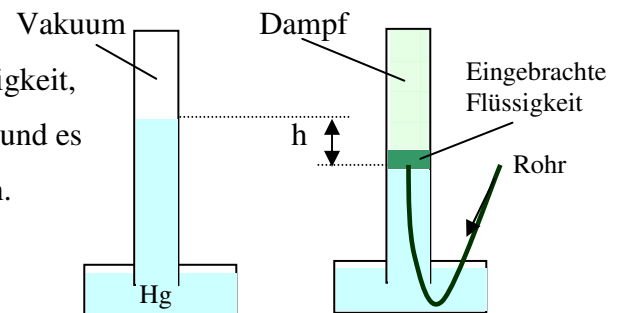


4 Aggregatzustände

4.1 Koexistenz von Flüssigkeit & Dampf

Nur an der Tafel skizzieren

Exp. Bringt man in ein evakuiertes Gefäß eine Flüssigkeit, die es nur teilweise füllt, so verdampft ein Teil und es stellt sich der charakteristische Dampfdruck ein.



Exp mit Wasser statt Hg und Alkohol

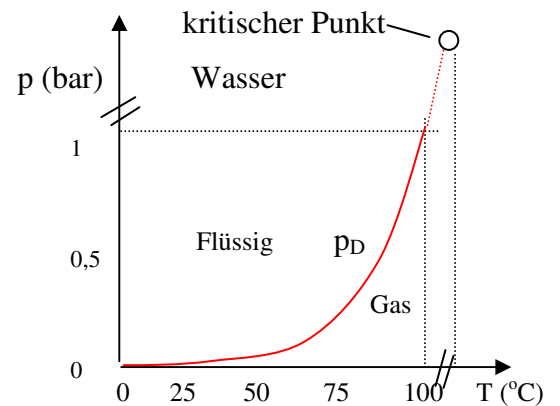
Dampfdruck: direkt gemessen durch Höhe h in mm Hg (= Torr) falls Hg benutzt wird

Volumenänderung (z.B. Senken des Rohres)

- => Druck ändert sich nicht
- => Dampf geht in Flüssigkeit über
- => Koexistenz von gasförmig / flüssig

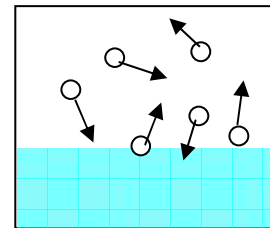
Dampfdruck bei 20°C:

Substanz	H2O	Methylalkohol	Quecksilber
p_D (mbar)	23,3	125	$1,6 \times 10^{-6}$



Dampfdruck-Kurve:

- Rote Linie: p & T so dass Flüssigkeit und Dampf im Gleichgewicht
- Unterhalb: T groß, p klein => Dampf
- Oberhalb: T klein, p groß => flüssig
- Kritischer Punkt: Ende der Dampfdruckkurve
oberhalb von T_3 nur Gas



Moleküle treten aus Flüssigkeit aus / ein

Austrittsarbeit $W_D =$ Verdampfungswärme notwendig

Verdampfen: $E_{kin} > W_D$ für "heiße" Moleküle möglich

$$E_{kin} = f/2 kT$$

=> Temperatursteigerung bewirkt Druckanstieg (s.o.)

Boltzmannverteilung gibt den Anteil der Moleküle an mit:

$$E_{kin} > W_D$$

daraus ergibt sich die Dampfdruckkurve:

$$p_D = b kT \exp\{-W_D/kT\}$$

$b =$ konst. enthält u.a. die Teilchendichte der Flüssigkeit

Sieden

Wenn Dampfdruck und der darüber lastende Druck gleich ($p_D = p_0$) so siedet die Flüssigkeit.

Dampfentwicklung nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in der Flüssigkeit (Blasen).

Exp. Siedepunktniedrigung von Wasser im Vakuum. Wasser im Becher unter einer Vaku-
umglocke beginnt bei 300 K zu kochen, wenn p klein genug.

Weitermachen bis Eis entsteht

Bsp. kann Reinhold Messner auf dem Mont Everest sein Frühstücksei kochen?

Nein, siehe Dampfdruckkurve:

am Mont Everest: $p_0 = 340 \text{ mbar}$ $\Rightarrow T = 65 \text{ }^\circ\text{C} \ll 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Verdampfungswärme W_D

Wenn Moleküle aus Flüssigkeit austreten, entziehen sie dieser Verdampfungswärme W_V

Wird die nicht nachgeführt, so kühlt die Flüssigkeit ab (Verdunstungskälte),

(Bsp. feuchte Haut nach dem Baden ist kälter als trockne Haut)

$\Rightarrow T$ sinkt, $\Delta T = 2E / f_k$ denn nur langsame Moleküle bleiben zurück

isotherme Verdampfung: T konst:

$$\underline{dW_D = dQ = m\lambda_D} \quad \text{Verdampfungswärme zuführen}$$

Kondensation des Dampfes zur Flüssigkeit: Verdampfungswärme wird frei

Material	Siedepunkt	Verdampfungswärme
Sauerstoff	90,2 K	213 kJ/kg
Wasser	373 K	2256 kJ/kg
Kupfer	2868 K	4730 kJ/kg

Kühlschrank:

Prozeß: Verdampfungswärme, nicht Expansion nutzen

Ammoniak, Ethylchlorid gasförmig bei gewünschter Kühltemp (z.B. $-20 \text{ }^\circ\text{C}$)

Wird komprimiert und so verflüssigt (kostet Arbeit)

Verdampft am Wärmetauscher des Kühlschranks \Rightarrow kühlt dabei ab, entzieht

Verdampfungswärme

4.2 Koexistenz von fest & flüssig

Schmelzen: Aufbrechen der Kristallbindungen

$$\underline{dW_s = dQ = m\lambda_s}$$

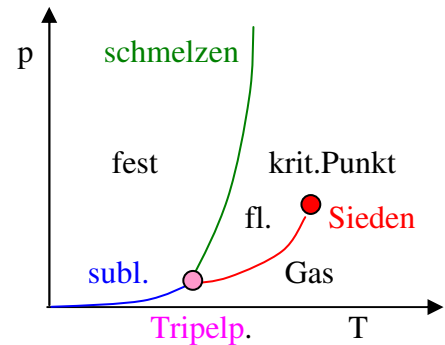
Schmelzwärme zuführen

Kondensation der Flüssigkeit zum Festkörper: Schmelzwärme wird frei

Schmelztemperatur ist druckabhängig, aber weniger als die Siedetemperatur

Sublimation: Übergang fest => gasförmig,
flüssiger Zustand wird übersprungen

Tripelpunkt: einziger Gleichgewichtspunkt (p,T,V)
für fest, flüssig, gasförmig

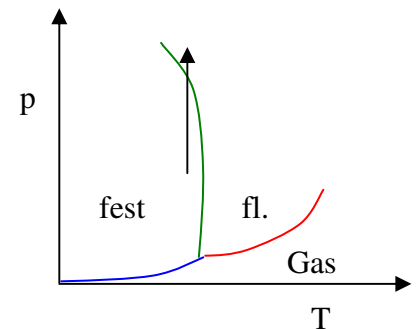


Prozesse eintragen: p steigt: gas => flüssig => fest
T steigt: fest => flüssig => gas
fest => gas (Sublimation)

Exp. Trockeneis, festes CO₂, geht direkt in gasförmigen Zustand über
Münze auf Eis legen => hebt sich durch Gas,
Siedetemp. 194,7 K = -78,5 °C bei 1,13 bar

Wasser zeigt eine Anomalie in der Schmelzkurve um 0°C

Exp. Eisblock wird mit Drahtschlinge / Gewicht durchgeschnitten
Man kann durch Drucksteigerung Eis schmelzen
Bei CO₂, geht es nicht!
Tripelpunkt Wasser p = 6,1 mbar, T = 0,0075 °C



4.4 Reale Gase

ideale Gase: kleine Dichte, großer Abstand der Atome, Atome haben kein Volumen
Übergang Gas => Flüssigkeit ist ganz und gar nicht "ideal"

Neues Modell: Van der Waals

b = Eigenvolumen der Moleküle

a/V_{mol}^2 = Binnendruck durch Anziehungskräfte der Moleküle

$$\underline{\underline{(p + a/V_{mol}^2)(V_{mol} - b) = RT}} \quad n = 1 \text{ Mol}$$

Bsp. CO_2 $a = 3,6 \times 10^{-6} \text{ bar m}^6 \text{ mol}^{-2}$, $b = 4,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$

FOLIE VAN DER WAALS KURVEN ISOTHERMEN

Prozess p-V-Kurven für CO_2 beschreiben:

Isotherme bei 0°C , 1 bar $\Rightarrow V = 22,4 \text{ L} = \text{ideales Molvolumen}$

Komprimieren auf 0,3 L (A) $\Rightarrow p = 47 \text{ bar}$, nicht 75 bar wie für ideales Gas erwartet

Weitere Kompression: $p = \text{konstant}$, nicht van der Waals Kurve!

\Rightarrow Flüssigkeitsbildung, van der Waals beschreibt nur Gase

Punkt (E) Dampf völlig kondensiert

Weitere Kompression: p steigt sehr steil, Flüssigkeiten haben kleine Kompressibilität

Isotherme bei 20°C : Prinzip gleich, aber Gas / Flüssigkeits Bereich kleiner

Isotherme bei 31°C : rein van der Waals Gl., keine Flüssigkeit

\Rightarrow Kritischer Punkt, oberhalb keine Flüssigkeit

$T \gg T_{\text{Krit}}$ ideales Gas

Schleifenflächen $ABC = CDE$ (Regel von Maxwell)

Schleife

AB übersättigter Dampf, es fehlen Kondensationskeime

ED überhitzte Flüssigkeit, es bilden sich keine Dampfblasen,

Siedeverzug, Explosion vermeiden durch Siedesteine

D kann unter $p = 0$ liegen, Zerreißfestigkeit der Flüssigkeit

4.5 Gasverflüssigung

Joule-Thomson Effekt

Die innere Energie eines realen Gases hängt stark von der Wechselwirkung der Moleküle untereinander ab, d.h. von der Gasdichte

Bei Expansion: $\Rightarrow dE_{\text{int}} \neq 0$ auch wenn $dQ = 0$ (adiabatisch),

$dW = pdV = 0$ (gedrosselte Expansion)

$\Rightarrow dT = 2dE_{\text{int}} / f k \neq 0$

aus van-der Waals-Gl. folgt:

$$\Rightarrow \underline{\underline{dT \approx dV \frac{RTb - 2a}{(\frac{1}{2}f + 1)RV^2}}}$$

ob Gas dabei abkühlt ab, entscheidet die Inversionstemp. $T_i = 2a/Rb$

$\Rightarrow dT < 0$ wenn $T < T_i$ Gas kühlt ab

$\Rightarrow dT > 0$ wenn $T > T_i$ Gas erwärmt sich

Prozeß:

bei Expansion entfernen sich die Moleküle voneinander, Anziehungskräfte müssen überwunden werden (van der Waals Konstante a), kostet Energie d.h. kinetische Energie d.h. Temperatur sinkt.

Exp. Spraydose, auf Temperatursensor sprühen

Linde-Verfahren

Luft, CO_2 : $T_i > 300 \text{ K} \Rightarrow$ man kann Luft verflüssigen bei Zimmertemperatur

FOLIE LINDE

- i) Luft wird komprimiert $p = 200 \text{ bar}$
- ii) Expansion $p = 20 \text{ bar}$ am Drosselventil
- iii) Abkühlung $\Delta T = \frac{1}{4} \text{ }^\circ\text{C} / \text{bar} = \frac{1}{4} (200 - 20) = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (für Luft)
- iv) Gegenstrom-Vorkühlung, mehrfacher Durchlauf
 $\Sigma (\Delta T) \Rightarrow T = -190 \text{ }^\circ\text{C}$ flüssige Luft bei $p = 20 \text{ bar}$

5 Entropie & Wärme

5.1 Gerichtete Prozesse

Irreversible Prozesse laufen nur in eine Richtung ab.

Exp. Farbige Gas in Standzylinder, durch Absperrhahn von Außenwelt getrennt.

Hahn öffnen und farbiges Gas auströmen lassen.

Dieser Prozeß ist irreversibel, die Moleküle kommen nicht von allein zurück.

Bsp. Sie stellen eine heiße Tasse Tee im kälteren Raum ab

\Rightarrow Natürlicher Prozeß: Tee kühlt ab bis zur Raumtemperatur

\Rightarrow Unmöglicher Prozeß: Raum kühlt ab & Tee wird heißer

Beachte: Energieerhaltung wäre bei irreversiblen Prozessen nicht verletzt !

5.2 Entropieänderung

Gerichtetheit von Prozessen folgt nicht aus dem Energiesatz,

=> Neue Zustandsgröße, die das System beschreibt, Entropie

=> „Findet in einem abgeschlossenen System ein irreversibler Prozeß statt, so nimmt die Entropie S des Systems zu, sie nimmt nie ab“.

Entropieänderung dS

Bei irreversible Zustandsänderung i) => f)

$$\underline{dS = S_f - S_i = \int_i^f dQ/T} \quad \text{Zustand i)}$$

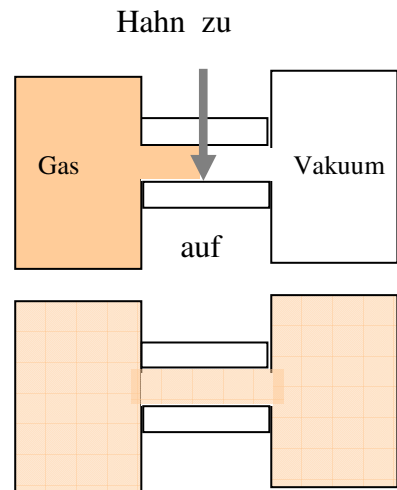
$$[S] = \text{J/K}$$

dS abhängig von:

dQ: ausgetauschter Wärme Zustand f)

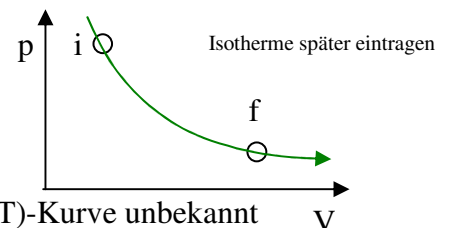
T: Temperatur, bei der der Prozeß abläuft

Vorzeichen von dS u. dQ gleich, da $T > 0$



Die betrachtete irreversible Zustandsänderung durchläuft Nichtgleichgewichtszustände, daher kennt man nur Anfang & Endzustand, nicht aber den Weg

Problem $dS = \int_i^f dQ/T$ kann nicht integriert werden, da $p(V,T)$ -Kurve unbekannt



Lsg. Entropie ist Zustandsgröße

=> nur Anfang / Endzustand wichtig, nicht der Weg

=> wähle irgendeinen bekannten Weg, so dass Integration möglich

Hier: wähle isothermen Prozeß, d.h. sehr langsame Expansion des Gases in Vakuumbereich

$$dS = S_f - S_i = 1/T \int_i^f dQ, \quad T = \text{konst.}$$

dS = dQ/T Bestimmung von ΔS ist durch die Wahl eines beliebigen reversiblen Prozesses durch die Anfangs / Endzustände möglich.

Bsp. Abb. oben enthält 1 Mol Stickstoff links, Hahn wird geöffnet, Gas strömt nach rechts, Volumen verdoppelt sich.

Berechne die Entropieänderung für den irreversiblen Prozeß

Lsg.

5.4 Zweiter Hauptsatz

$$\Rightarrow dS \geq 0$$

Die Entropie im abgeschlossenen System nimmt für irreversible Prozesse zu und bleibt für reversible Prozesse konstant.

6 Wärmemaschinen

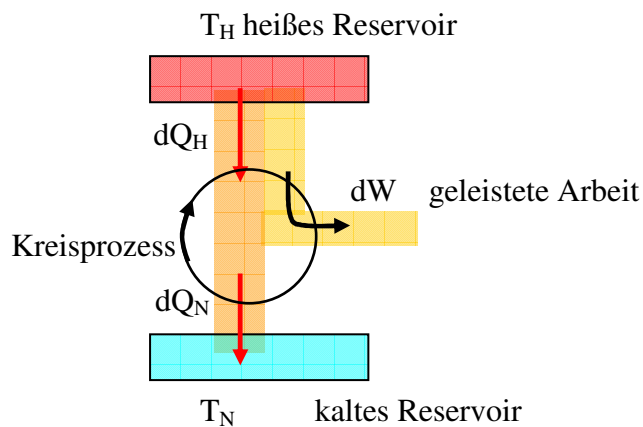
Wärmemaschinen nehmen aus der Umgebung Wärme auf und verrichten mechanische Arbeit.

Wärmeaufnahme dQ_H im heißen Reservoir

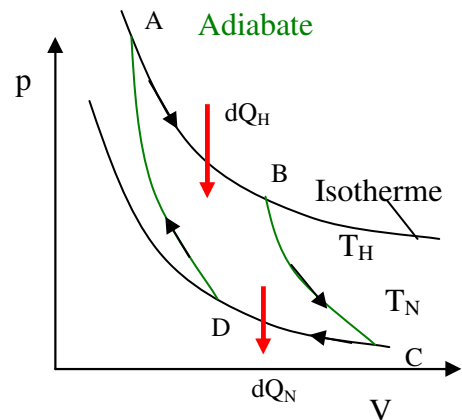
Wärmeabgabe $dQ_N < dQ_H$ im kalten Reservoir

Kreisprozeß: periodisches Durchlaufen einer Folge von Zuständen

Vermittler: Arbeitsgas



Carnot-Prozess



6.1.1 Carnot-Maschine (Carnot 1824)

Gedankenexperiment für eine ideale Maschine mit reversiblen Prozessen, d.h ohne Energieverlust durch Reibung, Wirbel etc. Carnotmaschine hat höchst möglichen Wirkungsgrad.

Prozesse des Gases im Zylinder:

A => B	Kontakt mit heißem Reservoir T_H Isotherme Expansion, Wärmeaufnahme Q_H	Gas arbeitet + W_{AB}
B => C	Isoliert Adiabatische Expansion ($dQ = 0$)	+ W_{BC}
C => D	Kontakt mit kaltem Reservoir T_N Isotherme Kompression, Wärmeabgabe dQ_N	- W_{CD}
D => A	Isoliert Adiabatische Kompression ($dQ = 0$)	- W_{DA}

Gesamtarbeit für Kreisprozess:

$$W = + W_{AB} + W_{BC} - W_{CD} - W_{DA} = \text{eingeschlossene Fläche (schraffieren)}$$

Arbeit wird an der Umgebung verrichtet, z.B. Gewicht heben, Kolben schieben

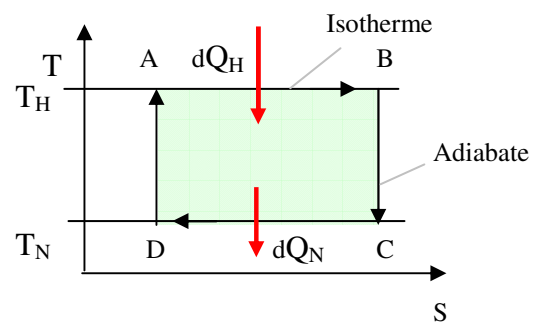
Da Kreisprozeß => $dE_{int} = 0$ (1. HS)

$$dW = |dQ_H| - |dQ_N|$$

Ideal, da im System verbleibende Wärme zu 100% in mechan. Arbeit umgewandelt wird

Carnotprozeß im T-S-Diagramm: $dS = \int dQ/T$

A => B	$dS_{AB} = dQ_H / T_H$ Isotherme T_H , Wärmeaufnahme Q_H
B => C	$dS_{BC} = 0$ Adiabate $dQ = 0$
C => D	$dS_{CD} = dQ_N / T_N$ Isotherme T_N , Wärmeabgabe dQ_N
D => A	$dS_{DA} = 0$ Adiabate $Q = 0$



gesamte Entropieänderung:

$$dS = dS_{AB} + dS_{CD} = |dQ_H|/T_H - |dQ_N|/T_N$$

dS_{AB} pos, Wärmezufuhr
 dS_{CD} neg, Wärmeabfuhr

Da Kreisprozeß $\Rightarrow dS = 0$

$$\Rightarrow |dQ_H|/T_H = |dQ_N|/T_N$$

also $dQ_H > dQ_N$ da $T_N < T_H$

Wärme bleibt im System um Arbeit zu leisten:

$$dS_{AB} T_H - dS_{CD} T_N \text{ eingeschlossene Fläche im S-T-Diagramm}$$

6.1.2 Wirkungsgrad für Carnotmaschine

Ziel: möglichst viel der zugeführten Wärmeenergie dQ_H in Arbeit umzuwandeln

$$\eta = |dW|/|dQ_H| = \text{erhaltene Energie} / \text{bezahlte Energie}$$

$$\begin{aligned} \eta_C &= (|dQ_H| - |dQ_N|) / |dQ_H| \quad \text{mit } dW = |dQ_H| - |dQ_N| \\ &= 1 - |dQ_N|/|dQ_H| \\ &= \underline{\underline{1 - T_N/T_H}} \end{aligned}$$

$\Rightarrow \eta_C < 1$, aber nie = 1, d.h. 100% , denn $T_N > 0$

\Rightarrow „Es gibt keine Folge von Prozessen, die nur Wärme aus Wärmereservoir entnehmen und vollständig in Arbeit umwandeln, d.h. es gibt keine perfekte Maschine.“

Bsp. Schiff kann nicht Wärme dem Meer entziehen und sie völlig in Arbeit wandeln, denn ein Teil muss wieder an kälteres Reservoir abgegeben werden.

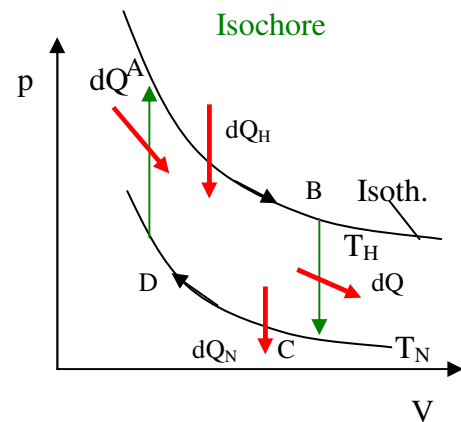
Zusätzliches Problem: Kreisprozesse in Maschinen besitzen irreversiblen Anteil und erreichen damit nie den maximalen Wirkungsgrad.

6.2 Stirlingmaschine

alle Prozesse sind reversibel

(Rober Stirling 1816)

- A => B Kontakt mit heißem Reservoir, T_H
Isotherme Expansion, Aufnahme von dQ_H
- B => C isochorer Druckabbau, Abgabe von dQ
- C => D Kontakt mit kaltem Reservoir, T_N
Isotherme Kompression, Abgabe dQ_N
- D => A isochorer Druckaufbau, Aufnahme von dQ



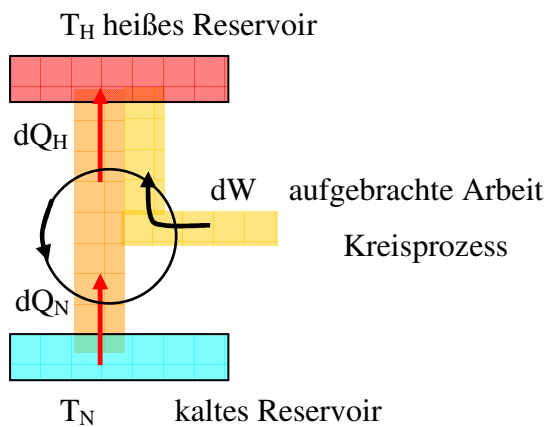
(obwohl alle Prozesse reversibel gilt $\eta_{Carnot} > \eta_{Stirling}$)

FOLIE STIRLINGPROZESS

Exp. Stirlingmaschine laufen lassen als Wärmekraftmaschine

6.3 Kältemaschinen

Prozesse wie bei Wärmemaschinen, laufen hier aber rückwärts ab.



Effektivität, Leistungszahl:

$$\epsilon = |dQ_N| / |dW| \quad \text{Wärmetransfer / Arbeit}$$

Carnot

$$\epsilon_C = |dQ_N| / (|dQ_H| - |dQ_N|)$$

$$= T_N / (T_H - T_N)$$

Bsp. Kühlschrank $\epsilon \sim 5$, Klimaanlage $\epsilon \sim 2,5$

ϵ steigt mit fallender Temperaturdifferenz

Exp. Stirlingmaschine laufen lassen als Kühlmaschine

6.4 Zusammenfassung thermische Energiewandler

NUR ALS FOLIE

Gerthsen S 184

Perpetuum Mobile

In einem *abgeschlossenen* System sind Prozesse nur möglich wenn gilt

$$dE = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Energieerhaltungssatz, 1. HS}$$

Es gibt kein Perpetuum Mobile erster Art.

$$dS \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \text{2. HS}$$

Es gibt kein Perpetuum Mobile zweiter Art.

reversible Prozesse: $d = 0$ müßten extrem langsam ablaufen

Ziel aller Prozesse:

- Temperaturgleichgewicht
- Wärmetod
- alle thermodynamischen Prozesse kommen zum Stillstand, das Leben endet !

aber: Erde ist kein abgeschlossenes System, befindet sich im Energiestrom der Sonne

7 Wärmetransport

7.1 Wärmeleitung

legt man einen Schürhaken in's Kaminfeuer, so wird nach gewisser Zeit auch der Griff heiß.

Prozess: Atome / Elektronen im Material werden zu thermischen Schwingungen angeregt

Stoß mit Nachbaratomen führt zum Energieübertrag (Wärmeleitung)

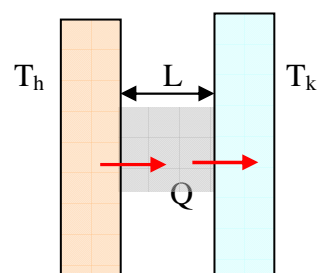
=> Wärmeleitfähigkeit abhängig von Wechselwirkung der Atome untereinander

Betrachte: Wärmestrom P_L aus warmen in kaltes Reservoir durch Platte der Fläche A , Dicke L

$$P_L = Q/t = \lambda (T_h - T_k)A/L$$

λ = Wärmeleitfähigkeit

$$[\lambda] = \text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$



<u>Material</u>	<u>λ (W / (m · K))</u>	
Stahl	14	
Kupfer	401	
Luft	0,026	großes λ => guter Leiter
Steinwolle	0,043	
Glas	1	

Thermischer Widerstand

$$\underline{R = L / \lambda} \quad \text{kleines } R \Rightarrow \text{guter Leiter}$$

$$[R] = \text{m}^2 \text{ K / W} \quad \text{beachte: } R \text{ ist keine Materialkonstante}$$

7.2 Konvektion

- Kerzenflamme:
- Fluid (Luft) erwärmt sich
 - dehnt sich aus, Dichte nimmt ab
 - heiße Luft steigt auf (Auftrieb), kalte Luft strömt nach

Bsp. atmosphärische Konvektion, Energieumwälzung im Ozean, Energietransport an der Sonne von innen nach außen

7.3 Wärmestrahlung

Vor einem großen Lagerfeuer wird man erwärmt, auch wenn ein kalter Wind weht, d.h. Wärmeleitung durch die kalte Luft kann nicht der entscheidende Prozeß sein.

=> Energieübertragung durch elektromagnetische Wellen, benötigt kein Medium, d.h. Übertragung durch Vakuum möglich (Sonne => Erde)

FOLIE THERMOGRAMM ZEIGEN

Rate der emittierten Energie durch elektromagnetische Strahlung

$$P_S = \sigma \epsilon A T^4$$

$$\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4) \quad \text{Stefan-Boltzmann Konstante}$$

ϵ : Maß für Emissionsgrad der Oberfläche A

$\epsilon = 1$: schwarzer Körper, maximaler Emissionsgrad

Gesamtrate des Energieaustausches: absorbiert - emittiert

$$P_{S\text{-absorb}} - P_{S\text{-emitt}} = \sigma \varepsilon A (T^4_{\text{Umgebung}} - T^4)$$

Beachte: Wärmeleitung $P_L \sim \Delta T$

Wärmestrahlung $P_S \sim \Delta T^4$

Schallwellen / Longitudinale Wellen

Für die Ausbreitung benötigen mechanische Wellen ein materielles Medium, in dem sich die Störung (Welle) ausbreitet. Es gibt zwei Typen von Wellen

1) Transversale Wellen: $y(x, t) \perp x$ Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

2) Longitudinale Wellen: $s(x, t) \parallel x$ Auslenkung in Ausbreitungsrichtung

Nutzung von Schallwellen:

Seismologie: Erdbeben, Atombombentestüberwachung, Suche nach Ölvorkommen

Sonar: Schallmessung von U-Booten

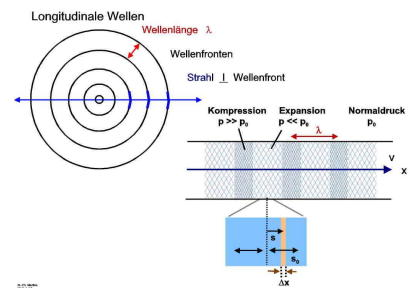
Ultraschall: bildgebende Verfahren in der Medizin

1.1 Druckwellen

Schall = Druckwelle, punktförmige Störung breitet sich als Kugelwelle aus

Exp. gelbe Feder als Modell für Kompression

FOLIE



Luftmoleküle schwingen aufeinander zu / voneinander weg

so dass sich Bereiche ausbilden mit Über / Unterdruck

Bewegungs-Welle $s(x, t) = s_0 \cos(kx - \omega t)$ (Luftmoleküle)

Auslenkung = Amplitude x Schwingungsterm

Amplitude s_0 max. Auslenkung der Luftmoleküle aus Gleichgewicht

Wellenlänge λ räumlicher Abstand von benachbarten Orten gleichen Druckes (Über- bzw. Unterdruck) hier $s_0 \ll \lambda$

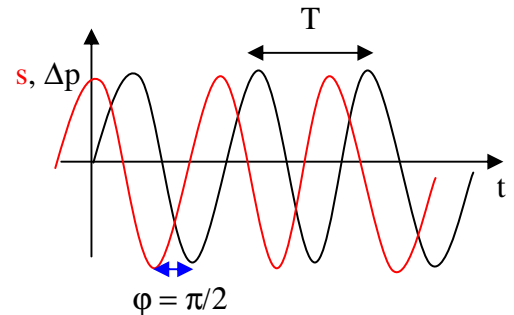
Druck-Welle $\Delta p(x, t) = \Delta p_0 \sin(kx - \omega t)$ (Druckdifferenz zu Normaldruck p_0)

Druck-Amplitude $\Delta p_0 = (c\rho\omega)s_0$

c = Schallgeschw., ρ : Dichte

Phasendifferenz $\pi/2$ zwischen Auslenkung s_0 und Δp_0

($\cos \Rightarrow \sin$, ohne Beweis)



Drucksensor / Mikrophon:

Schwingung eines Luftelementes am festen Ort x

Exp. Schallausbreitung durch Druckwelle: 2 Stimmgabeln mit Resonanzkörper

Exp. Schallausbreitung im Vakuum: Luft als mechanisches Medium nötig

1.2 Schallgeschwindigkeit c

generell gilt für die Geschwindigkeit von mechanischen Wellen

$$c = \sqrt{\frac{\text{elastische Eigenschaft}}{\text{Trägheit}}} \quad (\text{siehe Seilwelle: } c = \sqrt{\frac{F_s}{\mu}})$$

Elastizität von Gasen wird durch Kompressionsmodul K erfasst

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta V/V} \quad \text{Druckänderung pro relativer Volumenänderung}$$

Trägheit wird durch Massendichte ρ erfasst

$$\Rightarrow c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \text{Schallgeschwindigkeit}$$

Material	Luft 20°C	Helium	H ₂	Wasser 20°C	Stahl
c (m/s)	343	965	1284	1482	5941

Exp. Warum klingt die Stimme höher, wenn man He eingeatmet hat?

$\Rightarrow f = c/\lambda$ λ konstant, da gegeben durch Stimmbänder, Mundhöhle (Resonator)
 c abh. von Gas

Exp. Schallinterferenz durch 2 Lautsprecher im Hörsaal / Kundesches Rohr (alternativ)

Exp. Flammrohr (Maxima bei Druckbäuchen, Membran = Schwingungsbauch)

1.3.1 Schallintensität I

Lautstärke ist ein uneinheitlicher, subjektiver Begriff

Schallintensität: Energie-Übertragungsrate (Leistung) pro absorbierender Fläche

$$I = \frac{P}{A} \quad [P] = \text{W/m}^2$$

Betrachte: punktförmige Schallquelle mit Leistung P_Q strahlt Kugelwellen isotrop ab, idealisiert: ohne Verluste, Welle durchdringt Kugel mit Radius r

$$A = 4\pi r^2 \quad \text{Kugelfläche}$$

$$\Rightarrow I = \frac{P_Q}{4\pi r^2} \quad \text{Schallintensität einer Punktquelle nimmt mit } 1/r^2 \text{ ab, ist typisch}$$

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 s_0^2 = \frac{1}{2} \frac{\Delta p_0^2}{\rho c}$$

$$\Rightarrow \underline{I \sim (\text{Amplitude})^2} \quad \text{typisch für harmonische Welle}$$

1.3.2 Dezibel Skala

ist eine logarithmische Skala, angepasst an das menschliche Hörvermögen.

a) Maximal erträgliche Druckdifferenz: $\Delta p = 28 \text{ Pa}$, Normaldruck $p = 10^5 \text{ Pa}$

$$\Rightarrow \text{Auslenkung } s_0 = \frac{\Delta p}{c \rho \omega} = \frac{\Delta p}{c \rho 2\pi f} \quad \text{für: } f = 1000 \text{ Hz, } c = 343 \text{ m/s, } \rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$$

$$s_0 = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad (\text{ca. } 1/5 \text{ Haaresbreite})$$

b) Minimal hörbare Druckdifferenz $\Delta p = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

$$\Rightarrow \text{Auslenkung } s_0 = 1,1 \cdot 10^{-11} \text{ m} \quad (\text{ca. } 1/10 \text{ des Atomradius})$$

$$\text{Dynamikbereich: } \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \left(\frac{s_{0-\max}^2}{s_{0-\min}^2} \right) = \left(\frac{1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}}{1,1 \cdot 10^{-11} \text{ m}} \right)^2 = 10^{12}$$

Schallpegel β

riesiger Dynamikbereich, daher Logarithmus zur Definition des Schallpegels

$$\Rightarrow \underline{\underline{\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}}} \quad [\beta] = \text{db} \quad \text{Dezi-Bell (Alexander Graham Bell)}$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad \text{untere Wahrnehmungsgrenze}$$

$$\text{Falls } I = I_0 \Rightarrow \beta = 10 \cdot \log 1 = 0$$

Logarithmus: $y = \log(ax) = \log(a) + \log(x)$, β steigt um 10×1 , wenn I um Faktor 10 zunimmt

Bsp: Hörgrenze	Blätterrauschen	Unterhaltung	Rock-Konzert	Düsentriebwerk
0 dB	20	60	110	130

2 Schwebung

Exp. Stimmgabel auf zwei leicht verstimmt Resonanzkörpern

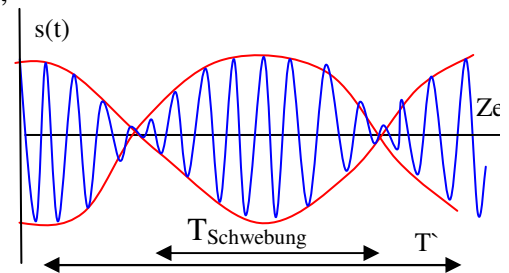
- a) jeden Ton einzeln, Unterschied ist nicht wahrnehmbar
- b) beide Töne gemeinsam, Unterschied durch Überlagerung hörbar

Schwingungen $s_1(t) = s_0 \sin(\omega_1 t), \quad s_2(t) = s_0 \sin(\omega_2 t), \quad \omega_2 > \omega_1$
 $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$

$$= 2s_0 \{ \cos \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t \} * \{ \cos \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t \},$$

mit $\omega' = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2), \quad \omega = (\omega_1 + \omega_2)$

=> $s(t) = 2s_0 \cos \omega' t * \cos \omega t$
 Amplitude $\cos \omega' t$ ändert sich zeitl.
 Schwingung $\cos \omega t$



Maximale Amplitude: $\cos \omega' t = \pm 1$ also 2mal in jeder Periode

=> $\omega_{Schwebung} = 2\omega' = \omega_1 - \omega_2$

=> $2T_{Schweb} = T'$

Anwendung: Stimmen von Instrumenten durch Vergleich mit perfekt gestimmtem Instrument / Ton bis die Schwebung verschwindet

2.1 Doppler-Effekt

Sie fahren friedlich mit dem Auto über die Landstrasse und werden plötzlich von der Polizei mit Sirene (1000 Hz) verfolgt. Zum Glück sind nicht Sie gemeint und werden überholt. Können Sie an der Frequenz der Sirene erkennen, ob diese auf Sie zukommt, oder sich entfernt?

Exp. Akustischer Dopplereffekt

Johann C. Doppler (Österreich) 1842 Theorie
 Buys Ballot (Holland) 1845 Trompeten / Zug

Prinzip: Sender und Empfänger bewegen sich relativ zueinander

Tritt auf bei: Schallwellen, elektromagnetischen Wellen, Licht

$$\underline{\underline{f' = f \frac{c \pm v_D}{c \pm v_S}}}$$

f: Frequenz des Senders, f': Frequenz bei Relativbewegung

c: Schallgeschwindigkeit in Luft

v_D: Detektor-Geschwindigkeit relativ zur Luft

v_S: Sender-Geschwindigkeit relativ zur Luft

Vorzeichen so wählen, dass f' > f wenn Detektor & Sender aufeinander zu laufen !

Bew.: Sender emittiert Wellen mit Frequenz f (Rate)

a) v_S = 0 Sender in Ruhe

s = ct zurückgelegte Strecke der Welle in Zeit t

ct/λ Zahl der detektierten Wellen in Zeit t

$$f = \frac{ct/\lambda}{t} = \frac{c}{\lambda} \text{ Rate der Wellen pro Zeit } t \Rightarrow \text{kein Doppler-Effekt}$$

b) v_D > 0 Detektor bewegt sich auf Sender / Wellenfront zu

s' = ct + v_Dt Strecke der Wellenfronten bzgl. Detektor

(ct + v_Dt)/λ Zahl der detektierten Wellenfronten in der Zeit t

$$f = \frac{(ct + v_D t)/\lambda}{t} = \frac{c + v_D}{\lambda} \text{ Rate der Wellen pro Zeit } t$$

$$\Rightarrow f' = \frac{c + v_D}{c/f} = f \frac{c + v_D}{c}$$

Doppler Effekt: Detektor fängt Wellen schon früher ab, also größerer Rate f' > f

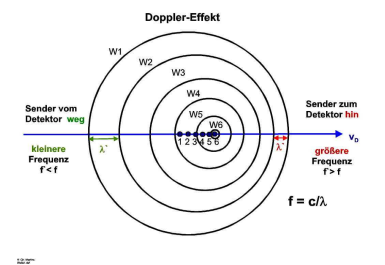
c) v_D < 0 Analog wie oben, aber (ct - v_Dt) => kleinere Rate f' < f

FOLIE zeigen

Bsp.

Fledermaus: Opferortung / Geschw.messung

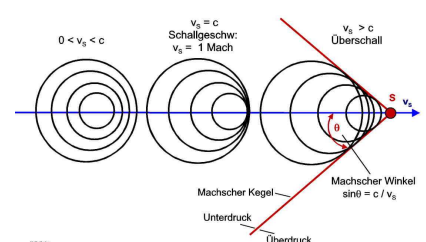
Medizin-Anwendung: Blut-Geschwindigkeitsmessung



2.2 Überschall

FOLIE zeigen

Exp. Peitsche



WELLENOPTIK

1 Elektromagnetische Wellen

Licht ist eine elektromagnetische Welle, nur ein Teil des Spektrums ist für uns sichtbar

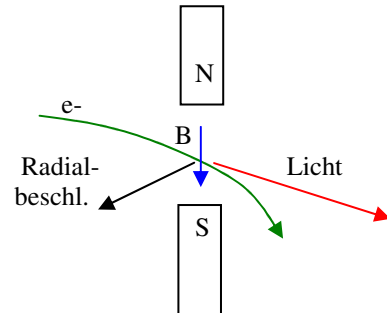
FOLIE LICHT-SPEKTRUM

FOLIE STRAHLENDER DIPOL

1.1 Erzeugung

Beschleunigte Ladung strahlt EM Wellen ab:

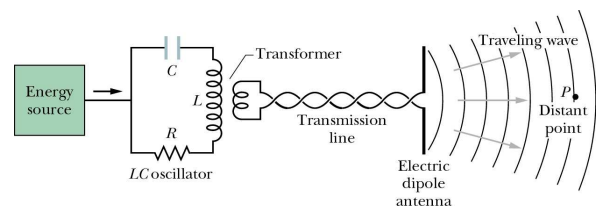
- Bremsstrahlung in Röntgenröhre
- Synchrotronstrahlung im Ablenkmagneten
- Oszillierender Strom in Antenne
- Thermische angeregte Strahlung in Sternen (Sonne)



Antenne / Mikrowellensender

- i) LC-Schwingkreis
- ii) Antenne wird induktiv eingekoppelt
- iii) Anregung des LC-Kreises um Strahlungsverluste (gewollt) auszugleichen
- iv) Antennenstrom: $I(t) = I_0 \sin \omega t$, $\omega = \sqrt{1/LC}$

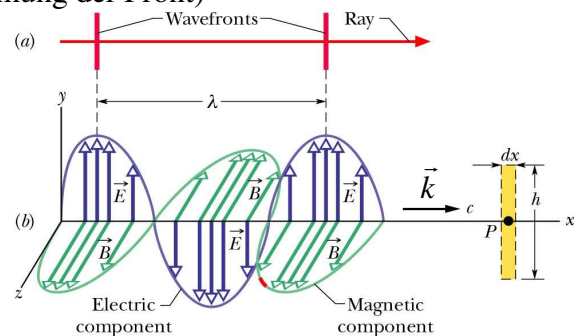
Exp. Radio, Resonanz einstellen



1.2 Eigenschaften

Ebene Welle weit entfernt von der Antenne (keine Krümmung der Front)

- transversal: $\vec{E} \perp \vec{k}$, $\vec{B} \perp \vec{k}$
 - $\vec{E} \perp \vec{B}$
 - $E(t) = E_0 \sin(kx - \omega t)$, $B(t) = B_0 \sin(kx - \omega t)$
 - B- & E-Felder halten sich gegenseitig am Leben
 - kann sich ohne Medium ausbreiten
 - Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,459$ m/s (Definition des Meters)
- ist unabh. von Geschw. des Beobachters (spez. Relativitätstheorie)



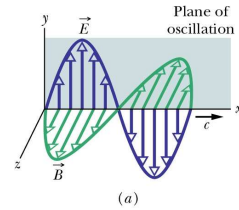
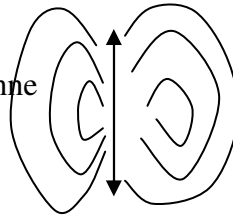
2.1 Polarisation

linear polarisiert E-Feld schwingt immer in gleicher Ebene

Hertzscher Dipol strahlt linear polarisierte Wellen ab

Strahlt Quer zur Antenne

Strahlt Nie längs der Antenne



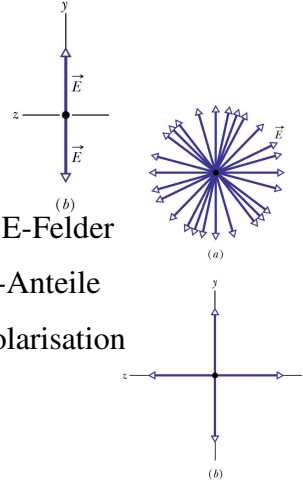
Laserlicht meist linear pol.

Unpolarisiert viele Wellenzüge mit beliebigen Schwingungsebenen der E-Felder

Vektorielle Aufteilung aller Komponenten in gleiche x- y-Anteile

Sonne, Glühlampe unpolarisiert, da statistisch emittierte Wellenzüge jeder Polarisation

Pola-Messung Beweis, dass Licht transversale EM Welle ist



2.2 Polarisationsfilter

Polaroidfolien: Kunststoffe mit parallel angeordneten, langkettigen Molekülen

Prinzip: Absorption des lin. Pol. Lichtes, wenn E-Feld parallel zu Molekülen

Langes Molekül wirkt wie Hertzscher Dipol, Anregung der Elektronen

Wellen mit E quer zum Molekül werden nicht absorbiert

Nomenklatur: Pol-Filter absorbiert Welle mit E quer zur Polarisationsrichtung des Filters

Exp. Mikrowellensender und Drahtnetz, 2 Polfilter

Polarimeter

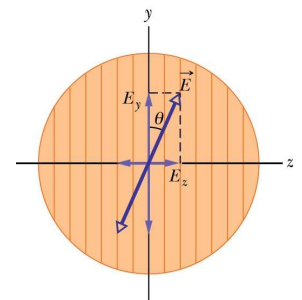
Aufbau zur Messung von Effekten mit linear polarisiertem Licht,

Anwendung: Biologie, Chemie, Physik Lesegeräte von magn. Datenspeichern

Lin pol. Licht fällt auf Pol-Filter unter Pol-Winkel θ

=> Durchgelassene Komponente $E_y = E_0 \cos \theta$

=> $I = E_y^2 = E_0^2 \cos^2 \theta$ Intensität hinter Analysator

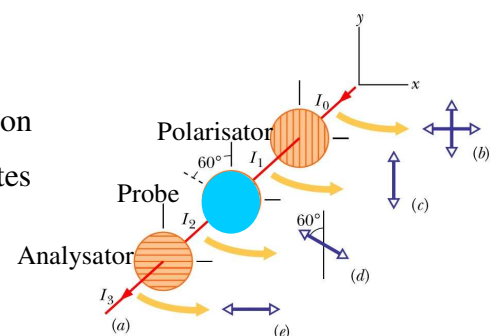


Messung: Polarisator & Analysator 90° verdreht => Lichtabsorption

Probe steht in der Mitte, dreht die Polarisation des Lichtes

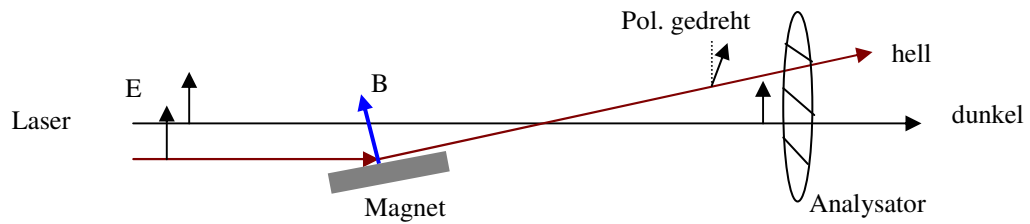
=> Analysator drehen, bis wieder Lichtauslöschung

=> Drehwinkel: Drehung der Pol. durch die Probe



Exp. Rohrzuckerhalt bestimmen, Laser + 2 Polfilter

Exp. Kerr-Effekt



Anwendung - Messung magnetischer Bits auf Speicherplatte

3. Beugung

Strahlen geben nur die Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle an. Brechung / Reflexion in der geometrischen Optik ergeben sich aus der Wellentheorie. Viele Lichtphänomene können nur über das Wellenmodell des Lichtes erklärt werden, wie z.B. Interferenz.

3.1 Huygensches Prinzip

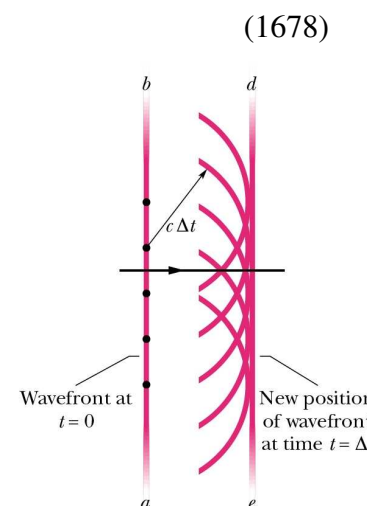
aus dem momentanen Ort einer Wellenfront kann jede zukünftige Position vorausgesagt werden (geometrisches Verfahren)

„Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt kugelförmiger Elementarwellen. Der Ort der Wellenfront ist gegeben durch die Tangente an die Sekundärwellen“

$t = 0$: Wellenfront auf Linie ab

Punkt: Zentrum der kugelförmigen Elementarwelle

$t = \Delta t$ Ausbreitung um $x = c\Delta t$ (Line cd) \Rightarrow Tangente = neue Wellenfront



Lichtausbreitung bisher im Strahlenmodell, findet Grenze an kleinen Aperturen (Spaltöffnungen), beschränkt die Anwendung der geometrischen Optik,

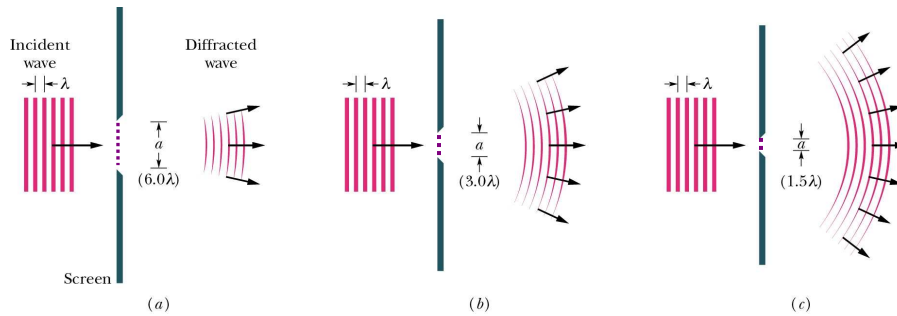
Modell	Ausbreitung	Anwendung wenn
a) Geometrische Optik:	Strahlen geradlinig	große Aperturen (Spalte)
b) Wellenoptik:	Kugelwellen Beugung	kleine Aperturen $d \sim \lambda$

3.2 Beugungsprinzip

Exp. Wellenwanne, Durchgang von ebenen Wellen durch kleinen Spalt

Beugung am Spalt: Welle läuft auch in den Schattenraum

Ursache: Huygensche Wellenzentren sitzen in Spaltebene, kugelförmige Ausbreitung



Übergang von Strahlen / zur Wellenoptik: Spalt verkleinern => Zahl der Wellenzentren sinkt

Exp. Laserinterferenz am Einfachspalt mit variabler Spaltbreite

3.3 Beugung am Doppelspalt

1801 Beugung von Licht (Thomas Young) erster Nachweis, dass Licht eine Welle ist

FOLIE

Spalt S_0 sendet 1 monochromatische Kugelwelle aus, trifft S_1, S_2

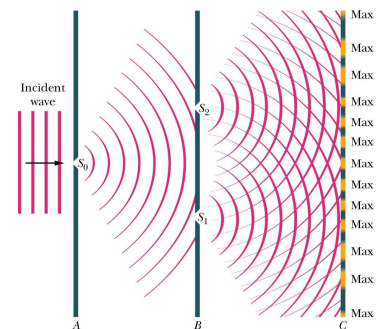
Spalte S_1, S_2 senden gleichzeitig Kugelwellen mit gleicher Phase aus

gleichphasig: feste zeitl / räuml. Beziehung der Wellen aus S_1, S_2

Interferenz der Wellen, Interferenzmuster sichtbar an Schirm

Wellenberg + Tal => Auslöschung (Minimum)

Wellenberg + Berg => Verstärkung (Maximum)



Exp. Laserinterferenz am Doppelspalt

Interferenz-Muster

Wellen aus S_1, S_2 sind phasengleich

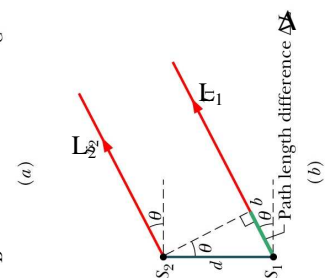
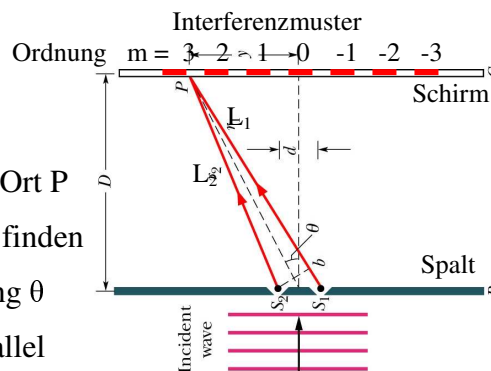
gesucht: Phasendifferenz ϕ am Ort P

Berechnung: Weglängendifferenz Δ finden

Interferenzort gegeben durch Richtung θ

Näherung: $D \gg d \Rightarrow L_1, L_2$ parallel

$$\Rightarrow L_1 - L_2 = \Delta = d \sin \theta$$



Maxima: $\underline{\underline{\Delta = m\lambda = d \sin \theta}}$, $m = 0, 1, 2, \dots$ Wellen von S_1, S_2 addieren sich

Minima: $\underline{\underline{\Delta = (m + \frac{1}{2})\lambda = d \sin \theta}}$ $m = 0, 1, 2, \dots$ Wellen von S_1, S_2 löschen sich aus

Beugungsordnung: $m = 0$ Hauptmaximum
 $m = \pm 1, 2, 3 \dots$ Nebenmaxima

Zusammenhang Weglängen-

Phasendifferenz:

Maxima $\Delta = m\lambda$ $\varphi = m(2\pi)$ $m = 0, 1, 2, \dots$

Minima $\Delta = (m + \frac{1}{2})\lambda$ $\varphi = (m + \frac{1}{2})2\pi$

$\Rightarrow \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\Delta}{\lambda}$, generell

$\Rightarrow \underline{\underline{\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta}}$ (für Doppelspalt, mit $\Delta = d \sin \theta$)

3.4 Interferenz an dünnen Schichten

Farbiges Schillern von Seifenblasen, Ölflecken auf einer Pfütze oder Schmetterlingsflügeln durch wellenlängenabhängige Interferenz des weißen Spektrums

Exp. Interferenz an senkrecht stehender Seifenhaut mit weißem Licht

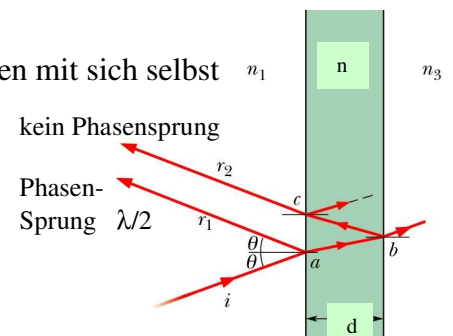
Objekt: Schicht mit Brechungsindex n

hier $n = 1,5$ (Schicht), $n_1 = n_3 = 1$ (Luft)

Licht: ein Wellenzug spaltet an Schicht in 2 Teilwellen, interferieren mit sich selbst

Interferenz: von 2 reflektierten, kohärenten Teilwellen

Gesucht: Phasendifferenz der 2 reflektierten Teilwellen



Phasendifferenz:

a) Reflexion an optisch dichtem Medium: $\varphi = \pi$ $\Delta_R = \frac{1}{2} \lambda$
 an optisch dünnem Medium: $\varphi = 0$ $\Delta_R = 0$

b) geometrische Weglänge Δ_L

c) optische Weglänge: $n \cdot \Delta_L$

$$n = \frac{c}{c_{mat}} \quad c_{mat}: \text{Lichtgeschwindigkeit in Materie}$$

$$s = c_{mat} t = \frac{c}{n} t \Rightarrow s n = c t \quad \text{Lichtweg in Materie mit } n \text{ multiplizieren!}$$

längerer „Aufenthalt“ des Lichtes in Materie

=> Gangunterschied $\Delta = n \cdot \Delta_L + \Delta_R$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + \frac{\lambda}{2}}} \quad (\theta \text{ Einfallswinkel, selber rechnen})$$

konstruktive Interferenz: $\Delta = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots$

destruktive Interferenz: $\Delta = \frac{2m+1}{2} \lambda$

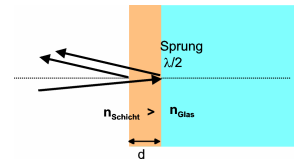
Beachte: Interferenz abhängig von d, θ, λ

Anwendung:

- 1) Reflexionsverstärkung im Interferenzspiegel für festen Winkel θ , Wellenlänge λ
- 2) Dickenbestimmung von sub- μm -Schichten (optische & Halbleiterindustrie)
- 3) Anti-Reflex-Beschichtung, Interferenzfilter für feste Wellenlänge

Ziel: Auslöschung der reflektierten Strahlen (hier $\theta = 0^\circ$)

$$\Rightarrow \frac{2m+1}{2} \lambda = \Delta = \underbrace{2nd}_{\text{Wegunterschied}} + \underbrace{\frac{1}{2} \lambda}_{\text{Phasensprung}}, \quad \text{mit } n = n_{\text{Schicht}} < n_{\text{Glas}}$$



=> $\lambda = 2nd, \quad m = 1$

=> $d = \frac{\lambda}{2n}$ Dicke der Anti-Reflex-Schicht

Beachte: für $m = 0$ Auslöschung auch für $d = 0$

Phasensprung reicht! Billige Lösung, da kaum Materialverbrauch für Schicht.

4) Interferenz an Luftschicht, Vermessung von Krümmungsradien

3.5 Michelson Interferometer

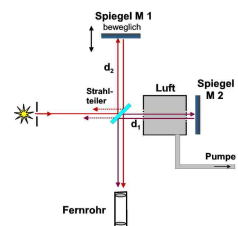
Messung: Weglängen-Unterschiede in Einheiten der Lichtwellenlänge

Prinzip: Erzeugung / Auswertung von Interferenzmustern (Fernrohr)

FOLIE ZEIGEN (erst oberer Teil, dann unterer Teil)

hell $\Delta L = m\lambda = 2(d_2 - d_1)$ Interferenz konstruktiv

dunkel $\Delta L = \frac{1}{2}(2m+1)\lambda = 2(d_2 - d_1)$ destruktiv



Messung: Änderung des Interferenzmusters durch

a) ΔL ändern, Spiegel M1 um Δx verschieben

$\Delta x = \frac{1}{4} \lambda \Rightarrow \Delta L = \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow$ heller Streifen wandert auf nächsten dunklen

$\Delta x = \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow \Delta L = \lambda \Rightarrow$ heller Streifen wandert auf nächsten hellen

\Rightarrow wandernde Streifen zählen $\Rightarrow \Delta x$ bestimmen

b) dünnes transparentes Material in einen Weg stellen

$\Delta L = 2nd$ n: Brechungsindex, d: Materialdicke

\Rightarrow n oder d bestimmen

- Streckendifferenzen in Einheiten der Lichtwellenlänge zu messen, also extrem genau

- Weltweit verfügbar (Urmeter in Paris nicht mehr nötig)

- Meter = 1 553 163,5fache der Wellenlänge einer Cd-Spektrallinie, 1907 Nobelpreis.

3.6 Einzelspalt

Exp. Beugung am variablen Einzelspalt, hier Spaltbreite fest

Modell: Huygensche Elementarwellen in Spaltebene

Einteilung in 2 Hälften, Paare von Strahlen suchen

Max. im Zentrum: je 2 Strahlen gleicher Länge \Rightarrow pos. Interferenz

Nebenminima: je 2 Strahlen mit $\Delta L = \frac{2m+1}{2} \lambda$

1. Paar: $\Delta L = r_2 - r_1$, $D \gg a \Rightarrow r_2, r_1$ parallel

$$\Delta L = \frac{a}{2} \sin \theta = \frac{a}{2} \frac{x}{D} \Rightarrow \frac{\lambda}{2} = \frac{a}{2} \sin \theta$$

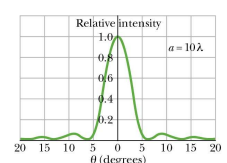
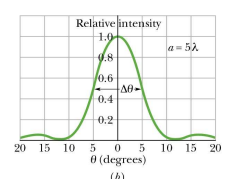
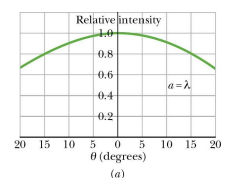
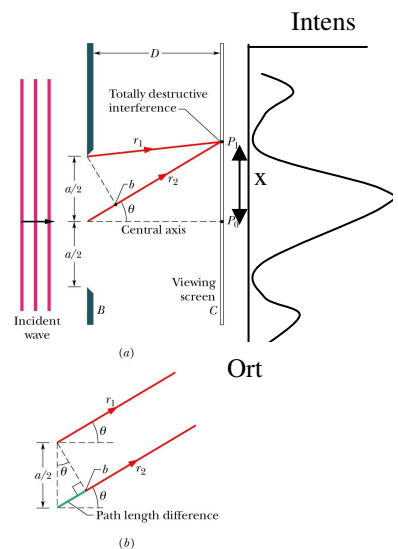
$\Rightarrow \underline{\lambda = a \sin \theta}$ 1. Minimum

2. Paar r_2, r_1 ein Wellenzentrum tiefer setzen, Rechnung s.o. (r_1, r_2 parallel)

Was passiert mit dem Beugungsmuster, wenn der Spalt schmaler wird ?

Exp. Beugung am variablen Einzelspalt, Spaltbreite ändern

Beobachtung: Zentralmaximum wird breiter mit fallender Spaltbreite a, d.h. Beugungseffekt nimmt zu. Übergang Strahlen \Rightarrow Wellenoptik!



Deutung: $\lambda = a \sin \theta$, θ = Position des 1. Minimums

$$\frac{\lambda}{a} = \sin \theta \Rightarrow \text{wenn } a \Rightarrow \lambda \text{ dann } \theta \Rightarrow 90^\circ$$

\Rightarrow 1. Min. wandert nach außen, d.h. Zentralmaximum verbreitert

3.7 Beugungsgitter

wie Doppelspalt, aber mehr Spalte, Anordnung von vielen kohärenten Lichtquellen (Spalten)

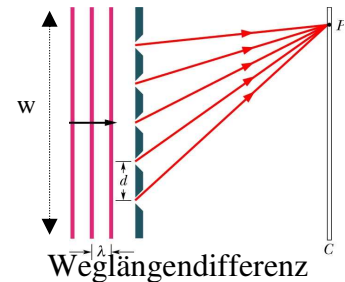
Prinzip

Gitterkonstante: $d = \frac{w}{N}$ w : Gitterbreite (ausgeleuchtet)

Gitterstrichzahl: N , typisch $N \sim 100 - 3000$ Striche pro mm

Maximum: je 2 benachbarte Strahlen (parallel) mit $\Delta L = \lambda = d \sin \theta$

$$\Rightarrow \underline{\underline{d \sin \theta = m \lambda}} \quad (\text{wie Doppelspalt})$$



Minimum: 2 Strahlen mit $\Delta L = \frac{1}{4} \lambda \Rightarrow$ übernächster Strahl $\Delta L = \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow$ Auslöschung
 2 Strahlen mit $\Delta L = \frac{1}{6} \lambda \Rightarrow$ dritt-nächster Strahl $\Delta L = \frac{1}{2} \lambda \Rightarrow$ Auslöschung
 usw.

Gitter

- es gibt mehr Strahl-Paarungen (Richtungen θ), die zu destruktiver, als zu konstruktiver Interferenz führen
- Lage der Hauptmaxima nicht von Gitterstrichzahl N abhängig
- Interferenzmaxima werden schmaler mit wachsender Gitterstrichzahl N
- Nutzbar zur Licht-Dispersion (Spektrometer)

FOLIE

Exp. Gitter beleuchten mit monochromatischem und weißem Licht

Wellenlängenmessung = Beugungswinkel der Linie und Ordnung m ermitteln

CD mit 500 nm breiten Rillen wirkt wie Gitter

Gitterspektrometer

--NUR FOLIE ZEIGEN--

Ziel: Emissionswellenlängen diverser Lichtquellen ermitteln

Prinzip: Beugung am Strichgitter

Messung: Beugungswinkel θ für Ordnung $m = 1$ (oder höher),

beachte: $m = 0 \Rightarrow$ weißes Licht

Optimierung: große Auflösung: $R = Nm$, gute Trennung der Linien, lichtstark

Gitter Reflexion, Transmissionsgitter

FOLIE AU-GITTER

Quantenmechanik

Die Quantenmechanik beschäftigt sich mit der Mikrowelt, genauer der subatomaren Welt. Die Quantenmechanik beschreibt Dimensionen, in die wir im alltäglichen Leben nicht vorstoßen, also in der klassischen Physik nicht erfasst wurden. Allerdings basieren die meisten elektronischen / optischen / magnetischen Geräte auf den Erkenntnissen der Quantenmechanik (Transistor, Mikroelektronik, warum ist Cu elektrisch leitend und Glas nicht, ebenso wie die Chemie, Biochemie, also Lebenswissenschaften oder die Astrophysik (warum leuchten Sterne)

FOLIE

1 Photonen

1.1 Quantisierung

Viele Größen sind ganzzahlige Vielfache eine nicht teilbaren Grundgröße (Quantum)

Ladung $q = ne$, $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $n \in \mathbb{Z}$

Bsp. Euro $W = nC$ $C = 1 \text{ Cent}$, Quantum = 1 Cent, $n \in \mathbb{N}$,
 $0,755\text{€} = 75,5 \cdot 1\text{Cent}$, $n=75,5$ gibt es nicht

klassische Physik kleine Quantisierungen sind kaum zu beobachten

1.2 Photon (Licht)

Bedeutung: ohne Licht kein Leben, Opto-Elektronik, Materialanalyse vorwiegend mit Licht, entscheidende Frage am Anfang der Quantenphysik war: wie funktioniert die Wechselwirkung von Licht und Materie

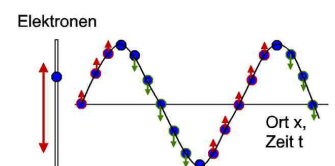
1.2.1 Klassisch: Licht-Welle

Welle $E(x,t) = E_0 \cos(kx - \omega t + \varphi)$ E-Feld der Lichtwelle

Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$, Frequenz $\omega = 2\pi f$, Phase φ , Geschw. $c = \lambda f$

Intensität $I = |E_0|^2$

WW-Materie Elektronen schwingen wie Hertzscher Dipol in der Materie
 Beliebige Anregung durch E-Feld der Lichtwelle möglich



hf

1.2.2 Quantenmechanik: Photon (Licht-Teilchen)

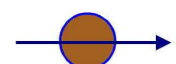
Frequenz f Verbindung zur klassischen Physik

Energie $E = hf$ Energie eines Photons der Lichtwelle mit der Frequenz f

$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ Plancksches Wirkungsquantum (neue Naturkonstante)

Geschw. c

Intensität $I = nE/At$ Zahl der Photonen x Energie pro Zeit u. Fläche



WW-Materie Absorption / Emission ganzer Photonen, d.h. vernichtet / erzeugt Energiepakete

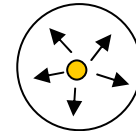
Beachte: Photon ist keine fliegende Materie, die z.B. kinetische Energie trägt

Frage: Ordne nach wachsender Photonenenergie: gelbes Licht, radioaktive Gammastrahlung, Radiowelle einer Antenne

Lsg.

Bsp. Na-Lampe emittiert gelbes Licht ($\lambda = 590 \text{ nm}$) mit $P = 100 \text{ W}$ in Kugel

Frage: mit welcher Rate absorbiert die Kugel Photonen?



1.2.3 Photo-Effekt

Exp. Metallplatte elektrostatisch aufladen (Elektroskop), entladen mit UV-Licht, Filter

Experiment: Licht kurzer Wellenlänge trifft auf eine Metallplatte und löst Elektronen aus.

Messung: i) Photoelektronen: Strom I

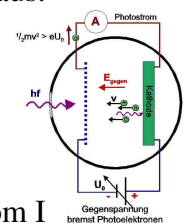
FOLIE

ii) E_{kin} als Funktion der Lichtfrequenz

Messung E_{kin} Gegenfeldmethode, Elektronen müssen elektr. Potenzial U_0 überwinden

$E_{\text{kin}} > eU_0 \Rightarrow$ Elektronen dieser Energie erreichen Drahtnetz, bilden Strom I

Stelle U_0 so ein, dass $I = 0$, dann $E_{\text{kin}} = eU_0$

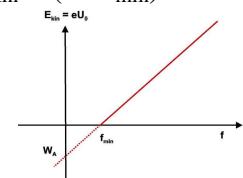


Beobachtung:

a) Licht muss eine Mindestfrequenz f_{min} besitzen um Elektronen auszulösen

b) E_{kin} der Elektronen steigt linear mit der Frequenz f des Lichtes: $E_{\text{kin}} \sim (f - f_{\text{min}})$

c) E_{kin} der Elektronen hängt *nicht* von der Lichtintensität ab



Deutung 1) klassisch:

Licht als elek.magn. Welle regt Elektronen im Metall zu Schwingungen an (Hertzscher Dipol)

\Rightarrow Schwingungs-Amplitude wächst \Rightarrow Elektronen lösen sich

\Rightarrow Amplitude \sim Intensität \Rightarrow freie Elektronen bei heller Lampe **Falsch!**

Deutung 2) quantenmechanisch:

Energieabgabe Photon \Rightarrow Elektron gequantelt ($E = hf$) & vollständig

- zu a) $hf \geq W_A = hf_{\min}$ Mindestfrequenz f_{\min} zur Ablösung der Elektronen nötig
- zu b) $E_{\text{kin}} = hf - W_A$ Aufteilung in Ablöse-, Rest kin. Energie
- zu c) $I = nE/At$ Intensität \sim Photonenzahl, irrelevant ob Prozeß statt findet, gibt
Int. \sim Zahl der abgelösten Elektronen falls $f > f_{\min}$

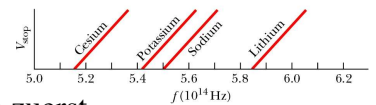
Neue Naturkonstante

$$h = 4.1 \cdot 10^{-15} \text{ Vs} * 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Deutung durch Einstein 1905, Basis: Planck's Quantenhypothese, Nobelpreis 1919

Frage: Messkurven $U_g(f)$ für verschiedene Metalle.

- a) Ordne die Metalle nach ihrer Austrittsarbeit, größte zuerst
- b) Ordne Kurven nach dem Wert, den sie für h ergeben, größten zuerst



1.2.4 Anwendung: Photomultiplier

FOLIE

Prinzip: 1 Photon löst 1 Elektron aus,

Elektron wird auf Dynode beschleunigt, löst 2 Elektronen aus

Beschleunigung auf weitere Dynoden \Rightarrow e-Kaskade \Rightarrow Strommessung

Verstärkung: bis 10^{10} -fach, Nachweis einzelner Photonen (Photon-Counting)

1.2.5 Photonenimpuls

Einstein postuliert 1916: Photonen haben einen Impuls, Konsequenz aus Teilchenbild,

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{Photonenimpuls, } \lambda: \text{Lichtwellenlänge}$$

W.W. Licht / Materie wie Stoß behandeln: a) Energieübertrag, b) Impuls Übertrag

Idee: $p = mv = \frac{2}{v} \left(\frac{1}{2} mv^2 \right) = \frac{2}{v} E$ Teilchen in klassischer Mechanik $v \ll c$

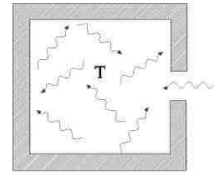
$= E/v$ wenn $v \approx c$ relativistisch rechnen

$$\Rightarrow p = \frac{1}{c} hf = \frac{1}{c} \frac{hc}{\lambda} = \frac{h}{\lambda} \text{ Licht-Impuls}$$

1.2.6 Schwarzer Strahler

Temperaturstrahler, Hohlraumstrahler,

Historischer Ausgangspunkt der Quantentheorie durch Max Planck



a) idealer Absorber:

- Hohlraum mit kleinem Loch

- absorbiert Strahlung ohne Bevorzugung der Wellenlänge, daher schwarz

b) Temperaturstrahler:

- aus Loch tritt Strahlung aus deren

spektrale Intensitätsverteilung von der Temperatur abhängt

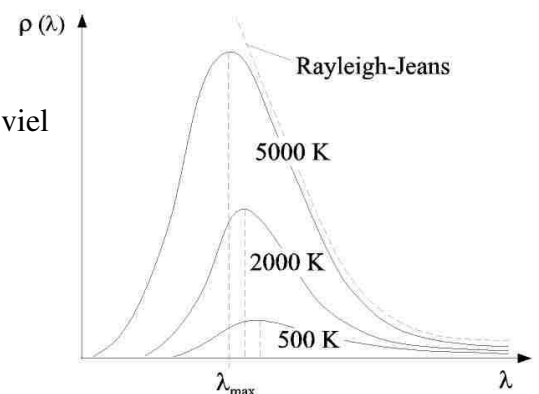
- im thermischen Gleichgewicht wird von den Wänden gleich viel

Energie emittiert wie absorbiert

$\rho(\lambda)$: spektrale Strahlungsdichte =

Energie im Frequenzintervall $(f, f+df)$ pro cm^3

- Fläche unter der Kurve = abgestrahlte Gesamtintensität



Planck's Quantenhypothese:

Problem: Kurve $\rho(\lambda)$ konnte durch klassische Physik nicht erklärt werden

Klassisch: Energieaustausch Wand – Strahlungsfeld durch beliebige

Energiemengen möglich

Lösung: Quantenhypothese: „Monochromatisches Licht der Frequenz f tritt bei

Absorptions / Emissionsprozessen nur in ganzen Energiequanten $E = hf$ auf“

$$\underline{\underline{\rho(f, T) df = \frac{4\pi h f^3}{c^3 \cdot (\exp\{hf/kT\} - 1)} df}}}$$

Mit steigender Temperatur:

a) wächst $\rho(\lambda)$, also die Intensität

b) schiebt das Maximum von $\rho(\lambda)$ zu größerer Energie

$$\underline{\underline{\lambda_{\max} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T}}}}$$

Wiensches Verschiebungsgesetz

Anwendung: kontaktlose Temperaturbestimmung durch Messung von $\rho(\lambda)$ u. λ_{\max}

Thermographie

Bsp. a) $\rho_{\text{Sonne}} \gg \rho_{\text{Herd}}$ \Rightarrow Sonne ist heller als Herdplatte

b) Sonne $T = 5800 \text{ K}$ $\Rightarrow \lambda_{\text{max}} = 500 \text{ nm}$ grün

Herdplatte $T = 800 \text{ K}$ $\Rightarrow \lambda_{\text{max}} = 5000$ infrarot

Exp. glühender Metalldraht mit Thermosensor unter Vakuumglocke

2 Materiewellen

De Broglie's Symmetriebetrachtung Welle - Teilchen (1924), Licht tauscht an lokalen Orten über Photonen Energie u. Impuls mit Materie aus

$$\text{Photonenimpuls} \quad p = \frac{h}{\lambda} \Leftrightarrow \text{Materiewelle} \quad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Beachte: Materiewelle nur sinnvoll bei bewegter Materie $p \neq 0$

Beweis: Interferenzerscheinung 1927 (Davisson, Germer, Thomson), Elektronen, Atome, Teilchen müssten als Materiewelle Beugungserscheinungen zeigen

2.1 Elektronenwellen

Experiment I: Elektronen fallen durch einen Doppelspalt auf einen Leuchtschirm

Beobachtung: Streifen auf Leuchtschirm

FOLIE

Deutung: Interferenzstreifen, Elektronenstrahl verhält sich wie eine Welle

Experiment II: Elektronen werden durch Al-Kristallpulver geschossen

Beobachtung: Kreise um Strahlzentrum auf Leuchtschirm

Kreisradius abhängig von Beschleunigungsspannung U

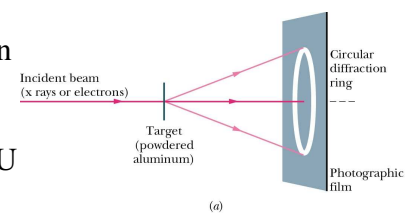
Deutung: Interferenz der Elektronenwelle an Kristallstruktur

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$eU = E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{m2eU}}$$

$$\Rightarrow \lambda \sim \frac{1}{\sqrt{U}} \Rightarrow \text{Wellenlänge durch Beschleunigungsspannung einstellbar}$$



Bsp. $U = 100 \text{ V}$, $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
 $\Rightarrow \lambda = 0,12 \text{ nm}$ Größenordnung von Röntgenstrahlung

FOLIE

Anwendung: Oberflächenanalyse in Halbleitertechnologie, Kristallanalyse (LEED, RHEED)

Vorteil gegenüber Röntgen: einfach handhabbar, λ einfach einstellbar
 Oberflächensensitiver als X-rays

Frage: Elektron u. Proton haben je gleiche a) Impuls, b) kin. Energie, c) Geschwindigkeit

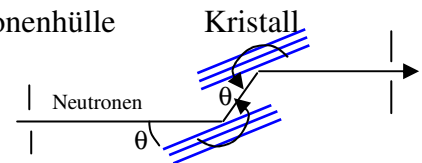
Wer hat die größere De-Broglie Wellenlänge?

Lsg.

2.2 Materiewellen & Neutronenspektrometer

Anwendung: Materialanalyse, Kristallstruktur, magnetische Materialien

Vorteil: keine Ladung \Rightarrow keine Abbremsung durch Elektronenhülle
 der Atome wie für Elektr., Protonen,
 WW mit den Kernen selbst



Ziel Geschw. / Impuls der Neutronen muss einstellbar sein

Lsg. Kristallgitter-Monochromator für Neutronenwellen

Funktion Bragg-Reflexion der Neutronenwellen an Kristall ähnlich dem Röntgenlicht

$$2d \sin\theta = n\lambda, \quad \lambda = \frac{h}{mv} \quad m: \text{Masse, } n: \text{Beugungsordnung}$$

$$\Rightarrow v = \frac{h}{2d n m \sin\theta} \quad \text{Geschw. durch Kristallwinkel einstellen}$$

Bsp $d = 0,25 \text{ nm}$, $m = 1,68 \times 10^{-27} \text{ kg}$, $n = 1$, $\theta = 10^\circ \Rightarrow v = 4524 \text{ m/s}$
 thermische Neutronen: $v \sim 2000 \text{ m/s}$

3 Wahrscheinlichkeitswellen

Grundlegendes Problem: welches Modell stimmt – Welle oder Teilchen ?

Modell	Licht-Welle	Licht-Teilchen
Größen	Frequenz f , Wellenlänge λ $c = f\lambda$	Impuls $p = h/\lambda$ Energie $E = hf$
Beweis	Interferenz	Photoeffekt

3.1 Interferenzexperimente:

Frage: wie können Teilchen (Photonen, Elektronen) Interferenzmuster bilden?

Experiment A)

Experiment: Licht- bzw. e-Beugung an Doppelspalt

Messung: Detektor bewegt sich entlang des Schirms

Detektor: Messung einzelner Photonen durch „Klick“

„Klick“ = Energieübertrag von Welle auf Detektor = Absorption eines Photons

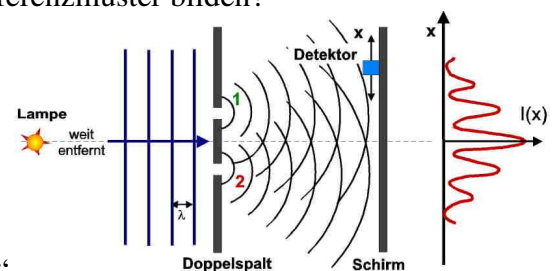
Beobachtung: zeitlich statistisch verteilte Folge von Klicks

Räumliches Interferenzmuster entlang des Schirmes

exakter Ort u. Zeitpunkt des Photoneneinschlags nicht vorhersagbar

nur Wahrscheinlichkeitsverteilung $W(x) = I(x)$ berechenbar

Neue Beschreibung: Wahrscheinlichkeitswelle $\psi(x)$: ordne jedem Punkt x der Welle die Wahrscheinlichkeit $W(x)$ zu, in kleiner Umgebung dx pro Zeit dt ein Photon zu detektieren.



Experiment B)

Messung: es befindet sich je nur ein einzelnes Photon im Aufbau

sehr schwache Lichtquelle benutzen, Exp. dauert Monate, (Taylor 1909)

Beobachtung: Interferenzstreifen bilden sich aus

Fragen: Durch welchen Spalt tritt das Photon ?

FOLIE ELEKTRONEN

Kann es mit sich selbst interferieren?

Woher weiß das Photon vom zweiten Spalt, den es für Interferenz braucht ?

Beachte: wir messen nur die WW von Licht mit Materie am Schirm, Vorgang dazwischen ist unbekannt

Deutung: Lichtausbreitung von Quelle zu Schirm durch Wahrscheinlichkeitswelle
Interferenzmuster = Wahrscheinlichkeits-Verteilung der Welle am Schirm

Deutung für alle Experimente

- 1) Licht wird in Quelle als Photonen erzeugt
- 2) Licht wird am Detektor als Photon absorbiert
- 3) Lichtausbreitung von Quelle zum Detektor durch Wahrscheinlichkeitswelle $\psi(x)$

3.2 Wahrscheinlichkeitsdichte

Anfangsfrage: was beschreibt die Wahrscheinlichkeitswelle?

Wellenfunktion $\psi(x)$ komplex

WS-Dichte $|\psi(x)|^2$ immer reell

ist proportional zur Wahrscheinlichkeit (WS) ein Teilchen im kleinen Bereich dx um den Ort $x \pm dx$ in einer Zeit dt nachzuweisen.

Wahrscheinlichkeit W , ein Teilchen in einem Bereich nachzuweisen (detektieren) ist

Bereich x_1 bis x_2 $W(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx$

Irgendwo $W(-\infty, +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1$ (Normierungsbedingung)

vergleiche $Masse \quad m = \int_0^V \rho(V) dV$

3.3 Heisenbergsche Unschärfe-Relation

klassische Mechanik: Vorhersage von Ereignissen möglich

Quantenmechanik: Berechnung von Wahrscheinlichkeiten

Heisenbergsche Unschärferelation: man kann nicht gleichzeitig den Ort $x_0 \pm \Delta x$ und den Impuls $p_0 \pm \Delta p$ eines Teilchens exakt messen oder vorhersagen, jedenfalls nicht genauer als

$$\Delta x \Delta p > h/2\pi$$

3.4 Tunneleffekt

Sie schlagen einen Squashball immer wieder an die Wand. Irgendwann durchdringt er diese ohne diese zu zerstören, er ist durch getunnelt. In der klassischen Physik der makroskopischen Teilchen-Welt unmöglich, in der Quantenphysik der mikroskopischen Welt schon.

Statt Ball, fliegt ein Elektron gegen Wand (Potenzialbarriere zu), z.B. elektr. Gegenfeld U

Elektronenenergie $E_{\text{kin}} = E$

Potenzialbarriere $U(x) = U_0$ für $0 < x < L$, sonst $U = 0$

=> Kraft $F(x) = -\frac{dU}{dx}$ (Physik I)

Klassische Physik für Teilchen:

a) Transmission für $E > eU_0$ $T = 100\%$

b) Reflexion für $E < eU_0$ $R = 100\%$

Quantenmechanik: De Broglie-Welle statt Teilchen

=> Wellenfunktion $\psi(x)$ ermitteln,

Aufenthaltswahrscheinlichkeit $|\psi(x)|^2$ des Elektrons berechnen

=> Lösung für

i) $x < 0$ => $W = |\psi(x)|^2$ stehende Welle

ii) $0 < x < L$ => $|\psi(x)|^2 \neq 0$, Welle klingt ab NEU!

iii) $x > L$ => $|\psi(x)|^2 \neq 0$, wenn L nicht zu groß NEU!

=> Transmission der Welle (Teilchen) möglich, Tunneleffekt

Transmission $T \approx e^{-2kL}$, $k = \sqrt{\frac{8\pi^2 m(eU_0 - E)}{h^2}}$

Beachte: sei $T = 0.05$ dann tunneln von 100 Elektronen 5 durch die Barriere

Aber nicht 5% des einen Elektrons tunnelt, Teilchen werden nicht geteilt! Ganz oder gar nicht!

Transmission T groß für kleine: Masse m, Potenzialbarriere L, Energiedifferenz ($U_0 - E$)

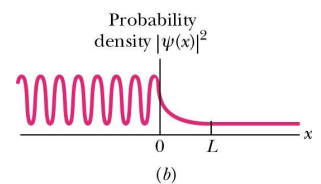
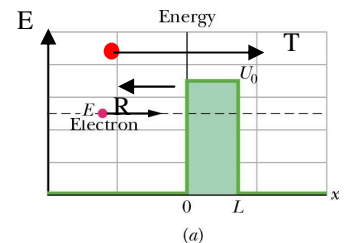
=> Elektron tunnelt eher als Tennisball

Effekt bekannt aus der Wellenoptik: Welle dringt in das reflektierende Medium ein

Anwendung: attenuated total reflection (ATR), Nahfeldmikroskopie FOLIE

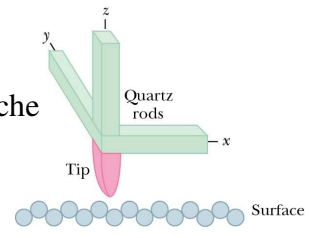
Anwendung

Feldemission von Elektronen aus Metallen, Tunnelmikroskop, SQUID-Magnetfeldmessung



Raster-Tunnelmikroskop (Binnig, Rohrer 1984, Nobelpreis 1986)

- Messung: Oberfläche von elektrisch leitenden Festkörpern
- Auflösung: atomar, d.h. größer als optisches oder Elektronenmikroskop
- Prinzip: feine Metallspitze im Abstand $L \sim 1 \text{ nm}$ über der Probenoberfläche
- Spannung $U \sim 0,01 - 1 \text{ V}$ zwischen Spitze (-) / Probe (+)
- Feldemission der Elektronen aus Spitze
- Elektronen tunneln durch Luftbarriere von Oberfläche in Spitze
- => Tunnelstrom abh. von Abstand $L \quad I \sim T \approx e^{-2kL}$



- Rastern Spitze sitzt an x-y-z-Piezo-Verschiebevorrichtung
- Spitze wird über Probe verfahren, so dass der Tunnelstrom konstant bleibt
- => Abstand L gibt Karte der Oberfläche

FOLIE Si 7x7

4. Elektronen im Potenzialtopf (optional)

Elektronen können durch Materiewellen beschrieben werden. Sie zeigen daher auch Eigenschaften wie fortlaufende oder stehende Wellen. Daher beschreiben wir nun Seilwellen mit Begriffen der Quantenmechanik.

4.1 Stehende Seilwellen

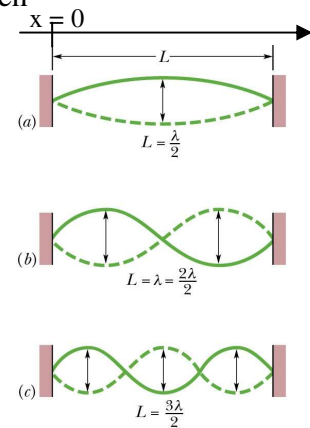
- Seillänge $L = \infty$: Welle jeder Frequenz kann sich ausbreiten
- $L \neq \infty$: nur stehende Wellen können sich ausbilden
- Bewegungsform der Welle ist quantisiert
- Nur diskrete Wellenlängen / Frequenzen zugelassen

Quantisierungsbdg. $L = \frac{n\lambda}{2}$ Schwingungsmoden

Quantenzahl $n \in \mathbb{N}$ Knoten bei $x = 0, L$

Amplitude $y_n(x) = A \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right), \quad k = \frac{n\pi}{L}$

(siehe Kapitel Wellen)



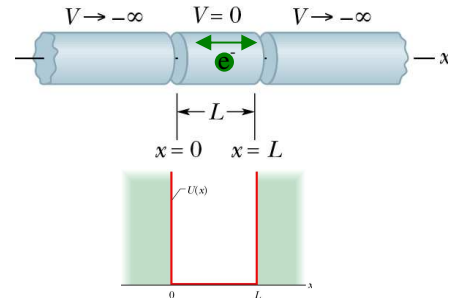
4.2 Materiewelle in Elektronenfalle

eine Elektronenfalle schränkt die Bewegung des Elektrons räumlich ein so wie ein gespanntes Seil endlicher Länge die Bewegung der Seilwelle einschränkt. Es bildet sich eine stehende Materiewelle (Elektronenwelle) aus.

- freies Elektron ∞ langes Seil => jede Energie möglich
- gebundenes Elektron endlich langes Seil => Energie ist quantisiert

Unendlich hohes Kastenpotenzial:

- 3 Zylinder mit unterschiedlichem Potenzial
- links / rechts $U = -\infty$, $L = \infty$
- Elektron im Mittelzylinder mit $U = 0$, Länge = L



Prinzip: Elektron ist im mittleren Zylinder gefangen
 Wird von ∞ hohen Potenzialwänden immer in die Mitte zurückreflektiert
 Zur Überwindung wäre Energie $E = eU = \infty$ nötig

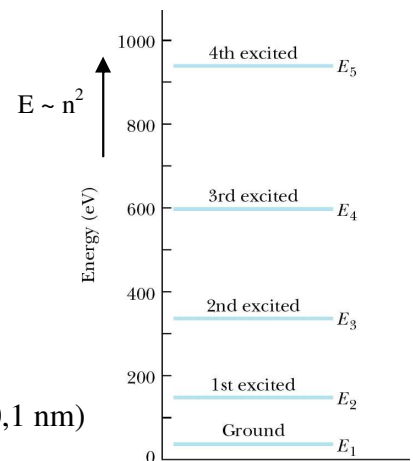
Stehende Materiewelle:

- Knoten bei $x = 0, x = L$
- Wellenlänge $\lambda = h/p$ (De Broglie)
- Impuls $p = \sqrt{2mE}$
- Quantisierung $L = \frac{n\lambda}{2}$ der stehenden Welle

$$\Rightarrow E = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m} \frac{1}{\lambda^2} = \frac{h^2}{2m} \frac{n^2}{4L^2}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{E_n = \left(\frac{h^2}{8mL^2} \right) n^2}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ nicht } 0 !$$

(hier $L = 0,1 \text{ nm}$)



Quantenmechanik: gebundenes Elektron ist stehende Welle => Energie E_n ist quantisiert
 => nimmt nur die möglichen Energien E_n an, aber keine Zwischenwerte

klassisch: Elektron ist freies Teilchen => kann jede Energie annehmen

4.3 Übergänge

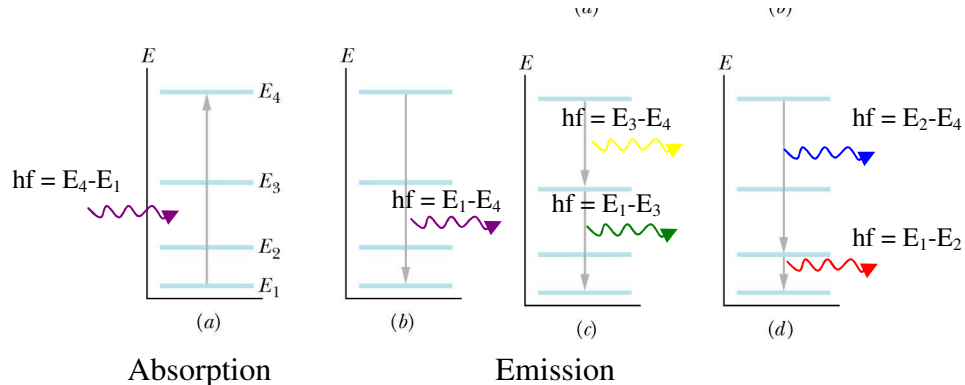
Grundzustand $n = 1$: gebundenes Elektron hält sich im Grundzustand auf,
d.h. bei kleinster Energie (siehe 2. HS der Thermodynamik)

angeregter Zustand $n > 1$ nur einnehmbar, wenn von außen Energie zugeführt wird

Quantensprung $\Delta E = E_{\text{hoch}} - E_{\text{tief}}$

Absorption Ein gebundenes Elektron absorbiert ein Photon, wenn dessen Energie exakt der Energiedifferenz $hf = \Delta E$ zwischen einem tieferen und einem höheren, angeregten Zustand entspricht

Emission Emittiert ein gebundenes Elektron ein Photon, so ist die Photonenenergie gleich der Differenz zwischen dem Übergang vom höherem angeregten Zustand des Elektrons in den tieferem Zustand: $hf = \Delta E$



Beachte: Photonenabsorption / Emission verläuft bei realen 1-dim. Elektronenfallen etwas anders
Drehimpuls muss mit berücksichtigt werden, hier vernachlässigt

4.4 Wellenfunktion des gebundenen Elektrons

unendlich hohes Kastenpotenzial, Schrödingergleichung lösen =>

für $x < 0, x > L$ $\psi(x) = 0$

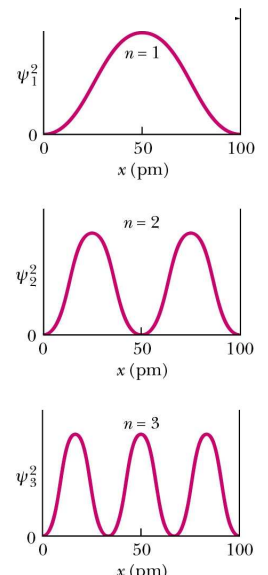
für $0 < x < L$ $\psi_n(x) = A \sin\left(\frac{n \pi}{L} x\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots$ A später

Wellenfunktion $\psi_n(x)$ nicht messbar

Wahrscheinl.dichte $\psi_n^2(x)$ messbar

=> $\psi_n^2(x) = A^2 \sin^2\left(\frac{n \pi}{L} x\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots$

- Bilder hier -



Wahrscheinlichkeit, Elektron bei x im Intervall der Breite dx nachzuweisen

$$W(x, dx) = \psi_n^2(x) dx$$

Nachweis-WS für das Elektron im Bereich zwischen x_1 und x_2

$$W(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} A^2 \sin^2\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx$$

klassische Physik: Nachweis des Elektrons für alle Orte x im Kasten mit gleicher Wahrscheinlichkeit, also $\psi^2(x) = \text{konst}$

Quantenmechanik: $\psi_n^2(x)$ ortsabhängig, z.B. für $n = 2$:

Nachweis-WS $W(x)$ max bei $x = 25, 75 \text{ pm}$, $W(x) = 0$ bei $x = 0, 100 \text{ pm}$

Nullpunktsenergie

Grundzustand $n = 1$ Warum beginnen die Zustände nicht bei $n = 0$?

$$\psi_{n=0}^2(x) = A^2 \sin^2\left(\frac{0\pi}{L} x\right) = 0 \text{ für alle } x$$

=> für $n = 0$ gäbe es kein Elektron im Kasten, Widerspruch zu unserer Annahme

=> Systeme in endlichem Volumen haben immer Nullpunktsenergie $E_1 > 0$

=> Grund für $T > 0$ ($T \neq 0$), folgt aus $kT = E > 0$

Korrespondenzprinzip: Quantenmechanik => klassische Physik

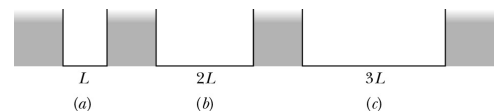
$$L \Rightarrow \infty$$

$$E_1 = \left(\frac{h^2}{8mL^2}\right) 1^2 \Rightarrow 0 \text{ Nullpunktsenergie} = 0$$

Bsp. Ordne für die Kastenpotenziale für Zustand $n = 10$ nach

a) Zahl der Maxima (alle gleich)

b) Größe der Energie $E_{n=10}$ $E \sim 1/L^2$



4.5 Technische Anwendung: Nanokristallite

Einfachste Form der Potenzialbarriere für Elektronen: kleine Kristalle im nm-Bereich

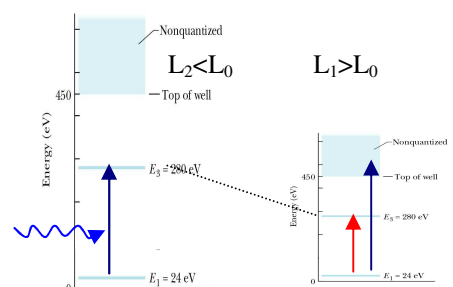
Elektronen sind im Kastenpotenzial des Kristalls gefangen

Energieniveaus $E_n = \left(\frac{h^2}{8mL^2}\right) n^2$ einstellbar durch Kristallgröße L

Lichtabsorption Anregung von $n = 1 \Rightarrow n = 2$

$$hf = \Delta E = E_2 - E_1 = \left(\frac{h^2}{8mL^2}\right) (n_2^2 - n_1^2),$$

=> $hf \sim \frac{1}{L^2}$ kleinste absorbierbare Lichtenergie



- => kleine Kristallite absorbieren höhere Energie
- => große Kristallite absorbieren kleine & große Energien

5. Wasserstoffatom

Betrachte einfaches H-Atom. Es stellt eine Elektronenfalle dar, denn der Kern hält durch die Coulombkraft das Elektron auf bestimmtem Raumgebiet gefangen => wir erwarten diskrete Energiezustände. Hier nicht die Herleitung des Bohrschen Atommodells

5.1 Elektronen im Kernpotenzial

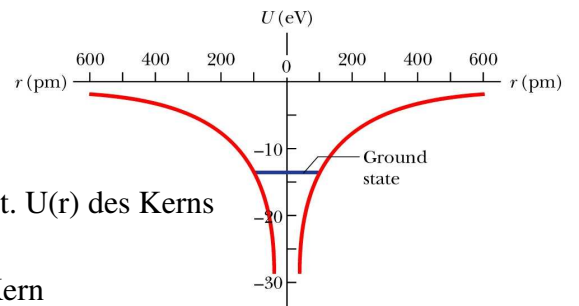
betrachte potenzielle elektrische Energie eines Zweiteilchensystems (siehe Elektrodynamik)

Ladungen $q_1 = q_2 = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (Kern, Elektron)

Potenzial $U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r}$

Pot. Energie $E_{pot} = eU(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$ des Elektr. im Pot. $U(r)$ des Kerns

Nullpunkt: $r = \infty$, $r =$ Abstand Elektron - Kern



Beschreibe Elektron durch Materiewelle im Potenzial $U(r)$ des Kerns

- Lösung:
- a) Energien E_n
 - b) Wellenfunktionen $\psi_n(r)$ beides ist gequantelt, typisch für stehende Welle

5.2 Energie

Energie: $E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -13,6 \text{ eV} \frac{1}{n^2}$

Quantenzahl $n = 1, 2, 3, \dots$

$E_n < 0$ bedeutet gebundene Elektronen

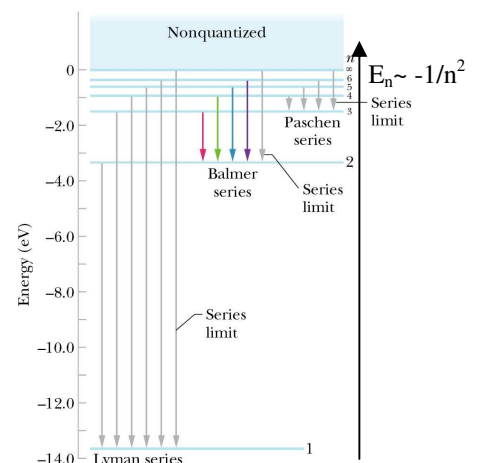
Grundzustand $n = 1$

$E_1 = -13,6 \text{ eV}$, tiefste Energie des e-

Angeregte Zustände: $n > 1$ instabil, kurze Lebensdauer $t \sim 10^{-9} \text{ s}$

Höchster Zustand $E_\infty = 0, n = \infty$

Ionisiert $E > 0$ bedeutet freies Elektron, d.h.



Elektron nicht gefangen im Kernpot.

=> kontinuierliche Energieverteilung

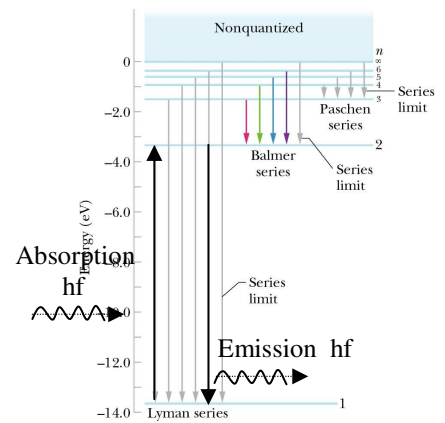
Übergänge: i) Lichtabsorption: $hf = E_m - E_n, m > n$

ii) Emission $m < n$

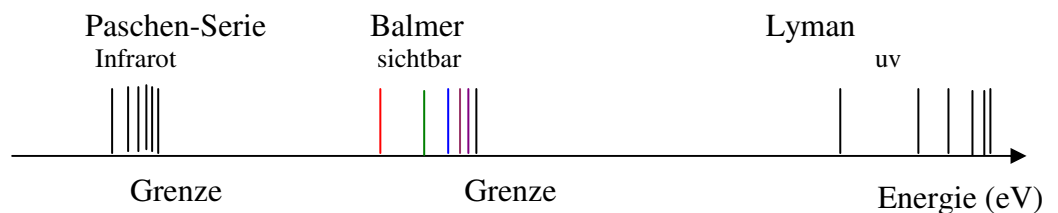
=> diskrete Linien, da E_n gequantelt

Spektrum: alle möglichen Übergänge

Serie: Übergänge aus allen möglichen Niveaus m in das Niveau n



Spektralanalyse:



=> Atomphysik opt. Spektralanalyse

=> Elementzuordnung eindeutig, da jedes Element sein charakteristisches Termschema besitzt

Exp. Wasserstoffspektrum mit Gitter

5.3 Quantenzahlen

Jede Wellenfunktion beschreibt einen möglichen Zustand des Elektrons und wird charakterisiert durch eine Kombination von Quantenzahlen

Name	Symbol	mögliche Werte	Bedeutung
Hauptquantenzahl	n	1, 2, 3, ...	Energie E_n , Schale
Bahndrehimpulsqu.	l	0, 1, 2 ... (n-1)	Drehimpuls, Orbital
magnet. Quantenzahl	m_l	$-l, -(l-1), \dots, +(l-1), +l$	Bahn-Orientierung bzgl. B_{extern}
Spin	m_s	$\pm 1/2$	Spin z-Komponente bzgl. Achse

3-fache Quantelung da 3-dim-Problem

Orbitale

3 X FOLIEN

Drehimpulszahl	Name	Symmetrie	Zahl
$l = 0$	S	Kugel	1
$l = 1$	P	Keule	3
$l = 2$	D	Kreuz	5

Deutung: alle P-Orbitale ergeben Drehimpuls $\Sigma m = -1 + 0 + 1 = 0 \Rightarrow$ kugelsymmetrisch
 Aufenthalt 1/3 der Zeit in px, 1/3 in py 1/3 in pz

5.4 Periodensystem der Elemente

das reale Mehrelektronen-Atom ist viel komplizierter als das Kastenpotenzial, denn das gebundene Elektron sieht nicht nur das Kernpotenzial, sondern auch das Pot. der Nachbarelektronen

- \Rightarrow Mehrelektronenproblem numerisch (PC) lösen
- \Rightarrow Problem: geeignetes Potenzial finden

Die Schalen haben bestimmte Anzahl von Plätzen um Elektronen aufzunehmen

FOLIE Energieniveaus

FOLIE Periodentafel

6 Röntgenstrahlung - X-Ray

Röntgenstrahlung ist elektromagn. Strahlung. Sie ist durch die Lage im Spektrum definiert

Bereich: Extreme-UV bis γ -Strahlung, $100 \text{ eV} < E < 100 \text{ keV}$
 $10 \text{ nm} > \lambda > 0,01 \text{ nm}$

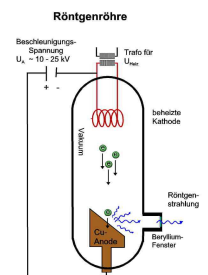
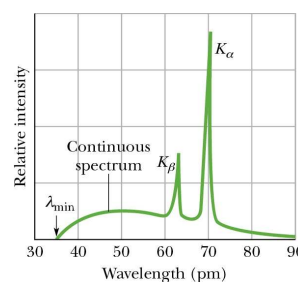
Erzeugung hochenergetische Elektronen werden auf Materie geschossen

FOLIE

U_A : Beschleunigungsspannung

Röntgenspektrum

- 1) Bremspektrum
- 2) charakteristisches Spektrum



6.1 Bremspektrum

beschleunigte Elektronen werden im Coulombfeld der Materie-Elektronen abgebremst

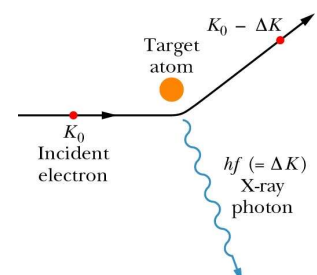
$E_{kin} \Rightarrow hf$ Energieumwandlung nach den Gesetzen der Elektrodynamik

Energieabgabe in Teilschritten oder einmalig

Maximale Photonenenergie:

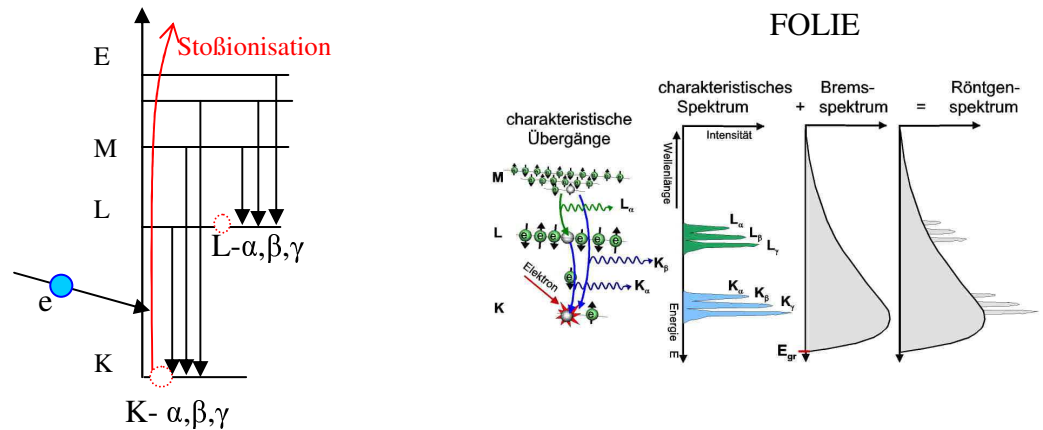
$$E_{kin} = eU_A = E_{gr} = hf_{gr} = \frac{hc}{\lambda_{gr}}$$

λ_{gr} : Grenzwellenlänge, unabhängig vom Anodenmaterial



6.2 Charakteristisches Spektrum

1. Stoßionisation: beschleunigte Elektronen schießen ein tief gebundenes Elektron des Anodenmaterials heraus, erzeugen Loch in tiefer Schale
2. Rekombination: gebundenes Elektron springt aus höhere Schale m in Loch der tieferen Schale n
3. X-Rays => $\Delta E = E_n - E_m = hf$ abhängig vom Anodenmaterial



Bezeichnung: K, L, M, Schale des erzeugten Lochs
 α, β, γ Schalenabstand des rekombinierenden Elektrons

7 Laser

Laser = **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Typischerweise entsteht Licht in Glühlampen oder Leuchtstoffröhren durch spontane Emission einzelner Atome. Beim Laser ist die Emission ein kollektives Verhalten vieler Atome
 Maimann 1960 erster Laser, Idee 1917, Einstein, Theorie: Schawlow & Townes 1958

7.1 Eigenschaften von Laserlicht

1. monochromatisch, d.h. $\Delta\lambda/\lambda$ sehr klein
2. kohärent, Wellenzuglänge ~ 100 km, Glühlampe < 1 m
3. parallel, Aufweitung des Strahls im wesentlichen durch Beugung am Austritt
 (Strahldurchmesser auf dem Mond wenige Meter)
4. scharfe Bündelung möglich => hohe Flächendichten $I \sim 10^{17} \text{W/cm}^2$ (Pulse)
 Ursache: paralleler Strahl, (Vergleich: Schweißbrenner-Flamme 10^3W/m^2)
 (höhere Divergenz der Glühlampe durch Drahtdurchmesser)

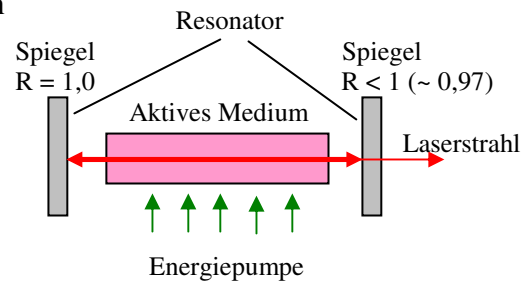
Größe a) ~ 1 mm (Festkörperlaser), Leistung < 100 mW, Anwendung Datenübertragung, CD
 b) ~ 10 m, Leistung $\sim 10^{14}$ W, Anwendung: Kernfusion, Militär Astronomie

7.2 Funktionsprinzip

7.2.1 Aufbau

ein Laser besteht im wesentlichen aus 3 Komponenten

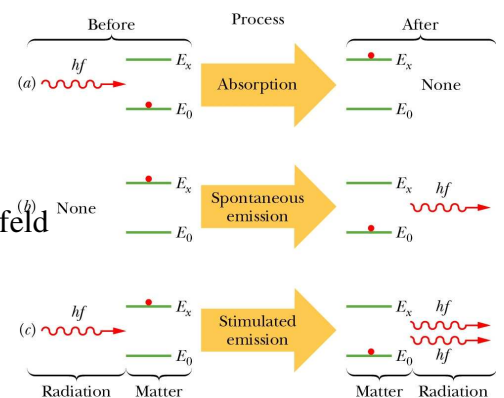
- aktives Lasermedium (Lasingsprozess)
- Energiepumpe
- optischer Resonator



7.2.2. Emissionsprozess

- a) Absorption durch WW mit äußerem Strahlungsfeld

$$hf = E_n - E_0$$



- b) Spontane Emission ohne WW mit äußerem Strahlungsfeld

$$hf = E_0 - E_n$$

Lebensdauer typisch $\tau \sim 10^{-9}$ s

Metastabile Zustände $\tau \sim 10^{-3}$ s

- c) induzierte Emission wenn WW mit äußerem Strahlungsfeld

$$hf = E_0 - E_n$$

Emission wird durch ein äußeres Photon ausgelöst

=> beide Photonen haben gleiche

- Energie
- Phase
- Polarisation
- Ausbreitungsrichtung

Laserlicht

Übergangswahrscheinlichkeiten sind gleich für Absorption / Emission

=> Laser-Verstärkung durch induzierte Emission tritt nur auf, wenn mehr Atome im angeregten Zustand als im Grundzustand sind (sonst wird das emittierte Photon wieder absorbiert)

7.2.3 Besetzungsinversion

Problem: meisten Atome sind im Grundzustand

_____ Grundzustand: angeregter Zustand

Energie E_0 E_n

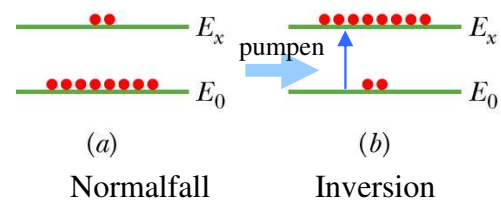
Atomzahl N_0 $N_n = N_0 \exp\left\{-\frac{E_n - E_0}{kT}\right\}$ (Boltzmannverteilung), T: Temperatur

weil $E_n > E_0 \Rightarrow \exp\{-\frac{E_n - E_0}{kT}\} < 1 \Rightarrow N_n < N_0 \Rightarrow$ es sind immer mehr Atome im Grund-

zustand als im angeregten Zustand

Ziel: Besetzungsinversion, d.h. viel mehr Atome im angeregten als im Grundzustand

Methode: Energie pumpen



7.3 Drei-Niveau-Laser (Rubinlaser)

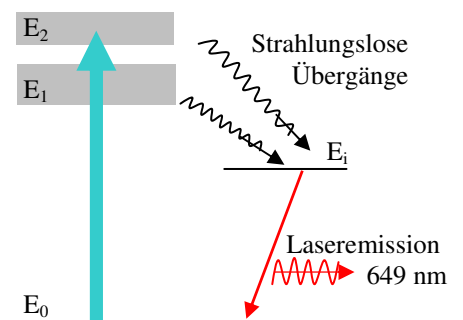
aktives Medium: $Al_2O_3:Cr^{3+}$ (Saphir-Stab, dotiert mit Cr)

Pumpen mit Blitzlampe, weißes Licht,

1) Grundniveau E_0

2) Pumpniveau E_1, E_2 stark verbreitert im Festkörper
Lebensdauer $\tau = 10^{-10}s$, Gitterschwingung

3) Inversionsniveau E_i , metastabil $\tau \sim 10^{-6}s$



hier werden die Elektronen angesammelt und warten auf die induzierte Emission (τ groß)

Laservoraussetzung: Besetzungsinversion zwischen E_0 und E_i ist erreicht

also E_0 leer, E_i voll

daher 3 Niveaus notwendig!, 2 Niveaus reichen nicht aus

Resonator

Lasingprozess: Einsatz durch spontane Emission ($E_i \Rightarrow E_0$)

Verstärkung: Kettenreaktion

Spiegelreflexion hält Photonen im aktiven Medium, viele Atome müssen getroffen werden

Auskopplung nur kleiner Anteil macht Laserstrahl aus

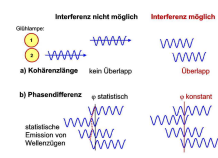
7.3 Kohärenz

zur Interferenz benötigt man kohärente Wellenzüge

a) zeitlich konstante Phasenbeziehung \Rightarrow immer gleiche Art der Interferenz (pos, neg)

b) gleiche Frequenz, gleiche Wellenlänge

c) Kohärenzlänge ausreichend groß (Überlapp)



FOLIE ZEIGEN

Glühlampe: inkohärent, da statistische Emission von Wellenzügen, willkürliche Verteilung von pos. und neg. Interferenz

Laser: kohärent, da feste Phasenbeziehung der Wellenzüge

Strahlteilung: Interferenz an dünnen Schichten, Michelson-Interferometer kohärent, da ein Wellenzug immer geteilt wird und mit sich selbst interferiert, aber Kohärenzlänge beachten!

Punktförmige Lichtquelle nahezu kohärent, wenn $d\theta \ll \lambda$

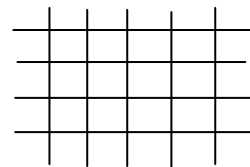


Festkörperphysik

Materialkunde bedeutet Festkörperphysik, denn alle Baustoffe sind Festkörper. Man kann die Festkörper klassifizieren nach ihren Eigenschaften: optisch, elektronisch, Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit, räumlichen Struktur

1.1 Gitterstruktur

a) Einkristalle: Orte der Atome werden durch periodisches Gitter beschrieben, hohe Fernordnung



b) Polykristalline FK: viele kleine, statistisch verteilte Einkristalle bilden den FK

c) Amorpher FK: Atome statistisch verteilt, keine Fernordnung (Glas)

d) Flüssigkristall: orientierte Flüssigkeit, meist durch externes E-Feld



1.2 Einkristalle

Exp. Kristallgitter zeigen, echte Kristalle

Raumgitter an jedem Eckpunkt des Gitters sitzt ein Atom

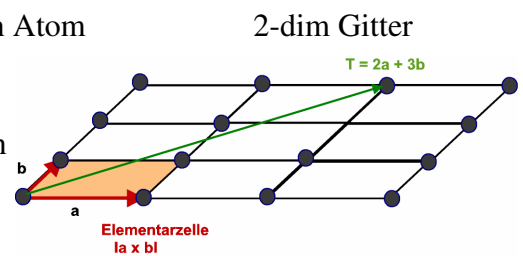
Koordinaten Ursprung in einem Atom

Basisvektoren $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ zeigen zu den 3 Nachbaratomen

(müssen nicht rechtwinklig sein)

Gitterkonstanten $|\vec{a}|, |\vec{b}|, |\vec{c}|$

Translationsvektor $\vec{T} = m_1\vec{a} + m_2\vec{b} + m_3\vec{c}$ zeigt zu beliebigem Gitterpunkt



Elementarzelle gegeben durch Basisvektoren $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$

$$V = (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} \quad \text{Volumen} = \text{Spatprodukt}$$

=> gesamte Gitter lässt sich durch Translation der Elementarzelle aufbauen

1.3 Bravaisgitter

FOLIE BRAVAIS

alle möglichen Kristallgitter können nach Symmetrie geordnet werden

=> 7 mögliche Gittertypen (nur einer Atomsorte pro Einheitszelle)

=> 14 Gitter, wenn verschiedene Atome pro Einheitszelle

1.4 Bragg-Streuung

Ziel: Bestimmung des Gitterabstands d

Je nach Blickrichtung gegeben durch Atomabstände a, b, c

Methode: monochromatischer Röntgen / Neutronen-Strahl fällt unter Winkel θ auf Kristall

$$\underline{m\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta}$$

FOLIE

=> θ bezieht sich nicht auf Kristalloberfläche, sondern auf Kristallebene

Kristalloberfläche ist nur zu einer bestimmten Ebenenschar parallel

2 Kristallbindungen

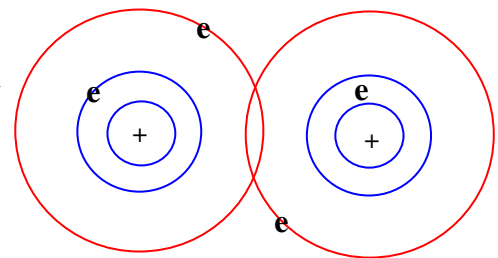
Welche Kräfte halten die Atome im Kristall zusammen ? Welche Bindungen gibt es ?

Im wesentlichen sind es elektrostatische Kräfte mit unterschiedlicher Reichweite.

Valenzelektronen: - Elektronen der äußeren, teilweise gefüllten Schalen stehen in WW

- machen die chemische Bindungen

Core-Elektronen: - innere, vollständig gefüllte Schalen



2.1 Ionenkristalle

Meist Alkaliatome + Halogene (Salze)

Alkali gibt äußeres Elektron ab => volle Schale

einfach positiv

Halogen nimmt Elektron auf => volle Schale

einfach negativ geladen



FOLIE

=> elektrost. Anziehung der Ionen bis sich Elektronenschalen berühren und Abstoßen

=> Gleichgewichtsabstand = Gitterabstand im Kristallgitter

Bindungsenergie beider Ionen:

Abschätzung $E_{Bind} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} = 5,1eV$, Gitterabstand $R = 0,281$ nm aus Röntgenbeugung

Experiment $E_{Bind} = 8,2$ eV

Bedeutung der hohen Bindungsenergie

=> hohe Schmelztemperatur, harte Materialien

=> schlechter elektr. Leiter, da Elektronen in abgeschlossenen Schalen gebunden

2.2 Metalle

- mehrere „frei“ bewegliche Elektronen, keine feste Zuordnung zu einem Atom

=> guter Leiter

- Modell: Elektronengas als See, in dem die pos. geladenen Atome sitzen FOLIE

- Bindungsenergie der Metallatome im Gitter:

~ 1 eV Alkali => weiches Material, geringe Schmelztemp. $T \sim 30^\circ - 190^\circ$ C

~ 4 eV 3d-Metalle (Fe, Co, Ni) => mittlere Schmelztemp. $T \sim 1000^\circ - 2000^\circ$ C

~ 8 eV W => harte Materialien, hohe Schmelztemp. $T \sim 3400^\circ$ C

2.3 Kovalente Bindung

räumliche Umverteilung der Valenzelektronen, gerichtet zwischen Atomen

Typ. Vertreter: C, Si, Ge,

mit je gleich vielen Valenzelektronen (äußere Elektronen)

4 Nachbarn erhalten je 1 Elektron, Diamantstruktur

BN, SiC: harte, spröde Materialien, hohe Schmelztemp. wegen gerichteter Bindungen

FOLIE Übersicht Bindungen

3.1 Energiebänder

betrachte freie Atome, die zu einem Festkörper zusammen geschoben werden

=> Valenzelektronen spüren Nachbarn

FOLIE

=> Orbitale überlappen => Elektronen tunneln zum Nachbaratom

=> aus N einzelnen Atomen wird neues N-Atom-System mit doppelter Elektronenzahl

Bindung: Energieabsenkung im Festkörper gegenüber freiem Atom

Gitterkonstante: Gleichgewichtsabstand der Atome im Festkörper

- Bänder: Energiezustände für Elektronen breiter als atomare Niveaus
- Bandlücke E_g : verbotener Energiebereich für Elektronen
- Core-Zustände: enge Bindung der Elektronen an Kern, lokalisierte Elektronen
=> Energie kaum verändert gegenüber freiem Atom
- höhere Bänder: Elektronen sind delokalisiert, tunneln von Atom zu Atom
Elektronen sind keinem Atom fest zugeordnet
- Band-Besetzung: N Atome mit Kernladungszahl Z bilden Festkörper
=> Elektronenzahl: $N \times Z$ $N \sim 10^{24}$
Bandelektronenzahl = $N \times$ Elektronen pro Atomzustand

3.2 Isolatoren & Leiter

Die elektrische Leitfähigkeit von Festkörpern wird anhand der Bandstruktur gedeutet. Design von modernen Werkstoffen, Chips, Magneten bedeutet heute Design von Bandstrukturen.

Fermienergie E_F

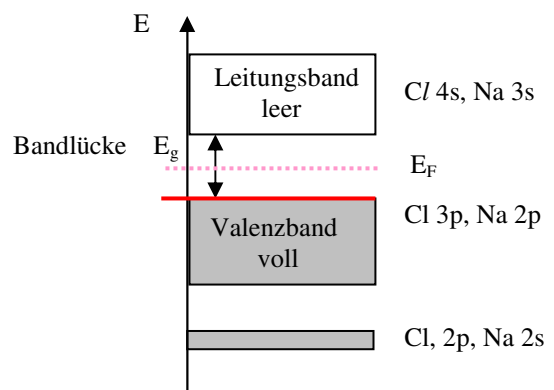
Gibt Energie der höchsten mit Elektronen besetzten Energieniveaus an, E_F ist Kriterium, ob Leiter oder Isolator: wie sind die Bänder mit Elektronen gefüllt, d.h. wo liegt E_F ?

Isolator Betrachte ionischen Kristall Na^+Cl^-

Na^+ : äußere Schale leer, da Elektron an Cl abgegeben

Cl^- : äußere Schale voll, da Elektron von Na erhalten

=> Zustände komplett gefüllt oder komplett leer,
kein teilweise gefüllter Zustand / Band



elektrische Leitung:

lege außen elektrische Spannung U an

=> Energieaufnahme der Elektronen $E_{kin} = eU$ => Strom

Voraussetzung: freie Zustände höherer Energie für Elektronen nicht gegeben

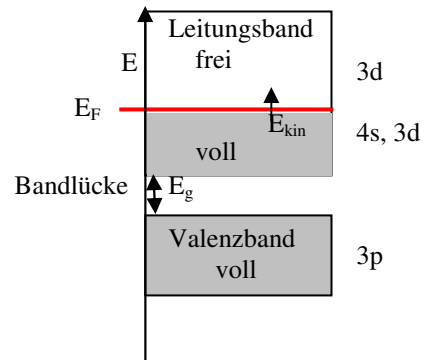
Isolator: $E_{kin} \ll E_g$ keine Zustände in Bandlücke vorhanden (einzeichnen)

Anschaulich: keine freien Plätze, auf die die Elektronen springen können

=> keine elektrische Leitung

Leiter Fe-Kristall

Fe: äußere Schale nur teilweise gefüllt
 Bandlücke $E_g = 0$ auch möglich, irrelevant



Energieaufnahme E_{kin} möglich

=> elektrische Leitung möglich (einzeichnen)

Valenzband: immer voll

Leitungsband: teilweise gefüllt oder leer, Elektronen frei beweglich

4 Halbleiter

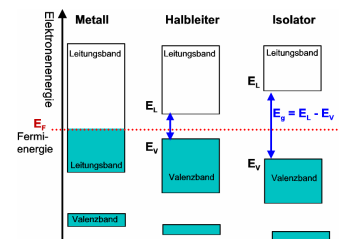
4.1.1 Intrinsische Halbleiter

Materialien: Elementhalbleiter (Si, Ge, ...)
 Verbindungshalbleiter (GaAs, InP,...)

FOLIE Periodentafel

FOLIE Bandmodell

Isolator: Bandlücke E_g groß LB leer ($T \geq 0$ K)
 Halbleiter: Bandlücke E_g klein LB leer nur bei $T = 0$
 => Temperaturabhängige Leitfähigkeit
 => Nichtleiter bei $T = 0$ K



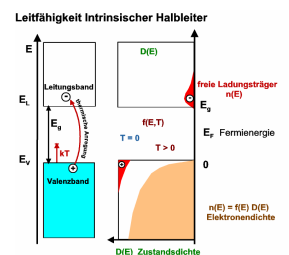
4.1.2 Temperaturabhängigkeit

Bandlücke E_g ist kleiner als im Isolator

=> Elektr. Leitung durch thermische Anregung wahrscheinlicher wenn $T > 0$ K
 => Ladungsträger: Freie Elektronen im LB

Löcher im VB

FOLIE



beachte: thermische Anregung möglich, obwohl $(kT < E_g)$!

Wahrscheinlichkeiten für Elektronenaufenthalt berechnen!

Elektronenzahl im LB
$$n_e(E) = n_0 e^{\frac{-(E_L - E_F)}{kT}}, \quad n_0 = 2 \left(\frac{m_e^* kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

Löcherzahl im VB
$$n_p(E) = p_0 e^{\frac{-(E_F - E_V)}{kT}}, \quad p_0 = 2 \left(\frac{m_p^* kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

Ladungsträgerdichte:
$$n_i = \sqrt{n_e \cdot n_p} = \sqrt{n_0 p_0} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (\text{intrinsische Dichte undotierter HL})$$

Bsp. Si, T = 300 K $n_0 = 2,73 \cdot 10^{19} 1/cm^3$, $p_0 = 1,08 \cdot 10^{19} 1/cm^3$

4.1.3 Leitfähigkeit intrinsischer Halbleiter

Stromdichte $j = \sigma \cdot E$ mit $\rho = \frac{1}{\sigma}$ spezifischer Widerstand

Leitfähigkeit $\sigma = n_e \cdot e^2 \cdot \frac{\tau_e}{m_e^*} + n_p \cdot e^2 \cdot \frac{\tau_p}{m_p^*}$

τ : freie Flugzeit zwischen 2 Stößen für Elektronen, Löcher

$n_{e,p}$: intrinsische Ladungsträgerdichte (identisch für Elektronen und Löcher)

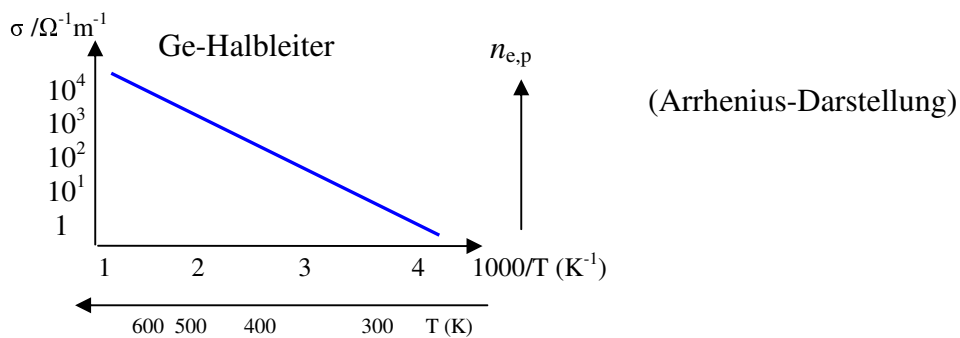
Temperaturabhängigkeit

a) τ : sinkt mit wachsendem T (bestimmend für Metalle)

b) $n_{e,p}$: wächst mit T (bestimmend für Halbleiter) exponentiell

=> $\sigma = X(T) \cdot e^{\frac{-E_g}{2kT}}$, $X(T)$ leicht temperaturabhängig

=> Leitfähigkeit eines HL: - steigt exponentiell mit Temperatur an,
 - hängt ab von E_g



- Exp.** 1) Stromkreis mit Widerstandsdraht über einer Flamme, U fest, I messen
 2) Halbleiter, dotiertes Si

4.2 Dotierte Halbleiter

Für elektronische Anwendungen ist die gezielte Einstellung der Leitfähigkeit wichtig, unabhängig von der Temperatur, woher erhält man zusätzliche Ladungsträger?

Idee: - Wirtskristall (Si, Ge) dotieren mit Fremdatomen

Lösung: - Ionen-Implantation (Beschuss mit 100 eV – keV), Diffusion aus heißem Dampf
 machbar: - Fremdionenkonzentration $10^{-8} - 10^{-4}$

4.2.1 Donatoren und n-Halbleiter

Wirtskristall: sei 4-wertig (Si, Ge) (hier nur ein Beispiel für 4-wertigen Wirt)

Wertigkeit: Zahl der äußeren Elektronen, die an der Bindung teilnehmen

Dotierung: 5-wertig (P, As, Sb, Hauptgruppe V)

Donator: 1 Elektron zu viel für Kristallbindung
 extra Elektron kann leicht abgegeben werden

n-Halbleiter: negative Überschussladung

Leitung: Elektronen = Majoritätsträger, Minoritätsträger: Löcher

Bindung: Donatorelektron im Coulombfeld des Donatorions

Reduzierte Bindung durch Polarisierung der Si-Valenzelektronen skaliert mit ϵ

Energie Donatorelektron wie im H-Atom, aber skaliert mit

$$E_n^{Donator} = -13,6eV \frac{1}{n^2} \left(\frac{m_e^*}{m_e \epsilon^2} \right)$$

Radius $r_n = r_{Bohr-n} \cdot \epsilon \cdot \frac{m_e}{m_e^*}$

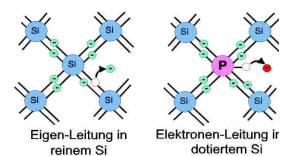
Bsp. für Si gilt $\epsilon \approx 12$, $m_e/m_e^* \approx 3$

=> $E_1^{Donator} = -40 meV$, sehr schwach gebunden, Ionisierungsenergie $\sim kT$

=> $r_1 = 2 nm$ also delokalisiertes Elektron, ca. 10-facher Atomabstand

=> quasi-freies Donatorelektron im LB

FOLIE teilweise

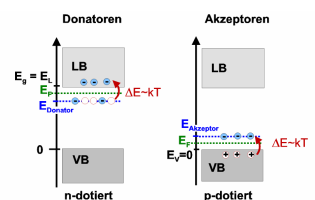


FOLIE teilweise

Dichte freier Donatorelektronen:

Allgemeine Formel $n = n_D^+ = \frac{N_D}{2e^{(E_F - E_D)/kT} + 1}$, $N_D =$ Donatordichte

$$E_F = \frac{E_D + E_L}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_D}{n_0} \right)$$



Typ. Fälle:

- a) Tiefe Temperatur $kT \ll |E_F - E_D| \Rightarrow n_D^+ = 0$
- b) mittlere Temperaturen $n_D^+ \approx 0,1 \cdot N_D$ groß, da $(E_F - E_D) \sim kT$
- c) Zimmertemperatur $n_D^+ \approx N_D$ nahezu alle Donatoren sind ionisiert
- d) hohe Temperaturen $kT \gg E_g$ $n = n_i = \sqrt{n_0 p_0} e^{\frac{-E_g}{2kT}}$ intrinsische Leitung
unerwünscht für Anwendung, bei großem T wähle HL mit größerem E_g Ge < Si < GaAs < GaN

4.2.2 Akzeptoren und p-Halbleiter

Wirtskristall: sei 4-wertiges Si

Dotierung: 3-wertig (Al, Ga, Hauptgruppe III)

Akzeptor: 1 Elektron fehlt für Kristallbindung
extra Loch kann leicht aufgefüllt werden

p-Halbleiter: positive Überschussladung

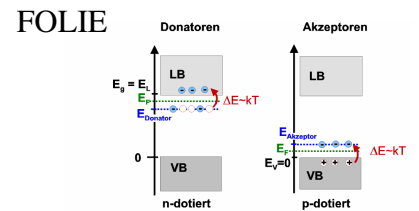
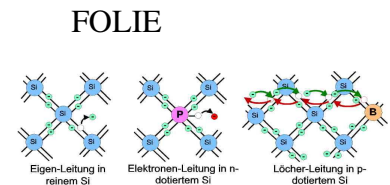
Leitung: Löcher = Majoritätsträger, Minoritätsträger: Elektronen

Bindung: 3-wertiges Akzeptorion hat kleinere Bindungsenergie für extra Elektron im Vergleich zu Si-Ionen

\Rightarrow Akzeptorniveaus liegen oberhalb des VB

Valenzband: Bindungsenergie der Si-Valenzelektronen

Akzeptorzustände: $E_A \sim kT$



FOLIE Periodentafel

4.2.3 Absorption in Festkörpern

Wie kann man Energiezustände in dotierten ermitteln ? \Rightarrow Spektroskopie

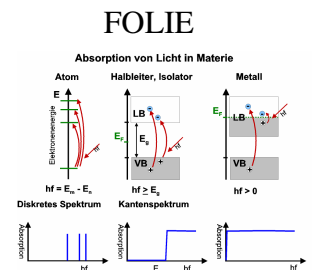
Absorption nur durch Übergang von besetztes in unbesetztes Niveau

Atom: $hf = E_m - E_n$, diskretes Spektrum

Isolator: $hf \geq E_g$, Kantenspektrum

Metall: $hf > 0$, Absorption jeder Frequenz

Dotierter HL: $hf \geq (E_g - E_{D,A}), \geq E_{A,D}$



Exp UV-Anregung von Leuchtstoffen ZnS:Cu, ZnS:Ag, YSO₂:Eu

4.3 Halbleiterbauelemente

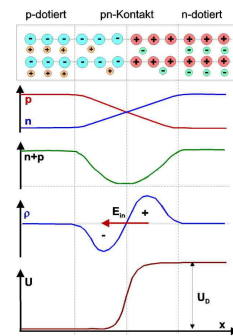
Die wichtigsten elektronischen Bauelemente bestehen aus dotierten Halbleitern

4.3.1 p-n-Kontakt

Bilde Kontakt aus p- & n-Halbleiter und betrachte Kontaktfläche

FOLIE schrittweise

- Diffusion: Elektronen strömen aus n- in p-Bereich I_{Diff} und rekombinieren mit Löchern im p-Bereich
- Ursache: Ladungsträgergradient an n-p-Grenze
- Folge: Verarmungsschicht, keine freien Ladungsträger
Raumladungszonen, lokaler Grenzbereich ist nicht neutral
ortsfeste Ladungsträger: p: neg, da e^- am Akzeptor gebunden
n: pos, da e^- dem Donator fehlt
- Folge inneres Gegenfeld E_{in} bremst Diffusionsstrom durch Feldstrom I_{Feld}
Kontaktspannung U_D

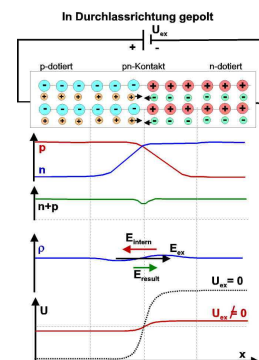


Durchlassrichtung

Externe Spannungsquelle U_{ex} so anschließen, dass

- Polung: p-Bereich: plus-Pol
n-Bereich: minus-Pol
- Folge: E_{ex} kompensiert E_{in} => innere Barriere verschwindet
Raumladungszone wird verkleinert, mehr freie Ladungen
Majoritätsträger-Strom fließt

FOLIE



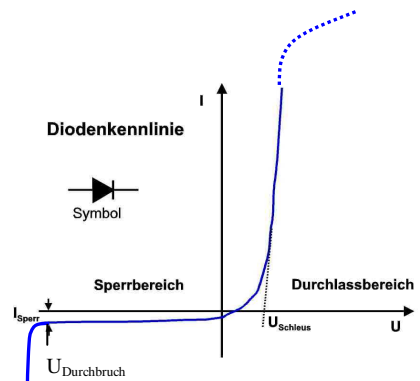
Sperrichtung

- Polung: n-Bereich: plus-Pol
p-Bereich: minus-Pol
- Folge: E_{ex} verstärkt E_{in} => innere Barriere wächst,
Raumladungszone wächst, Zahl freier Ladungen sinkt => Widerstand wächst,
- Sperrstrom I_S : nur Minoritätsträger-Strom fließt, also e^- auf p-Seite, Löcher auf n-Seite
Antrieb durch $(E_{ex} + E_{in})$

Gleichrichter

Gesamte Stromdichte als Funktion der externen Spannung

$$j = j_s \left(e^{\frac{eU_{ex}}{kT}} - 1 \right), \quad j_s: \text{Sperrstromdichte}$$



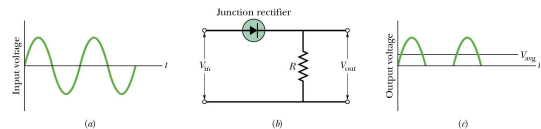
Fälle: $U_{ex} > 0 \Rightarrow$ exponentieller Anstieg ($I = 0,1 - 20 \text{ A}$)

$U_{ex} \geq U_D$ linearer Anstieg, alle freien Ladungsträger nehmen am Strom teil

$U_{ex} < 0$ $e^{\frac{eU_{ex}}{kT}} \sim 0, (I \sim \mu A)$

$U_{ex} < U_{Durchbruch}$ Tunnelstrom setzt ein, da Bandverbiegung am p-n-Kontakt so stark, dass p-Valenzband höher liegt als n-Leitungsband
($U_{Durchbruch} \text{ 50 V} - 2000 \text{ V}$)

- Exp.** A) Diodenkennlinie,
- B) Sinusspannung auf Gleichrichterdiode



4.3.2 LED, Laser

Light Emitting Diodes haben fast überall konventionelle Glühlampen ersetzt. Basis für viele Sender z.B. Fernbedienung Fernseher (infrarot)

Prinzip Lichtemission durch Elektronenübergang LB => VB

$$E_g \approx hf$$

Material: GaAs, ZnSe, GaN, ... emittiert Licht

Ge, Si, ... wandeln Energie nur in Wärme um

Nötig: viele Elektron-Loch-Paare, die rekombinieren können

- Lösung: p-n-Kontakt, - Halbleiter allein hat zu wenig Ladungsträger,
- einfach dotierter HL hat nur eine Sorte (Löcher oder Elektr.)
- meist GaAs, dotiert mit Al oder In

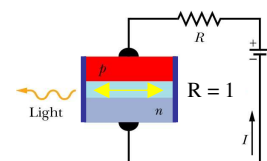
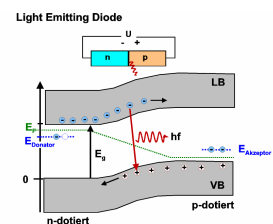
Schaltung: Durchlassrichtung

HL-Laser: Besetzungsinversion durch p-n-Kontakt gegeben

Resonator: Stirnflächen plan und verspiegelt $R=1 / 0,95$

Probleme: meist strahlungslose Rekombinationen an Defekten u. Störstellen

FOLIE



Exp. Diode, Festkörper-Laser, siehe auch Praktikum

4.3.3 Photodiode & Solarzelle

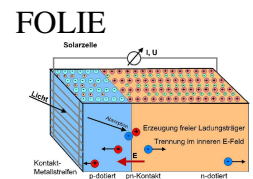
Prinzip: a) Lichtabsorption erzeugt freie Ladungsträger, wenn

$$hf > E_g$$

b) inneres Feld E_{in} trennt die Ladungsträger am p-n-Kontakt

wichtig: Lichtabsorption nahe der p-n-Grenze, da nur hier E_{in} wirkt

=> Elektronen laufen in n-Bereich, Löcher laufen in p-Bereich



Kurzschlußstrom: $I_K(U=0) \sim P_{Op}$ (Lichtleistung)

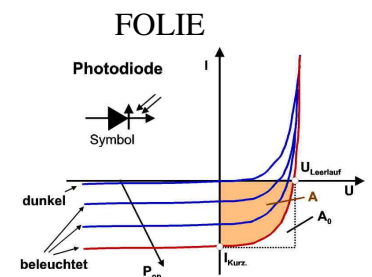
Leerlaufspannung: $U_L(I=0) \sim \ln(P_{Op})$

Füllfaktor:
$$FF = \frac{A}{A_0} = \frac{\int I dU}{U_L I_K}$$

Arbeitsbereich: 4. Quadrant, wähle Arbeitswiderstand so, dass $P_{max} = U_A \cdot I_A$

Typische Werte: $E_g \approx 1 - 2eV$, $U_L = 0,5 - 1V$, Deckschichtdicke $\sim \mu m$

Spannung steigern: parallel schalten



Exp. Solarzelle treibt Motor an

5. Magnetismus der Materie (sofern noch Zeit vorhanden)

H Magnetfeld

$$\underline{\underline{\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}}}$$

Magnetische Flussdichte

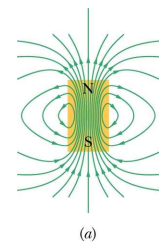
$\mu = (1 + \kappa)$ Permeabilitätskonstante (ohne Einheit), Vakuum $\mu = 1$

$\kappa \neq 0$ Suszeptibilität (ohne Einheit), Stärke des B-Feldes in der Materie

$$\underline{\underline{\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})}}$$

$\mu_0 H$: externes Magnetfeld (magn. Flussdichte)

$\mu_0 M$: Magnetfeld (Flussdichte) der Materie



Magnete existieren nur als Dipole, nie als Monopole – warum? Halbiert man einen Magneten, so gibt es 2 neue Magnete. Wie weit kann man den Magneten herunter brechen? Gibt es einen kleinsten Elementarmagneten?

5.1 Magnetismus des Elektrons

Was ist die kleinste magn. Einheit? Magnetfelder werden durch bewegte Ladung erzeugt, also sehen wir uns die kleinste Ladungseinheit, das Elektron an.

5.1.1 Bahnmoment

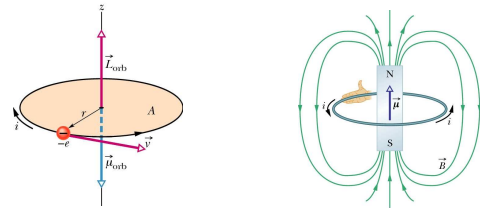
Planetenmodell der Atome: Elektron kreist um Atomkern, entspricht Ringstrom I um Kern

=> magn. Bahn-Dipolmoment durch Ringstrom

=> $\mu_{\text{Bahn}} = IA$

mit $I = \frac{\text{Ladung}}{\text{Zeit}} = \frac{e}{2\pi r/v}$

=> $\mu_{\text{Bahn}} = \frac{e}{2\pi r/v} \pi r^2 = \frac{1}{2} evr$



kreisendes Elektron hat einen mechanischen Bahndrehimpuls

$\vec{L} = m(\vec{r} \times \vec{v}) \quad L = m r v \quad \text{da } r \text{ senkrecht } v$

=> $\underline{\underline{\vec{\mu}_{\text{Bahn}} = -\frac{e}{2m} \vec{L}}}$ minus, da $\mu_{\text{Bahn}} =$ und L antiparallel (-e)

also: kreisendes Elektron erzeugt magnetisches Moment

kreisendes Elektron ist nicht weiter teilbar (Elementarmagnet)

Quantenmechanik: Bahndrehimpuls kann nur bestimmte Werte annehmen (Physik III)

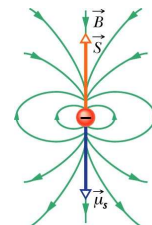
Planetenmodell dient nur der Motivation, es ist sehr begrenzt!

$\underline{\underline{\vec{\mu}_{\text{Bohr}} = \frac{eh}{2m 2\pi} = 9,27 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T}}}$ Bohrsches Magneton

5.1.2 Spinmoment

gibt es Magnetismus, auch wenn die Elektronen nicht auf Kreisbahnen fliegen? Ja!

Elektronen-Eigenschaften:	Masse	$m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
	Ladung	$e = -1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
	Spin	$S, m_S = \pm 1/2$



Spin engl. Schnell drehen, Drall, denkbar als Eigenrotation des Elektrons

(Rotation der Erde 1x pro Tag um sich selbst). Aber: Elektron hat kein Volumen, u.

ein Punkt kann sich nicht um sich selbst drehen

$\underline{\underline{\vec{\mu}_{\text{Spin}} = -\frac{e}{m} \vec{S}}}$

nur die Komponente des Spins parallel zum B-Feld in z-Richtung ist messbar

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi} \quad m_s = \pm \frac{1}{2} \quad \text{eigentlich: } \mu_{Spin} = -2\mu_{Bohr} \frac{S}{h2\pi} \text{ aber } 2 \times \frac{1}{2} = 1$$

$$\underline{\underline{\mu_{Spin-z} = \pm \frac{eh}{4\pi m} = 9,27 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T}}} \quad \text{Bohrsches Magneton, (Elementarmagnet)}$$

$$\underline{\underline{\mu_{neutron} = 5,05 \cdot 10^{-27} \frac{J}{T}}} \quad \text{magn. Moment des Neutrons}$$

Magnetische Energie des Elektrons

Atom orientiert / bewegt sich im externen Magnetfeld, so dass die Energie der Elektronen in der Hülle minimal wird:

$$\underline{\underline{E_{Mag} = -(\vec{\mu}_{Bahn} + \vec{\mu}_{Spin}) \cdot \vec{B}}} \quad (\text{siehe Physik I magn. Dipol})$$

=> erklärt später das Verhalten von Para- & Ferromagneten im externen B-Feld

5.2 Diamagnetismus

Tritt in allen Substanzen auf, ist aber so schwach, dass es meist von den anderen Formen des Magnetismus überdeckt wird.

„Eine diamagnetische Probe erhält erst in einem äußeren Magnetfeld B_{ex} ein magnetisches Moment, das B_{ex} entgegengesetzt ist. Die Probe wird aus B_{ex} hinausgedrängt.“

- Exp.** 1) Wismutkugel wird aus B-Feld gedrängt
2) Supraleiter ist ein idealer Diamagnet, Meißner-Ochsenfeld Effekt

Atomstruktur: Magn. Momente *aller Elektronen eines Atoms* kompensieren sich:

$$\vec{\mu}_{Spin} + \vec{\mu}_{Bahn} = \mu = 0 \quad \Rightarrow \text{Material ist nicht magnetisch}$$

Prozess: Material wird in externes Feld B_{ext} hinein gebracht

$$\Rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} \neq 0 \quad \Rightarrow \text{Strom wird induziert, wirkt nach Lenzscher Regel der Ursache}$$

entgegen, d.h. $\vec{B}_{ind} = -\vec{B}_{ext} \Rightarrow$ Abstoßung des Materials

Material baut eigenes, entgegen B_{ex} gerichtetes Magnetfeld M auf

$$M = \kappa H$$

Diamagnete: $\kappa < 0$, -14×10^{-6} (Wismuth), $\kappa = -0,72 \times 10^{-6}$ H_2O (sehr schwach)

Supraleiter: idealer Diamagnet, da vollständiges Verdrängen von B_{ex} aus dem Supraleiter
=> Supraleiter schwebt im externen B-Feld

5.3 Paramagnetismus

Exp. 1) Aluminium wird in B-Feld hineingezogen

Atomstruktur: Spin- & Bahnmomente *aller Elektronen eines Atoms* bilden $\underline{\underline{\bar{\mu} \neq 0}}$

Festkörper: Wärmebewegung ergibt statistische Verteilung aller Atom-Momente
=> Festkörper ist nicht magnetisiert

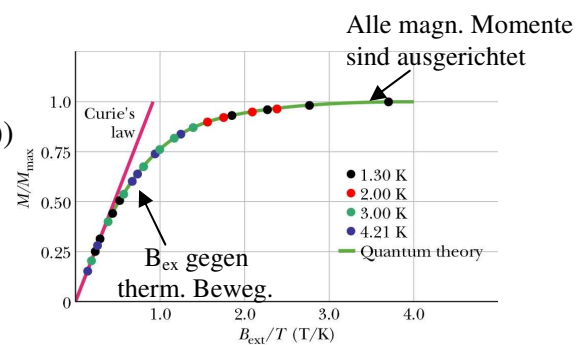
Prozess in B_{ex} : Ausrichtung aller magn. Momente der Atome
=> Paramagnet wird in B_{ext} -Feld gezogen

FOLIE

=> Paramagnete: $\kappa > 0$ ($\kappa = +19 \times 10^{-6}$ Platin)

=>
$$\underline{\underline{M = \frac{C}{T} H}}$$
 (Curiegesetz, Piere Curie 1895))

Wärmebewegung u. H-Feld sind gegenläufig



5.4 Ferromagnetismus

Exp. 1) Fe wird in B-Feld hineingezogen

Atomstruktur: Spin- & Bahnmomente *aller Elektronen eines Atoms* bilden $\underline{\underline{\bar{\mu} \neq 0}}$

Festkörper: Quantenmechan. Wechselwirkung richtet die atomaren Momente aus
=> permanenter Magnet

Prozess in B_{ext} : Ausrichtung aller atomaren magn. Momente
=> wird in B_{ext} -Feld gezogen

Temp.abh. wenn $T > T_C$ (Curietemp.) => Wärmebewegung stärker als quantenmechan.
Ausrichtung der atomaren Momente => Verhalten wie Paramagnet

$$\underline{\underline{M = \frac{C}{T - T_C} H}} \quad \text{für } T > T_C$$

Materialien: Fe, Co, Ni, seltene Erden Gd, Dy, Er, Häusler-Verbindungen
 $\kappa \sim 100 - 10000$, $\kappa > 0$, stark abh. von B_{ex} und Vorgeschichte

Weißsche Bezirke

Einzelne Kristallbereiche mit einheitlicher Magnetisierung, aber jeder Bereich hat seine eigene Magnetisierung

=> Summe der Magnetisierung aller Bereiche kann Null sein

FOLIE

Wirkung im externen B-Feld:

- Ausrichtung der magn. Momente der Weißschen Bereiche durch B_{ext}
- Wachstum der Weißschen Bereiche durch Wandverschiebung (Blochwände)

Wachstum kann man beobachten:

- Fehlstellen im Kristall hemmen das Wachsen der Bereiche / Wandverschiebung
- sprunghaftes Ändern der Magnetisierung => Barkhausen-Rauschen

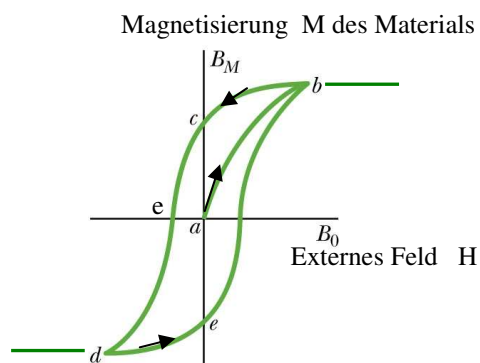
Hysteresiskurve

Neukurve a => b

Sättigung b, d

Remanenz c

Koerzitivfeld e



FOLIE ZEIGEN

Datenspeicher: Remanenz wichtig

Daten Schreiben: Koerzitivfeld klein halten („weiche“ Magnete)

Exp. Hysteresiskurve

Exp. Barkhausen-Rauschen in Spule => $U_{\text{ind}} = -d\Phi_B/dt$ Verstärker / Lautsprecher

5.5 Anwendung von Ferromagneten

1. permanente Magnetisierung (Remanenz) in Datenspeicher, Permanentmagn.
2. Verstärkung durch großes magn. Moment $\kappa \sim 100 - 10000$
3. Magnetische Flussführung im Transformator / Polschuh
4. Induktionsschleifen vor Ampel, Orts- / Längenmessung

Zu 2. Eisenkern mit eigener Magnetisierung M verstärkt B-Feld

$$\Rightarrow \vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \Rightarrow \text{Fluss } \Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Exp. 2 Spulen: a) ohne, b) mit Eisenkern ziehen an Faden hängendes Eisenstück verschieden stark an

Zu 4. $U_i = -\frac{dN\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$ Induktion

$\Rightarrow \underline{\underline{L = \mu \mu_0 n^2 l A}}$ Induktivität der Spule mit Eisenkern

Exp. Induktionsschleife vor Ampel, Eisenteile des Autos ändern Fluss durch die Schleife