

Vorlesungsmitschrieb zu

Experimentalphysik B

für Etec, Geo, Chem, Bio, Wiwi, LA



Dozent:
Prof. Dr. Thomas Schimmel

Inhalt

Hinweise zur Nutzung.....	8
III. Thermodynamik „Wärmelehre“	10
17. Wärmeenergie und Temperatur.....	10
1) Temperatur und der Nullte Hauptsatz.....	10
2) Temperaturskala und der absolute Temperatur-Nullpunkt	10
3) Wärmeausdehnung	12
4) Technische Verfahren der Temperaturmessung	13
5) Wärmeenergie und spezifische Wärme	14
6) Phasenumwandlungen und latente Wärme.....	15
7) Phasendiagramme	17
8) Die Dichte Anomalie des Wassers	18
18. Ideale und reale Gase	18
1) Die Stoffmenge und das Gesetz von Avogadro	18
2) Die Zustandsgleichung für ideale Gase.....	20
3) Mikroskopische Definition des idealen Gases	21
4) Kinetische Gastheorie	22
5) Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung.....	25
6) Partialdruck, Dampfdruck und Luftfeuchtigkeit	27
7) Reale Gase und die van der Waalsche Zustandsgleichung.....	28
8) Joule-Thompson-Effekt und Gasverflüssigung nach Linde	29
19. Zustandsänderungen und Kreisprozesse idealer Gase	30
1) Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	30
2) Die spezifische Molwärmen c_p und c_v für ideale Gase.....	31
3) Zustandsänderung idealer Gase	34
4) Der Carnotsche Kreisprozess	38
5) Energiebilanz und Wirkungsgrad der Carnot-Maschine.....	41
6) Die rückwärts laufende Carnot-Maschine	43
7) Stirling-Prozess und Heißluftmotor	45
8) Technische Kältschränke und Wärmepumpen	46

9)	Transport von Wärmeenergie	46
20.	Entropie und der 2. Und 3. Hauptsatz	47
1)	Formulierungen des 2. Hauptsatzes	47
2)	Reversible und irreversible Prozesse	48
3)	Reduzierte Wärme und Entropie	48
4)	Nullpunkt der Entropie und 3. Hauptsatz	50
5)	Entropie und Wahrscheinlichkeit	51
IV.	Elektrizität und Magnetismus	52
1.	Elektrostatik von Punktladungen	53
1)	Die elektrische Ladung	53
2)	Kräfte auf Punktladungen: Coulombsches Gesetz	54
3)	Feldstärke, Potential und Spannung	54
4)	Feldlinien und Äquipotenziallinien	56
5)	Systeme von Punktladungen	56
6)	Messung von Ladungen über Kräfte	58
7)	Freie Ladungsträger im elektrischen Feld	59
2.	Kontinuierliche Ladungsverteilung	60
1)	Ladungsverteilungen und Ladungsdichte	60
2)	Der elektrische Fluss und der Satz von Gauß	61
3)	Anwendungen des Gaußschen Satzes	62
4)	Leiter im elektrischen Feld	63
5)	Influenz	64
6)	Abschirmung elektrostatischer Felder: Faraday-Käfig	65
7)	Das Außenfeld einer leitenden Kugeloberfläche	67
8)	Felder Kugelsymmetrischer Ladungsverteilungen	68
3.	Kondensatoren und Dielektrika	68
1)	Ladungsverschiebung im Plattenkondensator	68
2)	Der Plattenkondensator	70
3)	Kugelkondensator und Zylinderkondensator	71
4)	Parallel- und Serienschaltung von Kondensatoren	72
5)	Gespeicherte Energie und Energiedichte im elektrischen Feld	73
6)	Dielektrika im elektrischen Feld	75

7)	Der Zusammenhang zwischen $\epsilon_0 \mathbf{E}$, \mathbf{D} und \mathbf{P}	77
4.	Stationäre Ströme	78
1)	Elektrischer Strom und Ohmsches Gesetz	78
2)	Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand	79
3)	Parallel- und Serienschaltung von Widerständen	80
4)	Widerstandsnetzwerke: Kirchhoffsche Gesetze	80
5)	Elektrische Arbeit und Leistung	81
6)	Spannungsquellen	82
7)	Messung von Strömen und Spannungen	84
8)	Potentiometer und Wheatstonesche-Brücke	85
9)	Mikroskopische Modelle des Ladungstransportes	86
5.	Stationäre Magnetfelder	88
1)	Phänomene des Magnetismus	88
2)	Eigenschaften magnetischer Felder	89
3)	Das Magnetfeld stromdurchflossener Leiter	90
4)	Das Gesetz von Biot-Savart	91
5)	Anwendung: Helmholtz-Spulenpaare	92
6)	Kräfte auf bewegte freie Ladungen	93
7)	Kräfte auf Ladungen im stromdurchflossenen Leiter	95
8)	Materie in Magnetfeld: \mathbf{H} , \mathbf{M} und \mathbf{B}	98
9)	Diamagnetismus, Paramagnetismus, Ferromagnetismus	99
6.	Elektromagnetische Induktion	100
1)	Induktionsgesetz und magnetischer Fluss	100
2)	Erzeugung von Induktionsspannungen	101
3)	Selbstinduktion und Induktivität	103
4)	Energie und Energiedichte des Magnetfeldes	104
5)	Transformator	105
7.	Maxwell-Gleichungen und elektromagnetische Wellen	106
1)	Der Maxwellsche Verschiebungsstrom	106
2)	Die Maxwell-Gleichungen	108
3)	Elektromagnetische Wellen	109
4)	Energiedichte, Intensität und Poynting-Vektor	110

5)	Erzeugung elektromagnetischer Wellen: der Hertzsche Dipol u.a	112
8.	Geometrische Optik	113
1)	Einteilung der Optik	113
2)	Reflexionsgesetz und ebener Spiegel	114
3)	Brechungsgesetz und Fermatsches Prinzip	114
4)	Totalreflektion	116
5)	Dispersion	116
6)	Hohlspiegel (=Konkav-Spiegel)	117
7)	Bildentstehung bei gewölbten Spiegeln	118
8)	Abbildung mit Linsen	119
9)	Die Brennweite von Linsen	120
10)	Das Abbildungsgesetz	121
11)	Abbildungsfehler	121
12)	Optische Instrumente	122
9.	Wellenoptik	124
1)	Kohärenz und Interferenz	124
2)	Erforderlich für Kohärenz	124
3)	Interferenz an dünnen Schichten	124
4)	Interferenz am Luftkeil	126
5)	Perot-Fabry-Interferometer und Laser	127
6)	Doppelspalt und Gitter	128
7)	Beugung am Spalt	129
10.	Erzeugung von polarisiertem Licht	130
1)	Polarisation durch Reflexion; Brewster-Winkel	130
2)	Polarisation durch Doppelbrechung	131
3)	Polarisation durch Dichroismus	132
11.	Relativistische Mechanik	132
1)	Der Versuch von Michelson und Morley	132
2)	Einsteins Postulate	132
3)	Die Zeitdilatation	133
4)	Weitere Konsequenzen	134
5)	Masse und Energie	134

12.	Welle-Teilchen-Dualismus	135
1)	Quantenoptik: Licht als Teilchen	135
2)	Der Photoeffekt	136
3)	Der Compton-Effekt.....	136
4)	Paarbildung und Zerstrahlung	136
5)	Welle-Teilchen Dualismus.....	137
6)	Materiewellen.....	137
7)	Beugung am Spalt: Der Abschied vom Determinismus	138
13.	Aufbau der Atome	139
1)	Atomkern und Elektronenhülle	139
2)	Das Bohrsche Atommodell	140
3)	Radien und Energien im Bohrschen Modell	140
4)	Die Bohrschen Postulate.....	141
5)	Das Spektrum des H-Atoms	142
14.	Kerne und Elementarteilchen	142
1)	Die starke Wechselwirkung	142
2)	Das Tröpfchenmodell des Atomkerns	143
3)	Bindungsenergie und Massendefekt	143
4)	Radioaktivität.....	143
5)	Der radioaktive Zerfall	144
V.	Formelsammlung	147
VI.	Übungen zur Experimentalphysik B.....	148
1)	Übungsblatt: Wärmelehre	148
2)	Übungsblatt: spezifische Wärme, ideale Gasgleichung.....	149
3)	Übungsblatt: Kinetische Gastheorie, Dampfdruck, spezifische Molwärme	150
4)	Übungsblatt: Thermodynamische Zustandsänderungen, Kreisprozesse	152
5)	Übungsblatt: Elektrostatische Felder, Potentiale und elektrische Spannung	154
6)	Übungsblatt: Elektrostatische Felder, Potentiale und elektrische Spannung	156
7)	Übungsblatt: Kondensatoren.....	157
8)	Übungsblatt: Kondensatoren und Dielektrika	158
9)	Übungsblatt: Stationäre Ströme	159
10)	Übungsblatt: Magnetostatik.....	161

11)	Übungsblatt: Induktion und Tansformatoren.....	163
12)	Übungsblatt: Geometrische Optik.....	165
13)	Übungsblatt: Wellenoptik.....	167
14)	Übungsblatt: Moderne Physik.....	169
VII.	Lösungshinweise.....	171
VIII.	Verzeichnis.....	171
1)	Griechisches Alphabet.....	171
2)	Zehnerpotenzen.....	171
3)	Basiseinheiten.....	172
4)	Physikalische Konstanten.....	173
5)	Größen und Einheiten: Mechanik.....	174
6)	Größen und Einheiten: Akustik.....	176
7)	Größen und Einheiten: Thermodynamik.....	177
8)	Größen und Einheiten: Optik.....	180
9)	Größen und Einheiten: Elektrik.....	181
10)	Größen und Einheiten: Spezielle Relativitätstheorie.....	183
11)	Größen und Einheiten: Atom- und Kernphysik.....	184
12)	Periodensystem und chemische Zusammensetzungen.....	185
15.	Index.....	187
16.	Literaturempfehlungen.....	190
17.	Lizenz.....	191

HINWEISE ZUR NUTZUNG

Dieser Vorlesungsmitschrieb ist sehr nahe an die eigentliche Vorlesung von Prof. Schimmel angelehnt. **Der Mitschrieb soll der Vervollständigung bzw. der Korrektur des eigenen handschriftlichen Mitschrieb dienen und nicht als eigenes verwendet werden.**

Nachfolgend Erläuterungen zur Formatierung:

I. KAPITELÜBERSCHRIFT

1. Kapitelunterteilung

1) Unterkapitel

Wichtige Sätze sind durch einen doppelten schwarzen Strich auf der linken Seite markiert

Sehr wichtige Sätze sind durch einen doppelten roten Strich auf der linken Seite markiert

Wichtige Formeln/Sätze sind Schwarz umrahmt

Sehr Wichtige Formeln/Sätze sind rot umrahmt und hellrot hinterlegt

Formeln, Zeichen, etc. sind in einer anderen Schriftart formatiert um sie vom Rest des Textes abzuheben

Graue Boxen sind nicht (Klausur)relevant, können aber durchaus interessante und/oder wichtige Zusatzinformationen darstellen.

Der Vollständigkeit halber wurden auch alle Übungsaufgaben in den Mitschrieb integriert. Sie sind nach den Kapiteln geordnet und enthalten größtenteils die Lösung.

Lösungshinweise und -wege zu den integrierten Übungsaufgaben wurden separat erarbeitet und sind auf www.froos.de/exphysik zu finden.

Das Kapitel „VIII – Verzeichnisse“ enthält viele praktische Tabellen zu Größen und Einheiten, zum Griechischen Alphabet, Zehnerpotenzen und dem Periodensystem. Sie sind zum Nachschlagen und/oder Aufgaben bearbeiten sehr hilfreich und wurden deshalb jeweils auf eine extra Seite gesetzt damit sie auch separat verwendet werden können.

Es besteht keinerlei Gewährleistung für den Mitschrieb. Der Mitschrieb wird so zur Verfügung gestellt, „wie er ist“, ohne irgendeine Gewährleistung, weder ausdrücklich noch implizit, einschließlich – aber nicht begrenzt auf – die implizite Gewährleistung der Vollständigkeit oder der Verwendbarkeit für einen bestimmten Zweck. Das volle Risiko bezüglich Qualität und Leistungsfähigkeit des Mitschrieb liegt bei Ihnen. Sollte sich der Mitschrieb als fehlerhaft herausstellen, können Sie uns dies auf der [Projekt-Seite](#) mitteilen.

Dieser Mitschrieb wird mittels iWorkspace.org publiziert. Anregungen, Fehler, Hinweise oder andere Anfragen können dort mitgeteilt werden.

URL: <http://www.iworkspace.org/edu/projects/view/id/1.html>

III. THERMODYNAMIK „Wärmelehre“

Auch unter „Statistische Mechanik“ zu finden.

17. Wärmeenergie und Temperatur

1) Temperatur und der Nullte Hauptsatz

Wärmeenergie als Energieform:

- Potentielle Energie
 - Kinetische Energie
 - Wärmeenergie
- } mechanische Energieformen

Wärmeenergie nicht
vollständig in andere
Energieformen
umwandelbar

Durch die Reibung werden mechanische Energieformen in
Wärmeenergie umgewandelt

Erhöhung der Temperatur T

Zwei Körper im thermischen Kontakt
tauschen so lange Wärmeenergie aus,
bis ihre Temperaturen gleich sind.



Zwei Körper im thermischen
Gleichgewicht haben die gleiche
Temperatur

Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

2) Temperaturskala und der absolute Temperatur-Nullpunkt

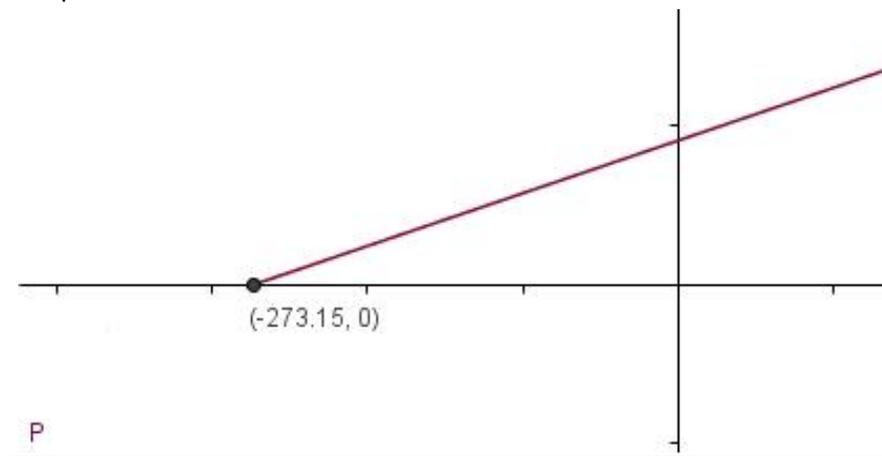
a) Die Celsius Skala

0 °C	Schmelzpunkt von Wasser	} auf Meereshöhe
100 °C	Siedepunkt von Wasser	

Nachteil: Nullpunkt willkürlich gewählt

b) Das merkwürdige Verhalten idealer Gase

Alle idealen Gase zeigen bei $V = \text{konstant}$ einen linearen Anstieg des Druckes mit der Temperatur



Extrapolation für $P \rightarrow 0$ liefert für
alle idealen Gase $T \rightarrow -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$

⇒ Definition der absoluten Temperatur T:

(Kelvin-Skala): $[T] = 1 \text{ K}$ (Kelvin)

Nullpunkt: $0 \text{ K} \hat{=} -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperaturdifferenzen: $1 \text{ K} \hat{=} 1 \text{ }^\circ\text{C}$

c) Das Gasthermometer

3) Wärmeausdehnung

a) Längenausdehnung

Als Funktion der Temperatur ändern Festkörper ihre Länge

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha * \Delta T$$

l Länge

Δl Längenänderung

ΔT Temperaturänderung

α Wärmeausdehnungskoeffizient

$$[\alpha] = \frac{1}{K}$$

Meist: $\alpha > 0$

Gummi und einige andere Kunststoffe: $\alpha < 0$

Anwendung:

- Rollenlager für Brücken
- Aufschumpfen von Metallen
- Öffnen von Marmeladengläsern
- Zerspringen von Trinkgläsern in heißem Wasser

b) Volumenausdehnung

Für Festkörper, Flüssigkeiten, Gase:

$$\frac{\Delta V}{V} = \gamma * \Delta T$$

γ Volumenausdehnungskoeffizient

$$[\gamma] = \frac{1}{K}$$

Meist: $\gamma > 0$

Ausnahme: H₂O (0 °C ... 4 °C), Polymere

γ bei Flüssigkeiten typisch um Faktor 50 größer als bei Festkörpern

Für Festkörper gilt:

$$\gamma = 3\alpha$$

Am Würfel wird dies sofort klar:



$$\frac{\Delta V_x}{V} = \frac{\Delta V_y}{V} = \frac{\Delta V_z}{V} = \alpha_a T \rightarrow \frac{\Delta V_{ges}}{V} = 3 * \alpha * \Delta T \Rightarrow \gamma = 3\alpha$$

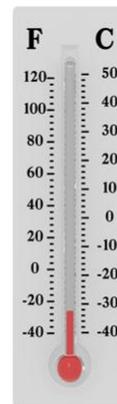
Bemerkung: Flächenausdehnungskoeffizient $\beta = 2\alpha$

$$\frac{\Delta A}{A} = \beta * \Delta T$$

4) Technische Verfahren der Temperaturmessung

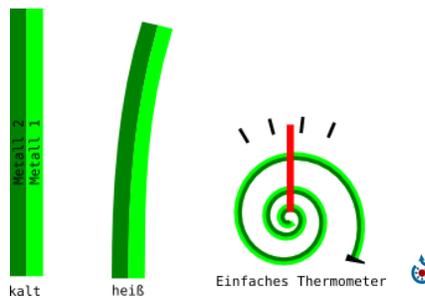
1) Flüssigkeitsthermometer

nutzen die thermische Ausdehnung einer Flüssigkeit (Quecksilber [Hg], Alkohol [C₂H₆O])



2) Bimetallthermometer

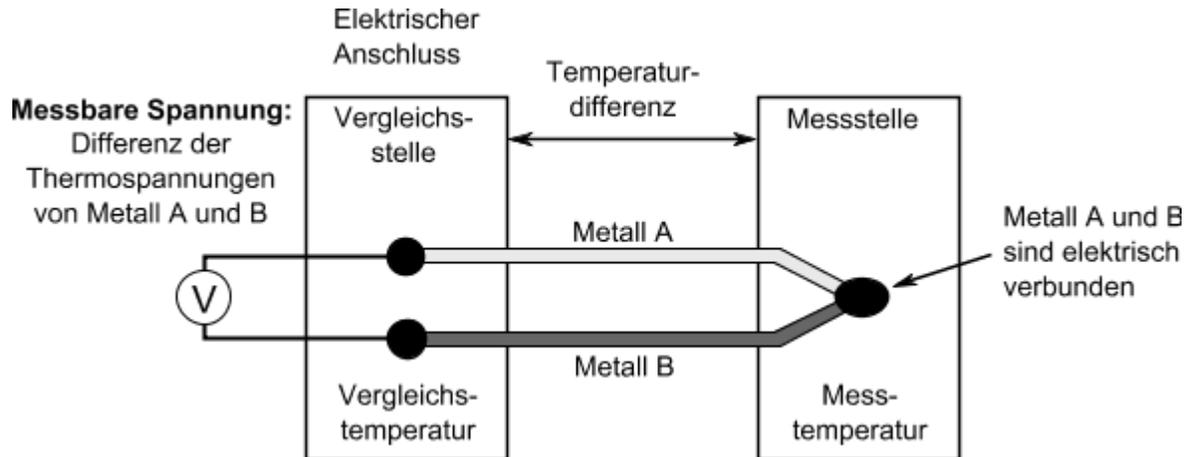
Zwei miteinander fest verbundene Metallstreifen mit unterschiedlichem $\alpha \Rightarrow$ Verbiegung bei Temperaturänderung



3) Widerstandsthermometer

Änderung des elektrischen Widerstandes mit der Temperatur.

Beispiel: Platin-Film des Pt100-Widerstand

4) Thermoelemente5) Strahlungs-pyrometer

Berührungslose Messung hoher Temperaturen:

Messung des Spektrums der emittierten Wärmestrahlung (→ „Rotglut“, „Weiβglut“...)



z.B. Oberflächentemperatur der Sonne $\approx 5700\text{ }^{\circ}\text{C}$

5) Wärmeenergie und spezifische Wärme

Benötigte Wärmeenergie ΔQ , um einen Körper der Masse m um ΔT zu erwärmen

$$\Delta Q = c * m * \Delta T$$

c spezifische Wärmekapazität

$$[c] = 1 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}}$$

Wärmekapazität:

$$C = c * m$$

$$[c * m] = 1 \frac{J}{K}$$

$$[\Delta Q] = 1 J = 1 N * m$$

4,2 J = 1 cal (Kalorie)
 → Energie um 1g H₂O um 1 °C zu erwärmen (von 14,5 °C auf 15,5 °C)
 ⇒ veraltete Einheit

Bemerkungen:

- 1) c hängt vom Material ab
- 2) c ist nur näherungsweise in einem bestimmten Temperaturbereich konstant

6) Phasenumwandlungen und latente Wärme

fest
 flüssig
 gasförmig } Aggregatzustände

a) Umwandlung fest ↔ flüssig

Um einen Festkörper zu schmelzen ist die Zufuhr von thermischer Energie erforderlich (sog. Schmelzwärme)

$$\Delta Q_{\text{Schmelz}} = m * c_{\text{Schmelz}}$$

c_{Schmelz} spezifische Schmelzwärme

$$[c_{\text{Schmelz}}] = 1 \frac{J}{kg}$$

|| Bei Erstarrung wird diese Wärmeenergie wieder frei

b) Umwandlung flüssig ↔ gasförmig

Um eine Flüssigkeit zu verdampfen ist die Zufuhr von thermischer Energie erforderlich (sog. Verdampfungswärme)

$$\Delta Q_{\text{Verdampf}} = m * c_{\text{Verdampf}}$$

c_{Verdampf} spezifische Verdampfungswärme

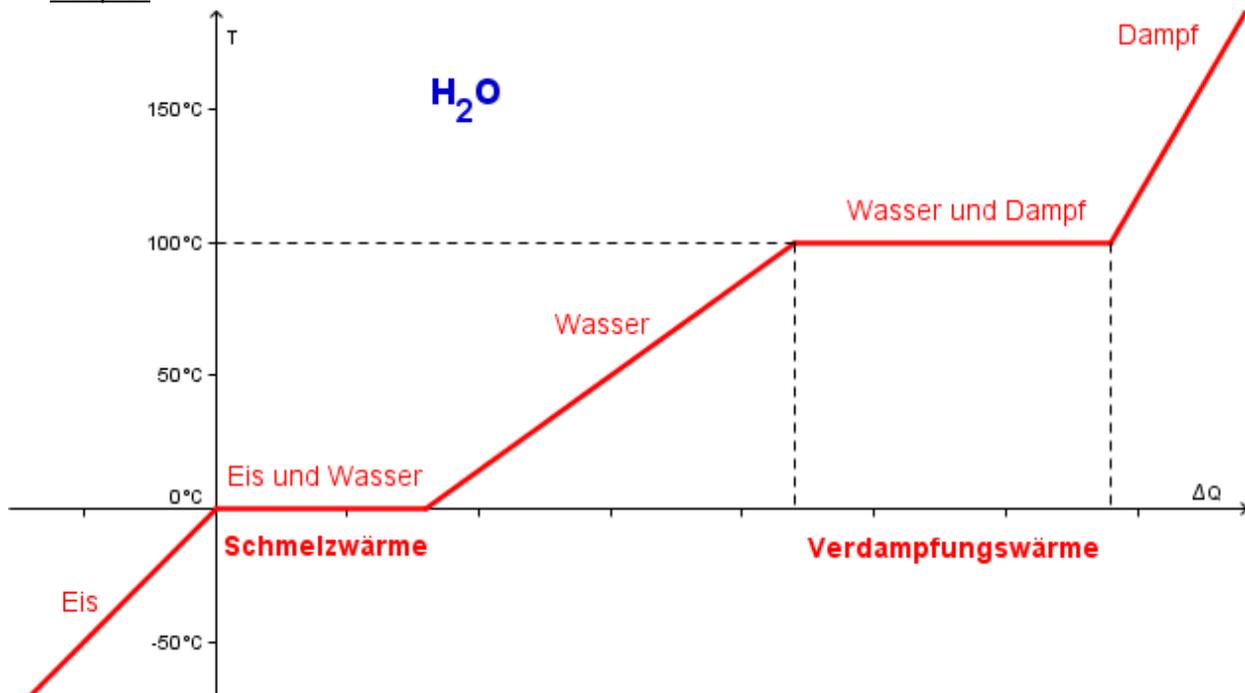
$$[c_{\text{Verdampf}}] = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Bei erneuter Kondensation wird $\Delta Q_{\text{Verdampf}}$ wieder frei (Kondensationswärme)

Beispiele:

- Tau (Kondensationswärme)
- Nebelbildung (Kondensationswärme)
- Schwitzen
- Kühltürme von Kraftwerken

Beispiel:

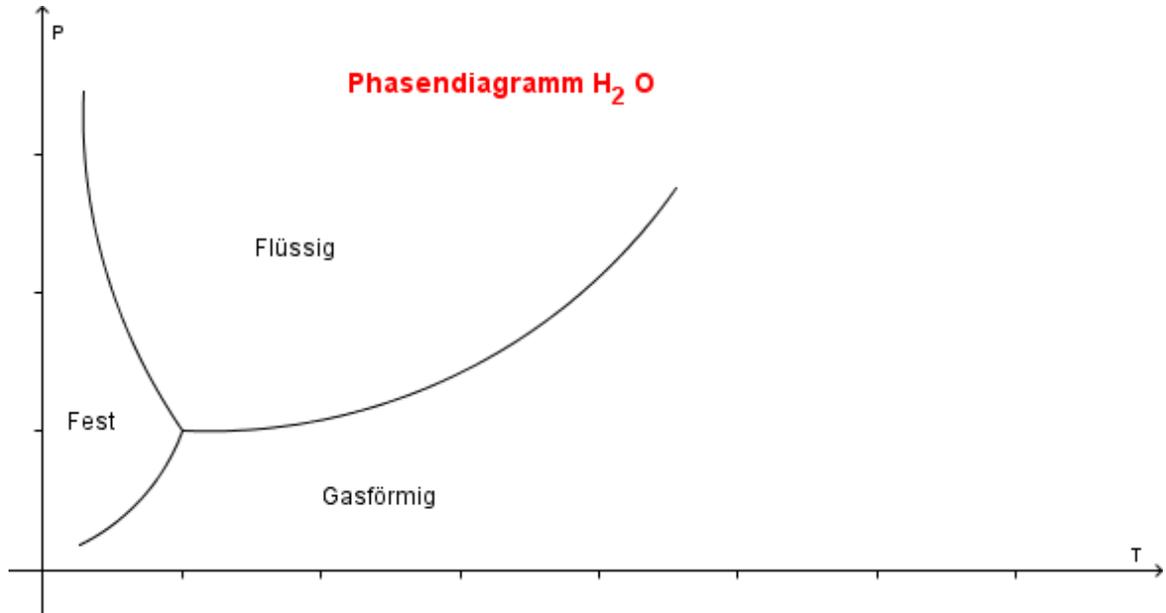


Schmelzwärme und Verdampfungswärme sind sog. Latente Wärmen

7) Phasendiagramme

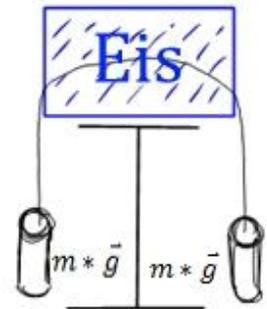
- a) Temperatur der Phasenübergänge ist Druckabhängig

Beispiel: H_2O



⇒ unter Druck wird Eis flüssig

- Schlittschuhlaufen
- Wandern von Gletschern
- Draht durch das Eis (Versuch)



- b) Temperatur der Phasenübergänge hängt von gelösten Stoffen ab

Beispiel: Gefrierpunktniedrigung von Wasser durch Kochsalz auf bis zu $-21\text{ }^\circ\text{C}$,
je nach Konzentration des NaCl.

- c) Ohne Keime Vorzug der Phasenübergänge

- Unterkühlte Flüssigkeiten (reines H_2O bis $-10\text{ }^\circ\text{C}$)
- Überhitzte Flüssigkeiten (zur Vermeidung: Siedesteine als Keime)

8) Die Dichte Anomalie des Wassers

- * Wasser dehnt sich beim Gefrieren aus

→ alte Sprengtechnik
→ Verwitterung von Gesteinen

- * Max. Dichte bei 4 °C

→ kaltes H₂O sinkt ab, warmes
H₂O steigt auf
→ bis auf 4 °C

18. Ideale und reale Gase

1) Die Stoffmenge und das Gesetz von Avogadro

Ein Mol ist die Menge eines Stoffes, die $6,022045 \cdot 10^{23}$ Teilchen enthält

Die Stoffmenge ist also lediglich die Anzahl von Teilchen in Einheiten von Mol ($\triangleq 6,022 \cdot 10^{23}$ Stück)

Trotzdem werden im SI-System die
Stoffmenge n zur Basisgröße
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

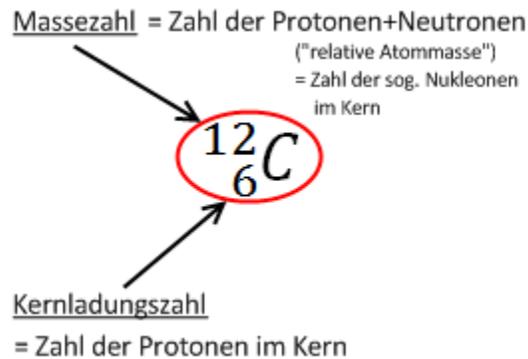
$$[n] = 1 \text{ mol}$$

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{[\text{Teilchen}]}{\text{mol}}$$

heißt Avogadro-Konstante

$6,022 \cdot 10^{23}$: Wieso gerade diese Zahl?

Antwort: 12g des Kohlenstoffisotops $^{12}_6\text{C}$ enthalten gerade $6,022 \cdot 10^{23}$ Atome.



Wie viele Nukleonen sind in 1 Gramm Masse enthalten?

Die Mol-Masse m_{molar} ist die Masse von $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen (=1 Mol) eines Stoffes

⇒

Die Molmasse beträgt (näherungsweise) genau so viel Gramm wie die Massezahl (bei Atomen) bzw. die relative Molekülmasse (bei Molekülen) angibt.

Veranschaulichung von $6,022 \cdot 10^{23}$:
602 200 000 000 000 000 000 000 (!)

Man findet:

*Das Molvolumen V_{molar} (=Volumen von 1 Mol) unter Normalbedingungen (1 atm, 273,15 K) ist für alle idealen Gase gleich und beträgt:
 $V_{\text{molar}} = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 22,414 \text{ l}$*

(Gesetz von Avogadro)

⇒ Gleiche Volumina eines idealen Gases enthalten unter Normalbedingungen die gleiche Teilchenzahl

2) Die Zustandsgleichung für ideale Gase

Experimentell findet man bei idealen Gasen:

1) $p \cdot V = \text{konstant}$ bei $T = \text{konstant}$

$$\Rightarrow p = \frac{1}{V} \quad \text{„Gesetz von Boyle-Mariotte“}$$

2) $p \cdot V \sim T$ „Gesetz von Gay-Lussac“

$$\Rightarrow \frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant}$$

3) $V \sim n$ (Stoffmenge)

$$\frac{p \cdot V}{T} = n \cdot R$$

⇔

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

ideale Gasgleichung

Berechnung von R nach dem Gesetz von Avogadro:

$$P = 1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$T = 273,15 \text{ K}$$

$$n = 1 \text{ mol}$$

$$V_{\text{molar}} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

⇒ universelle Gaskonstante

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Für alle idealen
Gase gleich

Kleine Umrechnung:

Teilchenzahl N:

$$N = n * N_A$$

$$N = n * \frac{6,022 * 10^{23}}{\text{mol}} \Rightarrow n = \frac{N}{N_k}$$

Folglich:

$$p * V = n * R * T = N \frac{R}{N_A} T = N * k * T$$

„Molzahl“/Stoffmenge

Anzahl der Teilchen

$$p * V = N * k * T$$

Mit

$$K := \frac{R}{N_A} = 1,3807 * 10^{-23} \frac{J}{K}$$

sog. „Boltzmann-Konstante“

Ideale Gasgleichung:

$$p * V = n * R * T$$

$$p * V = N * k * T$$

$$k = \frac{R}{N_A}$$

Merksatz

„Was R für 1 mol ist,
das ist k für 1 Teilchen

3) Mikroskopische Definition des idealen Gases

Die Bedingungen:

- 1) Gas besteht aus einer großen Zahl von Teilchen, die untereinander und mit den Wänden nur elastische Stöße machen
- 2) Großer Teilchenabstand
Gefäßvolumen >> Eigenvolumen aller darin enthaltener Teilchen
- 3) Zwischen den Stößen bewegen sich die Teilchen Wechselwirkungsfrei

Beispiel: Molekülvolumen....

XXXXXXXXXXXXXXXXXX

4) Kinetische Gastheorie

a) Die Grundidee

Wie entsteht denn Druck in Gasen?

Stahlkugeln prasseln in dichter Folge auf die rote Stahlwand und werden von ihr elastisch reflektiert

Folge: Wegen $\vec{F} = \dot{\vec{p}} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ (2. Newtonsches Gesetz) üben die Stahlkugeln im Mittel eine Kraft auf die Wand aus.

Näherung großer Teilchenzahl:
Gleichmäßige Kraft auf die Wand

b) Mikroskopische Deutung des Gasdruckes und der Temperatur

Moleküle des idealen Gases prasseln auf die Gefäßwände

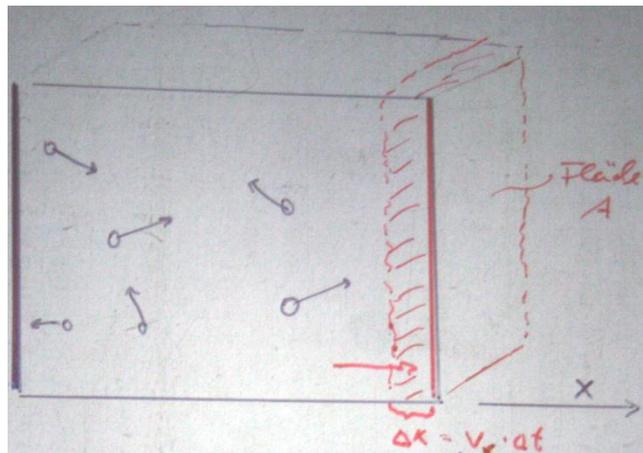
↓
Werden elastisch reflektiert

Übertragen Impuls $2 * m * v_{\perp}$ auf die Wand

$$F = \vec{p} = \frac{\Delta P}{\Delta t} \Leftrightarrow \text{Kraft auf die Wand}$$

→ Kommen mit $+m*v$
senkrecht, gehen mit $-m*v$
senkrecht

$$\Rightarrow \Delta p = 2mv$$



N Zahl der Moleküle in V
V Volumen

$$\frac{N}{V}$$

Anzahldichte, Zahl der Moleküle pro Volumen

Elastischer Stoß mit roter Wand (s.o.)

$v_x \rightarrow v_x$: v_y, v_z bleiben gleich

Anzahl der Moleküle, die auf die rote Wand zufliegen, d.h. $v_x > 0$: $\frac{1N}{2V}$

Annahme: $|v_x|$ für alle Moleküle gleich

Zahl der Moleküle, die in Δt auf die rote Wand treffen:

$$\Delta N_{rot}(\Delta t) = \frac{N}{2V} * \underbrace{A * \Delta x}_{v_x * \Delta t}$$

das Volumen, das innerhalb von Δt die rote Wand erreicht

Impulsübertragung Δp in Δt :

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta N_{rot}(\Delta t) * 2 * m * v_x = \frac{N}{2V} * A * v_x * \Delta t * 2 * m * v_x \\ &= \frac{N}{V} * A * m * v_x^2 * \Delta t \end{aligned}$$

Kraft F:

$$F = \Delta \dot{p} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{N}{V} * A * m * v_x^2$$

Druck p:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{N}{V} * m * v_x^2$$

Mikroskopische Deutung des Druckes (*)

⇒

⇒

vgl.:

⇒

$$p * V = N * m * v_x^2$$

$$p * V = N * k * T$$

$$\frac{1}{2} * k * T = \frac{m}{2} v_x^2$$

* In Wirklichkeit:

$$\frac{1}{2} * k * T = \frac{m}{2} \overline{v_x^2}$$

Mit

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{x_i}^2$$

mittleres
Geschwindigkeitsquadrat

$$* \quad \overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_x^2}$$

$$\Rightarrow \frac{m}{2} \overline{v^2} = \frac{3}{2} * k * T \quad \Rightarrow \quad v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3 * k * T}{m}}$$

rot mean square

$\frac{3}{2} * k * T$ ist also die mittlere kinetische Energie eines Teilchens bei seiner statistischen Wärmebewegung

„mikroskopische Deutung der Temperatur“

Ferner:

$$(*) \Rightarrow p = \frac{N}{V} * m * \overline{v_x^2} = \underbrace{\frac{N * m}{V}}_{\text{Dichte } \rho} * \frac{\overline{v^2}}{3} = \frac{\rho}{3} \overline{v^2}$$

$$P = \frac{\rho}{3} * \overline{v^2} \Leftrightarrow v_{rms} = \sqrt{\frac{3 * P}{\rho}}$$

(Berechnung der quadr. Mittleren Molekülgeschwindigkeit)

c) Gleichverteilungssatz (Äquipartitionstheorem)

Die thermische Energie eines Moleküls verteilt sich im zeitlichen Mittel gleichmäßig auf seine Freiheitsgrade. Jeder Freiheitsgrad hat die mittlere kinetische Energie

$$\overline{E_{kin,i}} = \frac{1}{2} * k * T$$

Mögliche Freiheitsgrade:

- Translation in x-,y- und z-Richtung
- Rotation (z.B. um x, y, z-Achsen)
- Schwingung

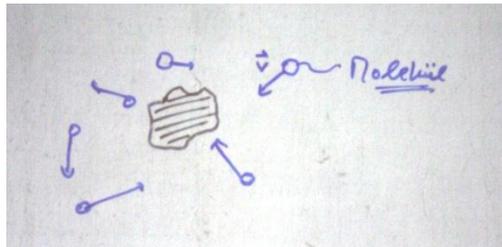
Schwingungsfreiheitsgrade zählen doppelt:

pro Freiheitsgrad $\frac{1}{2} * k * T$ in potentieller Energie
 und $\frac{1}{2} * k * T$ in kinetischer Energie

d) Brownsche Bewegung kleiner Teilchen

Moleküle stoßen an ein kleines Teilchen

→ führt unter dem Lichtmikroskop eine sichtbare Zitterbewegung durch



→ Sichtbarmachung molekularer Wärmebewegung!

5) Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung

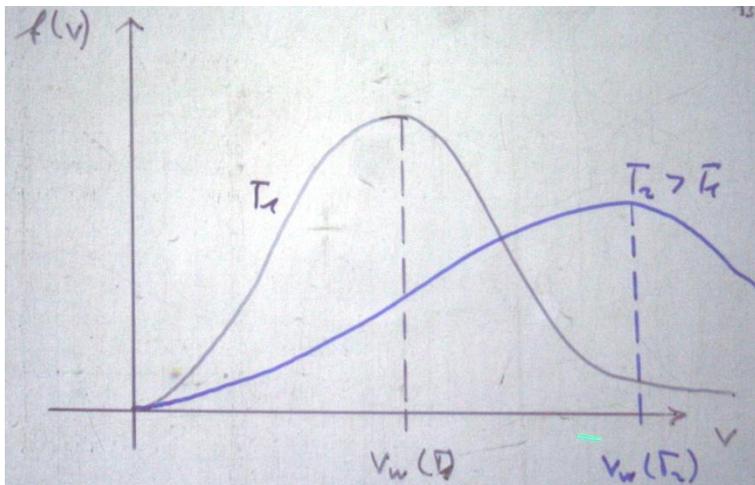
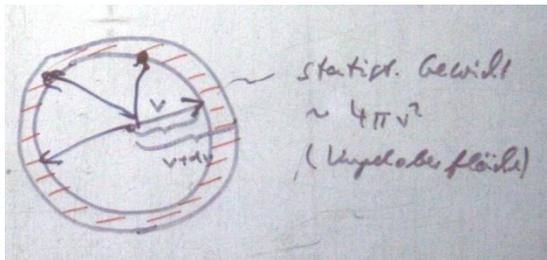
Teilchenzahl	N
Temperatur	T
Molekülmasse	m
Betrag der Molekülgeschwindigkeit	v

Sei $f(v) * dv =$ Zahl der Moleküle mit Geschwindigkeitsbetrag zwischen v und $(v + dv)$.

Man kann zeigen:

$$f(v) = \text{const.} * N * 4 * \pi * v^2 * e^{-\frac{m}{2} \frac{v^2}{k * T}}$$

$\underbrace{\hspace{2cm}}$ $\underbrace{\hspace{2cm}}$
 Statistisches Boltzmann Faktor:
 Gewicht $e^{-\text{Energie}/kT}$

Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung

Fläche unter der Geschwindigkeitsverteilungsfunktion: immer gleich \underline{N} (klar)

Wahrscheinlichste Geschwindigkeit:

$$v_w = \sqrt{\frac{2 * k * T}{m}}$$

Mittlere Geschwindigkeit:

$$\bar{v} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_w = \sqrt{\frac{8 * k * T}{\pi * m}}$$

Vgl.: quadratisch gemittelte Geschwindigkeit:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3 * k * T}{m}}$$

6) Partialdruck, Dampfdruck und Luftfeuchtigkeit

a) Daltonsches Gesetz der Partialdrücke

Betrachte Gasgemisch

z.B. Luft	78% N ₂
	21% O ₂
	1 % Ar, CO ₂ , H ₂ O...

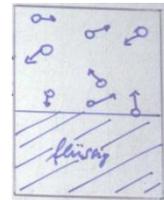
Der Druck, den ein Gasanteil ohne Anwesenheit der übrigen Gase ausüben würde heißt Partialdruck dieses Gases.

Beim idealen Gas ist der Gesamtdruck eines Gases gleich der Summe der Partialdrücke seiner Komponenten

Daltonsches Partialdruckgesetz

b) Dampfdruck

Im Gleichgewicht verlassen pro Zeiteinheit genau so viele Moleküle die Flüssigkeit wie Moleküle in sie eintreten.



Der Partialdruck der flüssigen Komponente der im Gleichgewicht über der Flüssigkeit herrscht, heißt Dampfdruck der Flüssigkeit bei dieser Temperatur

Zahl der Moleküle, die die Flüssigkeit pro Zeiteinheit verlassen, wächst mit T



Dampfdruck steigt mit wachsender Temperatur

c) Siedepunkt

Erreicht der Dampfdruck der Flüssigkeit den äußeren Gesamtdruck



Bildung von Gasblasen in der Flüssigkeit möglich



Sog. $Siedepunkt: \text{Dampfdruck} = \text{Gesamtdruck}$

⇒ Je kleiner der Gesamtdruck, desto niedriger ist der Siedepunkt

Beispiele: Kochen in Hochgebirge, Druckkochtopf für $T > 100\text{ °C}$

d) Relative Luftfeuchtigkeit und Taupunkt

$$\text{relative Luftfeuchtigkeit} = \frac{\text{Partialdruck}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{Dampfdruck}_{\text{H}_2\text{O}}} * 100\%$$

Taupunkt := Temperatur, bei der (bei gegebenem H_2O –Partialdruck) die relative Feuchtigkeit 100% erreicht.

7) Reale Gase und die van der Waalsche Zustandsgleichung

Ideale Gase:

$$p * V = n * R * T$$

Ideale Gasgleichung
(für ideale Gase)

Reale Gase:

$$\left(p + \frac{a * n^2}{V^2}\right) (V - p * n) = n * R * T$$

van der Waalsche
Zustandsgleichung
(für reale Gase)

$$\frac{a * n^2}{V^2}$$

Binnendruck

zusätzlich zum äußeren Druck p der Gefäßwände auf das Gas wirken auf das Gas noch innere anziehende Kräfte

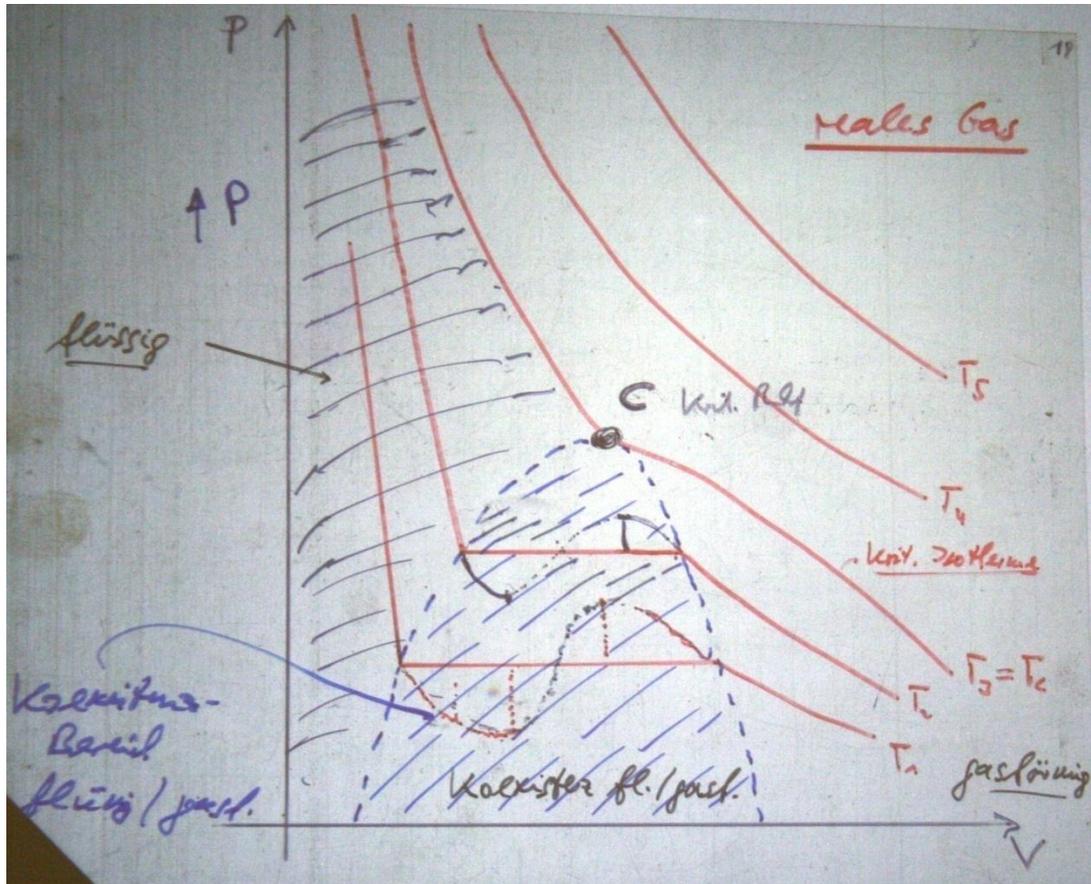
$$p * n$$

van der Waalsches Kovolumen = Eigenvolumen

das für die Gasmoleküle verfügbare Volumen wird durch das Eigenvolumen vermindert.



>> Beachte: p wird erhöht. V wird vermindert beim realen Gas<<



 Isothermen (Kurven konstanter Temperatur) in p-V-Diagramm; $T_1 < \dots < T_6$

 Koexistenz von flüssiger und gasförmiger Phase

• C Kritischer Punkt
 oberhalb von T_c ist keine Verflüssigung mehr möglich (T_c hängt vom Gas ab)

 falsche Beschreibung durch $v \cdot dW$ -Gleichung im  Gebiet

8) Joule-Thompson-Effekt und Gasverflüssigung nach Linde

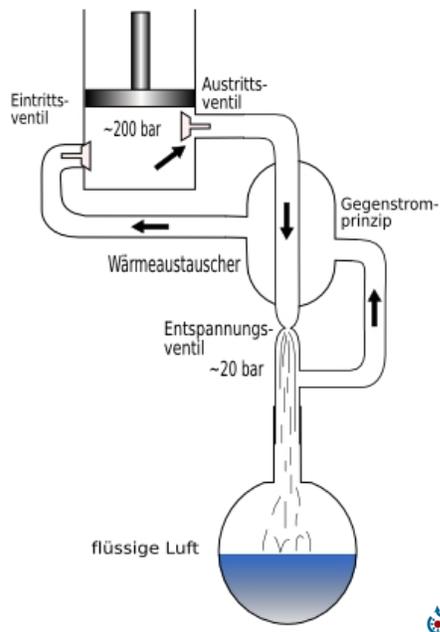
Joule-Thompson-Effekt

Unterhalb einer sog. Inversionstemperatur kühlen Gase beim Expandieren ab, weil sie Arbeit gegen die Zwischenmolekularen Anziehungskräfte verrichten müssen

Die erforderliche Energie wird der Wärmebewegung der Gasmoleküle entzogen



Linde Verfahren zur Luftverflüssigung



Mehrfach wiederholen.

19. Zustandsänderungen und Kreisprozesse idealer Gase

1) Der erste Hauptsatz der Thermodynamik

innere Energie: Die in einem System gespeicherte Energie (insbesondere Wärmeenergie)

Die Summe der in einem System von außen zugeführten Wärmeenergie ΔQ und der zugeführten (z.B. mechanischen) Arbeit ΔW ist gleich der Zunahme ΔU seiner inneren Energie:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

Erster Hauptsatz der Thermodynamik

(entspricht dem Energieerhaltungssatz: Es ist unmöglich Energie aus dem Nichts zu gewinnen)

Andere Formulierung: Ein Perpetuum Mobile erster Art ist unmöglich

Perpetuum Mobile erster Art = Maschine, die den 1. Hauptsatz verletzt, indem sie Energie aus dem nichts gewinnt.

1. Hauptsatz: ein reiner Erfahrungssatz, nichts ist bewiesen.

Speziell für das ideale Gas:

2 Möglichkeiten der Energiezufuhr (Abfuhr)

1) Mechanische Kompression (Expansion)

$$dW = F * dx = p * A * dx = -p * dV$$

Sehr (!) wichtig: Vorzeichenkonvention

$dW > 0$: dem System wird Energie zugeführt, d.h. an dem System wird Arbeit verrichtet (d.h. Kompression $\Leftrightarrow dV < 0$)

$dW < 0$: System verrichtet Arbeit an seiner Umgebung. D.h. Energie am System nimmt ab. (d.h. Expansion $\Leftrightarrow dV > 0$)

2) Zufuhr (Abfuhr)

von Wärmeenergie dQ

$\xrightarrow{1.HS}$

$$dU = dQ + dW = dQ - p * dV$$

1. HS beim idealen Gas

2) Die spezifische Molwärmern c_p und c_v für ideale Gase

- a) Bezieht man die spezifischen Wärmern nicht auf 1 kg (Masse) sondern auf ein 1 mol (Stoffmenge), so spricht man von den spezifischen Molwärmern c_{molar} :

$$\Delta Q = n * c_{molar} * \Delta T$$

n Stoffmenge

$$[c_{molar}] = \frac{1J}{mol * K}$$

Bei Gasen muss man dabei 2 Fälle unterscheiden:

Konstanter Druck oder Konstantes Volumen

↓
 c_p

↓
 c_v

b) Innere Energie U eines idealen Gases aus N einatomigen Teilchen:

$$\begin{aligned} U &= N * \overline{E_{kin}} = N * \frac{3}{2} * k * T \\ &= n * N_A * \frac{3}{2} * k * T \\ &= n * \frac{3}{2} R * T \end{aligned}$$

⇒

$$\Delta U = n * \frac{3}{2} R * \Delta T$$

Oder allgemein für Teilchen mit f Freiheitsgraden:

$$\Delta U = n * \frac{f}{2} R * \Delta T \quad (*)$$

c) Spezifische Wärme bei konstantem Volumen := c_v

1.HS:
$$\Delta U = \Delta Q - \underbrace{p * \Delta V}_{\Delta V=0, \text{ da } V=\text{const.}}$$

$$\begin{aligned} \overset{(*)}{\Rightarrow} \dots \\ \text{vgl. ...} \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} \Delta Q &= n * \frac{f}{2} R * \Delta T \\ \Delta Q &= n * c_v * \Delta T \end{aligned} \right\} \quad c_v = \frac{f}{2} R$$

$$\text{für } f=3: c_v = \frac{3}{2} R$$

d) Spezifische Molwärme bei konstantem Druck c_p

Gas wird erwärmt durch ΔQ

⇓

Gas dehnt sich aus

⇓

Gas verrichtet Arbeit nach außen ($\Delta W < 0$)

⇓

Gas gibt einen Teil des zugeführten ΔQ in Form von mechanischer Arbeit ΔW wieder nach außen ab

⇓

Mehr Wärme ΔQ als in c) erforderlich um ΔT zu erzielen

Volumenänderung ΔV bei $p = \text{const.}$

$$\left. \begin{aligned} p * V &= n * R * T \\ p * (V + \Delta V) &= n * R * (T + \Delta T) \end{aligned} \right\} p * \Delta V = n * R * \Delta T \quad (*)$$

1. HS: $\Delta U = \Delta Q - p * \Delta V$

$$\Leftrightarrow \Delta Q = \Delta U + p * \Delta V$$

$$\xrightarrow{(**)} \Delta Q = n * \frac{f}{2} R * \Delta T + n * R * \Delta T$$

$$\Delta Q = n * \underbrace{\left(\frac{f}{2} + 1\right)}_{c_p} * R * \Delta T$$

\Rightarrow

$$c_p = \left(\frac{f}{2} + 1\right) R = c_v + R$$

$\text{für } f = 3: c_p = \frac{5}{2} R$	$c_v = \frac{3}{2} R$
--	-----------------------

Def.:

$$K := \frac{c_p}{c_v} = \frac{f + 2}{f} = \frac{c_v + R}{c_v}$$

K: sog. Adiabatenkoeffizient/Isentropenexponent



$f=3$

(Translation: x, y, z)



$f=5$

(Translation: x, y, z + 2x Rotation)

3) Zustandsänderung idealer Gase

a) Vorbemerkungen

- Unser „System“ sei eine abgeschlossene Stoffmenge eines idealen Gases
- Der „Zustand“ = Gesamtheit der makroskopischen Eigenschaften des Systems
- Zustandsgrößen: durch den Zustand eindeutig festgelegt

Der Zustand unseres Systems wird durch die Zustandsgrößen p,V,T eindeutig festgelegt

b) Isochore Prozesse (d.h. V=const.)

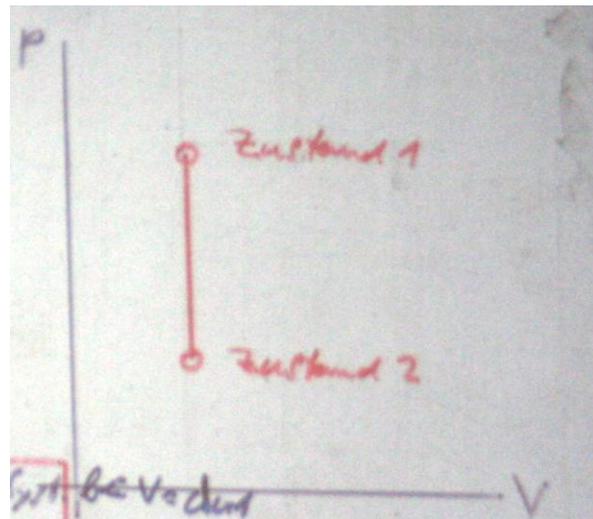
$$V = \text{const.}$$

$$\Rightarrow \Delta V = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta W = 0$$

$$\xrightarrow{1.HS} \quad \Delta Q = \Delta U = n * c_v * \Delta T$$

$$= n \frac{f}{2} R * \Delta T$$

Erwärmen oder Abkühlen des Systems ohne Verrichtung mechanischer Arbeit



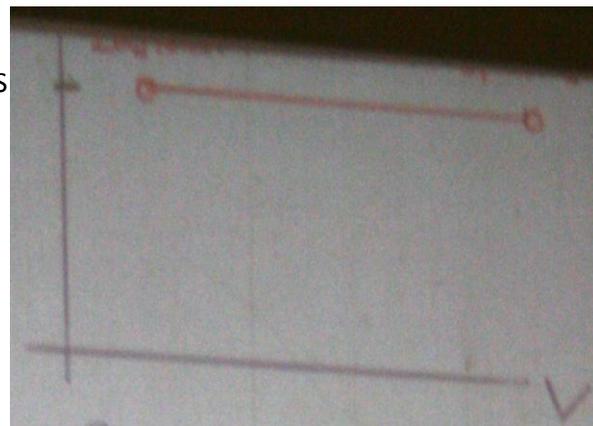
Beispiel für einen isochoren Prozess

c) Isobare Prozesse (d.h. p=const.)

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta U + p * \Delta V \\ &= \underbrace{n \frac{f}{2} R * \Delta T}_{\Delta U} + \underbrace{n * R * \Delta T}_{-\Delta W} \end{aligned}$$

Erwärmen oder Abkühlen unter Verrichtung mechanischer Arbeit aufgrund der Volumenänderung.

1.HS



Beispiel für eine isobare Expansion

d) Isotherme Prozesse (d.h. $T = \text{const.}$)

$$T = \text{const.}$$

$$\Updownarrow$$

$$\Delta U = \text{const.}$$

d.h. keine Änderung der inneren Energie

\Updownarrow 1.HS

$$\Delta Q = -\Delta W$$

1.HS: $\Delta U = \Delta Q + \Delta W = 0$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \leftarrow \text{const.}$$

$$\Rightarrow p \cdot V = \text{const.}$$

$$\Rightarrow p \sim \frac{1}{V}$$

Verrichtete Arbeit: $dW = -p \cdot dV$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

$$dW = -p \cdot dV = -\frac{n \cdot R \cdot T}{V} dV = -n \cdot R \cdot T \cdot \frac{1}{V} \cdot dV$$

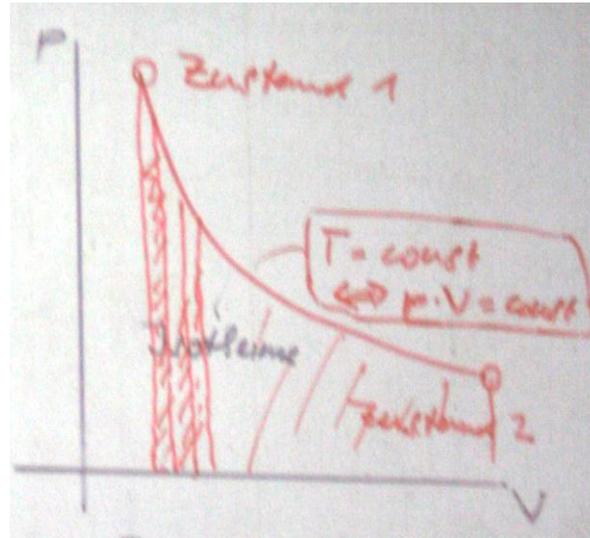
$$\Delta W = \int_{v_1}^{v_2} dW = -n \cdot R \cdot T \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{V} \cdot dV$$

$$= -n \cdot R \cdot T [\ln V]_{v_1}^{v_2}$$

$$= -n \cdot R \cdot T (\ln v_2 - \ln v_1)$$

$$= -n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{v_1}{v_2}$$

$$\Delta W = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{v_1}{v_2} = -\Delta Q$$



Beispiel für eine isotherme Expansion

e) Adiabatische Prozesse ($\Delta Q = 0$)

*Kompression oder Expansion
ohne Wärmeaustausch mit der
Umgebung*

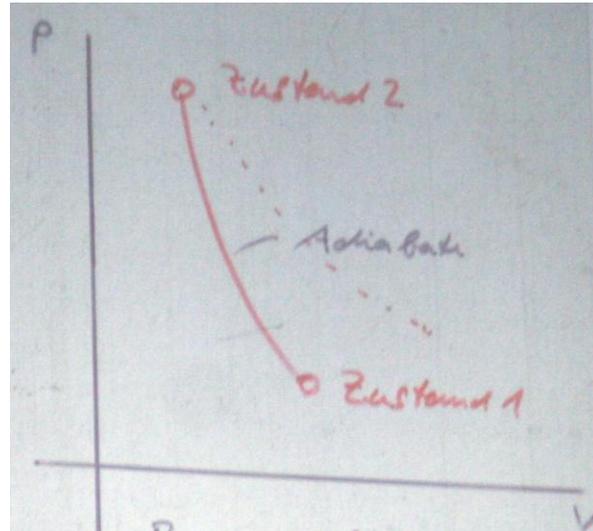
$$\Updownarrow$$

$$\Delta Q = 0$$

$$\Updownarrow$$

$$\Delta W = \Delta U = n * c_v * \Delta T$$

$$= n * \frac{f}{2} * R * \Delta T$$



Beispiel für eine adiabatische Kompression

Vergleich:	Isotherme:	$p * V = const.$
	Adiabatische:	$p * V^K = const.$
		$K = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + R}{c_v} > 1$

$$p * V = n * R * T \Rightarrow p = \frac{n * R * T}{V}$$

$$dQ = 0$$

$$\Leftrightarrow dU = dW$$

$$\Updownarrow$$

$$n * c_v * dT = -p * dV = -\frac{n * R * T}{V} dV$$

$$\Updownarrow$$

$$c_v * \frac{dT}{T} = -R * \frac{dV}{V}$$

$$c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = -R * \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{c_v} = \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-R}$$

$$\frac{T_2^{c_v} * V_2^R}{T_1^{c_v} * V_1^R} = 1$$

Poisson-Gleichung
oder
Adiabaten-Gleichung

$\Rightarrow T^{c_v} * V^R = const.$ bei adiabatischem Prozess
 Mit $R = c_p - c_v$:
 $T^{c_v} * V^{c_p - c_v} = const.$
 $T * V^{\frac{c_p - c_v}{c_v}} = T * V^{\frac{c_p}{c_v} - 1} = const.$
 $T * V^{K-1} = const.$ $\xrightarrow{pV=nRT} \frac{pV}{nR} V^{K-1} = const.$
 $p * V^K = const.$ ☺

f) Polytrophe Zustandsänderung

* isotherm ideale Ankopplung am Wärmebad (=Wärmeumgebung) mit $T = const.$

$\Rightarrow p * V^1 = const.$

Perfekter Wärmeaustausch (mit Umgebung)

* adiabatisch keinerlei Wärmeaustausch mit Wärmebad

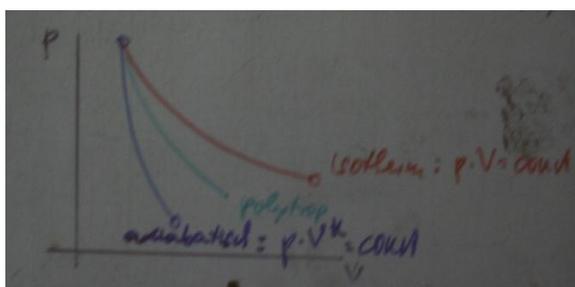
$\Rightarrow p * V^K = const.$

Adiabaten verlaufen im pV-Diagramm steiler als Isothermen (weil $K = \frac{c_p}{c_v} > 1$)

* polytrop Zwischenfall (der Realfall)

$\Rightarrow p * V^\alpha = const.$

Mit $1 < \alpha < K$
(unvollständiger Wärmeaustausch)



← adiabatische Expansion

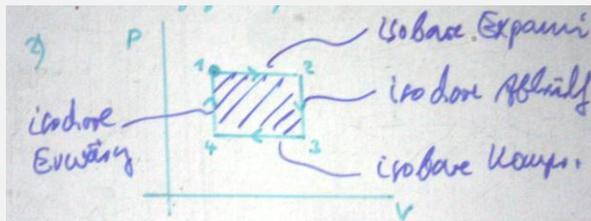
4) Der Carnotsche Kreisprozess

a) Kreisprozesse

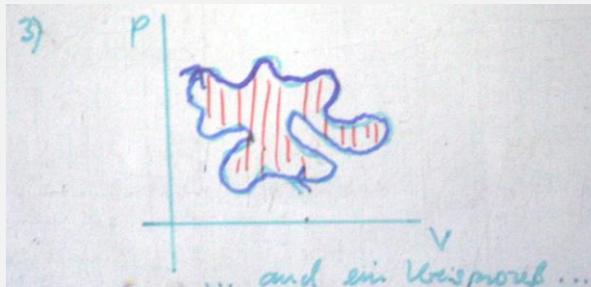
- * Eine Abfolge thermodynamischer Prozesse, an deren Ende ein System wieder den Ausgangszustand (gleiche p, V, T wie am Anfang) erreicht, heißt Kreisprozess.
- * Kann ein Kreisprozess in beiden Richtungen verlaufen, so heißt er reversibel (umkehrbar).

Beispiele für Kreisprozesse:

- 1) Erwärmen eines Systems (isobar) und anschließendes Abkühlen auf die Ausgangstemperatur

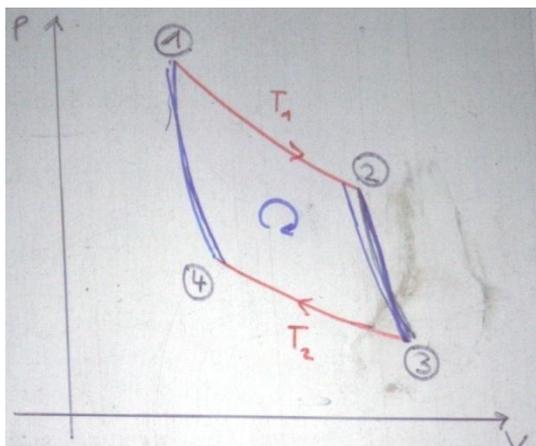


2)



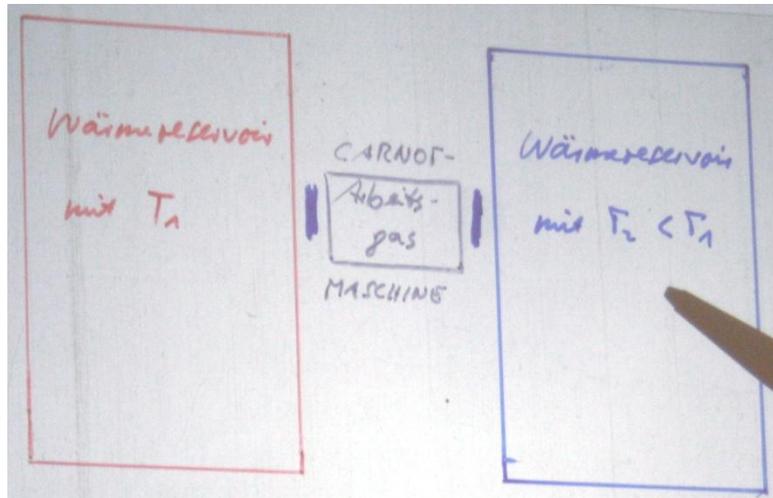
3)

b) Ablauf des Carnot-Prozesses



Anschließendes Abkühlen

Der Carnot-Prozess ist ein Kreisprozess aus 2 Isothermen — und 2 Adiabaten —

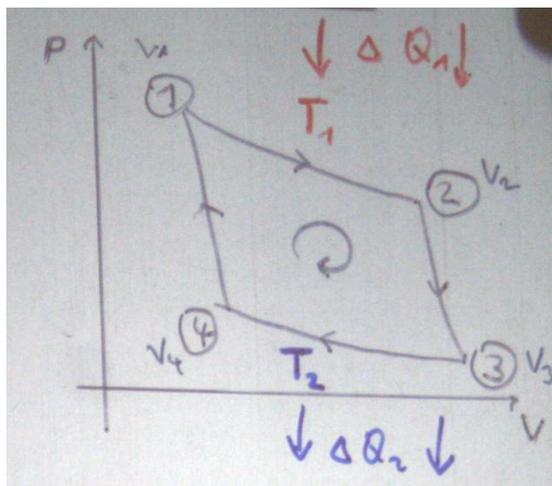


Wärmereservoirs sind riesige Wärmespeicher mit („fast“) unendlicher Wärmekapazität und gleichbleibender Temperatur

Man macht beim Carnot-Prozess folgendes:

- ① → ② isotherme Expansion bei idealer Ankopplung am Wärmereservoir T_1
- ③ → ④ isotherme Kompression bei idealer Ankopplung an Kältereservoir $T_2 < T_1$
- ② → ③ } Adiabatische Expansion bzw. Kompression, d.h. $\Delta Q = 0$, d.h.
- ④ → ① } Abkopplung von beiden Wärmebädern, kein Wärmeaustausch

c) Die 4 Teilschritte des Carnot-Prozesses



① → ② isotherme Expansion bei T_1

$$T = \text{const.} \Rightarrow \Delta U = 0$$

$$\underline{\Delta Q_1 = -\Delta W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p * dV = R * T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} > 0}$$

Das bei T_1 zugeführte ΔQ_1 wird vollständig wieder in Form von mechanischer Arbeit abgegeben

② → ③ Adiabatische Expansion von V_2 auf V_3

$$\Delta Q = 0$$

$$\Delta W_{23} = \Delta U = U(T_2) - U(T_1) < 0$$

Die lineare Expansion nach außen „abgegebene“/vernichtete Arbeit entstammt der inneren Energie des Systems
→ Abkühlung auf T_2

③ → ④ isotherme Kompression bei T_2

$$T = \text{const.} \Rightarrow \Delta U = 0$$

$$\underline{\Delta Q_2 = -\Delta W_{34} = \int_{V_3}^{V_4} p * dV = R * T_2 \ln \frac{V_4}{V_3} > 0}$$

Die bei der mechanischen Kompression am System verrichtete mechanische Arbeit fließt vollständig in das kalte Reservoir ab.

④ → ① Adiabatische Kompression von V_4 auf V_1

$$\Delta Q = 0$$

$$\Delta W_{41} = \Delta U = U(T_1) - U(T_2) > 0$$

Beachte: $\Delta W_{41} + \Delta W_{23} = 0$

Adiabatische Kompression erwärmt das Arbeitsgas von T_2 auf T_1

Für die beiden Adiabaten gilt ferner:

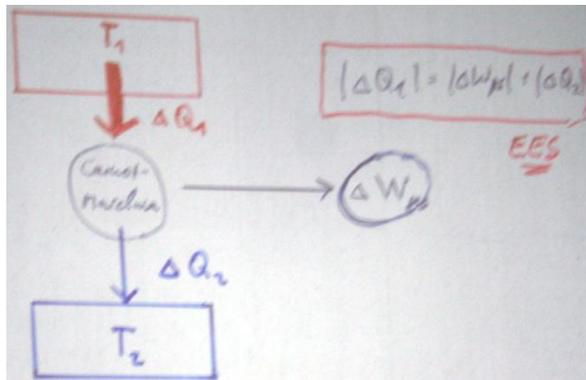
$$\textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \quad T_1 * V_2^{K-1} = T_2 * V_3^{K-1} \quad (*) \text{ „rechte“ Adiabate}$$

$$\textcircled{4} \rightarrow \textcircled{1} \quad T_1 * V_1^{K-1} = T_2 * V_4^{K-1} \quad (**) \text{ „linke“ Adiabate}$$

$$(*) : (**) \quad \boxed{\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}} \quad \text{Beim Carnot-Prozess (***)}$$

5) Energiebilanz und Wirkungsgrad der Carnot-Maschine

a) Energiebilanz



$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_1 &= R * T_1 * \ln \frac{V_2}{V_1} \\ \Delta Q_2 &= R * T_2 * \ln \frac{V_4}{V_3} \end{aligned} \right\} = -RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \left. \begin{aligned} \frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2} &= -\frac{T_1}{T_2} \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{ges} &= \Delta W_{12} + \Delta W_{23} + \Delta W_{34} + \Delta W_{41} \\ &= -R * T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - R * T_2 \ln \frac{V_4}{V_3} \\ &= +R * T_2 \ln \frac{V_3}{V_4} \\ &\stackrel{(***)}{\iff} +R * T_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \end{aligned}$$

$$\boxed{\Delta W_{ges} = -R(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} < 0}$$

d.h. Arbeit wird vom System nach außen abgegeben pro Umlauf ΔW_{ges} .

Ganz grob:

$$\text{"Wirkungsgrad} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \text{"}$$

b) Wirkungsgrad

Ziel einer Wärmekraftmaschine: Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Arbeit.

Dies gelingt allerdings auch bei den noch so idealen – reibungsfrei laufenden – Carnot-Maschinen nie zu 100%

Wirkungsgrad η einer Carnot-Wärmekraftmaschine

$$\eta = \frac{\text{pro Zyklus vom System verrichtete Arbeit } |\Delta W_{ges}|}{\text{pro Zyklus dem warmen Reservoir entnommenes } |\Delta Q_1|}$$

$$\eta = \frac{|\Delta W_{ges}|}{|\Delta Q_1|}$$

für Carnot-Prozess:

$$\eta_{max} = \frac{n * R * (T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1}}{n * R * T_1 * \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1$$

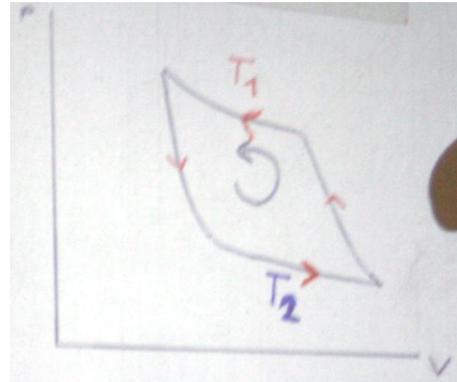
Nicht-ideale Maschine: Reibung etc. $\Rightarrow \eta < \eta_{max}$



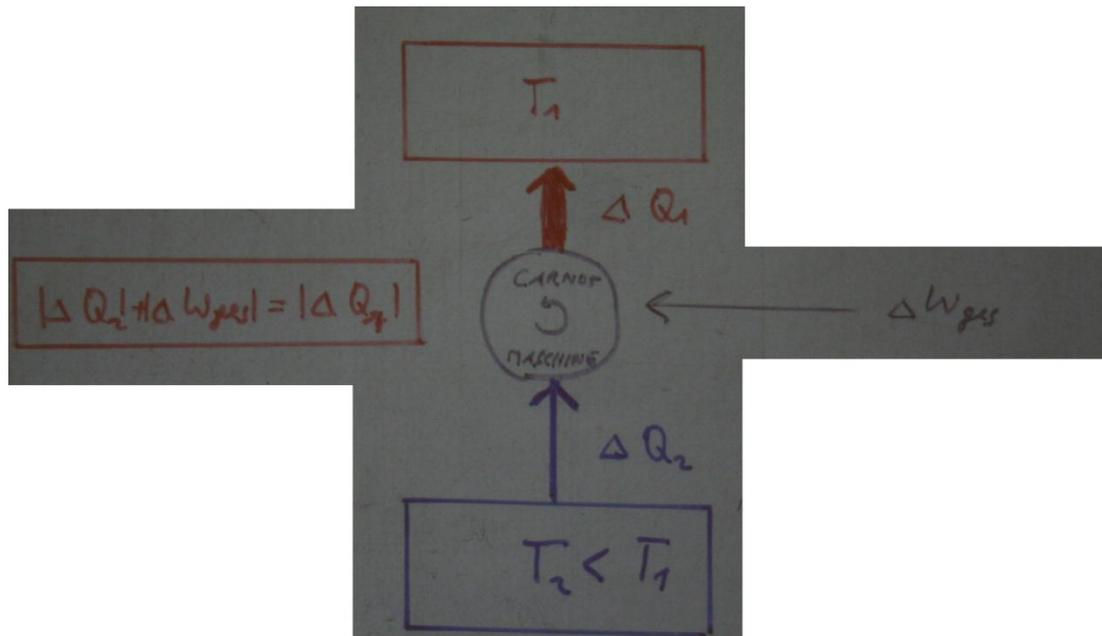
6) Die rückwärts laufende Carnot-Maschine

a) Energiebilanz

Kompression bei hoher Temperatur, Expansion bei tiefer Temperatur



Alle Energien wechseln Vorzeichen:



Unter Verrichtung von mechanischer Arbeit wird Wärmeenergie ΔQ_2 dem kälteren Reservoir entzogen und in das wärmere Reservoir gepumpt

b) Verwendung als Kühlschrank, sog. Kältemaschine:Nutzen: unterem Reservoir wird ΔQ_2 entzogen.Wirkungsgrad als Kältemaschine

$$\eta_K = \frac{|\Delta Q_2|}{|\Delta W_{ges}|} = \frac{RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}}{R(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$\eta_K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

 η_K groß, falls $(T_1 - T_2)$ klein (klar).c) Verwendung als WarmepumpeNutzen: Energiezufuhr an das wärmere ReservoirWirkungsgrad als Wärmepumpe:

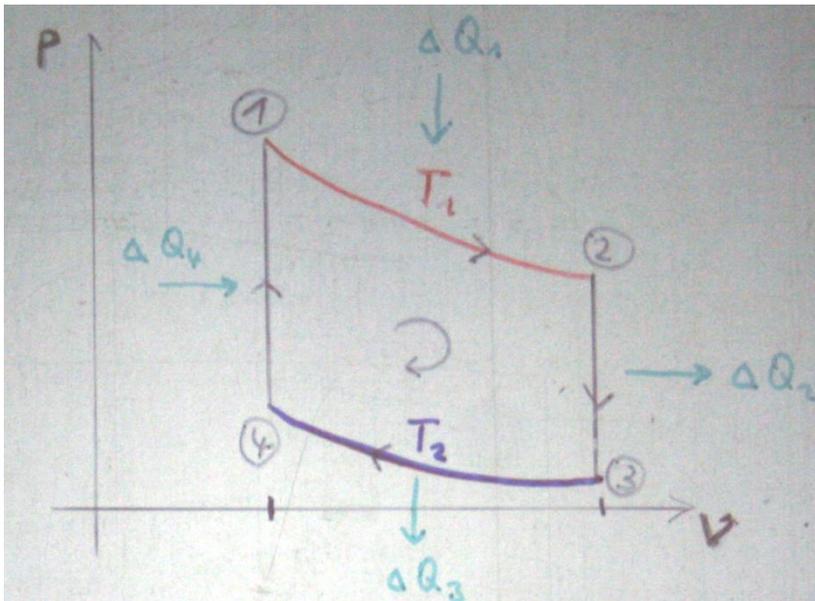
$$\eta_W = \frac{\Delta Q_1}{\Delta W_{ges}} = \frac{nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}}{nR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$\eta_W = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_1}} \geq 1 (!)$$

* Vorteil der Wärmepumpe im Vergleich zu direkter Verbrennungsheizung

* η_W ist $\frac{1}{\eta_{max}}$ (Kehrwert von η der Wärmekraftmaschine)

7) Stirling-Prozess und Heißluftmotor



Stirling-Prozess: Kreisprozess aus zwei Isochoren und zwei Isothermen

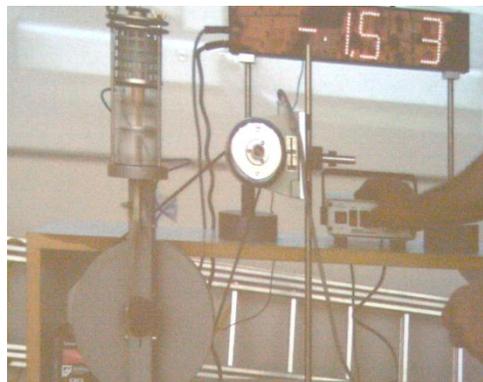
Im Gegensatz zum Carnot-Prozess treten noch ΔQ_2 und ΔQ_4 auf mit

$$\Delta Q_2 = -\Delta Q_4 = c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

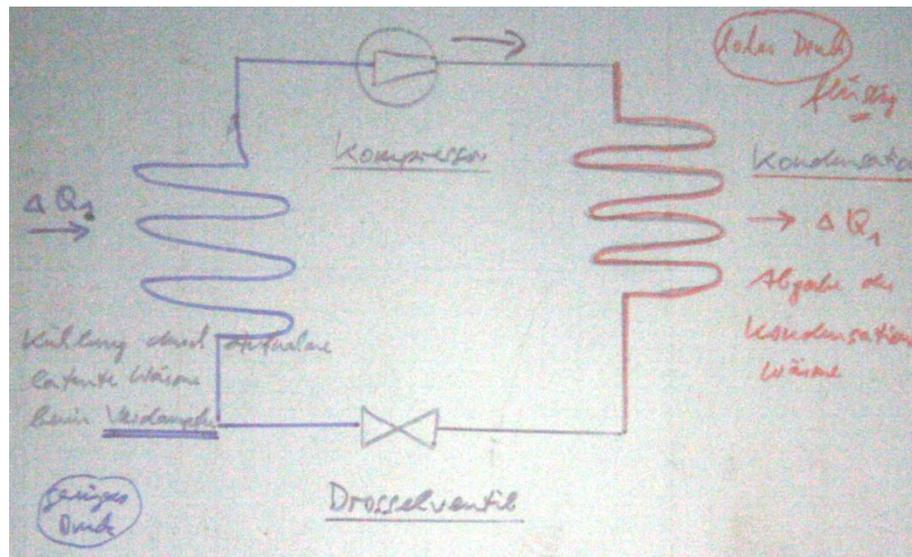
$$\eta_{\text{Stirling}} < \eta_{\text{Carnot}}$$

Falls ΔQ_2 nicht zwischengespeichert und als ΔQ_4 wieder zugeführt wird, hat die Stirling-Maschine einen geringeren Wirkungsgrad als die Carnot-Maschine.

Technische Realisierung mit (teilweisen) Zwischenspeicherung von ΔQ_2 : Heißluftmotor (ist kein Verbrennungsmotor)



8) Technische Kältschränke und Wärmepumpen



- * Verflüssigung durch Kompression
- * Verdampfung nach Entspannung beim Drosselventil

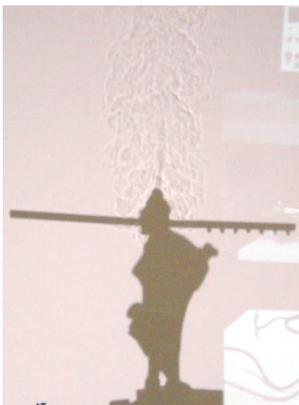
Drei Möglichkeiten für Kältemaschinen

- 1) Linde Verfahren → flüssige Luft
- 2) Wärmepumpe → Carnot/Stirling Kühlung
- 3) Kühlschrank → latente Wärme

9) Transport von Wärmeenergie

Drei Prozesse:

- a) Wärmeleitung:
- Medium erforderlich
 - kein Transport von Materie



$$\frac{dQ}{dT} = -\lambda * A * \frac{dT}{dx}$$

Wärmeleitungsgleichung

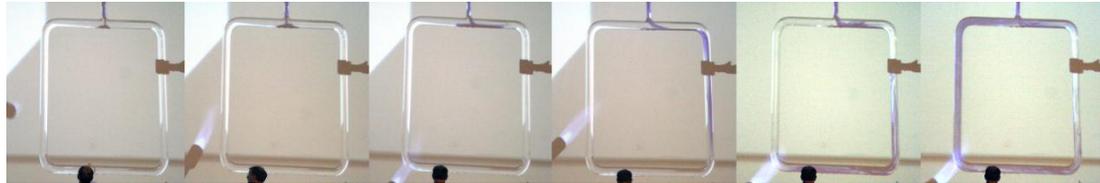
$\frac{dQ}{dT}$: Wärmestrom

λ : Wärmeleitfähigkeit des Materials

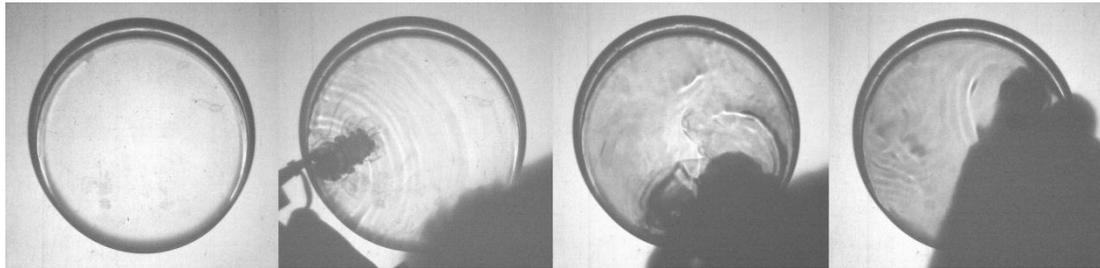
A: Querschnittsfläche

- b) Konvektion: - Medium erforderlich
 - Transport von Materie wegen $\delta = \delta(T)$

Bsp: Warme Luft steigt nach oben



Tinte in mit Wasser gefüllten geschlossenen Kreis geben, an einer Stelle erhitzen → Es entsteht ein Kreislauf



1) Schale mit Wasser 2) Tinte in Wasser geben 3) Im Uhrzeigersinn rühren 4) Gegen den Uhrzeigersinn rühren um den Prozess Umzukehren

- c) Wärmestrahlung: - kein Medium erforderlich
 - Körper emittiert umso mehr (elektromagnetische) Wärmestrahlung, je größer T

20. Entropie und der 2. Und 3. Hauptsatz

1) Formulierungen des 2. Hauptsatzes

Es gibt Prozesse, die nach dem 1. Hauptsatz erlaubt wären, die aber trotzdem nicht beobachtet werden. Wieso?

Wärmeenergie fließt von selbst immer nur vom wärmeren zum kälteren Körper, nie jedoch umgekehrt!

2. Hauptsatz der Thermodynamik
 (ein Erfahrungssatz, d.h. nicht beweisbar)

Äquivalente Formulierung:

Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes tut, als einem Reservoir Wärmeenergie zu entziehen und diese in mechanische Arbeit umzuwandeln.

Oder kürzer:

Ein Perpetuum mobile 2. Art ist unmöglich

Es gilt sogar:

Es gibt keine Wärmekraftmaschine, die einen höheren Wirkungsgrad hat, als die ideale Carnot-Maschine

2. Hauptsatz

2) Reversible und irreversible Prozesse

3) Reduzierte Wärme und Entropie

a) Gesucht: ein (quantitatives) Maß für die Reversibilität eines Kreisprozesses

Lösung: reduzierte Wärmeenergie $\frac{dQ}{T}$

dQ: ausgetauschte Wärmeenergie

T: Temperatur, bei der der Wärmeaustausch stattfindet

$$dS := \frac{dQ}{T} \quad \text{Bei reversiblen Prozessen !!!}$$

Entropie S: wird definiert als eine Größe, deren Änderung $\frac{dQ_{\text{reversibel}}}{T}$ beträgt.

Folgerung: falls $dQ_{\text{reversibel}} = 0$ ist $\Delta S = 0$

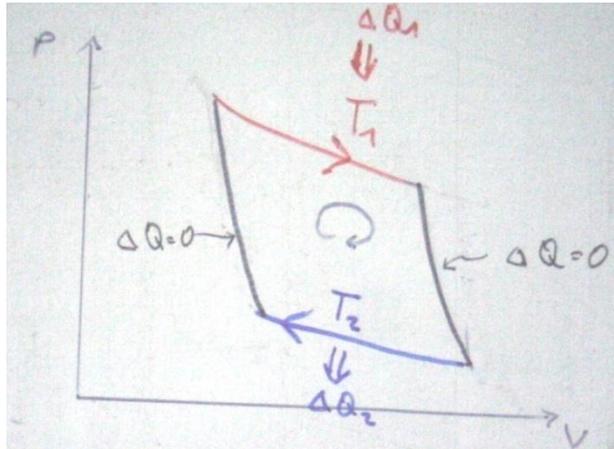
⇓

Keine Entropieänderung ΔS bei (reversiblen) adiabatischen Prozessen.

⇓

Adiabaten sind Linien konstanter Entropie, sogenannte Isotropen (bei reversiblen Prozessen)

b) Reduzierte Wärme und Entropie beim Carnot-Prozess



Wir fanden:

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2} = -\frac{T_1}{T_2} \Leftrightarrow \boxed{\frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} = 0}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\Delta S_C = 0}$$

Die Summe aller Entropieänderungen bei einem Zyklus des Carnot-Prozesses ist Null
(gilt für beide Umlaufrichtungen)

→

Entropie S ist Zustandsgröße

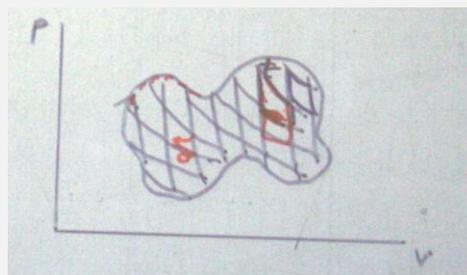
(hängt nur vom Zustand ab, nicht jedoch vom Weg,
auf dem dieser erreicht wurde)

c) Entropieänderung bei reversiblen und irreversiblen Kreisprozessen

Man findet allgemein:

Bei reversiblen Kreisprozessen ist $\Delta S = 0$.

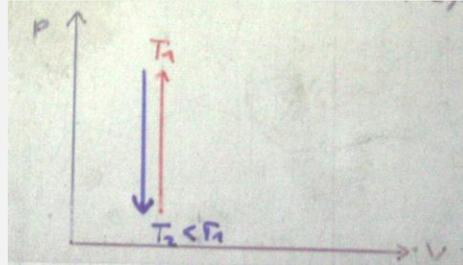
Beweis: Jeder reversible Kreisprozess läßt sich durch Überlagerung (∞) vieler (infinitesimal) kleiner Carnot-Prozesse darstellen.



Ferner gilt:

Bei irreversiblen Kreisprozessen nimmt die Entropie zu, d.h. $\Delta S > 0$

Beispiel: Statt Carnot-Prozess XXXX isochores Abkühlen auf T_2 und anschließendes erwärmen auf T_1 ein XXXX Kreisprozess



4) Nullpunkt der Entropie und 3. Hauptsatz

Bis jetzt: Berechnung von ΔS , nicht von S

Wo liegt der Nullpunkt von S ?

Am absoluten Nullpunkt $T = 0K$ gilt $S = 0$ (für reine Stoffe)

3. Hauptsatz der Thermodynamik

⇓

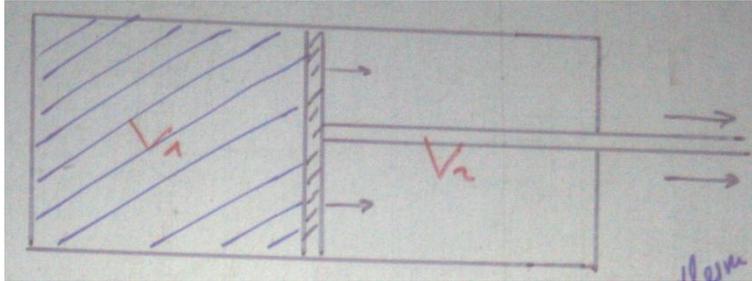
$$c_v \rightarrow 0 \text{ für } T \rightarrow 0$$

⇓

Es ist prinzipiell unmöglich den absoluten Temperatur-Nullpunkt zu erreichen

5) Entropie und Wahrscheinlichkeit

Betrachte isotherme Expansion (reversibel) von V_1 auf (V_1+V_2)



$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} = \frac{dU + p * dV}{T} = \frac{0 + n * R * T \frac{dV}{V}}{T}$$

↑
 $pV = nRT$

⇒

$$\Delta S = k * \ln \left(\frac{V_1 + V_2}{V_1} \right)^N$$

⇒

$$\Delta S = k * \ln(w) = S \quad \delta(\delta = 0) = 0$$

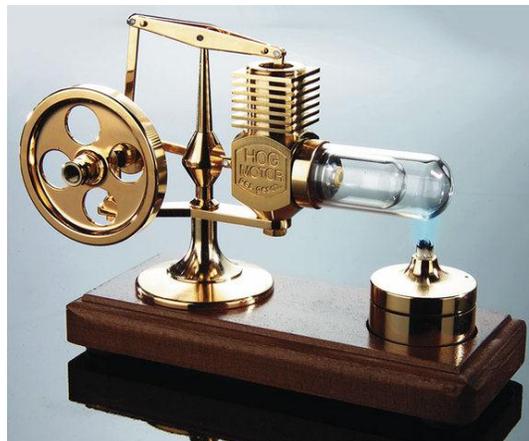
↑
Wahrscheinlichkeit

$$p(N = 1) = \frac{V_1}{V_1 + V_2}$$

$$p(N = 2) = \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^2$$

$$p(N = 3) = \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^3$$

$$p(N = 4) = \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)^4$$



IV. ELEKTRIZITÄT UND MAGNETISMUS

I. Elektrizität und Magnetismus

- * Elektrostatik → ruhende Ladungen
- * Magnetismus → bewegte Ladungen
- * Elektrodynamik → beschleunigte Ladungen

II. Optik

- * Geometrische Optik
- * Wellenoptik
- * Quantenoptik

III. Moderne Physik

- * Relativistische Effekte
- * Quanteneffekte
- * Atom- und Kernphysik

1. Elektrostatik von Punktladungen

1) Die elektrische Ladung

Entdeckung (bereits im Altertum):

Reibungselektrizität

Einheit der elektrischen Ladung Q:

$$[Q] = 1C = 1 \text{ Coulomb}$$

Die Eigenschaften der elektrischen Ladung:

- ① Es gibt positive und negative Ladungen
- ② Kräfte zwischen Ladungen, sogenannte Coulomb-Kräfte
 - Gleichnamige Ladungen: Abstoß
 - Ungleichnamige Ladungen: Anziehung
- ③ Ladungen verhalten sich additiv:

$$Q_{\text{gesamt}} = \sum_i Q_i$$

- ④ Ladungserhaltung:

$$\sum_i Q_i = \text{const. in abgeschlossenen Systemen}$$

- ⑤ Ladungsquantisierung:

Ladung tritt nur in ganzzahligen Vielfachen der sogenannten Elementarladungen auf.

$$e = 1,602 * 10^{-19} C$$

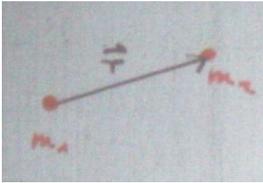
(Ladung des Elektrons: $-e$)

Stoffe unterteilbar in

- Leiter: ein Teil der enthaltenen Ladungsträger beweglich (z.B. Metalle)
- Isolatoren: Ladungsträger unbeweglich (L=Nichtleiter)

2) Kräfte auf Punktladungen: Coulombsches Gesetz

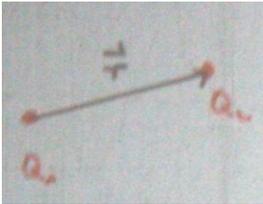
Zur Erinnerung: Gravitationsgesetz



$$F_G = -\gamma \frac{m_1 * m_2}{r^2} \text{ mit } \vec{F} \parallel \vec{r}$$

$$W_{pot} = \int_{\infty}^r \vec{F}_G * \vec{ds} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r}$$

Jetzt in völliger Analogie für Punktladungen



$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Q_1 * Q_2}{r^2} \text{ mit } \vec{F} \parallel \vec{r}$$

Coulombsches Gesetz

Mit: F_c = Coulomb-Kraft oder elektrostatische Kraft

$$\epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} = \frac{As}{Vm}$$

Sogenannte elektrische Feldkonstante oder absolute Dielektrizitätskonstante

⇒ pot. Energie zweier Punktladungen:

$$W_{pot} = \int_{\infty}^r \vec{F}_C * \vec{ds} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Q_1 * Q_2}{r}$$

Analog zu F_G : Coulomb-Kraft ist eine konservative Kraft (d.h. wegunabhängig)

3) Feldstärke, Potential und Spannung

a) Def.:

$$\text{elektrische Feldstärke} = \frac{\text{Kraft } \vec{F}_C \text{ auf Ladung } Q_2}{Q_2}$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}_C(\vec{r})}{Q}$$

Elektrische Feldstärke
→ $\vec{E} \parallel \vec{F}$

Beispiel: elektrisches Feld einer Punktladung Q_1

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Q_1}{r^2}$$

b) Def.: $\text{elektrisches Potential} = \frac{\text{potentielle Energie der Ladung } Q_2}{Q_2}$

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{W_{pot}}{Q} \quad \text{Elektrisches Potential}$$

Üblicher Bezugspunkt: ∞ , d.h. $\varphi(r \rightarrow \infty) \rightarrow 0$

Beispiel: elektrisches Potential im Feld von Punktladung Q_1

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Q_1}{r}$$

c) Def.: $U = \Delta\varphi = \varphi(r_2) - \varphi(r_1)$

Elektrische Spannung = Potentialdifferenz

Einheit: $[U] = [\varphi] = \frac{[W]}{[Q]} = 1 \frac{J}{C} = 1V = 1 \text{ Volt}$

d) \Rightarrow Arbeit bei Verschiebung einer Ladung im elektrischen Feld:

$$W = W_{pot}(r_2) - W_{pot}(r_1)$$

$$= Q * (\varphi(r_2) - \varphi(r_1))$$

$$= Q * \Delta\varphi = Q * U$$

$$W = Q * U$$

Oder:

$$W = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} * \vec{ds} = Q * \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} * \vec{ds}$$

Wobei:

$$\vec{F} = Q * \vec{E}$$

$$U = \Delta\varphi = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} * \vec{ds}$$

4) Feldlinien und Äquipotenziallinien

a) Feldlinien

- Veranschaulichen den Verlauf von $\vec{E}(\vec{v})$
- Stets parallel \vec{E} (und damit $\parallel \vec{F}_C$)
- Beginnen an positiven Ladungen, enden an negativen Ladungen
- Hohe Feldliniendichte \triangleq hohe Feldstärke $|\vec{E}|$

b) Äquipotentiallinien (ÄPL)

- Linien konstanten elektrischen Potentials

⇓

$$W_{pot} = \text{const.} \quad \text{längs ÄPL}$$

⇓

$$\int \vec{F}_c * d\vec{s} = Q * \int \vec{E} * d\vec{s} = 0$$

⇓

Äquipotentiallinien (im Dreidimensionalen: Äquipotentialflächen) stehen

Stets senkrecht zu den elektrischen Feldlinien

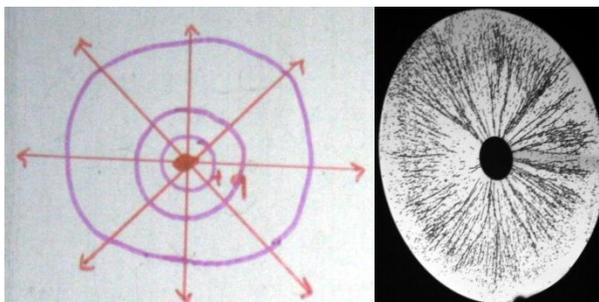
5) Systeme von Punktladungen

a) Superpositionsprinzip

$$\vec{F}_{ges} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i \quad \text{bei } N \text{ Ladungen}$$

$$\xrightarrow{\text{wegen } \vec{F}_i = Q\vec{E}_i} \vec{E}_{ges} = \sum_i^N \vec{E}_i$$

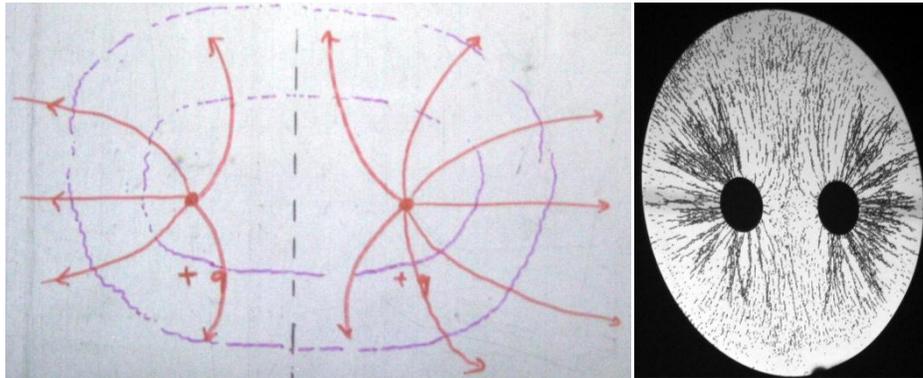
b) Feld einer Punktladung (Monopol): q



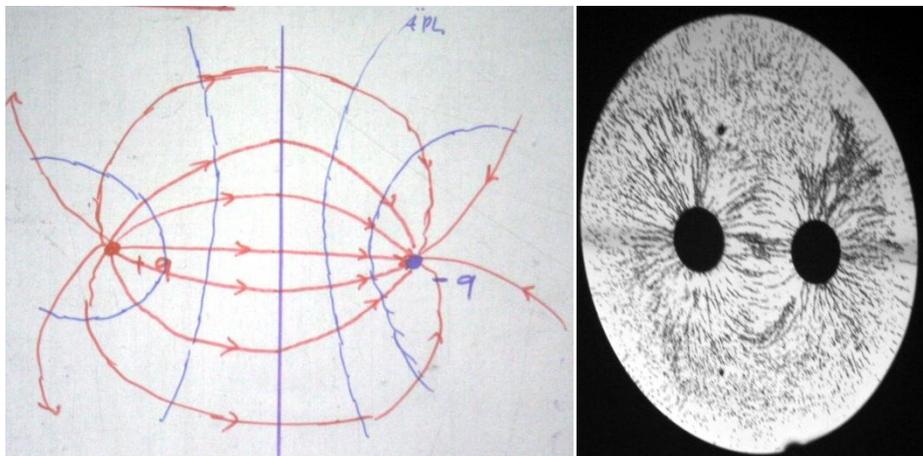
— Feldlinien

— Äquipotentiallinien

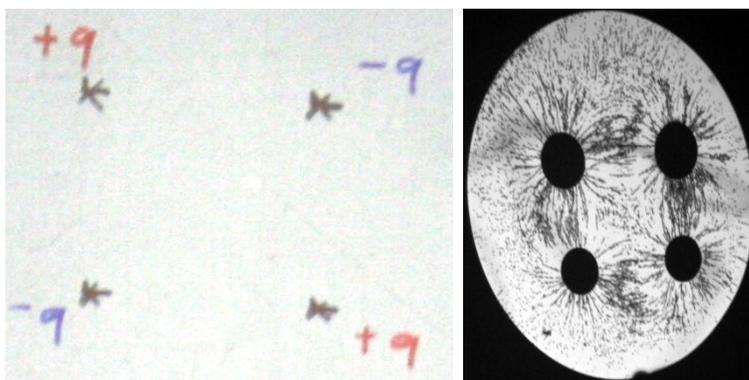
c) Zwei gleichnamige Ladungen: $+q, +q$



d) Zwei entgegengesetzte gleiche Ladungen (sog. Elektrischer Dipol):



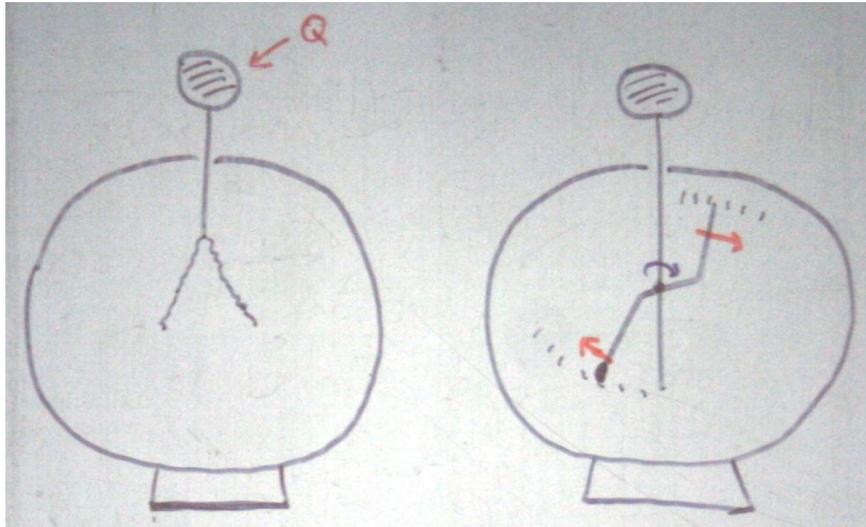
e) Quadrupol (alternierende quadratische Anordnung von $+q, -q, +q, -q$)



→ Übungsaufgabe (siehe Lösungshinweise Blatt 5 Aufgabe 4c)

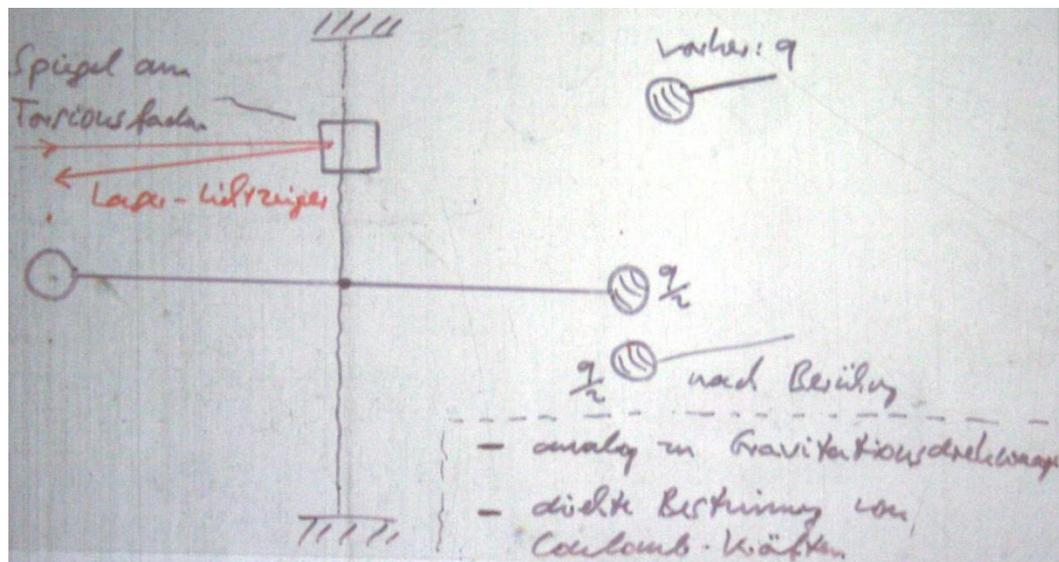
6) Messung von Ladungen über Kräfte

a) Mit dem Elektroskop



Elektrostatische Abstoßung zwischen gleichnamig geladenen Teilen \Rightarrow Zeigerausschlag

b) Mit der Torsionswaage



7) Freie Ladungsträger im elektrischen Feld

① Newton $m * \vec{a} = q * \vec{E}$

② Energieerhaltung

Beim Durchlaufen der Potentialdifferenz wird potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt (oder umgekehrt):

$$\Delta E_{kin} = -\Delta E_{pot} \quad (\text{EES})$$

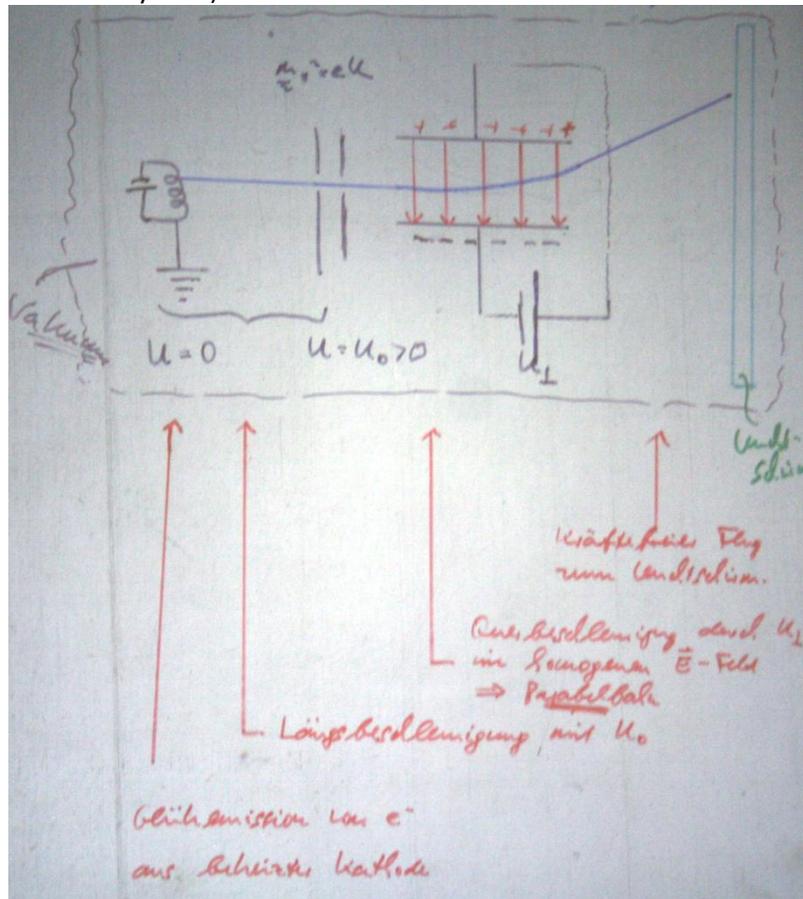
Für $v_0 = 0$ folgt:

$$\frac{m}{2} v^2 = |q * U|$$

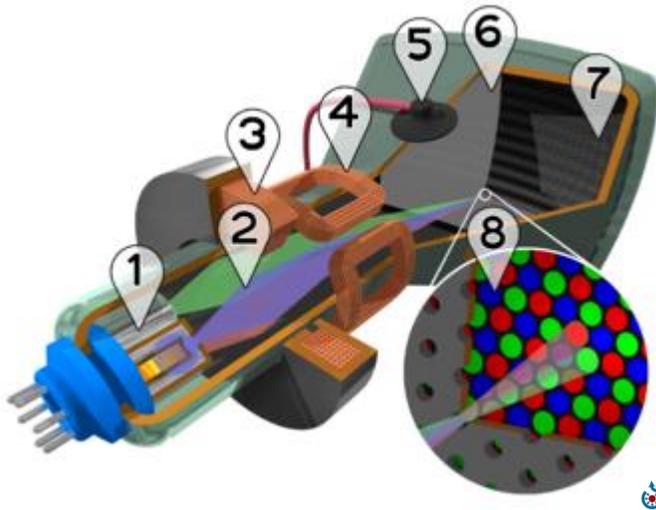
⇒

$$v = \sqrt{\left| 2 \frac{q}{m} * U \right|}$$

Anwendung: Elektronen in der Braunschen Röhre (Elektronenstrahlröhre/CRT-CathodeRayTube)



In modernen Fernsehöhren jedoch findet eine Ablenkung durch Magnetfelder statt durch das elektrische Feld statt. Ablenkung in x und y.



1-Glühkathoden, 2-Elektronenstrahlen, 3-Bündelungsspulen, 4-Ablenkspulen, 5-Anodenanschluss, 6-Lochmaske, 7-Fluoreszenzschicht mit roten, grünen und blauen Subpixeln, 8-Nahansicht der Fluoreszenzschicht

2. Kontinuierliche Ladungsverteilung

1) Ladungsverteilungen und Ladungsdichte

Bisher: Punktladungen

Jetzt: Ladungswolken, ausgedehnte Ladungen

Begriff der Raumladungsdichte ρ :

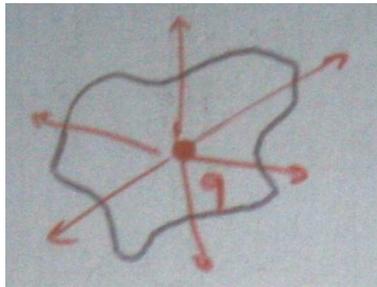
$$\rho(\vec{r}) = \frac{dQ}{dV} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

Ladungsdichte = Ladung pro Volumen

$$[\rho] = 1 \text{ C}/\text{m}^3$$

2) Der elektrische Fluss und der Satz von Gauß

a) Fluss Φ des elektrischen Feldes durch geschlossene Hüllfläche



$$\Phi = \oint \vec{E} d\vec{A} = \oint E * \cos \varphi * dA$$

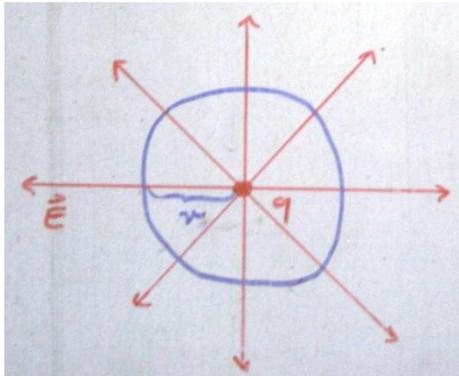
↑
Integral über
geschlossene
Hüllfläche

↙
 $d\vec{A} \perp$ Flächenelement
 $dA (!)$

b) Berechnung für Punktladung q

Hüllfläche: Kugeloberfläche mit q als Mittelpunkt

Vorteil: $E = const.$
 $\vec{E} \perp$ Hüllfläche } Auf der gesamten Hüllfläche



$$\begin{aligned} \Phi &= \oint \vec{E} * d\vec{A} \\ &= \oint E * dA * \cos \varphi \\ &= \oint \frac{1}{4 * \pi * \epsilon_0} * \frac{q}{r^2} * dA \\ &= \frac{1}{4 * \pi * \epsilon_0} * \frac{q}{r^2} * \oint dA \\ &= \frac{1}{4 * \pi * \epsilon_0} * \frac{q}{r^2} * 4 * \pi * r^2 = \frac{q}{\epsilon_0} \end{aligned}$$

$$\Phi = \oint \vec{E} * d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Satz von Gauß

$$= \int \rho(\vec{r}) dV$$

- * Gilt auch für beliebige Teilflächen
- * Und beliebige Ladungsverteilungen

$$\text{elektrischer Fluss durch geschlossene Hüllfläche} = \frac{\text{eingeschlossene Ladung}}{\epsilon_0}$$

Elektrische Ladungen sind die Quellen des elektrischen Feldes

3) Anwendungen des Gaußschen Satzes

a) Die unendlich ausgedehnte, homogen geladene Ebene

$$\sigma := \frac{dQ}{dA} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Fläche}}$$

Sog. Flächenladungszone

$$[\sigma] = 1 \text{ C/m}^2$$

Kein Punkt der unendlich ausgedehnten Ebene ist ausgezeichnet



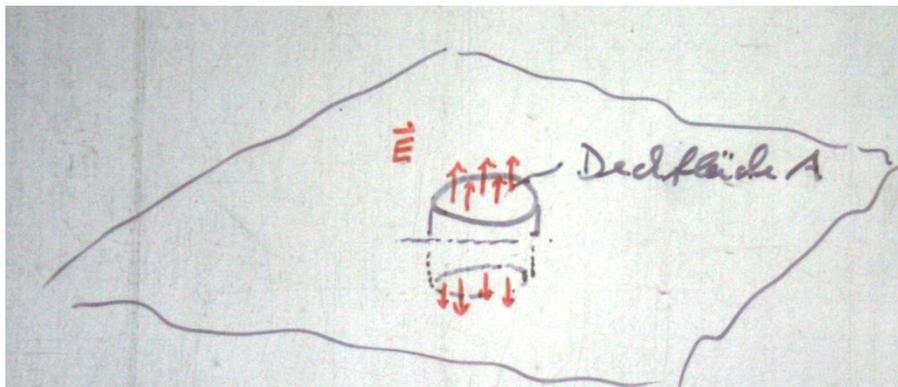
Ebene ist Äquipotentialfläche



$\vec{E} \perp \text{Ebene}$ an jedem Punkt der Ebene

Wie groß ist E?

(„Käseschachtelmethode“)



$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\zeta A}{\epsilon_0}$$

$$\Phi_E = 2 * E_{\perp} * A$$

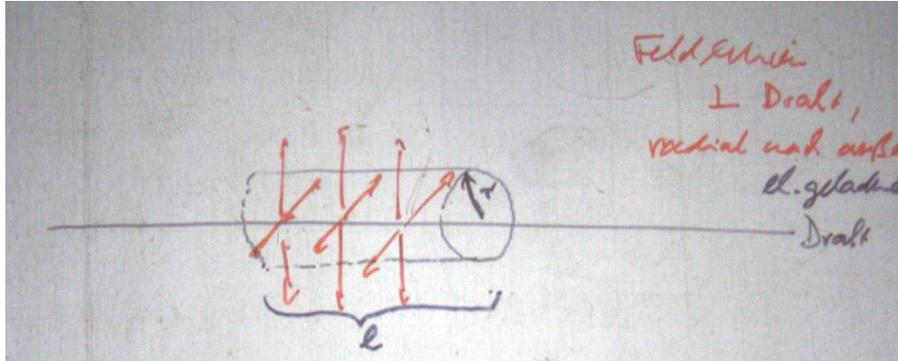
↑
Deckel+Boden

$$2E_{\perp}A = \frac{\zeta A}{\epsilon_0} \Rightarrow E_{\perp} = \frac{\zeta}{2\epsilon_0}$$

Unabhängig vom Abstand von der unendlichen Ebene!

b) Unendlich langer, homogener geladener Draht

$$\lambda = \frac{dQ}{dl}$$

Längenladungsdichte

$$\left. \begin{aligned} \Phi_E &= \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\lambda l}{\epsilon_0} \\ \Phi_E &= 2\pi r l * E_{\perp} \end{aligned} \right\} E_{\perp} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} * \frac{1}{r}$$

Zusammenfassung:0-dimensionale Ladung (Punktladung): $E \sim \frac{1}{r^2}$ 1-dimensionale Ladung (geladener Draht): $E \sim \frac{1}{r}$ 2-dimensionale Ladung (geladene Fläche): $E \sim 1$ **4) Leiter im elektrischen Feld**

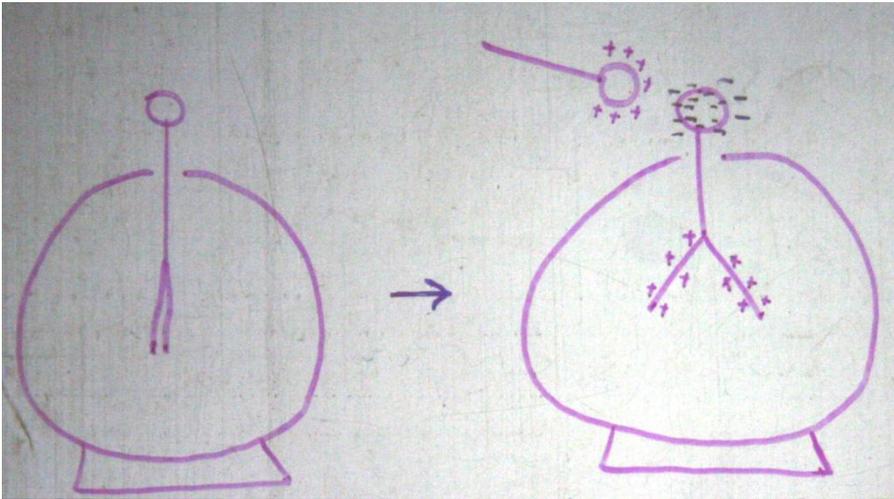
Leiter enthalten bewegliche Ladungsträger.

Konsequenzen (im elektrostatischen Fall):

- ① Im Inneren von Leitern ist $\vec{E} = 0$
- ② An der Leiteroberfläche gilt: $\vec{E} \perp$ Oberfläche
- ③ Sind Leiter elektrisch geladen, befinden sich die Ladungen auf der Leiteroberfläche (\rightarrow Gauß)
- ④ Leiteroberflächen sind stets Äquipotentialflächen ($E_{\parallel} = 0$)
- ⑤ Bringt man einen Leiter ins elektrische Feld, dann verschieben sich die beweglichen Ladungsträger so lange, bis im Leiterinneren $\vec{E} = 0$ (sogenannte Influenz)
Die so erzeugten Oberflächenladungen heißen Influenzladungen

5) Influenz

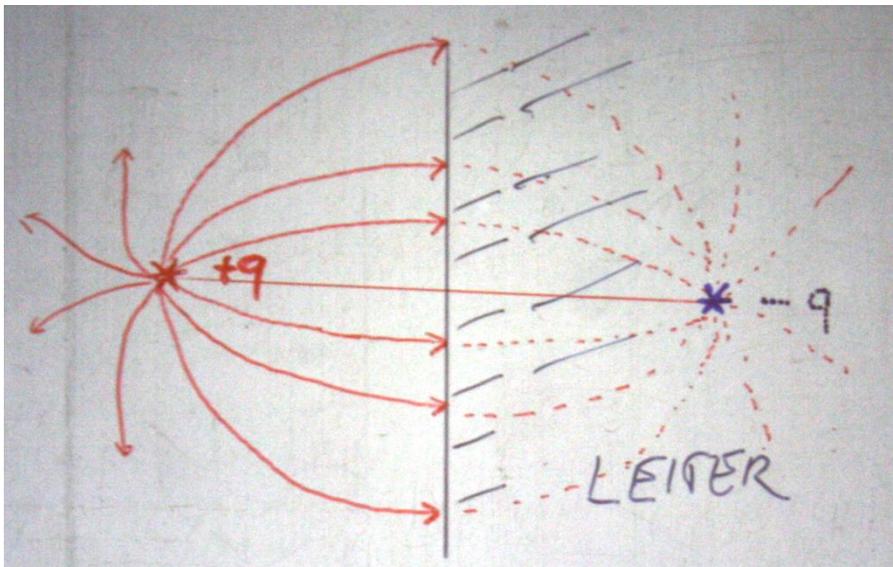
Experiment: Influenzladungen



Effekt erfolgt berührungslos durch Influenz

Ladung vor einer elektrisch leitenden Ebene:

↳ Spiegelladungen & Bildladungsmethode



Feld einer Ladungsanordnung vor einer unendlich ausgedehnten leitenden Ebene ist:

- im Außenraum gleich dem Feld von Ladung plus Spiegelladung
- im Leiter ist $\vec{E} = 0$

Spiegelladung oder Bildladung erzeugen durch:

- Spiegelung der Ladungsanordnung an Leiteroberfläche
- Wechsel des Ladungsvorzeichens

6) Abschirmung elektrostatischer Felder: Faraday-Käfig

$\vec{E} = 0$ überall im Leiter

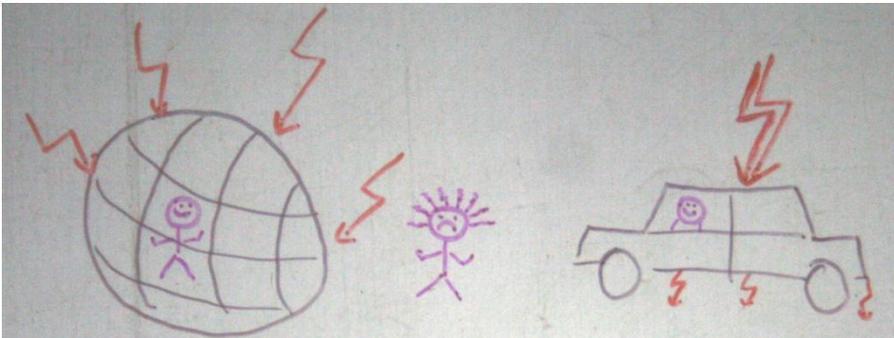


$\vec{E} = 0$ auch in ladungsfreien Hohlräumen von Leitern

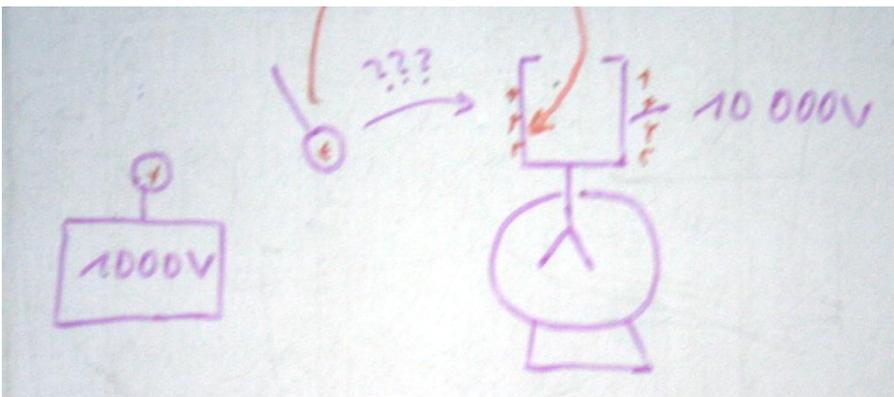


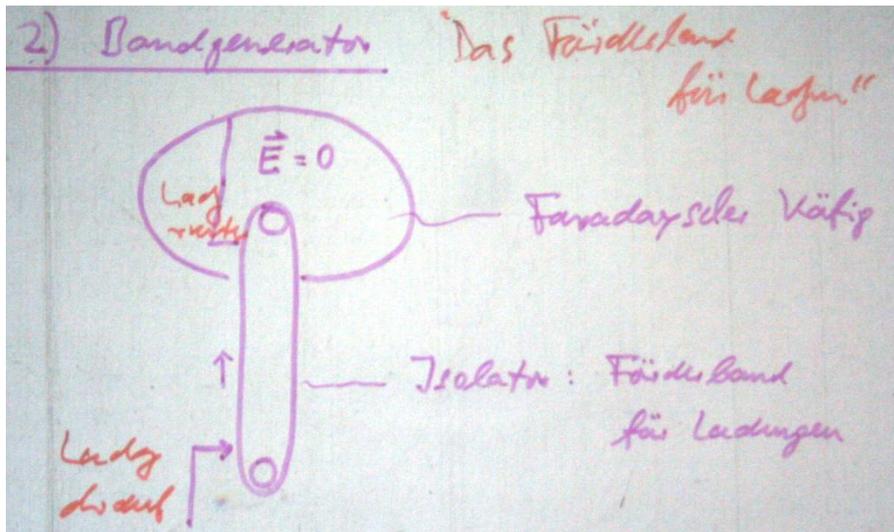
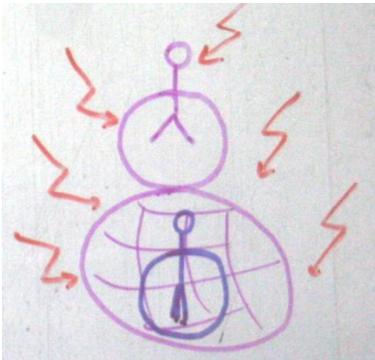
Ladungen befinden sich immer nur auf den Außenflächen von Leitern, es sei denn, die Innenflächen schließen Ladungen ein (wegen Gaußschen Satz)

Anwendung: Faraday-Käfig

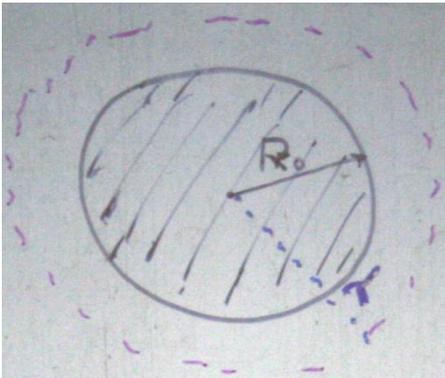


Experiment 1) Faradaybecher:



Experiment 2) Bandgenerator:Experiment 3) Faraday-Käfig:

7) Das Außenfeld einer leitenden Kugeloberfläche



Elektrisch leitende Kugel

Radius: R_0

Ladung: Q

\vec{E}_\perp Oberfläche (Leiter!)

$|\vec{E}| = \text{const.}$ auf Oberfläche (Symmetrie)

Satz von Gauß:

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} \\ \Phi_E = 4\pi r^2 * E(r) \end{array} \right\} E(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{für } r \gg R_0$$

Kugeloberfläche

Feld einer leitenden Kugel im Außenraum mit Ladung Q wie Feld einer entsprechenden Punktladung Q im Kugelmittelpunkt

Analog:

GRAVITATION: Außenfeld einer Kugelsymmetrie

MASSEN: Verteilung wie bei Punktmasse im Mittelpunkt

Allgemein gilt für elektrisch geladene Leiteroberflächen (ohne exakte allgemeine Herleitung):

Je kleiner der Krümmungsradius r , desto größer die Feldstärke E an der Oberfläche:

Sog. Spitzenfläche



Anwendungen:

- 1) Blitzableiter
- 2) Verhalten im Gewitter...
- 3) Kugelelektroden am HV-Generator
- 4) Feldemissionsspitzen, z.B. für Displays

8) Felder Kugelsymmetrischer Ladungsverteilungen

Symmetrie
&
Satz von Gauß



Das Außenfeld einer Kugelsymmetrischen Ladungsverteilung ist gleich dem elektrischen Feld das dadurch erzeugt würde, dass sich die gesamte Ladung im Mittelpunkt befände.

Wegen der Analogie des Gravitationsgesetzes zum Coulomb-Gesetz ($E, g \sim \frac{1}{r^2}, \vec{E}, \vec{g} \parallel \vec{r}$) gilt dies auch für das Gravitationsfeld.

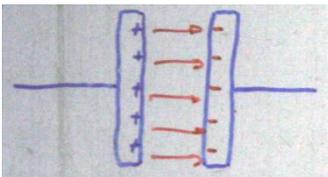
Das Gravitationsfeld einer Kugelsymmetrischen Masseverteilung ist im Außenraum gleich dem Gravitationsfeld, das dadurch erzeugt wird, dass sich die gesamte Masse im Mittelpunkt befindet.

Anwendung: Bestimmung der Masse der Erde aus $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$

3. Kondensatoren und Dielektrika

1) Ladungverschiebung im Plattenkondensator

Plattenkondensator = zwei parallele, ebene, elektrisch leitfähige Platten



Fläche: A

Abstand: d

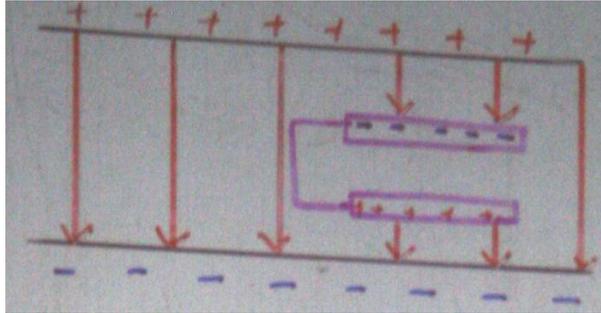
Vorteil: Falls $d \ll \text{laterale Ausdehnung der Platten}$, kann \vec{E}_\perp im Plattenkondensator als homogen angesehen werden, d.h. $\vec{E}_\perp = \text{const.}$, solange keine Ladung zwischen die Platten eingebracht werden.

Begründung:

- Leitfähige Platten sind Äquipotentialflächen
- Näherung: ∞ -ausgedehnte Platten

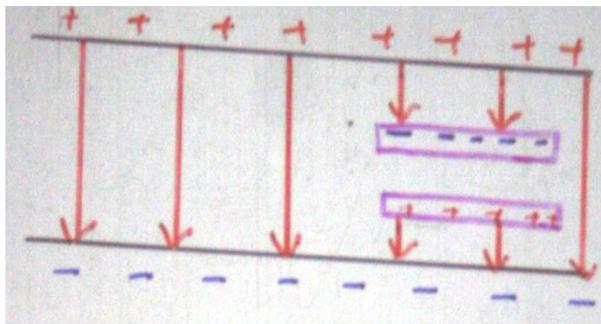
Experiment:

a)



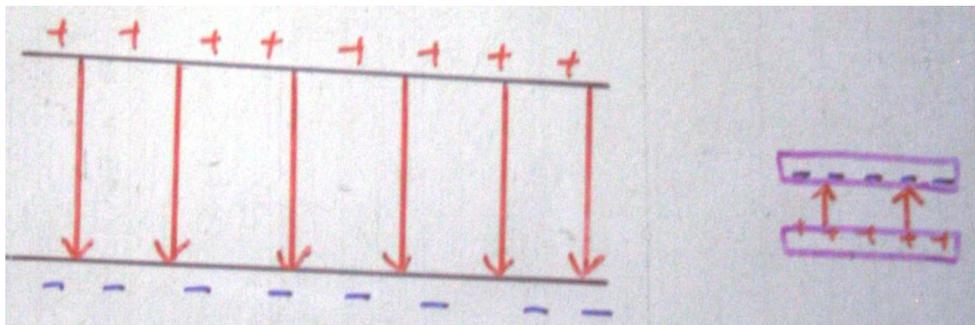
↓

b)

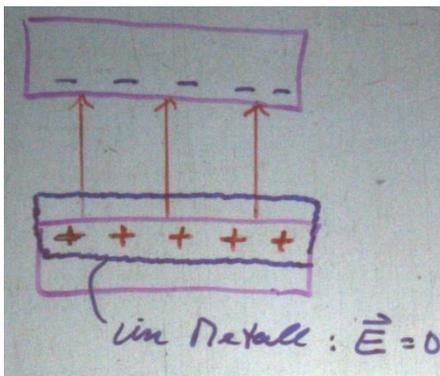


↓

c)



„Käseschachtelmethode“ (Satz von Gauß)



$$\left. \begin{aligned} \Phi_E &= E_{\perp} * A \\ \Phi_E &= \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0} \end{aligned} \right\} \sigma = \epsilon_0 E_{\perp}$$

Induzierte Flächenladungsdichte σ

Durch äußeres \vec{E} - Feld auf Leiteroberfläche (die senkrecht zu \vec{E} steht):

$$\sigma = \varepsilon_0 E_{\perp} \quad (\text{Skalar})$$

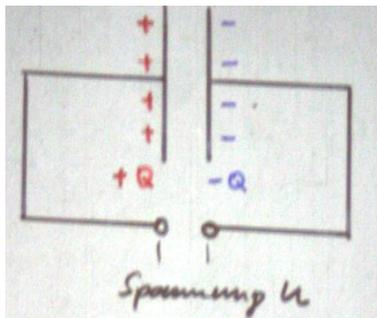
Definiere: elektrische Verschiebungsdichte \vec{D}

$$\vec{D} := \varepsilon_0 \vec{E} \quad (\text{Vektor!})$$

$$[D] = [\sigma] = 1 \frac{C}{m^2}$$

2) Der Plattenkondensatora) Definition der Kapazität

Ein Kondensator besteht aus zwei gegeneinander Isolierten Leitern



Definition:

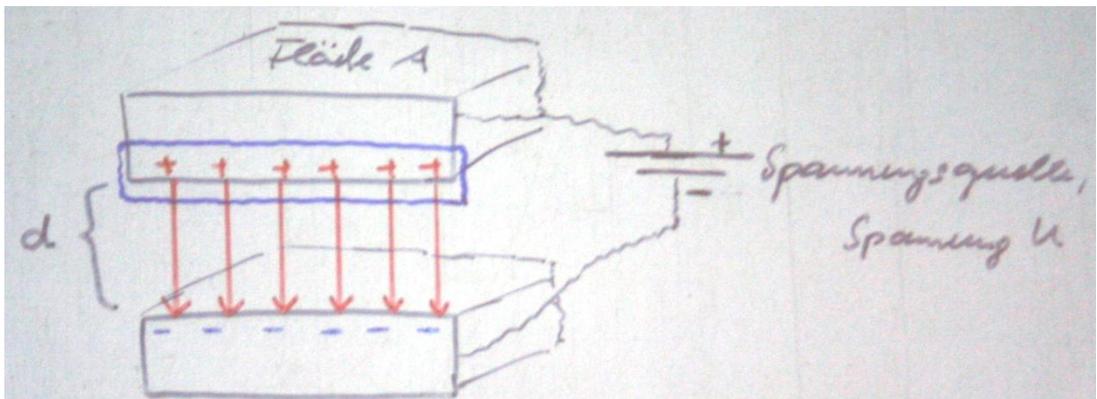
$$C := \frac{Q}{U} \Leftrightarrow Q = C * U$$

C: Kapazität des Kondensators

$$[C] = 1 \frac{C}{V} = 1F = 1 \text{ Farad}$$

Q: verschobene Ladung

b) Kapazität beim Plattenkondensator



Gauß: $\frac{Q}{\epsilon_0} = E * A \Rightarrow Q = \epsilon_0 E * A$

Homogenes Feld: $U = E * d$

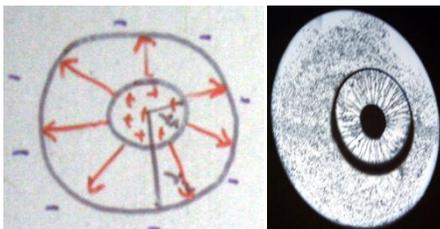
\Rightarrow $C = \frac{Q}{U} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$

Kapazität eines Plattenkondensators

3) Kugelkondensator und Zylinderkondensator

a) Kugelkondensator

Die Elektroden bestehen aus zwei leitenden konzentrischen Kugeloberflächen mit Radien r_1 und r_2 .

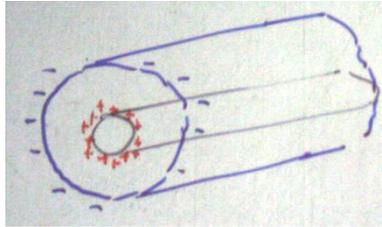


$$U = \int_{r_1}^{r_2} E * dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

b) Zylinderkondensator:

Die Elektroden bestehen aus zwei leitenden konzentrischen Zylinderoberflächen mit den Radien r_1 und r_2 und der Länge l .



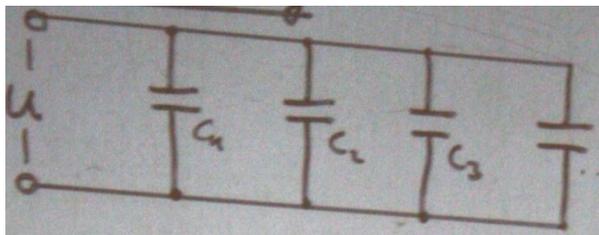
Gauß:

$$E * 2\pi r l = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\Rightarrow E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l r}$$

$$\Rightarrow U = \int_{r_1}^{r_2} E * dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} * \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr = \frac{Q * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\epsilon_0 l}$$

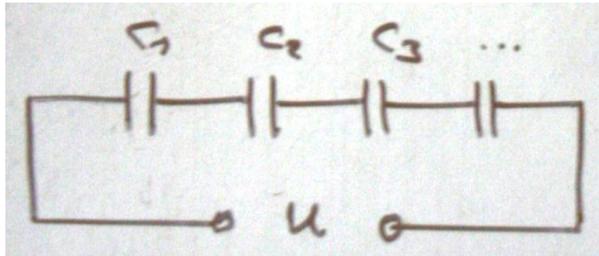
$$\Rightarrow \boxed{C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}}$$

4) Parallel- und Serienschaltung von Kondensatorena) Parallelschaltung

U für alle C_i gleich

$$C_{ges} = \frac{Q_{ges}}{U} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots}{U} = \frac{C_1 U + C_2 U + \dots}{U}$$

$$\Rightarrow \boxed{C_{ges} = \sum_i C_i = C_1 + C_2 + \dots}$$

b) Serienschaltung

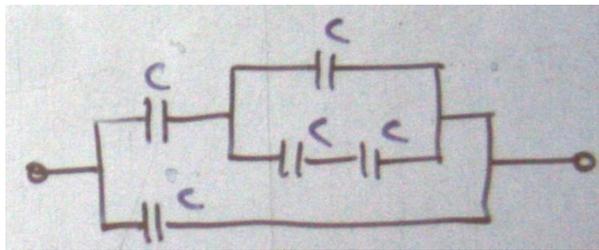
Q für alle C_i gleich

$$U = \sum_i U_i = \sum_i \frac{Q}{C_i} = Q * \sum_i \frac{1}{C_i}$$

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{U}{Q} = \sum \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

c) Netzwerke

Immer „von innen nach außen“ reduzieren



→ als Übung

5) Gespeicherte Energie und Energiedichte im elektrischen Feld

- a) Beim Laden eines Kondensators wird Energie gespeichert, beim Entladen wird sie wieder frei.

Arbeit, um Kondensator zu laden:

$$W = \int_0^{U_0} dW = \int_0^{U_0} U * dq = \int_0^{U_0} U * C * dU = C * \left[\frac{U^2}{2} \right]_0^{U_0} = \frac{C}{2} U_0^2$$

$$W = \frac{C}{2} U^2 = \frac{Q^2}{2C}$$

Im Kondensator gespeicherte Energie. Die Energie ist im elektrischen Feld gespeichert.

b) Betrachte Plattenkondensator:

$$W = \frac{C}{2} U^2 = \frac{1}{2} \underbrace{\epsilon_0 \frac{A}{d}}_C * \underbrace{E^2}_{U^2} * d^2 = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 * \underbrace{Ad}_{\text{Volumen zwischen den Platten}} = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 * V$$

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$$

Energiedichte des elektrischen Feldes (gilt allgemein)

c) Plattenkondensator: Kraft auf den Platten

Weg 1: Feld im Kondensator E

Jede Platte erzeugt davon $\frac{E}{2}$

Addition Innen: $\frac{E}{2} + \frac{E}{2} = E$

Subtraktion außen: $\frac{E}{2} - \frac{E}{2} = 0$

Ladung der Platte +Q oder -Q

⇒

$$F = \frac{E}{2} * Q$$

Weg 2: Energieerhaltungssatz:

$$dW = F * ds$$

$$dW = w * dV = w * A * ds$$

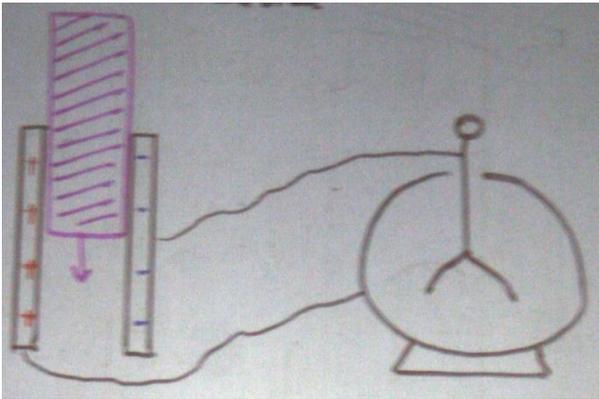
$$\Rightarrow F = w * A$$

$$= \frac{\epsilon_0}{2} E^2 * A$$

$$= \frac{\epsilon_0}{2} * \frac{U^2}{d^2} * A$$

$$= \frac{1}{2} * \underbrace{\frac{\epsilon_0 A}{d}}_{= C * U = Q} * \underbrace{U}_{E} * \frac{1}{d} = \frac{E}{2} Q$$

6) Dielektrika im elektrischen Feld



$$\left. \begin{array}{l} U \text{ sinkt} \\ Q = \text{const.} \end{array} \right\} C = \frac{Q}{U} \text{ steigt!}$$

$$C = \epsilon_r * C_0$$

mit ohne
Dielektrikum

z.B. $C = \epsilon_0 \epsilon_r * \frac{A}{d}$ für Plattenkondensator

ϵ_r : relative Dielektrizitätskonstante

$[\epsilon_0] = 1$

Erläuterung:

U nimmt ab (Faktor ϵ_r)



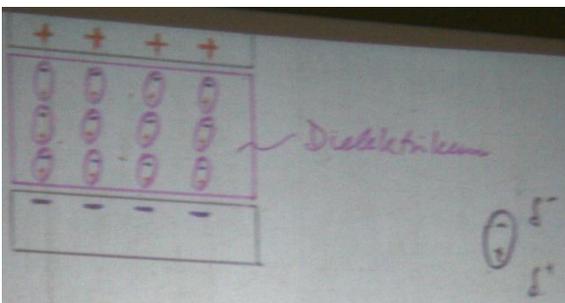
E nimmt ab (Faktor ϵ_r)



σ nimmt ab

(wegen Satz von Gauß) $\sigma = \epsilon_0 E$

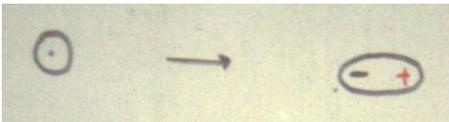
... aber es floss doch keine Ladung ab!



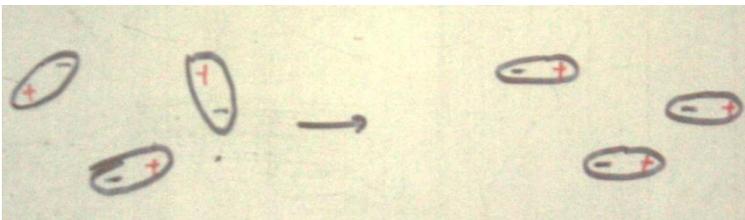
* Durch Polarisation der Atome und Moleküle im Dielektrikum sitzen Polarisationsladungen an der Oberfläche des Dielektrikums.

* Sie kompensieren einen Teil der freien Ladungen auf den Kondensatorplatten
 $\Rightarrow \sigma_{gesamt}$ nimmt ab \Rightarrow Schwächung von \vec{E} im Kondensator $\Rightarrow U$ nimmt ab
 $\Rightarrow C$ nimmt zu

Verschiebungspolarisation:



Orientierungspolarisation:



Ausrichtung permanenter Dipol-Moleküle im elektrischen Feld (Temperaturabhängig!)

Zahlenbeispiele für ϵ_r

Vakuum	1
Gase	≈ 1
Kunststoffe	2...5
Wasser $H_2O_{flüssig}$	81
Eis H_2O_{fest}	3
Glas	3...15
Quarzglas	4
Keramiken	$10^1 \dots 10^4$

7) Der Zusammenhang zwischen $\epsilon_0 \vec{E}$, \vec{D} und \vec{P}

Flächenladungsdichte σ

- | | |
|--|-----------------|
| 1) σ_F der <u>freien</u> Ladungen | $\sigma_F = D$ |
| 2) σ_P der Polarisationsladungen | $\sigma_P = -P$ |
-

$$\sigma_{ges} = \sigma_F + \sigma_P$$

$$\sigma_G = \epsilon_0 E \quad (\text{Gau\ss})$$

\Rightarrow

$$\epsilon_0 \vec{E} = \vec{D} - \vec{P} \quad (*)$$

$\epsilon_0 \vec{E}$: elektrische Feldstärke * ϵ_0 ;
Gesamtladung als Quelle

\vec{D} : elektrische Verschiebungsdichte;
Freie Ladungen als Quelle

\vec{P} elektrische Polarisation
(=Dipolmoment pro Volumen);
(neg.) Polarisationsladung als Quelle

$$\begin{aligned} (*) \Rightarrow \quad D &= \epsilon_0 E + P \\ &:= \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi E \\ &= \epsilon_0 (1 + \chi) E \\ &= \epsilon_0 \epsilon_r E \end{aligned}$$

$$\epsilon_r = 1 + \chi$$

χ : elektrische Suszeptibilität

$$-\sigma_P = P = \epsilon_0 \chi E \quad \text{Polarisation}$$

Faustregel: „Ersetze ϵ_0 im Vakuum durch $\epsilon_r * \epsilon_0$ im Dielektrikum“
(Vorsicht: Nur Faustregel)

4. Stationäre Ströme

1) Elektrischer Strom und Ohmsches Gesetz

a) Der elektrische Strom I

Ladung, die je Zeiteinheit durch den Leiterquerschnitt fließt.

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \text{ elektrischer Strom}$$

↑
Falls $I = \text{const.}$

$$[I] = 1 \text{ C/s} = 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ A}$$

$$j := \frac{I}{A} = \frac{\text{elektrische Stromstärke}}{\text{Leiterquerschnittsfläche}}$$

elektrische Stromdichte

Definition der technischen Stromrichtung: von + nach -

b) Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz

Man findet bei vielen Leitern:

$$U \sim I \quad \text{Ohmsches Gesetz}$$

$$U = R * I \quad R = \frac{U}{I}$$

R: ohmscher Widerstand des Leiters

$$[R] = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \text{ Ohm} = 1 \Omega$$

$$G := \frac{1}{R} \quad \text{heißt Leitwert}$$

$$[G] = 1 \frac{\text{A}}{\text{V}} = \frac{1}{\Omega} = 1 \text{ Siemens} = 1 \text{ S}$$

2) Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand

R hängt von Material und der Geometrie des Leiters ab. Man findet:

$$R = \rho * \frac{l}{A}$$

ρ : spezifischer Widerstand (materialabhängig)

$$[\rho] = 1 \Omega m$$

l: Länge des Leiters

A: Querschnittfläche

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

heißt elektrische Leitfähigkeit

Zahlenbeispiele für $\rho / \Omega m$:

Silber	$0,016 * 10^{-6}$	Supraleiter: $\rho \equiv 0$ (!)
Kupfer	$0,017 * 10^{-6}$	
Eisen	$0,098 * 10^{-6}$	
Hg	$0,96 * 10^{-6}$	
Hartgummi	$1 * 10^{16}$ (!)	

Umformung:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{\rho * \frac{l}{A}} = \sigma * \frac{A}{l} * U = \sigma * A * \frac{U}{l} = \sigma * A * E$$

⇒

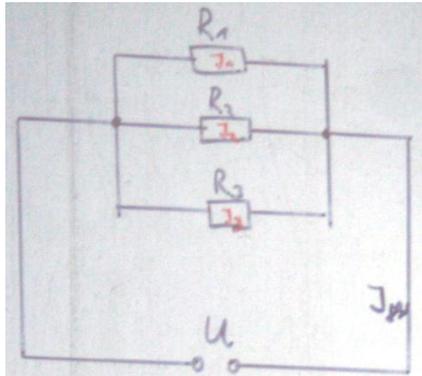
$$j = \frac{I}{A} = \sigma E$$

Andere Formulierung des Ohmschen Gesetzes

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

3) Parallel- und Serienschaltung von Widerständen

a) Parallelschaltung

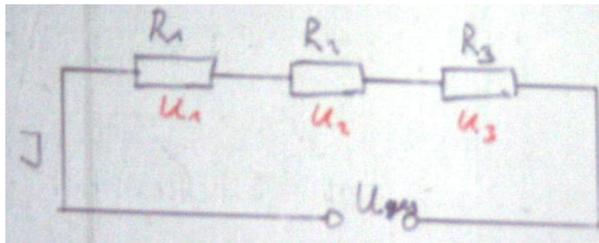


- * Spannung an allen R_i gleich
- * Ströme addieren sich zum Gesamtstrom I_{ges}

⇒

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{I_{ges}}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} + \dots = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

b) Serienschaltung (=Reihenschaltung)



- * Strom durch alle R_i gleich
- * Spannungen addieren sich zur Gesamtspannung U_{ges}

$$R_{ges} = \frac{U_{ges}}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \dots = R_1 + R_2 + \dots$$

4) Widerstandsnetzwerke: Kirchhoffsche Gesetze

a) 1. Kirchhoffsches Gesetz:

An jedem Verzweigungspunkt einer Schaltung (=Knoten) muss eben so viel Strom zufließen wie abfließen (Grund: Ladungserhaltung)

$$\sum_i I_i = 0$$

Sog. Knotenregel

Dabei: zufließende Ströme: $I > 0$

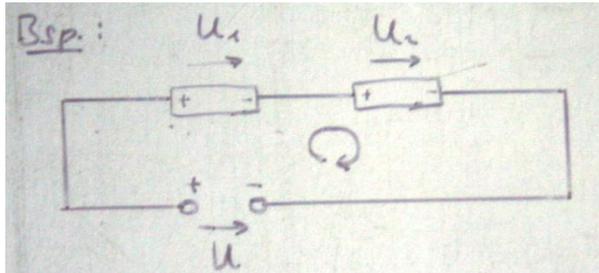
Abfließende Ströme: $I < 0$

b) 2. Kirchhoffsches Gesetz

Die Gesamtspannung längs einer geschlossenen Masche einer Schaltung ist Null

$$\sum_i U_i = 0$$

Sog. Maschenregel



$$|U_1| + |U_2| - |U| = 0$$

5) Elektrische Arbeit und Leistung

Elektrische Arbeit W:

$$dW = dQ * U = U * I * dt$$

Elektrische Leistung P:

$$P = \frac{dW}{dt} = U * I$$

Elektrische Leistung am Ohmschen Widerstand R:

$$P = U * I = R * I^2 = \frac{U^2}{R}$$

$$\text{(wegen } R = \frac{U}{I} \text{)}$$

Fließt ein elektrischer Strom durch einen Ohmschen Widerstand, so wird elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt

(wie bei Reibung im mechanischen Fall)

Einheit:

$$[P] = 1 \text{ J/s} = 1 \frac{\text{VAs}}{\text{s}} = 1 \text{ VA} = 1 \text{ W} = 1 \text{ Watt}$$

6) Spannungsquellen

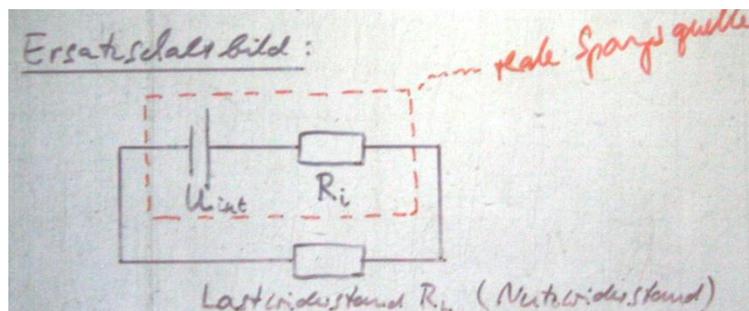
a) Arten von Spannungsquellen

- * Generator (elektromagnetisch):
mechanische Energie → elektrische Energie
- * Batterie (galvanische Elemente):
chemische Energie → elektrische Energie
- * Solarzelle (Halbleiter):
Strahlungsenergie (z.B. Licht) → elektrische Energie

b) Innenwiderstand von Spannungsquellen

Jede Spannungsquelle hat einen Innenwiderstand R_i

Ersatzschaltbild:



Folge:

$$1) \quad U_{ext} = U_{int} - R_i * I$$

↑
sog. Leerlaufspannung

- 2) Quelle erwärmt sich:
Leistung an R_i :

$$P_{int} = R_i * I^2$$

- 3) Strom vermindert sich

$$I = \frac{U}{R_L + R_i}$$

$$I_{max} = \frac{U}{R_i}$$

Sog. Kurzschlussstromstärke (bei $R_L = 0$)

Wichtig bei: - Klausuren
 - Autobatterien
 - P_{int} von Zuleitungen (Brandgefahr)
 - Erkennung verbrauchter Batterien: hohes $R_i \rightarrow$ leere Batterie

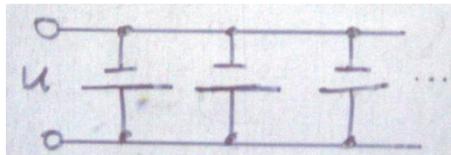
c) Schaltung von Spannungsquellen

* Parallelschaltung von Spannungsquellen

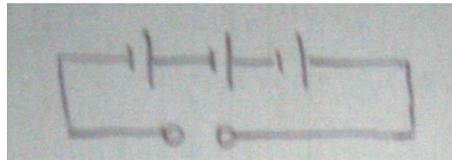
Mit gleichem U

- Senkt $R_{i,ges}$
- Erhöht Kurzschlussstromstärke

$$I_{max} = I_{max_1} + I_{max_2} + \dots$$



* Serienschaltung von Spannungsquellen



$$\Rightarrow U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

Die Leerlaufspannungen addieren sich.

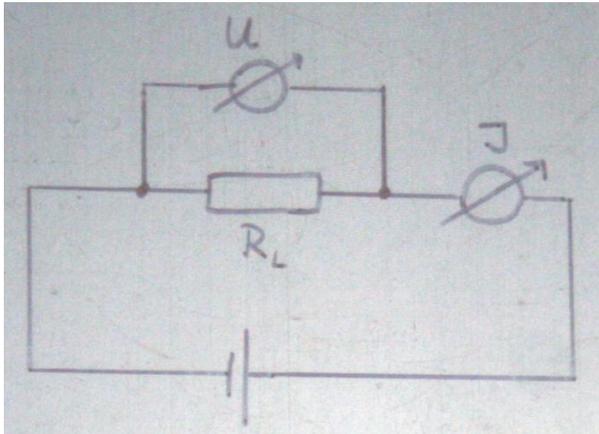
$$R_i = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + \dots$$

Die Innenwiderstände auch.

$$\Rightarrow I_{max} = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + \dots}{R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + \dots}$$

Anwendung: nicht alte und neue Batterien in Serie schalten!

7) Messung von Strömen und Spannungen



Auch Strommessgeräte (Amperemeter)

und Spannungsmessgeräte (Voltmeter)

haben einen Innenwiderstand R_i .

Um Messfehler zu minimieren, muss gelten:

$R_i \gg R_L$ für Spannungsmessung

$R_i \ll R_L$ für Strommessung

Spannungsmessgeräte benötigen einen hohen Innenwiderstand

Strommessgeräte benötigen einen kleinen Innenwiderstand

Messbereichserweiterung um Faktor n:

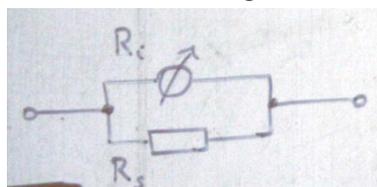
* Bei Strommessgeräten: Parallelwiderstand (Shunt)

Mit

$$R_s = \frac{R_i}{n - 1}$$

Entspricht zusätzlich $(n - 1)$ mal R_i
parallelgeschaltet

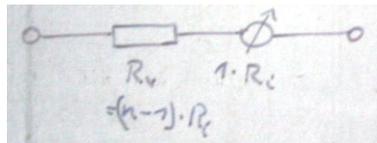
↳ Strom durch Messgerät sinkt um Faktor n



* Bei Spannungsmessgeräten: Vorwiderstand R_V

Mit $R_V = (n - 1)R_i$ entspricht zusätzlich $(n - 1)$ mal R_i in Serie geschaltet

↳ Spannungsabfall an Messgerät (= R_i) sinkt um Faktor n

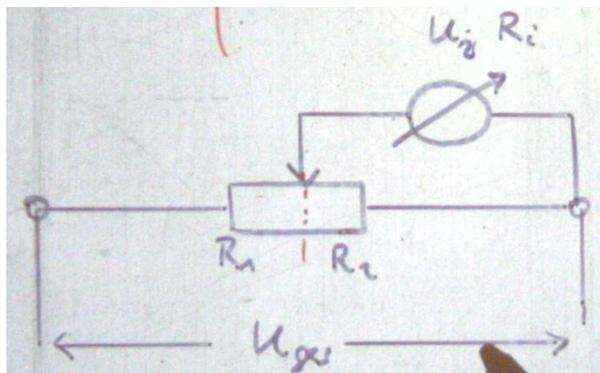
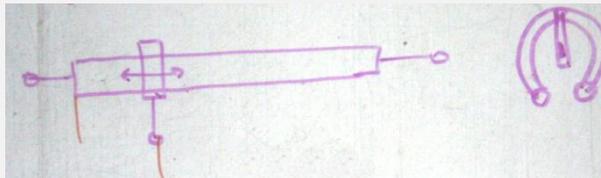


8) Potentiometer und Wheatstonesche-Brücke

a) Potentiometer

Widerstand mit verstellbarem Teilverhältnis $\frac{R_1}{R_2}$ wobei $R = R_1 + R_2 = const.$

Technische Realisierung etwa durch verschiebbaren Mittelabgriff auf einer Kohleschicht-Bahn



$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

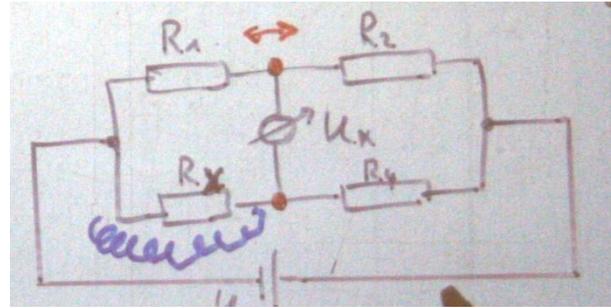
$$\frac{U_2}{U_{ges}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Nur für $R_i \rightarrow \infty$ (!!)

b) Wheatstonesche-Brücke

$$U_X = 0, \text{ falls:}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_X}{R_4}$$

9) Mikroskopische Modelle des Ladungstransportesa) Elektronentransport im Metall

- Spannungsquelle erzeugt ein zeitlich konstantes \vec{E} -Feld im Metall
- Metall enthält freie e^- (sog. Freies Elektronengas im Metall)
 $\Rightarrow e^-$ werden im \vec{E} -Feld beschleunigt

$$F = e * E$$

$$F = m * a \Rightarrow a = \frac{F}{m} = \frac{e}{m} * E$$

Spezifische Ladung der e^-

Umwandlung von elektrischer Energie in kinetische Energie

- Nach einer mittleren „Flugzeit“ τ gibt das e^- in einem Stoßprozess einen Teil seiner kinetischen Energie wieder ab:

Umwandlung von kinetischer Energie in Wärmeenergie durch Erzeugung von Phononen

(Quanten der Gitterschwingung \triangleq Wärmebewegung im Festkörper)

$$\Delta v = a * \tau = \frac{e}{m} * E * \tau = u_D \quad (*)$$

Sog. Driftgeschwindigkeit

In Δt werde ΔQ durch den Leiterquerschnitt A transportiert durch N Elektronen, die sich in der Zeit Δt um Δx voranbewegen

$$\Rightarrow \Delta Q = N * e = \underbrace{n * \Delta V}_N * e = n * \underbrace{\Delta x * A}_{\Delta V} * e = n * \underbrace{u_D \Delta t}_{\Delta x} * A * e$$

$$\Rightarrow I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = n * u_D A * e$$

$$\Rightarrow j = \frac{I}{A} \Rightarrow \boxed{j = n * e * u_D} \quad \text{Stromdichte}$$

$$= n * e * \frac{e}{m} * E * \tau$$

$$\Rightarrow j = n * e^2 * \frac{\tau}{m} * E \quad \left. \vphantom{j = n * e^2 * \frac{\tau}{m} * E} \right\} \boxed{\sigma = n * e^2 * \frac{\tau}{m}}$$

$$\text{vgl. } j = \sigma E$$

b) Andere Ladungstransportmechanismen

- * Halbleiter: erst durch thermische Anregung über eine Energielücke und/oder Dotierung werden bewegliche Ladungsträger erzeugt
↳ σ und n stark von Temperatur abhängig
- * Elektrolyte: Flüssigkeiten die Ionen enthalten
Ionen bewegen sich zur Elektrode und geben dort ihre Ladung ab.
↳ Ladungstransport

Pro Mol einwertige Ionen werden transportiert:

$$\frac{\Delta Q}{n} = N_A * e = 6,022 * 10^{23} * 1,602 * 10^{-19} \frac{C}{mol} \approx 96\,500 \frac{As}{mol}$$

Sog. Faraday-Konstante

- * Supraleiter: für $T < T_c$ (sog. Sprungtemperatur) Transport durch Cooper-Paare (je 2 e^-) mit $R = 0$

5. Stationäre Magnetfelder

1) Phänomene des Magnetismus

- | | | |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> * Gewisse Mineralien ziehen Eisenfeilspäne an * Nadeln richten sich nach Norden aus (→ Navigation) | } | schon im Altertum bekannt;
Fundort: Magnesien |
|---|---|--|

Permanentmagnete

Nordpol (**rot**) richtet sich nach Norden aus

Südpol (**grün**) richtet sich nach Süden aus

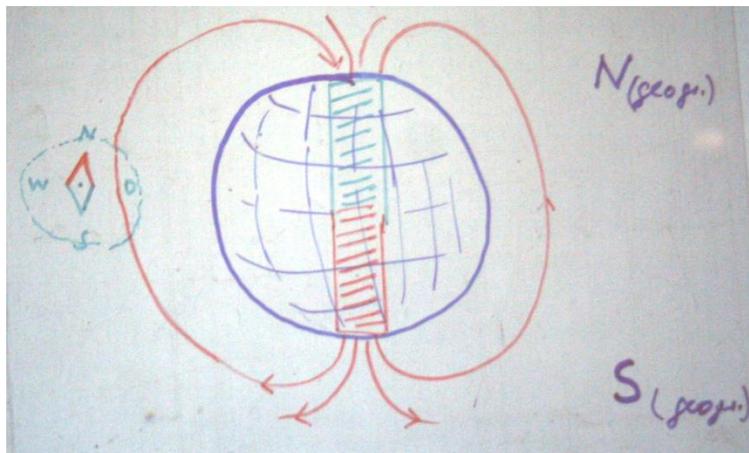
Permanentmagnete stellen magnetische Dipole dar. In einem Magnetfeld richten sie sich parallel zu den Feldlinien aus

(genauso wie elektrische Dipole im elektrischen Feld)

Ebenso in Analogie zum elektrischen Dipol:

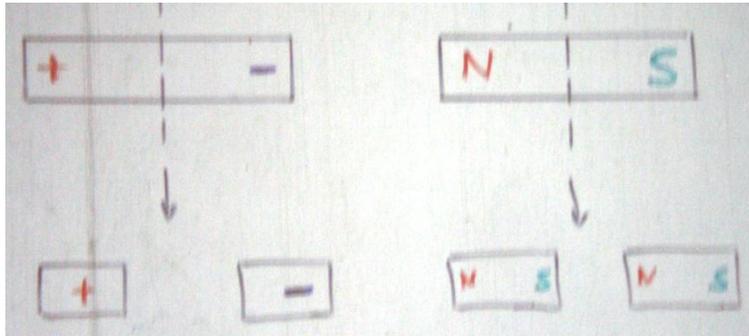
- * Gleichnamige Pole stoßen sich ab, entgegengesetzte ziehen sich an.
 - ↳ Magnethalter (Anziehung)
 - ↳ Magnetlager (Abstoßung)
- * Erde ist selbst ein magnetischer Dipol:
in ihrem Feld richten sich magnetische Dipole (bei drehbarer Lagerung) aus

Vorsicht: Erdnordpol ist magnetischer Südpol und Umgekehrt!



2) Eigenschaften magnetischer Felder

- * Magnetische Feldlinien zeigen im Außenfeld eines Magneten stets vom Nordpol weg und zum Südpol hin.
- * Experimentelle Bestimmung der Richtung magnetischer Feldlinien
 - Orientierung von magnetischen Dipolen
 - Orientierung von Eisenfeilspänen
(→reduzierte Dipole)
 - (Nordpol weist in Feldrichtung)
- * Spaltung eines magnetischen Dipols heißt wieder magnetische Dipole



elektrischer Dipol

↳ in positive und negative Ladung

magnetischer Dipol

↳ in 2 Dipole

Folge: es gibt nur magnetische Dipole, aber keine magnetische Ladungen („magnetische Monopole“), an denen die Feldlinien entspringen

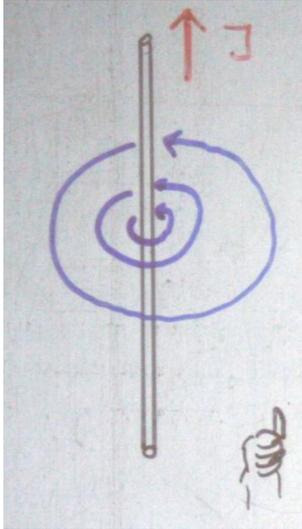


Magnetische Feldlinien sind stets geschlossen



3) Das Magnetfeld stromdurchflossener Leiter

a) Das magnetische Feld eines Stromdurchflossenen unendlich langen Leiters



- * Feldlinien sind konzentrische Kreise um den Leiter
- * Orientierung ergibt sich aus der Rechte-Hand-Regel

(Daumen zeigen dabei in technische Stromrichtung)

b) Die magnetische Erregung \vec{H} und Amperesches Durchflutungsgesetz

Für die magnetische Erregung \vec{H}
(früher: „magnetische Feldstärke“) findet man:

$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = I = \int \vec{j} * d\vec{A}$$

Amperesches Durchflutungsgesetz (*)

*Wegintegral von \vec{H} über geschlossene Kurve
= umschlossener Strom*



Zusammenhang zwischen Strom und resultierendem Magnetfeld

$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = I \Rightarrow [H] = 1 \frac{A}{m}$$

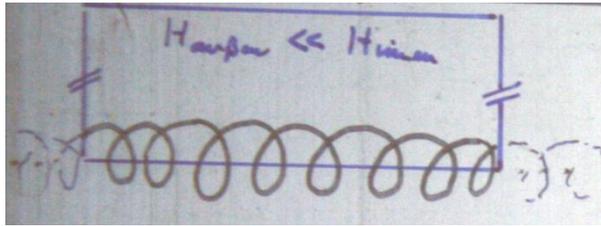
c) Anwendung: ∞ -langer Draht

Kreisbahn mit Radius r symmetrisch um Draht mit I :

$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = H * 2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

d) Anwendung: ∞ -lange, dünne Zylinderspule



- N: Windungszahl
- l: Spulenlänge
- I: Strom

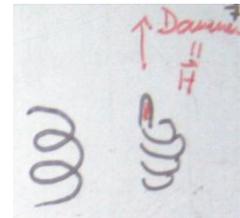
$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = H_{innen} * l = N * I$$

↑
}

Blauer Pfad
umschlossene Stromstärke

⇒ $H = I * \frac{N}{l}$

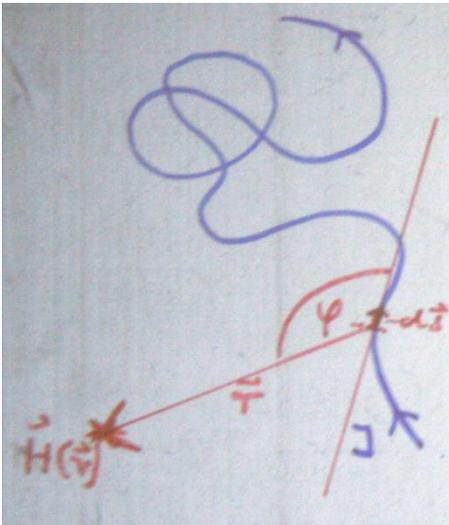
Vorzeichen von \vec{H} :
aus der rechte-Hand-Regel für Spulen
(technische Stromrichtung!)



4) Das Gesetz von Biot-Savart

Problem: Beliebiger geformter Stromdurchflussener Draht; berechne $\vec{H}(\vec{r})$.

Lösung: jedes Leiterstückchen $d\vec{s}$ liefert Beitrag zu $\vec{H}(\vec{r})$

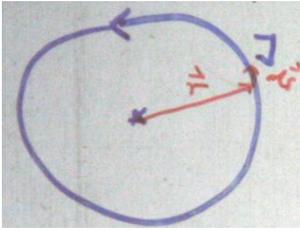


$$dH = \frac{I * ds}{4\pi r^2} * \sin \varphi$$

Gesetz von Biot-Savart

Anwendungsbeispiel:

H im Mittelpunkt eines Kreisstromes \rightarrow „kurze Spule“



$d\vec{s} \perp \vec{r}$ überall $\rightarrow \sin \varphi = 1$

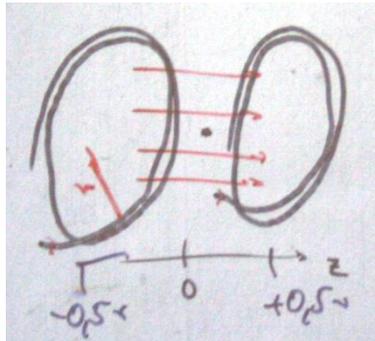
$$\Rightarrow H = \int_0^{2\pi} dH = \frac{I}{4\pi r^2} \int_0^{2\pi} ds * 1$$

$$= \frac{I}{4\pi r^2} * 2\pi r \Rightarrow H = \frac{I}{2r}$$

5) Anwendung: Helmholtz-Spulenpaare

Erzeugung besonders homogener magnetischer Felder durch Helmholtz-Spulenpaare

Zwei kurze Spulen ($l \ll r$) im Abstand r , beide gleichsinnig vom Strom I durchflossen



6) Kräfte auf bewegte freie Ladungen

a) Die magnetische Flussdichte

Definition:

$$\vec{B} = \mu_0 * \mu_r * \vec{H}$$

\vec{B} : magnetische Flußdichte,
„magnetisches Feld“

\vec{H} : magnetische Erregung

μ_0 : magnetische Feldkonstante

μ_r : (relative) magnetische Permeabilität:
materialabhängig

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

Vgl.

$$\epsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

$\mu_r = 1$ im Vakuum

$\mu_r \neq 1$ in Materie [μ_r] = 1

$$[B] = 1 \frac{Vs}{Am} * 1 \frac{A}{m} = \frac{1Vs}{m^2}$$

$$\underline{\underline{= 1 T = 1 Tesla = 10^4 Gauss}}$$

b) Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld

Statische Magnetfelder üben Kräfte nur auf bewegte Ladungen aus

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

Sog. Lorentz-Kraft

Kreuzprodukt mit:

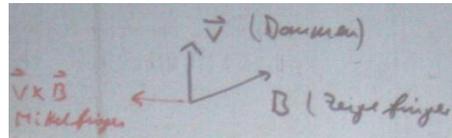
$$1) \quad |\vec{v} \times \vec{B}| = v * B * \sin \varphi$$

$$\text{mit } \varphi = \sphericalangle(\vec{v}, \vec{B})$$

$$2) \quad \vec{v} \times \vec{B} \perp \vec{v}$$

$$\vec{v} \times \vec{B} \perp \vec{B}$$

3) Orientierung von $\vec{v} \times \vec{B}$ aus der Drei-Finger-Regel der rechten Hand:



c) Bahnen freier Ladungsträger im Magnetfeld

$$1. \text{ Fall} \quad \vec{v} \parallel \vec{B} \quad \Rightarrow \quad \vec{v} \times \vec{B} = 0$$

$$\text{keine Lorentz-Kraft} \quad \Rightarrow \quad \vec{v} = \text{const.}$$

$$2. \text{ Fall} \quad \vec{v} \perp \vec{B}$$

$$\Rightarrow \quad \vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}) \perp \vec{v}$$

$$\Rightarrow \quad \vec{v} \neq \text{const.} \text{ aber } |\vec{v}| = \text{const.}$$

nur Richtung ändert sich

$$\Rightarrow \quad \vec{F}_L \text{ ist Zentralkraft} \Rightarrow \text{Kreisbahn}$$

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

$$\Rightarrow r = \frac{m * v}{q * B}$$

3. Fall \vec{v} beliebig

$$\Rightarrow \quad \text{zerlege } \vec{v} \text{ in } \vec{v}_{\parallel} \parallel \vec{B} \text{ und } \vec{v}_{\perp} \perp \vec{B}$$

$$\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$$

$$v_{\parallel} = v * \cos \varphi$$

$$v_{\perp} = v * \sin \varphi$$

\Rightarrow 2 unabhängige Bewegungen überlagern sich:

1) Translation mit $\vec{v}_{\parallel} = \text{const.} \parallel \vec{B}$

2) Kreisbahn um \vec{B} mit $|\vec{v}_{\perp}| = \text{const.}$ und $r = \frac{mv_{\perp}}{qB}$

insgesamt: Spiralbahn um \vec{B}

Anwendung: Das Massenspektrometer in der Chemie

7) Kräfte auf Ladungen im stromdurchflossenen Leiter

a) Herleitung

Auf bewegte Ladungsträger im Leiter wirkt die Lorentz-Kraft.

Beitrag eines Ladungsträgers Q mit Geschwindigkeit $\vec{v} \parallel \vec{l}$ zum Strom I im Leiter der Länge $|\vec{l}|$.

$$I = \frac{Q}{t} \stackrel{t = \frac{l}{v}}{=} \frac{Q \cdot v}{l} \Rightarrow I \cdot \vec{l} = Q \cdot \vec{v}$$

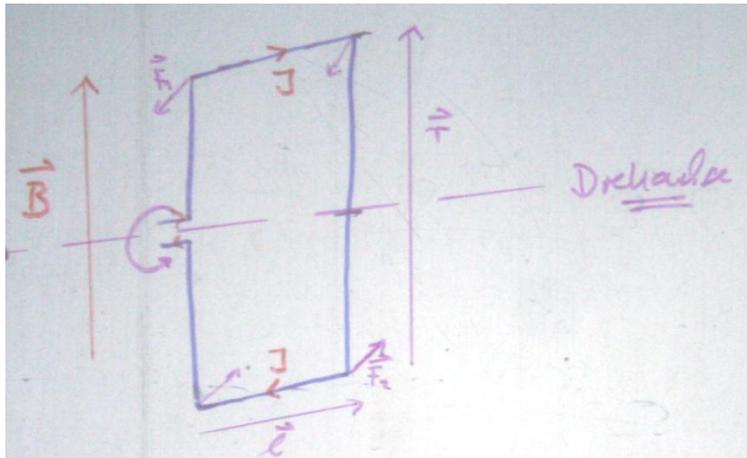
$$\stackrel{\text{da } \vec{l} \parallel \vec{v}}{\implies} I \cdot \vec{l} \times \vec{B} = \underbrace{Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}}_{\text{Lorentz-Kraft}}$$

⇒

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

Kraft auf stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

b) Drehmoment auf rechteckige Leiterschleife



Motivation:

Wie funktioniert ein Elektromotor?

$$\vec{F}_1 = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

$$\vec{F}_2 = -I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

$$\vec{M} = \left(\frac{\vec{r}}{2} \times \vec{F}_1 \right) + \left(-\frac{\vec{r}}{2} \times \vec{F}_2 \right)$$

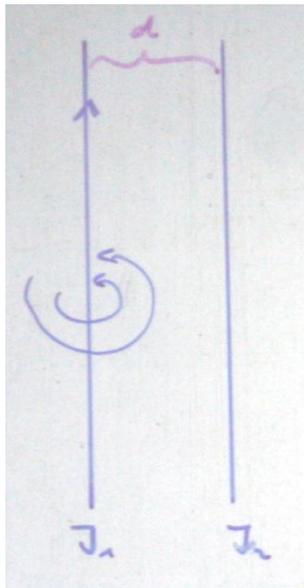
$$\vec{M} = I * \underbrace{\vec{r} \times \vec{l}}_{\vec{A}} \times \vec{B} = I * \underbrace{\vec{A}}_{:= \vec{m} \times \vec{B}} \times \vec{B} \quad \text{Drehmoment auf Leiterschleife}$$

wobei:

$$\vec{m} := I * \vec{A}$$

magnetischer Moment der Leiterschleife

Anwendung: Elektromotor, Drehspulinstrument

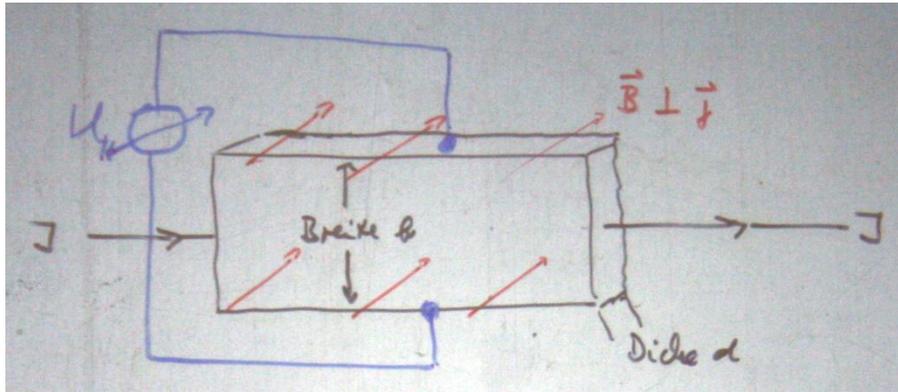
c) Kräfte zwischen parallelen stromdurchflossenen LeiternDraht 2 im \vec{B} -Feld von Draht 1
Abstand: d

$$B_1 = \mu_0 * H_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d_0}$$

$$|F_2| = I_2 * \underbrace{l}_{\vec{l} \perp \vec{B}_1} * B_1 = \mu_0 * \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

d) Der HALL-Effekt

- Experiment:
- Bandförmiger Leiter mit $\vec{j} \perp \vec{B}$
 - Man beobachtet Spannung $\perp \vec{j}, \vec{B}$, die sog. HALL-Spannung U_H
 - Ursache: Lorentz-Kraft



Es gilt:

$$I = j * A = j * b * d = neu * bd$$

$$\Rightarrow u = \frac{I}{nebd}$$

Ferner: Lorentz-Kraft verschiebt Ladungsträger solange $\perp \vec{j}, \vec{B}$, bis Kräftegleichgewicht zwischen Lorentz-Kraft und Coulomb-Kraft wieder hergestellt ist.

$$\Rightarrow q * \underbrace{u * B}_{\text{da } \sin \varphi = 1} = q * E_H$$

$$\Rightarrow E_H = u * B = \frac{I}{nebd} * B$$

$$\Rightarrow U_H = E_H * b = \frac{A}{ne} * \frac{I * B}{d} = A_H * \frac{I * B}{d}$$

$$A_H = \frac{1}{ne} \text{ heißt Hall-Koeffizient}$$

↳ experimentelle Bestimmung der Ladungsträgerkonzentration und des Vorzeichens der Ladungsträger

↓

- u_D - Vorzeichen
 $-q * \vec{v} \times \vec{B}$
gleiche Ablenkrichtung
 \Rightarrow entgegengesetztes u_H (!)

8) Materie in Magnetfeld: \vec{H} , \vec{M} und \vec{B}

Auch die Atome und Moleküle können

- permanente
- und induzierte

magnetische Momente beziehen

$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = I_{molekular}$$

Ursache von \vec{H} sind makroskopische Ströme

$$\oint \vec{M} * ds = I_{atomar}$$

atomare Beiträge

\vec{M} : Magnetisierung

$$\oint \vec{B} * d\vec{s} = \mu_0(I_{molekular} + I_{atomar})$$

Gesamteffekt (analog zu \vec{E} im elektrischen Fall)

Umformungen:

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H} + \vec{M}$$

\Rightarrow

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \underbrace{\mu_0(1 + \kappa)}_{\mu_r} \vec{H}$$

κ : magnetische Suszeptibilität

$$\vec{M} = \kappa \vec{H}$$

wobei:

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V}$$

(Dipolmoment pro Volumen,
analog zu \vec{P} im elektrischen Feld)

Analogie:

$$\vec{H} \leftrightarrow \vec{D}$$

$$\vec{M} \leftrightarrow \vec{P}$$

$$\vec{B} \leftrightarrow \vec{E}$$

9) Diamagnetismus, Paramagnetismus, Ferromagnetismus

a) Diamagnetismus

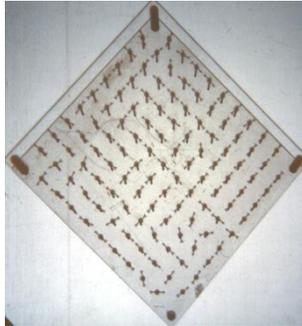
- durch äußeres Magnetfeld in den Atomen induzierte magnetische Momente
- dem äußeren Feld entgegengerichtet
(→ Lenzsche Regel)
- ↳ $\kappa < 0$ $|\kappa|$ sehr klein (z.B. 10^{-4})
- $\mu_r < 1$
- bei allen Atomen vorhanden

b) Paramagnetismus

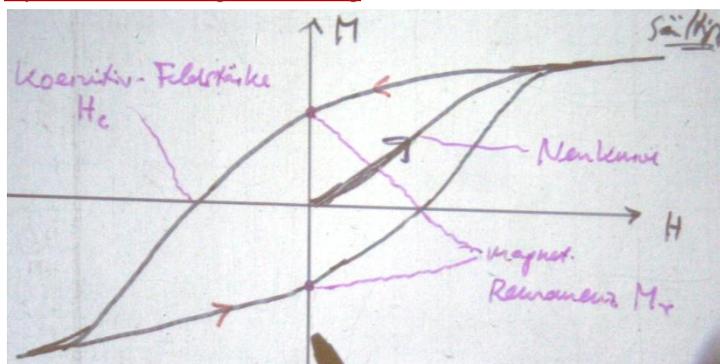
- bei Atomen mit permanentem Dipolmoment
- Ausrichtung der Dipole im externen Feld
- ↳ Temperaturabhängig (vgl. Orientierungspolarisation)
- ↳ relativ klein ($\kappa < 10^{-2}$ typ.)
- ↳ $\kappa > 0, \mu_r > 1$

c) Ferromagnetismus

- bei bestimmten Materialien, so genannten Ferromagneten, treten magnetisch geordnete Bereiche, so genannte Bezirke, auf



- Beispiele: Fe, Co, Ni
- ↳ κ sehr hoch (Fe: $\kappa \approx 10^4$)
- Polarisation durch
 - Lochwandverschiebung
 - Umorientierung weißscher Bezirke
 - geschieht unstetig, so genannte Barkhausensprünge
- Hysterese der Magnetisierung



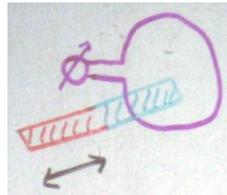
6. Elektromagnetische Induktion

1) Induktionsgesetz und magnetischer Fluss

Analog zum elektrischen Fluss definiert man den magnetischen Fluss

$$\Phi_M := \int_{\text{Fläche } A} \vec{B} * d\vec{A}$$

Experiment:



Man findet:

Ändert man den magnetischen Fluss durch eine Leiterschleife, so wird in der Leiterschleife eine Spannung U_{ind} induziert mit:

$$U_{ind} = \oint \vec{E} d\vec{s} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (*) \text{ Induktionsgesetz }$$

Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Feld, das den magnetischen Fluss umschließt (neu: geschlossene elektrische Feldlinien!)

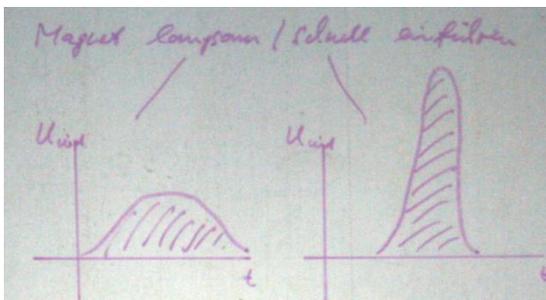
$$U_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$\Delta\Phi =$

$$\int d\Phi = - \int U_{ind}(t) dt = \Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$$

sog. Spannungsstoß
hängt von $\Delta\Phi$ ab

Experiment:

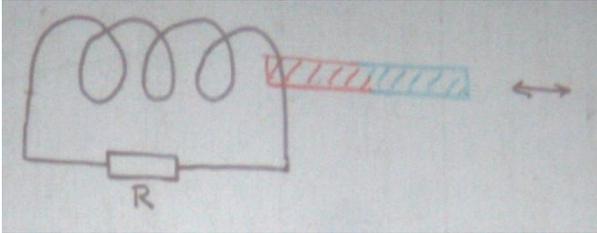


Spule = Serienschaltung von N Windungen

⇒

$$U_{ind} = -N * \frac{d\varphi}{dt}$$

(gleiches φ in jeder der N Windungen)



$R \neq \infty \Rightarrow \frac{d\varphi}{dt}$ ruft Strom in Spule hervor (sog. Induktionsstrom)

Minuszeichen in (*) bedeutet:

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er der Änderung des magnetischen Flusses entgegenwirkt.

(Lenzsche Regel) (aus Energieerhaltungssatz [EES])

Folgen:

- 1) Diamagnetismus durch Induktion atomarer Ströme
↳ $\mu_r < 1$ für Diamagnetika
- 2) Induktionsströme kompensieren externes Magnetfeld im Supraleiter
⇒ $\vec{B} = 0$
(Meissner-Effekt)

2) Erzeugung von Induktionsspannungen

$$U_{ind} = - \frac{d}{dt} \underbrace{\int \vec{B} * d\vec{A}}_{\varphi_M}$$

$$\vec{B} * d\vec{A} = |\vec{B}| * |d\vec{A}| * \cos \varphi$$

⇒ Drei Möglichkeiten U_{ind} hervorzurufen

- a) Änderung von \vec{B}
- b) Änderung von \vec{A}
- c) Änderung des Winkels zwischen \vec{B} und \vec{A}

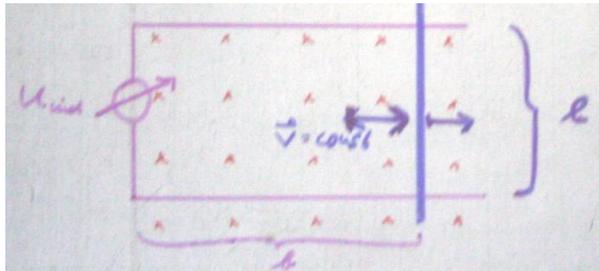
a) Änderung von \vec{B}

$$U_{ind} = -N * \vec{A} * \frac{d\vec{B}}{dt}$$

(falls $\vec{B} = const$ über \vec{A})b) Änderung von \vec{A}

$$U_{ind} = -N * \vec{B} * \frac{d\vec{A}}{dt}$$

$$= -N * \vec{B} * \frac{d\vec{A}}{dt}$$

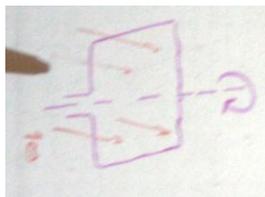
falls Richtung von \vec{A}, \vec{B} fest.Beispiel: Bewegter Bügel in rechteckiger Leiterschleife B_{\perp} Zeichenebene = const

$$\varphi = B * l * b$$

$$\dot{\varphi} = B * l * \dot{b} = B * l * v \quad \text{mit } v = \frac{db}{dt}$$

⇒

$$U_{ind} = -B * l * v$$

c) Änderung von φ 

$$\varphi = \pm(\vec{B}, \vec{A})$$

$$\varphi = \vec{B} * \vec{A} = B * A * \cos \varphi$$

(falls $\vec{B} = const$)

Beispiel (sehr wichtig):

Rotation einer Spule mit N Windungen mit $\omega = \text{const}$ ($\varphi = \omega t$) im homogenen \vec{B} -Feld mit $\vec{B} \perp$ Drehachse der Spule

$$U_{\text{ind}}(t) = -\frac{d}{dt}(\varphi(t)) = -\frac{d}{dt}(N * A * B * \cos(\omega t))$$

$$= \underbrace{N * B * A * \omega}_{\text{Amplitude der induzierten sinusförmigen Wechselspannung}} * \sin(\omega t)$$

Amplitude der induzierten sinusförmigen Wechselspannung

Anwendungen:

- Generatoren in Kraftwerken
- Fahrraddynamo
- Drehzahlmesser, elektronischer Tachometer
- ⋮

3) Selbstinduktion und Induktivität

Stromänderung in einer Spule ($\frac{dI}{dt}$) hat Änderung des magnetischen Flusses durch die Spule zur Folge

⇓

Induktion einer Spannung in dieser Spule, die dieser Stromänderung entgegenwirkt (nach Lenzscher Regel):

sog. Selbstinduktion

$$U_{\text{ind}} = -L * \frac{dI}{dt}$$

L : Induktivität

$$[L] = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

$$\text{vgl.: } [C] = 1 \frac{\text{As}}{\text{V}}$$

Serienschaltung von Induktivitäten:

$$L_{\text{ges}} = \sum_i L_i = L_1 + L_2 + L_3 \dots$$

Beweis: Klar: $U_{\text{ind},i}$ aus (*) addieren sich

Parallelschaltung von Induktivitäten

$$\frac{1}{L_{ges}} = -\frac{1}{U_{ind}} * \frac{dI_{ges}}{dt} = -\frac{1}{U_{ind}} \sum_i \frac{dI_i}{dt}$$

Die $\frac{dI}{dt}$ der Einzelströme addieren sich

⇒

$$\frac{1}{L} = \sum_i \frac{1}{L_i} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$$

Beispiel: Induktivität einer langen Zylinderspule

$$H = I * \frac{N}{l}$$

$$\phi = B * A = \mu_r * \mu_0 * H * A = \mu_r * \mu_0 * I * \frac{N}{l} * A$$

$$U_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\underbrace{\mu_r * \mu_0 * \frac{N^2}{l} * A}_{L} * \frac{dI}{dt}$$

$$L = \mu_r * \mu_0 * A * \frac{N^2}{l}$$

Allgemein:

$$L = +f * \mu_r * \mu_0 * A * \frac{N^2}{l}$$

f : Formfaktor der Spule

$f = 1$ für lange Spule

4) Energie und Energiedichte des Magnetfeldes

Das Magnetfeld enthält ebenso wie das elektrische Feld Energie.

Berechnung:

Beim Einschalten des Stromes wird (gegen U_{ind}) von der Spannungsquelle Arbeit verrichtet, um das Magnetfeld aufzubauen

$$W_m = \int_{t=0}^{\infty} (-U_{ind} * I) dt = + \int_{t=0}^{\infty} L * I * \frac{dI}{dt} dt = \int_{I=0}^I L * IdI = \frac{1}{2} L * I^2$$

⇒

$$W_m = \frac{1}{2} L * I^2 \quad \text{für Induktivitäten (allg.)}$$

$$\text{vgl.: } W_{el} = \frac{1}{2} C U^2 \quad \text{für Kapazitäten}$$

Energiedichte $W/V = w$ in langer Spule (homogenes Feld)

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} L * I^2 * \frac{1}{V} = \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 A \frac{N^2}{L} Q^2 \frac{1}{A * l} = \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 \left(I * \frac{N}{L} \right)^2 = \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 H^2$$

Energiedichte im Magnetfeld (gilt allg.)

$$w = \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} HB$$

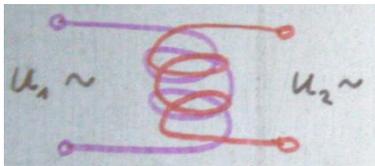
$$\text{vgl.: Energiedichte im elektrischen Feld}$$

$$v = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} DE$$

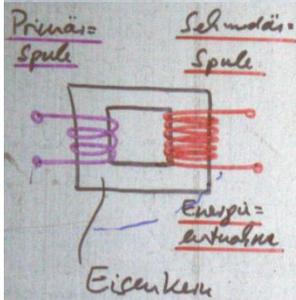
5) Transformator

Transformator:

2 aufeinander gewickelte Spulen
(z.B. auf gemeinsamem Eisenkern)



⇓
gleiches $\frac{d\phi}{dt}$ durch beide Spulen



⇓
induzierte Spannung pro Windung ist
in beiden Spulen gleich

$$\frac{U_{ind1}}{U_{ind2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Sinusspannung an Spule 1 (Amplitude U_1)

⇒ Sinusspannung (phasenverschoben) an Spule 2 (Amplitude U_2)

Amplituden:

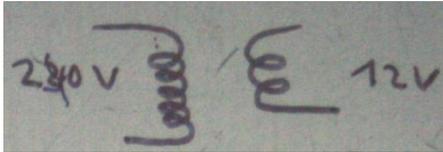
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

wegen Energieerhaltung gilt:

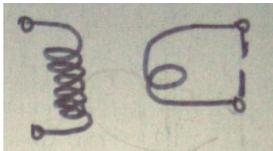
$$\text{el. Leistung} \quad \underbrace{I_1 * U_1}_{\text{Primär}} = \underbrace{I_2 * U_2}_{\text{Sekundär}} \Rightarrow \boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}}$$

Anwendungen:

1) Netztrafo:



2) Schweißtrafo:



Ziel: hohe Stromstärke

3) Hochspannungstrafo: Ziel: hohe Spannung

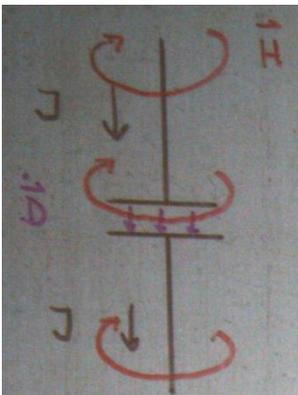
4) Überlandleitung mit Leitungswiderstand R
Ziel: geringer Wärmeverlust in Leitungen

$$P_V = R * I^2, \quad P_{Nutz} = U * I \approx \text{const.}$$

Bsp.: U um Faktor 100 erhöhen
 I um Faktor 100 senken

Verlustleistung: P_V um Faktor 10 000 senken (!)

7. Maxwell-Gleichungen und elektromagnetische Wellen



1) Der Maxwellsche Verschiebungsstrom

Strom I beim Laden von Plattenkondensator

Beim Draht:

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = I$$

Beobachtung: \vec{H} umschließt auch den Kondensator, obwohl dort $I = 0$!

Grund: Im Kondensator ändert sich die elektrische Verschiebungsdichte \vec{D} :

$$I = \dot{Q} = \frac{d}{dt} \int \vec{D} d\vec{A} = \frac{d}{dt} \int \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} d\vec{A}$$

↑ ↑
 im Leiter auf dem
 Kondensator

Ladung im Kondensator sog. Verschiebungsstrom

Stromdichte \vec{j} im Leiter \triangleq ∇ Stromdichte \vec{D} im Isolator.

2) Die Maxwell-Gleichungen

Man findet:

1)

$$\oint \vec{B} * d\vec{s} = \mu_0 \mu_r \left(I + \frac{d}{dt} \int \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} d\vec{A} \right)$$

Ampere-Maxwell-Gesetz = 1. Maxwellsche Gleichung

2)

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} * d\vec{A}$$

Induktionsgesetz = 2. Maxwellsche Gleichung

3)

$$\oint \vec{E} * d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

Gaußscher Satz

4)

$$\oint \vec{B} * d\vec{A} = 0$$

Quellenfreiheit des Magnetfeldes

(„Es gibt keine magnetischen Ladungen“)

Diese 4 sogenannten Maxwellsche Gleichungen bilden die Grundlage der klassischen Elektrodynamik

Materialgleichungen:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu_r \mu_0 \vec{H} \end{aligned}$$

gelten zusätzlich

3) Elektromagnetische Wellen

Zeitlich veränderliches \vec{E} -Feld erzeugt \vec{B} -Feld (1. Maxwellsche Gleichung)

Zeitlich veränderliches \vec{B} -Feld erzeugt \vec{E} -Feld (2. Maxwellsche Gleichung)

\vec{B} und \vec{E} erzeugen sich wechselseitig

↳ Ausbreitung als Welle möglich

Man kann durch einsetzen zeigen (Fleißaufgabe...):

Die Maxwell-Gleichungen erfüllen die Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2}$$

Es gilt:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Wellengleichungen für \vec{E} und \vec{B}

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Wobei:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}}$$

in Materie

bzw.

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

im Vakuum

$$c_0 = 2,997 * 10^8 \frac{m}{s}$$

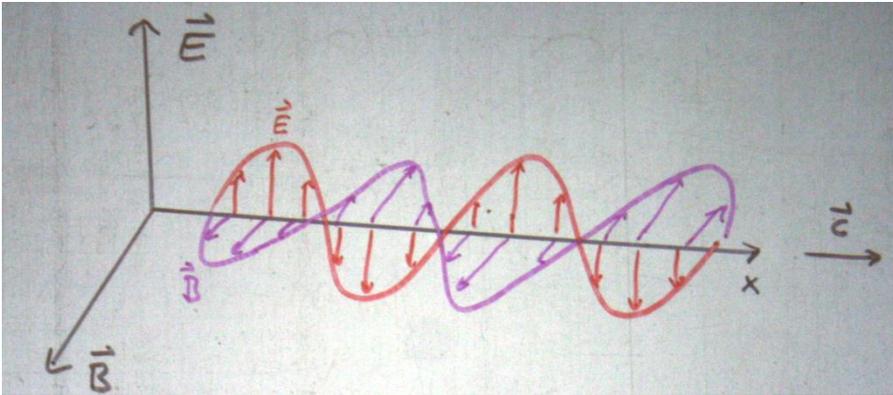
Vakuums-Lichtgeschwindigkeit

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

heißt Brechungsindex (>1) des Mediums

① Elektromagnetische Wellen sind transversale Wellen

② $\vec{E} \perp \vec{B}$



Polarisation (bei transversalen Wellen):

- * \vec{E} schwingt in einer Ebene
 - ↳ linear polarisiert
- * \vec{E} läuft auf Kreis (Ellipse)
 - ↳ zirkular (elliptisch)
- * \vec{E} hat alle Richtungen $\perp \vec{x}$
 - ↳ unpolarisierte Welle

4) Energiedichte, Intensität und Poynting-Vektor

Eine elektromagnetische Welle transportiert Energie.

Energiedichte ist für elektrisches und magnetisches Feld gleich:

$$\begin{aligned}
 w_{el} = w_{mag} &\Leftrightarrow \frac{\epsilon_0}{2} E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} \\
 &\Rightarrow \epsilon_0 \mu_0 E^2 = B^2 \\
 &\Rightarrow \boxed{E = cB}
 \end{aligned}$$

Gesamtenergiedichte:

$$\begin{aligned}
 w = w_{el} + w_{mag} &= \epsilon_0 E^2 \\
 &= \epsilon_0 c B E = \frac{BE}{\mu_0 c}
 \end{aligned}$$

Intensität (=Energie pro Zeit und Fläche) momentan:

$$\begin{aligned}
 I_m = c * w = \epsilon_0 c^2 B E &= \frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 \mu_0} B E = \frac{BE}{\mu_0} \\
 &\boxed{I_m = \frac{BE}{\mu_0}}
 \end{aligned}$$

Poynting-Vektor \vec{S} :

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

hat den Betrag von I_m und zeigt in Ausbreitungsrichtung der Welle

Es gilt für ebene Wellen:

$$E = E_0 \sin(\omega t * kx)$$

$$B = B_0 \sin(\omega t * kx)$$

$$w = \frac{EB}{\mu_0 c} = \frac{E_0 B_0}{\mu_0 c} * \underbrace{\sin(\omega t * kx)}_{\text{Mittelwert: } \frac{1}{2}}$$

Zeitlicher Mittelwert der Energiedichte des elektromagnetischen Feldes:

$$\bar{w} = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0 c} = \frac{E_{eff} B_{eff}}{\mu_0 c}$$

$$\left. \begin{array}{l} E_{eff} := \frac{E_0}{\sqrt{2}} \\ B_{eff} := \frac{B_0}{\sqrt{2}} \end{array} \right\} \text{sog. Effektivwerte} \Rightarrow E_{eff} = \frac{E_0 B_0}{2}$$

⇒

Intensität I :

$$I = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} = \frac{E_{eff} B_{eff}}{\mu_0}$$

In Materie $\epsilon_0 \rightarrow \epsilon_0 * \epsilon_r$

$\mu_0 \rightarrow \mu_0 * \mu_r$

5) Erzeugung elektromagnetischer Wellen: der Hertzsche Dipol u.a.

Allgemein:

Erzeugung von \dot{I} durch beschleunigte Ladungen

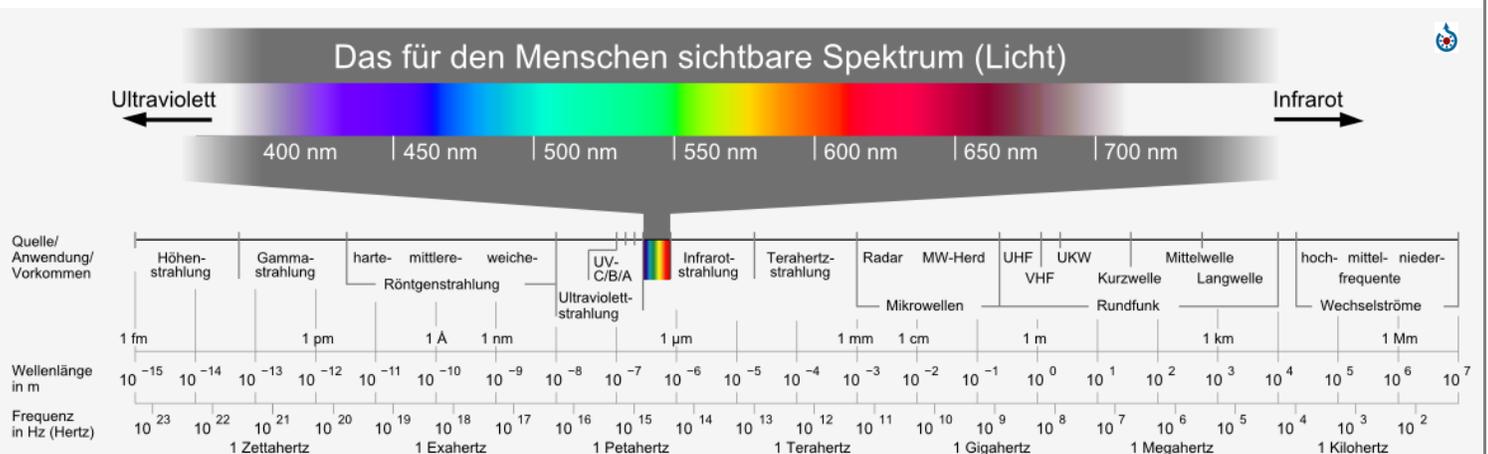


Abstrahlung elektromagnetischer Wellen

Drei Wichtige Beispiele:

- Synchrotron-Strahlung
- Röntgenstrahlung
- Hertzscher Dipol

Elektromagnetische Strahlung



8. Geometrische Optik

1) Einteilung der Optik

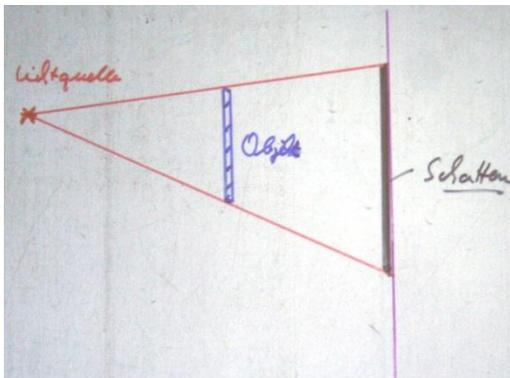
- * Geometrische Optik (=Strahlenoptik)
 - ↳ Licht als Lichtstrahlen
 - ↳ Beispiel: Wirkungsweise einer Lupe
- * Wellenoptik
 - ↳ Licht als Welle → Beugung, Interferenz
- * Quantenoptik
 - ↳ Licht als Teilchen: Lichtquanten = Photonen
 - ↳ Beispiel: Funktion eines Lasers

Grundprinzipien der geometrischen Optik

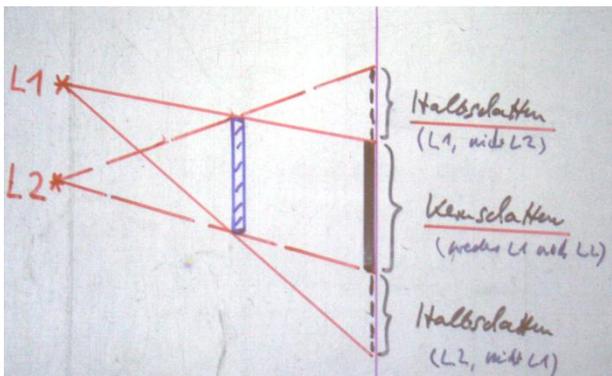
Alle Teile eines Lichtbündels („Lichtstrahlen“) sind unabhängig voneinander, d.h. keine Interferenz im homogenen Medium geradlinige Ausbreitung von Licht (keine Beugung)

Reflektionsgesetz und Brechungsgesetz

Beispiel: Schattenbildung (geometrische Optik)



Zwei (oder mehrere) Lichtquellen:



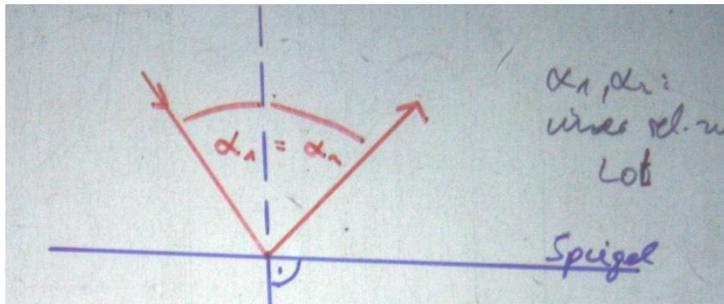
2) Reflexionsgesetz und ebener Spiegel

- a) Wird Licht an einer glatten Grenzfläche reflektiert, gilt:

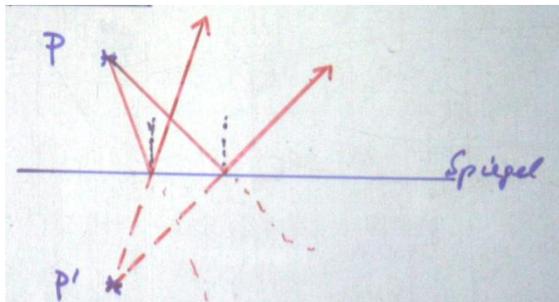
$$\text{Einfallswinkel} = \text{Ausfallswinkel}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

Reflexionsgesetz



- b) Spiegelbilder



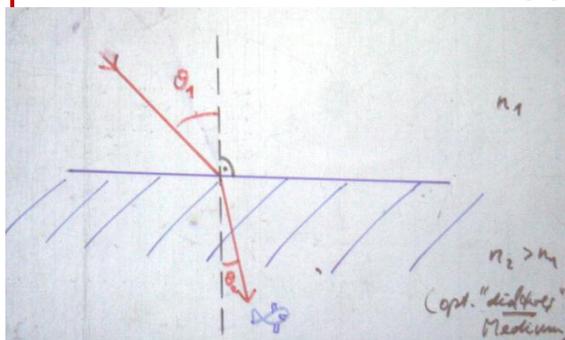
3) Brechungsgesetz und Fermatsches Prinzip

- a)

Trifft Licht auf eine Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex ($n_1 \neq n_2$), so findet Lichtbrechung statt. Es gilt:

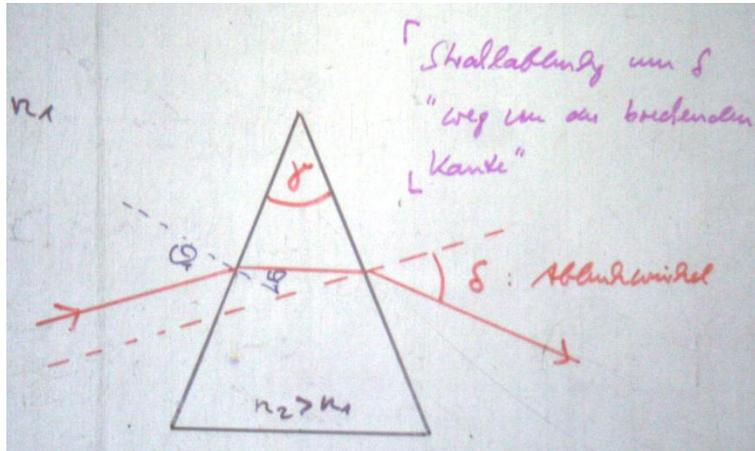
$$n_1 \sin(\theta_1)$$

Brechungsgesetz



Beim Eintritt in das optisch dichtere Medium wird das Licht zum Lot hin gebrochen (und umgekehrt)

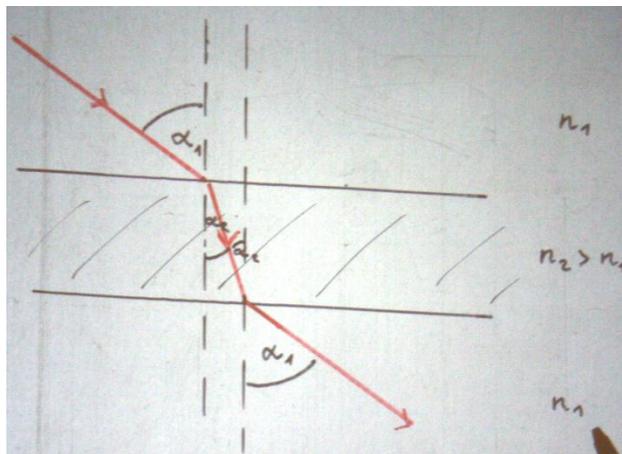
b) Ablenkung eines Lichtstrahls im Prisma



Ablenkwinkel φ ist minimal für symmetrischen Durchgang

c) Planparallele Platte

↳ Parallelverschiebung des Lichtstrahls durch Brechung



Fermatsches Prinzip:

Das Licht wählt den zeitlich kürzesten Weg von A nach B („Laufzeitminimierung“)

4) Totalreflektion

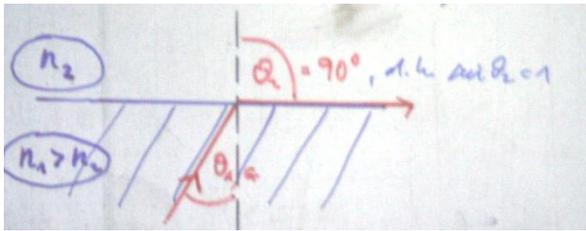
Tritt der Strahl vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium über (z.B. $H_2O \rightarrow$ Luft), und nur dann, gilt wegen

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$\Rightarrow \sin \theta_2 = 1$ falls:

$$\sin \theta_{1Gr} = \frac{n_2}{n_1}$$

θ_{1Gr} : **Grenzwinkel der Totalreflektion**
(Streifender Ausfallsstrahl)



Falls $\theta_1 > \theta_{1Gr}$, existiert keine Lösung

für $\theta_2 \Rightarrow$ es gibt keinen gebrochenen Strahl \Rightarrow so genannte Totalreflektion. Grenzfläche verhält sich wie ein Spiegel.

„echte“ Totalreflektion
an der Wasseroberfläche

kontinuierliche Variation
von n (mit der Dichte der
Luft)

Bsp1: Taucher blickt unter flachem Winkel gegen die
Wasseroberfläche (von unten)

\downarrow kann nicht heraussehen

Bsp2: Luftspiegelung
etwa auf heißem Asphalt

Bsp3: Fata Morgana
Glasfaser

5) Dispersion

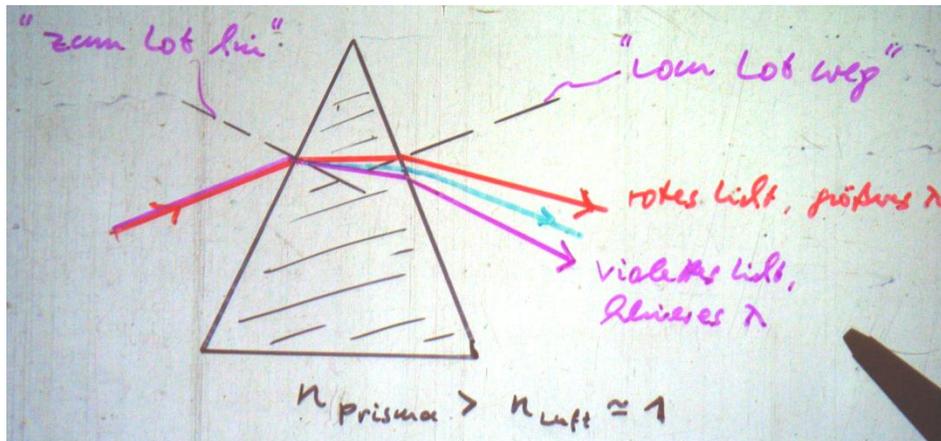
Die Tatsache, dass der Brechungsindex von der Wellenlänge abhängt, das heißt

$$n = n(\lambda)$$

nennt man Dispersion.

Anwendung

- 1) Zerlegung von Licht in seine unterschiedlichen Wellenlängen im Prisma



- 2) Regenbogen

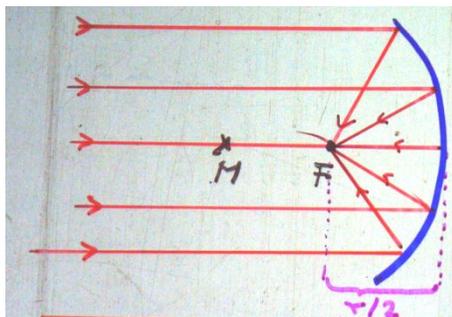
„Zerlegung“ von „weißem“ Sonnenlicht durch Dispersion in den H_2O -Tröpfchen

6) Hohlspiegel (=Konkav-Spiegel)

- 1) Fällt achsenparalleles Licht auf einen sphärischen (=halbkugelförmigen) Hohlspiegel, trifft es sich in einem Brennpunkt F (=Fokus) bei

$$f = \frac{r}{2}$$

Brennweite



Parallelstrahl wird zum Brennstrahl

- 2) Umgekehrt gilt:

Brennstrahl wird zum Parallelstrahl

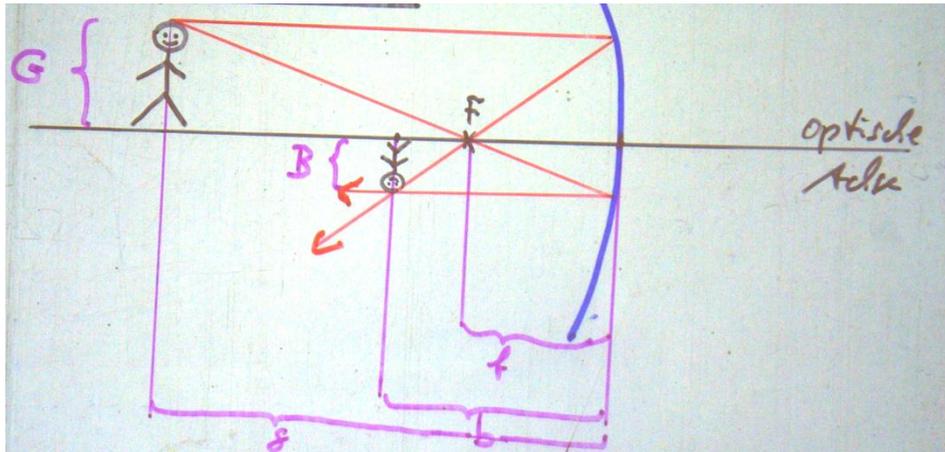
↳ Anwendung: Scheinwerfer mit Birne im Fokus

- 3) Ferner: Ein Lichtstrahl durch den Mittelpunkt des Hohlspiegels, ein so genannter

Mittelpunktstrahl wird in sich selber reflektiert

7) Bildentstehung bei gewölbten Spiegeln

- a) Hohlspiegel, $g > f$:



F : Fokus = Brennweite

B : Bildgröße

G : Gegenstandsgröße

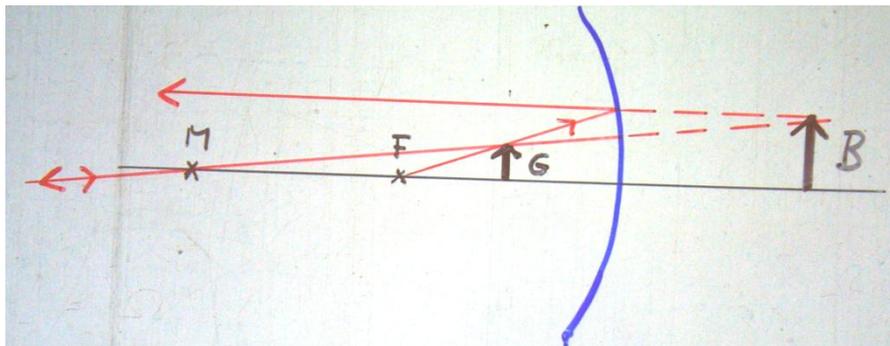
Die vom gleichen Punkt des Gegenstands ausgehenden Lichtstrahlen treffen sich in einem gemeinsamen Punkt des Bildes wieder \Rightarrow reelles Bild

f : Brennweite

b : Bildweite

g : Gegenstandsweite

- b) Hohlspiegel, $g < f$:



Brennstrahl → Parallelstrahl

Mittelpunktstrahl → in sich selbst reflektiert

↳ virtuelles, vergrößertes Bild, artgerecht;
Lichtstrahlen „scheinen“ von B zu kommen.

c) Konvexspiegel („Wölbspiegel“)

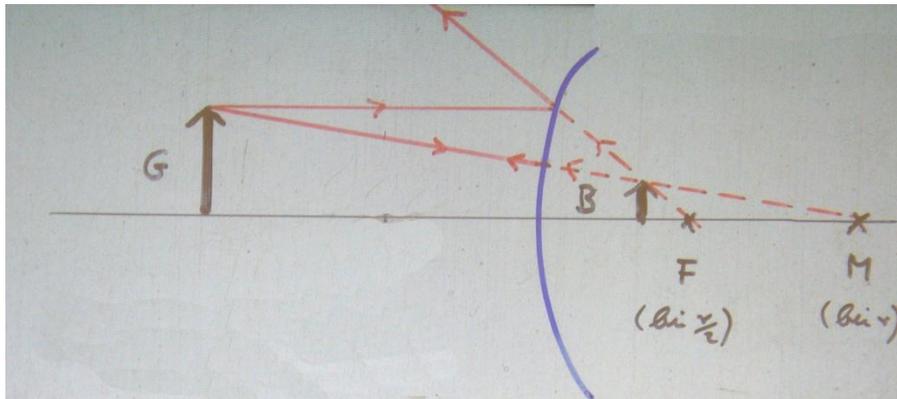
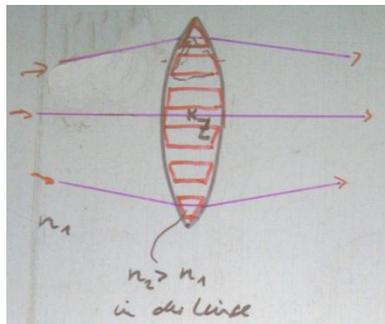


Bild ist

- aufrecht
- virtuell
- verkleinert

8) Abbildung mit Linsen

a) Lichtbrechung an Linsen



Betrachtung einer Linse als Sequenz von
Prismenstückchen



Lichtbrechung weg von der brechenden Kante

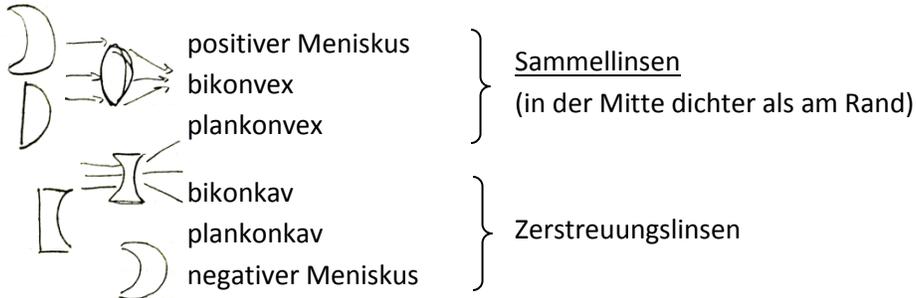
Man findet für Linsen mit Kugeloberfläche näherungsweise:

<i>Parallelstrahl</i>	⇒	<i>Brennstrahl</i>
<i>Brennstrahl</i>	⇒	<i>Parallelstrahl</i>
<i>Zentralstrahl</i>	⇒	<i>Zentralstrahl</i>

d.h. durch Linsenmittelpunkt Z

- falls:
- 1) paraxiale Strahlen
 - 2) kleine Einfallswinkel
 - 3) dünne Linsen

b) Arten von Linsen



9) Die Brennweite von Linsen

Man findet aus einfachen geometrischen Überlagerungen in der Näherung von 8a):

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

n : Brechungsindex Linse

1 : Brechungsindex Umgebung

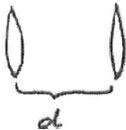
aus der Formel für das Prisma.

$$D = \frac{1}{f}$$

heißt Brechkraft

$$[D] = \frac{1}{m} = 1dpt = 1 \text{ Dioptrie}$$

Zwei dünne Linsen im Abstand d :



$$D = \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

Falls $d \rightarrow 0$, folgt:

$$D = D_1 + D_2$$

10) Das Abbildungsgesetz (sehr wichtig!)

Man findet für sphärische Linsen und Spiegel:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

(einfache Trigonometrie...)

Dabei gilt für die Vorzeichen: (!)

$$g, b, f, r_1, r_2 > 0$$

falls G, B, F , Krümmungsmittelpunkte M_1, M_2 auf „reeller“ Seite:

dies ist: - bei Spiegel Einfallseite

- bei Linse Einfallseite für G , Transmissionsseite für B, M_1, M_2

Bedeutung: $b > 0$ reelles Bild

$b < 0$ virtuelles Bild

Vergrößerung V (=Abbildungsmaßstab)

$$V = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$$

- folgt aus Strahlensatz

- $V < 0 \Rightarrow$ Bild ist Kopfstehend

11) Abbildungsfehler

Auch bei perfekter Herstellung des gewählten Spiegels oder der Linse verbleiben drei prinzipielle Fehler:

a) sphärische Aberration

= Abweichung von der berechneten Brennweite für achsenferne Strahlen

- Abhilfe: Blende
(d.h. Ausblenden der achsenfernen Strahlen; Nachteil:
Bild zwar schärfer, aber dunkler
- nicht vorhanden ist die sphärische Aberration bei Parabolspiegeln

b) chromatische Aberration

↳ nur bei Linsen, da $n = n(\lambda)$

(Dispersion) $\Rightarrow f = f(\lambda)$

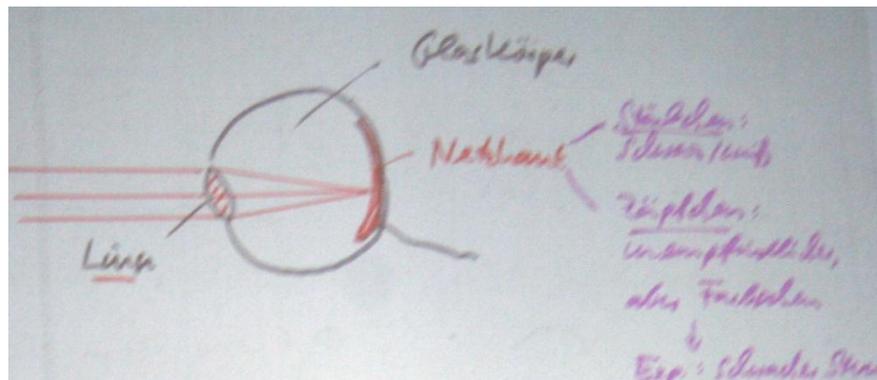
Wellenlängenabhängigkeit der Brennweite

- Korrektur durch zusammengesetzte Linsen mit unterschiedlichem $n(\lambda)$
- oder: Verwendung von Spiegeloptik statt Linsenoptik

c) Astigmatismus schiefer Bündel

Parallelbündel achsenferner Strahlen werden auf gekrümmte (statt ebene) Fläche fokussiert.

- Abhilfe: Blende
- Astigmatismus auch durch Linsfelder: falls Linse für unterschiedliche Richtungen unterschiedliche Krümmungsradien aufweist

12) Optische Instrumentea) Das Auge

Linse adaptierbarer Brennweite: $f = 19 \dots 23\text{mm}$

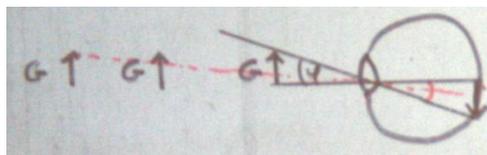
erzeugt - reelles
- kopfstehendes

Bild auf der Netzhaut.

Brennweiten-Korrektur durch Kontaktlinsen oder Brille

b) Die Lupe

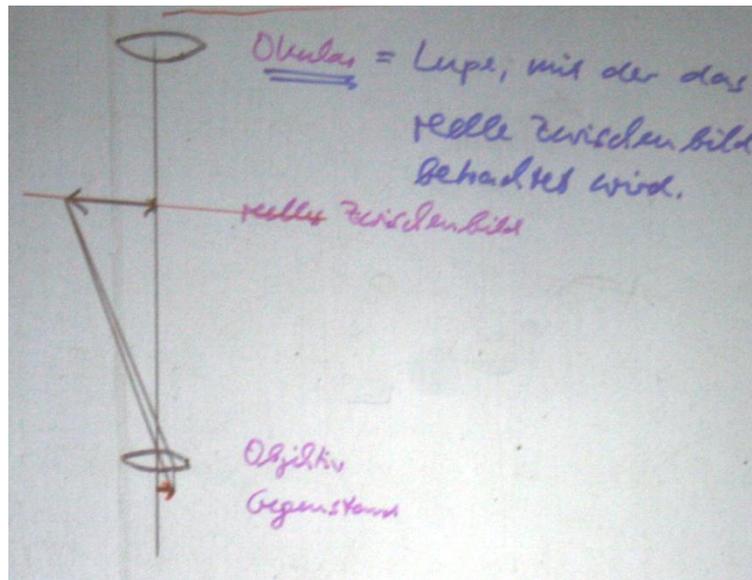
Sehwinkel betrenzt durch die Akkomodationsfähigkeit des Auges



$B \sim \varphi$ (Sehwinkel)

Sammellinse zwischen Gegenstand und Auge erlaubt Sehwinkelvergrößerung

$$\text{Vergrößerung} = \frac{\text{Sehwinkel mit Lupe}}{\text{Sehwinkel ohne Lupe}}$$

c) Das Mikroskop

Objektiv erzeugt ein reelles, vergrößertes Zwischenbild der Probe, das mit einer Lupe, dem sogenannten Okular betrachtet wird.

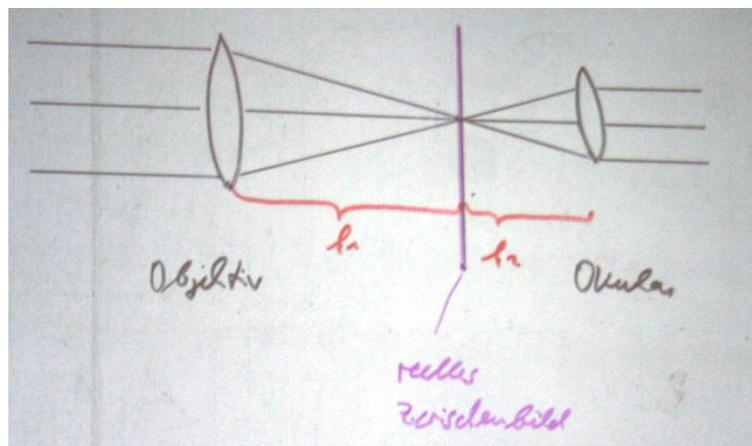
→

$$V = V_{\text{Objektiv}} * V_{\text{Okular}}$$

d) Das Fernrohr

Ziel: Vergrößerung des Sehswinkels weit entfernter Gegenstände

Beispiel: Kepler-Fernrohr



Vergrößerung:

$$V = \frac{f_1}{f_2}$$

9. Wellenoptik

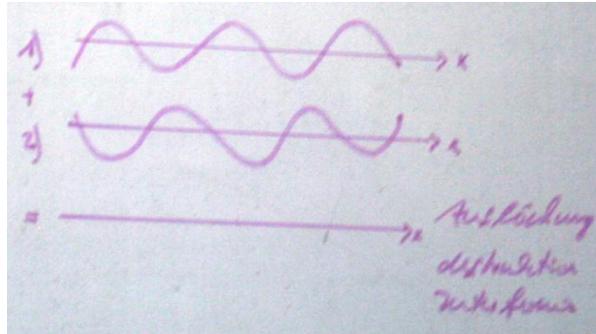
-Beugung
-Interferenz

1) Kohärenz und Interferenz

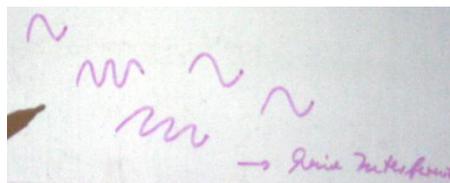
Überlagerung von zwei Wellenytigen mit gleicher Frequenz und mit fester Phasenbeziehung über ausgedehnten räumlichen Bereich (kohärentes Licht)

↓
Interferenz

Beispiele:



Glühlampe:



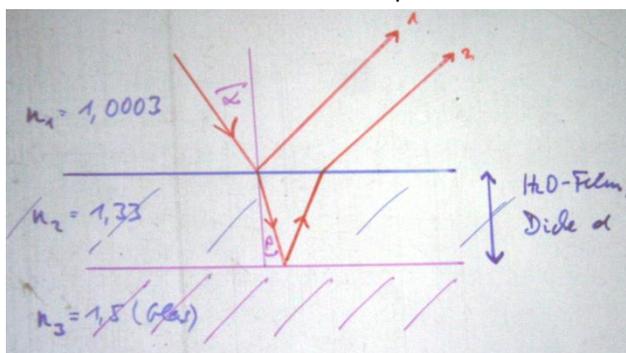
2) Erforderlich für Kohärenz

- 1) (nahezu) monochromatisches (= frequenzgleiches) Licht
↳ wegen festen Phasenbeziehung
- 2) Ausreichende Länge der Wellenzüge (damit diese trotz Phasenverschiebung einander treffen)
↳ so genannte Kohärenzlänge

3) Interferenz an dünnen Schichten

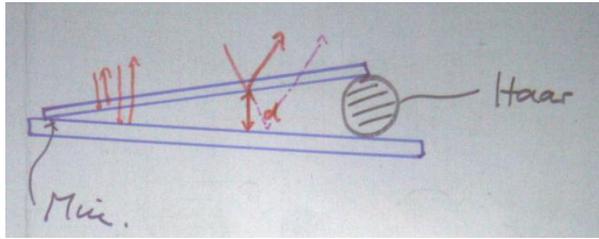
Allgemein:

- Bei Reflexionen am optisch dichteren Medium Phasensprung um $\Delta\varphi = \pi$
- Bei Reflexion am optisch dünneren Medium kein Phasensprung



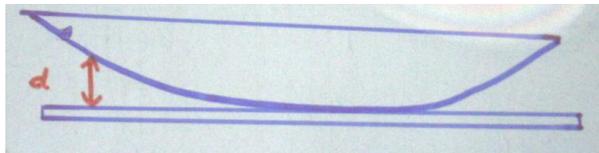
4) Interferenz am Luftkeil

a) Keil aus zwei Glasplatten



b) Keil zwischen Plankonvex-Linse und Glasplatte

Reflexion am Ober- und Unterseite des Luftspaltes



$$\Delta\varphi = \underbrace{\frac{2\pi}{\lambda} * 2d}_{\text{aus Gangunterschied durch Geometrie}} + \underbrace{\pi}_{\text{Phasensprung}}$$

für senkrechten Einfall

↓
in der Mitte schwarzer Punkt (=Minimum)

- | | |
|-------------|------------------------------|
| 1. Ordnung: | $\Delta\varphi = 2\pi$ |
| 2. Ordnung: | $\Delta\varphi = 4\pi$ |
| 3. Ordnung: | $\Delta\varphi = n * (2\pi)$ |

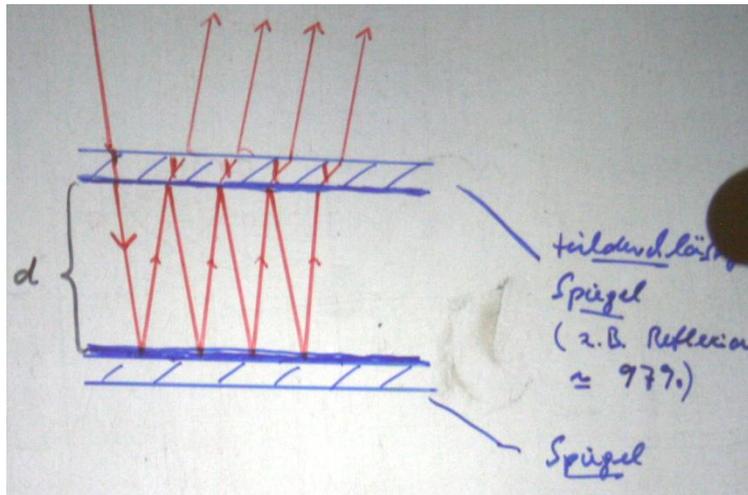
Anwendung:

Planparallele Platten
↓
auf Glasscheibe auflegen
↓
Prüfung auf Unebenheiten der Scheibe

Luftkeile an Unebenheiten ⇒ Interferenzen

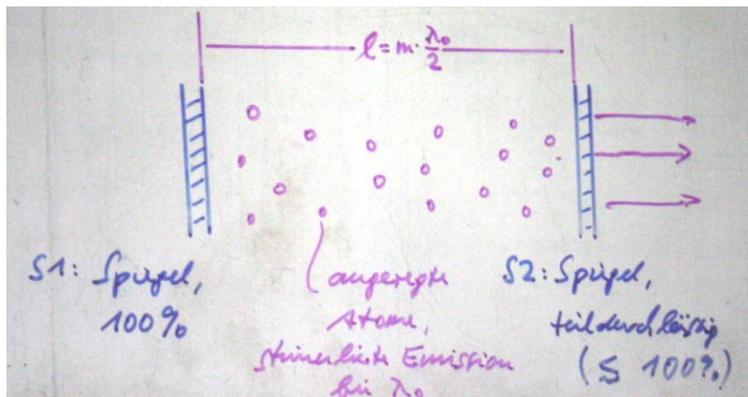
5) Perot-Fabry-Interferometer und Laser

a) Perot-Fabry-Interferometer



↳ Max. für $2d = n_2 * \lambda$ bei senkrechtem Einfall

b) Laser = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



Funktion:

- 1) Fabry-Perot-Interferometer als Laser-Resonator
- 2) Wegen $l = m * \frac{\lambda_0}{2}$ stehende Lichtwelle im Resonator möglich
- 3) Im Resonator angeregte Atome, die mit $\lambda = \lambda_0$ emittieren können
- 4) Stehende Welle im Resonator regt Atome zur phasensynchronen Emission ihrer Energie als elektromagnetische Welle an (stimulierte Emission)

↓

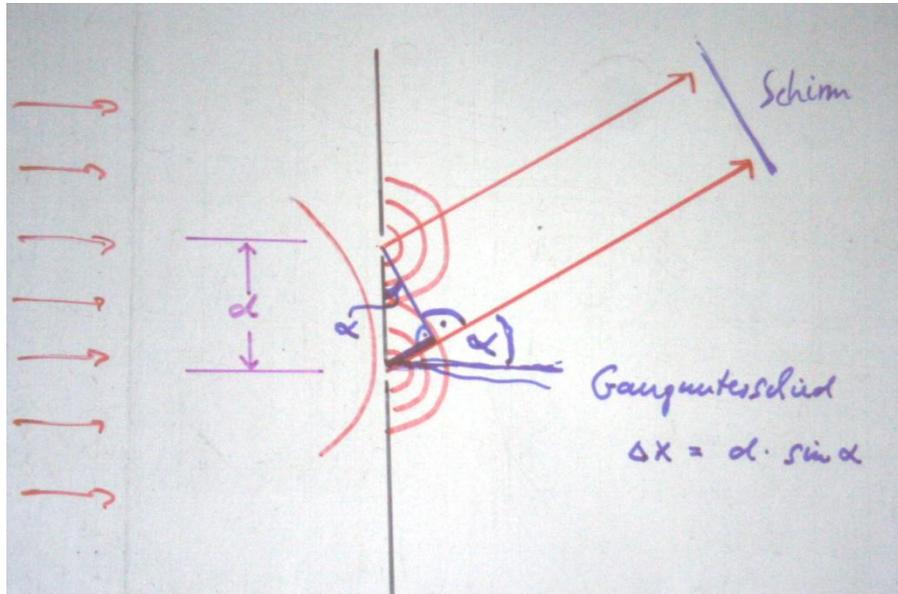
Verstärkung der stehenden Welle im Resonator

- 5) Auskoppeln eines kleinen Teils der stehenden Welle über S2

↳ Laserstrahlung:
Kohärent, monochromatisch, parallel

6) Doppelspalt und Gitter

- a) Beleuchtung eines Doppelspalts mit kohärentem Licht
 ↳ Interferenz der aus beiden Spalten austretenden Teilwellen

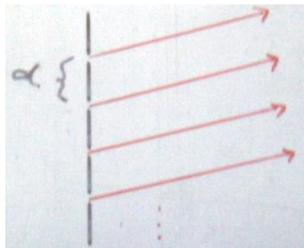


Maxima: $d * \sin \alpha = n_1 * \lambda$

Minima: $d * \sin \alpha = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$
 $m \in \mathbb{N}$

- b) Interferenz am Gitter

Gitter = N äquidistante Spalte im Abstand d

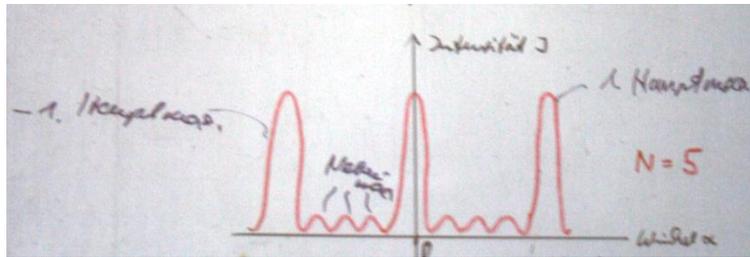


Hauptmaxima, falls

$$\underbrace{d * \sin \alpha}_{\text{Gangunterschied benachbarter Strahlen}} = m \lambda$$

Gangunterschied benachbarter Strahlen

jedoch zusätzlich $N - 2$ Nebenmaxima zwischen je 2 Hauptmaxima



- Intensität der Maxima $\sim N^2$
- Breite der Maxima nimmt mit N ab ($\sim \frac{1}{N}$ für große N)

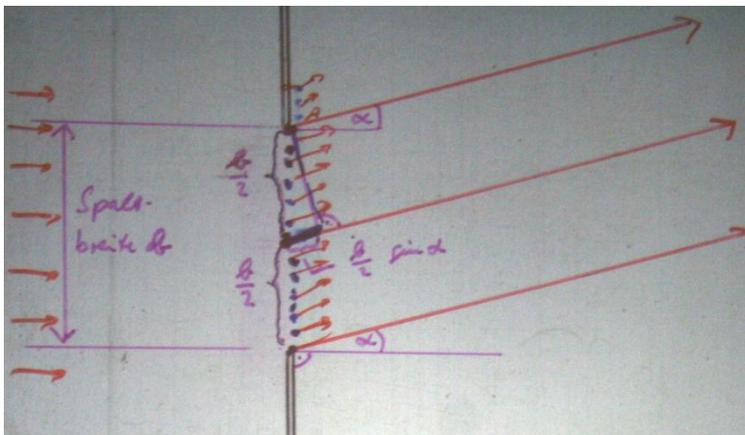


7) Beugung am Spalt

Bis jetzt: Spaltbreite $b \ll$ _____

Jetzt: breitere Spalten

↓
Interferenz der Teil _____ die durch den Spalt treten.



Auslöschung, falls:

$$\frac{b}{2} * \sin \alpha = m * \frac{\lambda}{2}$$

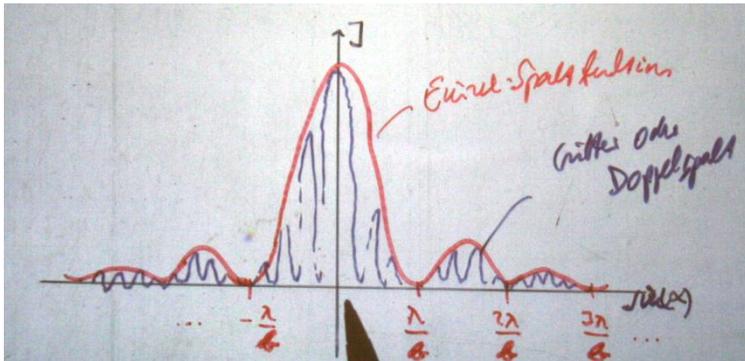
da dann für jeden Teilstrahl der oberen Spalthälfte ein destruktiv interferierender Teilstrahl der unteren Spalthälfte existiert.

Man findet für die Intensität I am Spalt:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\frac{\varphi}{2}} \right)^2 \quad \text{Spaltfunktion}$$

mit

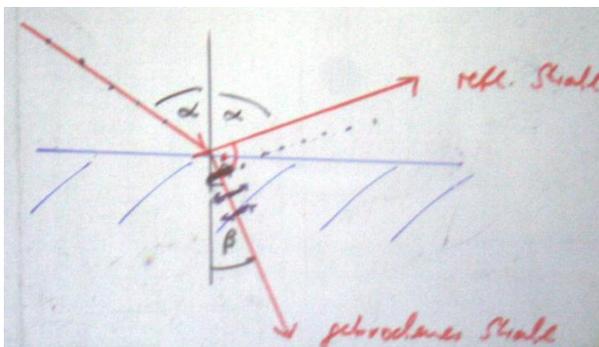
$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} b * \sin \alpha$$



10. Erzeugung von polarisiertem Licht

1) Polarisation durch Reflexion; Brewster-Winkel

- Ein schwingender Dipol strahlt elektromagnetische Wellen mit maximaler Intensität senkrecht zur Dipolachse, mit Intensität $\equiv 0$ parallel zu seiner Achse ab.
- Reflexion: reflektierte Welle wird durch schwingende (atomare/molekulare) Dipole erzeugt



Brewster-
Bedingung

Falls reflektierter Strahl \perp gebrochener Strahl, ist folglich nur Polarisation des reflektierten Strahl \perp Zeichenebene möglich
 \hookrightarrow Erzeugung von polarisiertem Licht

Also:

$$1 * \sin \alpha_B = n * \sin \beta_B = n * \sin(90^\circ - \alpha_B) = n * \cos \alpha_B$$

⇒

$$n = \operatorname{tg} \alpha_B$$

α_B : Brewster-Winkel

2) Polarisation durch Doppelbrechung

Snelliussches Brechungsgesetz: nur für optisch isotrope Medien.

Doppelbrechung in optisch anisotropen Medien:

Brechungsindex hängt von

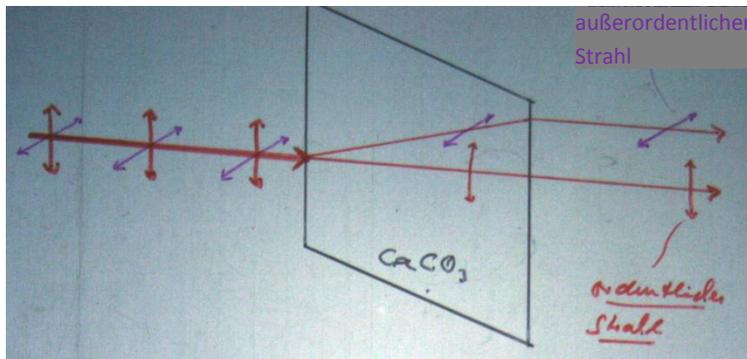
- Strahlrichtung
- Polarisationsrichtung

ab.

Beispiele:

- anisotrope Kristalle
(z.B. Kalkspat = CaCO_3)
- Spannungsdoppelbrechung
↳ Material wird durch anisotrope mechanische Spannung auch optisch anisotrop

Folge:



unpolarisiertes Licht
Einfall \perp Oberfläche
optisch anisotroper Kristall



Aufspaltung in zwei zueinander
senkrecht polarisierte
Teilstrahlen



Erzeugung von polarisiertem Licht.

3) Polarisation durch Dichroismus

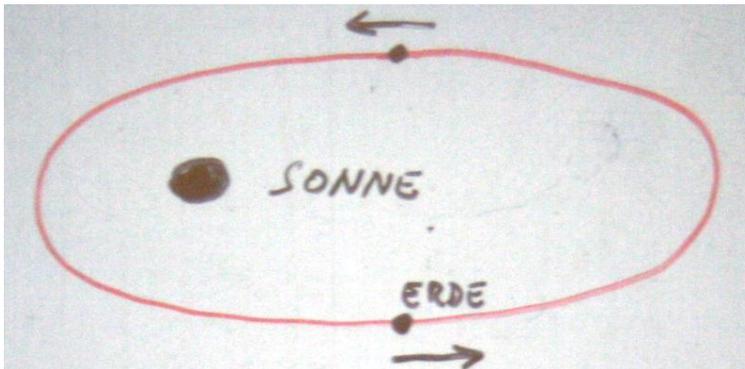
Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten von der Polarisationsrichtung: so genannter Dichroismus

↳ teilweise polarisiertes Licht nach Durchgang durch verstreckte Polymerfolien. (als Beispiel)

11. Relativistische Mechanik

spezielle Relativitätstheorie (SRT)

1) Der Versuch von Michelson und Morley



Ergebnis:

- Ausbreitung elektromagnetischer Wellen nicht an die Existenz eines Mediums gebunden:
„Es gibt keine Lichtäther“
- Es gibt kein ausgezeichnetes Bezugssystem

2) Einsteins Postulate

Definition: Inertialsystem = ein nicht-beschleunigtes Bezugssystem (→ keine Trägheitskräfte)

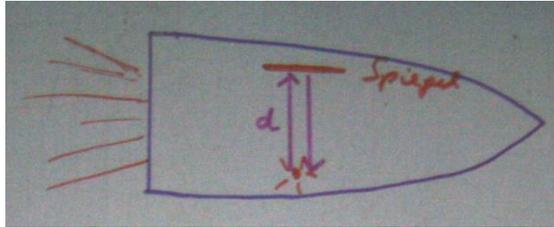
Einstein:

- 1) Die Naturgesetze gelten in allen Inertialsystemen gleich
 ↓
 - Es gibt kein ausgezeichnetes Inertialsystem
 - Es gibt keinen absoluten Zustand der Ruhe
- 2) Jeder Beobachter misst für die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum den selben Wert

3) Die Zeitdilatation

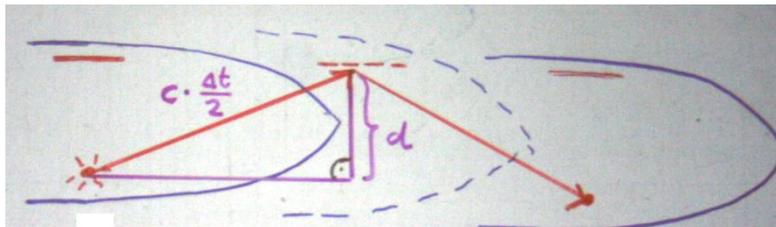
Gedankenexperiment: Lichtblitz & Spiegel im fliegenden Raumschiff

a) Bezugssystem Raumschiff: ZEIT



Lichtlaufzeit: $\Delta t' = \frac{2d}{c}$

b) Bezugssystem Erde: ZEIT



Pythagoras: $\left(\frac{c * \Delta t}{2}\right)^2 = d^2 + \left(\frac{v * \Delta t}{2}\right)^2$

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

$\Rightarrow \Delta t = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c} * \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ }

vergleiche: $\Delta t' = \frac{2d}{c}$ }

Beide sehen einen unterschiedlichen zeitlichen Abstand zwischen genau denselben Ereignissen (aussendung und Rückkehr des Lichtblitzes zur Blitzlampe)

$\Rightarrow \Delta t' = \Delta t * \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

„Bewegte Uhren gehen langsamer“
(unabhängig vom Vorzeichen der Bewegungsrichtung!)

↳ Zwillingsparadoxon

4) Weitere Konsequenzen

- Addition von Geschwindigkeiten

bisher: $v_{ges} = v + u$

jetzt: $v_{ges} = \frac{v+u}{1+\frac{vu}{c^2}}$

- Längenkontraktion:

Dem „ruhenden“ Beobachter erscheint Länge des bewegten Objektes in Bewegungsrichtung verkürzt.

- Relativierung der Gleichzeitigkeit

↳ hängt vom Beobachter ab

- Lorentz-Transformation

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{t' - \frac{x'v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5) Masse und Energie

- a) Äquivalenz von Masse und Energie

SRT ⇒ $E = mc^2$

- jede Energie (z.B. kinetische Energie, potentielle Energie, Feldenergie) besitzt Masse.
- Jede Masse entspricht einer Energie

- b) Masse und Geschwindigkeit

Masse m_0 eines Körpers bei $v = 0$:

sog. Ruhemasse m_0

SRT ⇒ $m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

GANZ WICHTIG!

c) Energie:

$$E(v) = m(v) * c^2 = \underbrace{m_0 c^2}_{\text{Ruheenergie}} + (m(v) - m_0) c^2 = \underbrace{\Delta m * c^2}_{\text{kin. Energie}}$$

Ein Elektron hat eine Masse von $2m_0$. Wie groß ist seine Geschwindigkeit v , sein Impuls, seine kinetische Energie?

$$E_{kin} = (m(v) - m_0) c^2 = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$$

$$= m_0 c^2 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots - 1 \right]$$

Grenzfall $v \ll c \Leftrightarrow \frac{v}{c} \rightarrow 0$

$\Rightarrow E_{kin} = m_0 c^2$ XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

12. Welle-Teilchen-Dualismus

1) Quantenoptik: Licht als Teilchen

Man findet: elektromagnetische Strahlung der Frequenz ϑ besteht aus Teilchen, den so genannten Photonen der Energie:

$$E = h * \vartheta \quad \begin{matrix} c = \lambda \vartheta \\ \downarrow \\ = h * \frac{c}{\lambda} \end{matrix}$$

Energie je Photon („Energiequant“)

$$h = 6,63 * 10^{-34} \text{ Js}$$

Plancksches Wirkungsquantum

$$\hbar := \frac{h}{2\pi}$$

Eigenschaften der Photonen:

$m_0 = 0$ keine Ruhemasse

$v = c$ Lichtgeschwindigkeit

Masse eines Photons:

$$\left. \begin{matrix} E = h\vartheta \\ E = m * c^2 \end{matrix} \right\} h\vartheta = mc^2 \Rightarrow m = \frac{h\vartheta}{c^2}$$

Impuls eines Photons:

$$P = m * c = \frac{E}{c^2} * c = \frac{h\nu}{c^2} * c = \frac{h\nu}{c}$$

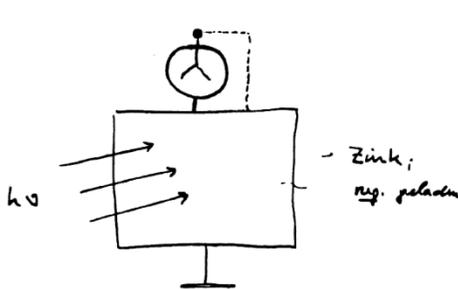
$$P = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k$$

2) Der Photoeffekt

 ↳ äußerer photoelektrischer Effekt

Negativ geladene Platte entlädt sich unter Lichteinstrahlung nur falls $\nu > \nu_{Gr}$

Deutung:



$$\boxed{h\nu_{Grenz} = W_A}$$

Energie eines Photons Austrittsarbeit eines Elektrons aus dem Metall

Falls $\nu > \nu_{Grenz}$

$$\boxed{E_{kin} = h\nu - W_A}$$

Kinetische Energie des freien e^-

3) Der Compton-Effekt

Elastischer Stoß eines Photons mit einem ruhenden Elektron (Ruhemasse m_0)

↳ EES, IES $\Rightarrow \dots \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \vartheta)$

4) Paarbildung und Zerstrahlung

Vorher:

Photon



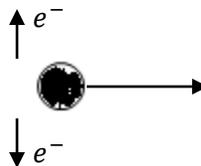
$$E = \hbar\omega$$

$$p = \hbar k$$



Nachher:

Elektron
(Materie)



P
(Antimaterie)

Paarbildung nur möglich falls

$$\boxed{h\nu \gg m_0 c^2}$$

$m_0 c^2$: Ruheenergie des e^- = Ruheenergie des e^+

Umkehrprozess: Zerstrahlung: $e^- + e^+ \Rightarrow \text{Photon}$

5) Welle-Teilchen Dualismus

bei elektromagnetischer Strahlung:

Licht ist Welle

- Bewegungsexperimente
- Interferenz

Licht ist Teilchen

- Photoeffekt
- Compton-Effekt
- Paarbildung
- Zerstrahlung eines e^+ / e^- -Paares
- Rückstoß bei Emission eines Photons

Licht ist beides zugleich. Interpretation der Welle als „Wahrscheinlichkeitswelle“

$$Wht. \sim (Amplitude)^2$$

↳ Beugung vom Laserstrahl am Spalt!

6) Materiewellen

Gilt der Welle-Teilchen-Dualismus auch für Teilchen mit Ruhemasse $\neq 0$?

Antwort: || ja, jedes Materieteilchen hat auch Welleneigenschaften

Es gilt wieder:

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

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

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

λ : Materiewellenlänge
oder
de Broglie-Wellenlänge

Woher weiß ich ob das überhaupt stimmt?

↳ Experiment von Davisson und Germer: (1927)

Beugung und Interferenz von e^- -Strahlen

$$\frac{m}{2}v^2 = eU \Rightarrow v = \sqrt{2\frac{e}{m}U}$$

$$p = mv = \sqrt{2emU}$$

Wellenlänge der e^-
so gefunden wie berechnet

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2emU}}$$

Zahlenbeispiel für Elektronen:

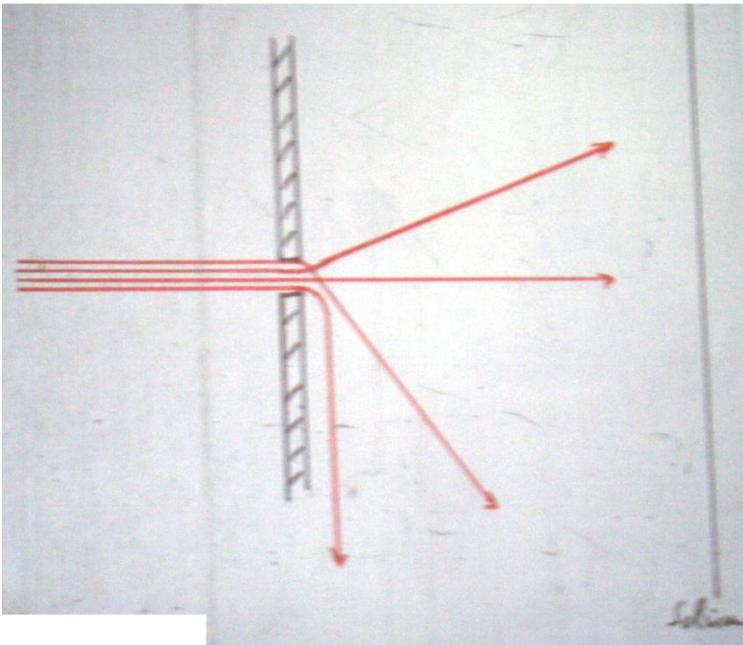
$$E_{kin} = 150eV$$

↓

$$\lambda \approx 1\text{\AA} = 10^{-10}m = 100pm$$

(kleiner als 1 Atom-Durchmesser)

7) Beugung am Spalt: Der Abschied vom Determinismus



Heisenbergsche Unschärfre-Relation

$$\Delta P_x * \Delta x \approx h$$

Ort-Impuls-Unschärfe

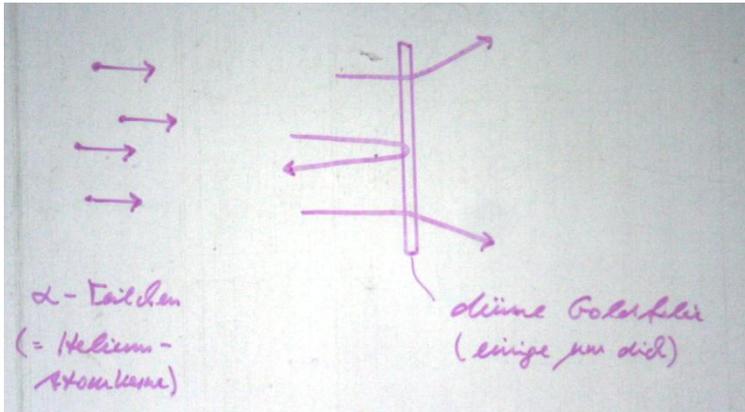
$$\Delta E * \Delta t \approx h$$

Entropie-Zeit-Unschärfe

13. Aufbau der Atome

1) Atomkern und Elektronenhülle

Rutherfordscher Streuversuch (1913):



Beobachtung: Die weitaus meisten α -Teilchen durchdringen die Folie ohne größere Ablenkung

Nur wenige werden stärker abgelenkt durch Streuung an den Atomkernen des Gold.

↳ Abschätzung des Kerndurchmessers

Atomradien: $\approx 10^{-10}m = 1\text{\AA}$

Kernradien: $\approx 10^{-15}m = 1fm = "1\text{ Fermi}"$

Aufbau von Atomen:

Hülle: Z Elektronen

A : Zahl der Nukleonen
(Massenzahl)

Kern: Z Protonen
 N Neutronen

Z : Zahl der Protonen
(Ordnungszahl)

$$A = Z + N$$

N : Zahl der Neutronen

Schreibweise:



Bsp.: ${}^{12}_6\text{C}$ ${}^1_1\text{H}$ ${}^4_2\text{He}$...

2) Das Bohrsche Atommodell

- Elektronen bewegen sich auf Kreisbahnen um den Atomkern
- Kreisbahnen stabil, falls $U = 2\pi r$ ein ganzzahliges Vielfaches von λ des Elektrons ist.
d.h.

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = \frac{h}{mv} \\ 2\pi r = n\lambda \end{array} \right\} n * \frac{h}{mv} = 2\pi r$$

⇔

$$mvr = n * \hbar$$

Drehimpuls des Elektrons muss ganzzahliges Vielfaches von \hbar sein,
so genannte Drehimpulsquantisierung

↓

Eine der Grundlagen der so genannten Quantenmechanik

3) Radien und Energien im Bohrschen Modell

Kreisbahn:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Ze^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

Coulombkraft ist Zentralkraft

wobei:

$$mvr = n\hbar \quad \Rightarrow \quad v = \frac{n\hbar}{mr} \quad (2)$$

$$\xrightarrow{(2) \text{ in } (1)} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{m n^2 \hbar^2}{r m^2 r^2}$$

$$\Rightarrow \quad r = n^2 * \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Ze^2 m} \quad (3)$$

Radius der Bohrschen Bahnen $\sim n^2$

$$v = \frac{n\hbar}{mr} = \dots \text{ (Fleißarbeit)}$$

Energien:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$\Rightarrow \underbrace{-mv^2} = -\underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}}$$

$$\underline{-2E_{kin} = E_{pot} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_1} \frac{Ze^2}{r}}$$

$$\Rightarrow \boxed{E_{ges} = E_{kin} + E_{pot} = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}} \quad (4)$$

mit r aus (3) in (4) folgt:

$$E_{ges} = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0} * \frac{1}{n^2} * \frac{Ze^2 m}{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}$$

$$\boxed{E_{ges} = -\frac{1}{n^2} * \frac{Z^2 e^4 m}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2}} = -\frac{1}{n^2} \frac{E e^4 m}{8\epsilon_0^2 \hbar^2}$$

$$\boxed{E_{ges} = -\frac{1}{n^2} Z^2 R}$$

$$\boxed{R = 13,6eV}$$

Rydberg-Konstante

E_{ges} : Bindungsenergie des e^- der Hqz. n im Atom

4) Die Bohrschen Postulate

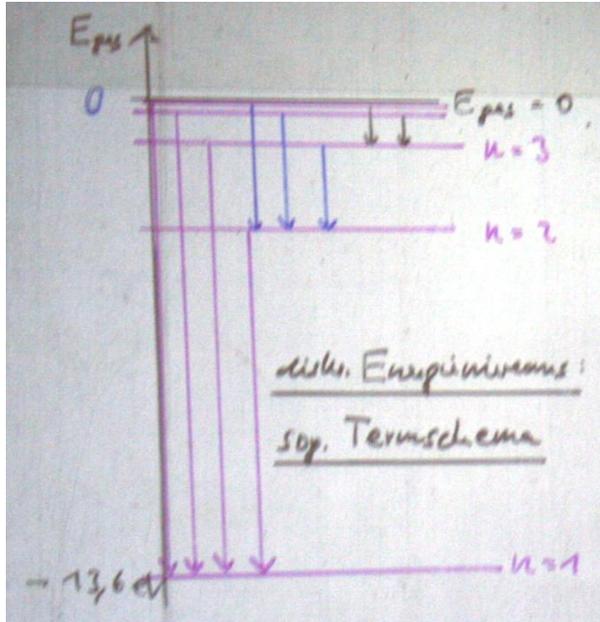
- 1) Elektronen bewegen sich auf Kreisbahnen um den Kern.
- 2) Stationäre Bahnen, falls $mvr = n\hbar$
 - ↳ keine Abstrahlung im Gegensatz zur klassischen Physik
 - ↳ diskrete Energieniveaus durch Drehimpulsquantisierung
- 3) Beim Übergang von Bahn mit höherer Energie zu Bahn mit niedrigerer Energie Emission von Licht der Frequenz ν mit:

$$\boxed{h\nu = E_2 - E_1}$$

↳ Emission eines Photons

5) Das Spektrum des H-Atoms

einfachstes Atom: Wasserstoff



Paschen-Serie: $n_3 \rightarrow 3$

Balmer-Serie: $n_2 \rightarrow 2$

Lyman-Serie: $n_1 \rightarrow 1$

$$h\nu = R * \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

14. Kerne und Elementarteilchen

1) Die starke Wechselwirkung

Was hält die Protonen im Kern – trotz Coulomb-Abstoßung – zusammen?

↳ die so genannte starke Wechselwirkung

- stark, das heißt hohe Bindungsenergien
Bindungsenergien je e^- der Hülle: einige eV
Bindungsenergien je Nukleon im Kern: einige MeV (!)
- vermittelt durch so genannte Gluonen als Feldteilchen der starken Wechselwirkung
- Reichweite und Ruhemasse: π -Massen-Austausch
 $\Delta m * c^2 * \Delta t \approx h$ Unschärferelation
- \Rightarrow nur sehr kurze Reichweite \approx einige fm

2) Das Tröpfchenmodell des Atomkerns

Atomkern als ein Tröpfchen aus Nukleonen.

- Pro Nukleon im Kern eine gewisse Bindungsenergie durch starke Wechselwirkung mit Nachbar-Nukleonen.
- Nukleonen an der Kernoberfläche haben weniger Nachbarn
↳ geringe Bindungsenergie je Nukleon bei sehr kleinen Kernen
- Coulomb-Abstand zwischen Protonen hat viel größere Reichweite als starke Wechselwirkung
↳ geringere Bindungsenergie je Nukleon bei sehr großen Kernen

3) Bindungsenergie und Massendefekt

Woher kennt man die Kernbindungsenergie?

↳ aus dem Massendefekt: Die Masse eines Atoms ist kleiner als die Summe der Massen seiner Bausteine

$$\begin{array}{rcl}
 & & {}^Z_X A \\
 \text{Atommasse} = & Z * m_e & \text{Elektronen} \\
 & + & Z * m_p \quad \text{Protonen} \\
 & + & Z * m_n \quad \text{Neutronen} \\
 & - & \Delta m \quad \text{Massendefekt} \\
 \hline
 & m_{Atom} & \text{(Masse der Bindungsenergie } E_{ges})
 \end{array}$$

$$E_{ges} = \Delta m * c^2$$

Kernbindungsenergie

$$\frac{E_{ges}}{A} = \frac{\Delta m * c^2}{A}$$

Bindungsenergie je Nukleon

4) Radioaktivität

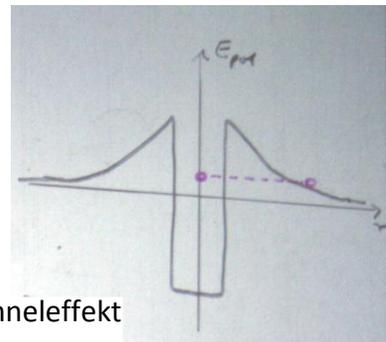
a) Der α -Zerfall

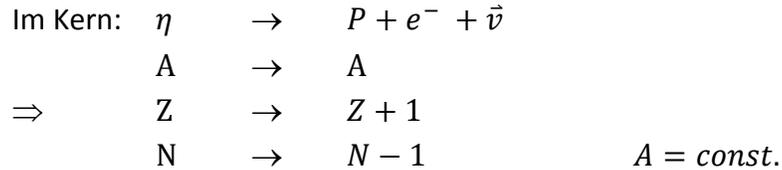
$$\begin{array}{l}
 Z \rightarrow Z-2 \\
 A \rightarrow A-4 \\
 V \rightarrow N-2
 \end{array}$$

Emission eines α -Teilchens durch den Atomkern via Tunneleffekt

$$\alpha\text{-Teilchen} = \text{Helium-Kern} \quad {}^4_2\text{He}^{2+}$$

= 2 Protonen & 2 Neutronen



b) Der β -Zerfall

Emission eines e^- (β -Teilchen) aus dem Kern

c) γ -Strahlung

Angeregter Kern sendet Photon aus

Sehr harte (=kurzwellige) Strahlung elektromagnetischer Art:
angeregter Kern gibt Energie in Form eines Photons (γ -Quant) ab.

5) Der radioaktive Zerfall

Jedes von N gleichen Atomen eines instabilen Nuklids (= Radionuklid) hat die gleiche Wahrscheinlichkeit, innerhalb der nächsten Sekunde zu zerfallen.

↳ $N(t)$ nimmt mit der Zeit ab

$$dN \sim N$$

$$dN = -\lambda N dt$$

$$\Rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Differenzialgleichung wird erfüllt durch:

$$N(t) = N(t=0) * \exp(-\lambda * t)$$

Zerfallsgesetz

$$\tau := \frac{1}{\lambda}$$

Zerfallzeit

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Halbwertszeit

$$N\left(T_{\frac{1}{2}}\right) = \frac{1}{2} N(t=0)$$

Die 4 Wechselwirkungen

- 1) Gravitation
- 2) elektromagnetische Wechselwirkung
- 3) starke Wechselwirkung
- 4) schwache Wechselwirkung
(z.B. β -Zerfall,...)

V. FORMELSAMMLUNG

Bezeichnung	Gleichung	Bedeutung der Formelzeichen	Einheiten	Erläuterungen

VI. ÜBUNGEN ZUR EXPERIMENTALPHYSIK B

Es empfiehlt sich, zuerst allgemein zu rechnen und erst in die Endformeln Zahlenwerte einzusetzen

1) Übungsblatt: Wärmelehre

- 1) Eine freitragende Stahlbrücke habe eine Länge von 600 m. Berechnen Sie die Längenänderung, wenn die Brücke um 30 °C erwärmt wird, (leicht)
thermischer Ausdehnungskoeffizient von Stahl: $\alpha_{Stahl} = 1,1 \cdot 10^{-5} K^{-1}$
Ergebnis: $\Delta l = 19,8 \text{ cm}$
- 2) Ein offenes Gefäß der Höhe h ist bis zum Rand mit Quecksilber der Masse m gefüllt. Der Volumen-Ausdehnungskoeffizient von Quecksilber sei γ_{Hg} , der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient von Glas α_{Gl} . Welche Masse Δm an Quecksilber läuft bei Erwärmung des Gefäßes um ΔT über, wenn

- a. die thermische Ausdehnung des Glases vernachlässigt,
- b. die thermische Ausdehnung berücksichtigt wird?

Die Oberflächenspannung des Quecksilbers muss nicht berücksichtigt werden! •

Zahlenbeispiel: $\gamma_{Hg} = 1,8 \cdot 10^{-4} K^{-1}$; $\alpha_{Gl} = 10^{-5} K^{-1}$; $\Delta T = 100 K$; $m = 0,90 \text{ kg}$.

Ergebnis: a) $\Delta m = 15,9 \text{ g}$; b) $\Delta m = 13,3 \text{ g}$

- 3) Eine kreisförmige Kupferplatte vom Radius R und der Dicke d hat in der Mitte einen quadratischen Ausschnitt der Seitenlänge s. In diesem Ausschnitt liegt eine Kugel, deren Durchmesser 2r etwas größer als s ist, solange Kugel und Platte die gleiche Temperatur haben.

Wie lange muss man die Platte mit einer elektrischen Heizung der Leistung P heizen, bis die Kugel durchfällt? Dabei möge die Erwärmung ohne Verluste erfolgen und die Temperatur der Kugel unverändert bleiben. •

Eigenschaften von Cu: spezifische Wärme: $c = 0,4 \frac{Ws}{gK}$, Dichte $\rho = 9 \frac{g}{cm^3}$, thermischer Ausdehnungskoeffizient $a = 1,7 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

Zahlenbeispiel: $R = 10 \text{ cm}$; $d = 0,5 \text{ cm}$; $s = 10 \text{ cm}$; $r = 5,01 \text{ cm}$; $P = 100 \text{ W}$.

Ergebnis: $t = 454 \text{ s}$

- 4) Wasser wird in einem Kalorimeter mit einem Tauchsieder erwärmt.
 - a. Nach welcher Zeit ist die Siedetemperatur erreicht?
 - b. Der Tauchsieder wird nicht wieder abgeschaltet. Nach welcher Gesamtzeit ist das Wasser verdampft?

Wärmekapazität des Kalorimeters: $480 \frac{J}{K}$, Eigenschaften von Wasser: Siedetemperatur

$100^\circ C$, spezifische Wärme $4,2 \frac{kJ}{kgK}$, Verdampfungsenergie $2,26 \frac{MJ}{kg}$.

Zahlenbeispiel: Masse des Wassers 500 g, Anfangstemperatur des Wassers $16^\circ C$, Heizleistung des Tauchsieders 600 W.

Ergebnis: a) $t = 6 \text{ min}$; b) $t = 37 \text{ min}$

2) Übungsblatt: spezifische Wärme, ideale Gasgleichung

- 1) Ein Eisblock der Masse m und der Temperatur T_1 wird aus dem Gefrierfach entnommen und in einem Mikrowellenherd der Leistung P vom Zeitpunkt t_0 an erwärmt.
- Skizzieren Sie den Temperaturverlauf in einem $T(t)$ -Diagramm
 - Nach welcher Zeit ist das ganze Eis geschmolzen?
 - Welche Energie wird für die Erwärmung von T_1 auf T_2 benötigt? Die Wärmekapazität des Gefäßes werde vernachlässigt.

Spezifische Wärme von Eis: $c_E = 2,1 \frac{Ws}{gK}$, spezifische Wärme von Wasser: $c_W = 4,2 \frac{Ws}{gK}$,

Schmelzwärme von Eis: $c_S = 330 \frac{Ws}{g}$.

Zahlenbeispiel: $m = 120 \text{ g}$; $T_1 = -25^\circ\text{C}$; $T_2 = 5^\circ\text{C}$; $P = 50 \text{ W}$.

Lösung: b) $\Delta t = 918 \text{ s}$; c) $\Delta Q = 48,4 \text{ kJ}$.

- 2) Um wieviel Grad erwärmt sich Wasser, wenn es einen 10 Meter hohen Wasserfall herunterstürzt und seine potentielle Energie in Wärme umgewandelt wird (Verdunstung und Zerstäubung werde vernachlässigt)? (leicht)

Lösung: $\Delta T = 0,023 \text{ K}$.

- 3) Ein Autoreifen habe bei 0°C und einem Druck von 2,5 bar ein Volumen von $0,06 \text{ m}^3$. Nach einer Erwärmung auf 30°C ist der Druck im Reifen auf 2,65 bar angestiegen.
- Wie groß ist das Volumen nach der Erwärmung?
 - Welche Stoffmenge und welche Masse hat die Luft im Autoreifen?

Die Luft werde als ideales Gas behandelt und besteht im Verhältnis 4:1 aus Stickstoff und Sauerstoff. Atommassen von Stickstoff und Sauerstoff: $A_N = 14 \frac{g}{mol}$; $A_O = 16 \frac{g}{mol}$.

Gaskonstante: $R = 8,3 \frac{Ws}{mol K}$. •

Lösung: a) $V = 0,0628 \text{ m}^3$; b) $n = 6,62 \text{ mol}$; $m = 191 \text{ g}$.

- 4) Ein mit Helium-Gas (ideales Gas) der Masse m_{He} auf den Umgebungsdruck $p_0 = 1 \text{ bar}$ gefüllter Ballon (Volumen $V = 100 \text{ m}^3$) werde von der Sonne gleichmäßig erwärmt. Seine Temperatur steigt von der Umgebungstemperatur $T_1 = 300 \text{ K}$ aus auf $T_2 = 310 \text{ K}$ an. Um welchen Betrag ändert sich dabei die Tragkraft des Ballons, wenn
- der Ballon geschlossen ist und sein Volumen konstant bleibt,
 - der Ballon geschlossen ist und sein Druck konstant gleich p_0 bleibt,
 - der Ballon offen ist und sein Druck und sein Volumen konstant bleiben?

Zahlenwerte: Dichte der Luft: $1,2 \frac{kg}{m^3}$; Dichte des He bei T_1 und p_0 : $0,17 \frac{kg}{m^3}$ (Original Klausuraufgabe 2005) •

Lösung: a) $\Delta F = 0 \text{ N}$; b) $\Delta F = 39,2 \text{ N}$ c) $\Delta F = 5,38 \text{ N}$.

3) Übungsblatt: Kinetische Gastheorie, Dampfdruck, spezifische Molwärme

- 1) In einer Druckflasche mit dem Volumen V ist bei der Temperatur T molekularer Wasserstoff H_2 der Masse m eingeschlossen. •
- Welche mittlere Geschwindigkeit v_{rms} haben die Moleküle?
 - Wie viele H_2 Moleküle sind in der Flasche und wie groß ist die im Gas gespeicherte Wärmeenergie?
 - Welcher Druck p wirkt auf die Flaschenwand?

Zahlenbeispiel: $V = 3l$; $T = 290K$; $m = 3g$; Molmasse von H_2 : $M_{H_2} = 2 \frac{g}{mol}$

Lösung: a) $v_{rms} = 6,8 * 10^3 \frac{km}{h}$; b) $N = 9,0 * 10^{23}$; $U = 9,0 kJ$; c) $p = 1.2 * 10^6 Pa$.

- 2) Ein Metallstück der Masse m_M , das auf die Temperatur T_M erwärmt wurde, wird in ein Kalorimeter getaucht, das Wasser der Masse m_W und der Temperatur T_A enthält. Es stellt sich eine Mischungstemperatur T_E ein.
- Wie groß ist die spezifische Wärme des Metalls?
 - Welche Molmasse hat das Metall? Berücksichtigen Sie dabei, dass jedes Metallatom drei Schwingungsfreiheitsgrade besitzt.

Die Wärmekapazität des Kalorimeters werde vernachlässigt.

Zahlenbeispiel: $T_M = 100^\circ C$; $T_A = 19^\circ C$; $T_E = 27^\circ C$; $m_M = 300 g$; $m_W = 250 g$;

$c_W = 4,2 \frac{Ws}{gK}$.

Lösung: a) $c_M = 0,38 \frac{J}{gK}$; b) $M_M = 65 \frac{g}{mol}$.

- 3) Der Dampfdruck von Wasser wird durch $p = p_0 * e^{-\frac{Q_v}{RT}}$ beschrieben, wobei Q_v die molare Verdampfungswärme des Wassers ist. •
- Bestimmen Sie dabei den Wert von p_0 .
 - In einem Dampfdrucktopf wurde vor dem Verschließen alle Luft durch Wasserdampf verdrängt. Welche Temperatur T_x herrscht im Topf bei einem Überdruck von $\Delta p = 1 bar$?
 - Die Luft sei nicht verdrängt sondern der Topf werde bereits bei $T_0 = 293 K$ fest verschlossen. Der Partialdruck des Wassers in der Luft beim Schließen des Topfes sei dabei vernachlässigbar. Wie groß ist jetzt der Überdruck Δp bei der in b) berechneten Temperatur T_x ?

Zahlenwerte: $Q_v = 40,7 \frac{kJ}{mol}$; Luftdruck: $p_{atm} = 1 bar$.

Lösung: a) $p_0 = 5,11 * 10^{10} Pa$; b) $T_x = 121^\circ C$; c) $\Delta p = 2,34 * 10^5 Pa$.

- 4) Zimmerluft (ideales Gas) vom Volumen V und der Temperatur T werde durch eine elektrische Heizung der Leistung P um ΔT erwärmt. Dabei entweiche durch Ritzen Luft aus dem Zimmer, so dass der Druck p konstant bleibt. Der Wärmeübergang auf die Zimmerwände bleibe unberücksichtigt.
- Welche Aufheizzeit wird zum Erreichen der Temperaturdifferenz ΔT gebraucht?
 - Man zeige, dass die Energie der im Zimmer verbleibenden Luft beim Aufheizprozess konstant bleibt, man also tatsächlich „zum Fenster hinaus“ heizt.

Zahlenwerte: $p = 1 \text{ bar}$; $V = 100 \text{ m}^3$; $P = 5 \text{ kW}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Lösung: a) $\Delta t = 23,5 \text{ s}$.

- 5) Zwei Mol Stickstoff (ideales, zweiatomiges Gas) werde unter verschiedenen Randbedingungen von $T_1 = 300 \text{ K}$ auf $T_2 = 600 \text{ K}$ erwärmt, (leicht)
- Berechnen Sie die Zunahme der inneren Energie, die verrichtete Arbeit und die zugeführte Wärmemenge, wenn das Volumen konstant gehalten wird.
 - Berechnen Sie dieselben Größen, wenn die Erwärmung bei konstantem Druck stattfindet.
 - Begründen Sie, warum die isobare Wärmekapazität c_p größer ist als die isochore Wärmekapazität c_v .

Lösung: a) $\Delta U = 12,5 \text{ kJ}$; $\Delta W = 0$; $\Delta Q = 12,5 \text{ kJ}$; b) $\Delta U = 12,5 \text{ kJ}$; $\Delta W = -5,0 \text{ kJ}$; $\Delta Q = 17,5 \text{ kJ}$.

4) Übungsblatt: Thermodynamische Zustandsänderungen, Kreisprozesse

- 1) Die Luft einer am Ausgang verschlossenen Fahrradpumpe wird ausgehend von den Bedingungen T_0, p_0, V_0 auf $\frac{1}{3}$ des Ausgangsvolumens komprimiert. Man nehme an, die Pumpe arbeite ohne Reibungsverluste und das zweiatomige Gas Luft verhalte sich wie ein ideales Gas. •
- Unter welcher Voraussetzung kann man die genannte Kompression als adiabatisch betrachten?
 - Berechnen Sie die Temperaturänderung und die bei der Kompression aufgewandte Arbeit.
 - In einem Experiment wurde tatsächlich ein Temperaturanstieg von 70 °C gemessen. Berechnen Sie für dieses Experiment den Polytropenexponenten α (in $pV^\alpha = \text{const}$).
- Zahlenwerte: $T_0 = 20\text{ °C}$; $p_0 = 10^5\text{ Pa}$; $V_0 = 0,2\text{ dm}^3$.
Ergebnis: b) $\Delta T = 162\text{ K}$; $\Delta W = 27,6\text{ J}$; c) $\alpha = 1,20$.

- 2) Eine feste Menge eines idealen Gases durchlaufe einen dreistufigen reversiblen Kreisprozess. •
- Schritt 1: isotherme Expansion von (p_1, V_1, T_1) nach (p_2, V_2, T_2) ;
Schritt 2: isobare Kompression von (p_2, V_2, T_2) nach (p_3, V_3, T_3) ;
Schritt 3: isochor zurück von (p_3, V_3, T_3) nach (p_1, V_1, T_1) . Es sei $p_2 = 0,1p_1$.
- Skizzieren Sie den Prozess in einem pV-Diagramm.
 - Berechnen Sie T_2, V_2 und T_3 aus den Anfangswerten (p_1, V_1, T_1) .
 - Berechnen Sie für die Schritte 1 bis 3 jeweils die am Gas bzw. vom Gas verrichtete Arbeit.
 - Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Kreisprozesses, wenn dieser mit einem idealen zweiatomigen Gas geführt wird.

(Teilaufgabe a. bis c.: Original-Klausuraufgabe Frühjahr 2001)

- 3) Carnotscher Kreisprozess: •
- Skizzieren Sie den Carnot-Prozess im pV-Diagramm. Benennen Sie die vier Teilprozesse und zeichnen Sie mit Pfeilen den Umlaufsinn ein für den Fall, dass die Carnot-Maschine als Wärmekraftmaschine arbeitet.
 - Wie ist der Wirkungsgrad η einer Wärmekraftmaschine allgemein definiert?
 - Drücken Sie den (idealen) Wirkungsgrad η_{Carnot} der reversibel arbeitenden Carnot-Maschine durch die Temperaturen T_1 und T_2 des wärmeren bzw. des kälteren Reservoirs aus.
 - Bei der Umkehrung des Umlaufsinn der Carnot-Wärmemaschine erhält man eine Wärmepumpe bzw. eine Kältemaschine. Wie ist n in diesen Fällen jeweils definiert und wie groß ist η für jeden dieser beiden Fälle, ausgedrückt durch die Temperaturen T_1 und T_2 ?

(Original-Klausuraufgabe Frühjahr 2004)

- 4) Eine Wärmepumpe durchlaufe zwischen den Temperaturen T_1 und T_2 einen Carnot-Prozess und gebe isotherm bei T_2 die Heizleistung $P(T_1)$ ab.
- Skizzieren Sie schematisch die Energieströme einer Wärmepumpe, diskutieren Sie die Definition des Wirkungsgrades und geben Sie dessen Temperaturabhängigkeit an.
 - Der reale Wirkungsgrad η_R einer Wärmepumpe sei $1/10$ des idealen. Vergleichen Sie diesen mit dem Wirkungsgrad η_H eines elektrischen Heizofens. Skizzieren Sie die Funktionen $\eta_R(\Delta T)$ und $\eta_H(\Delta T)$. Für welche Temperaturdifferenz ist die Wärmepumpe wirtschaftlicher als die elektrische Heizung?
 - Um die Temperatur T_1 gegenüber der Außentemperatur T_2 aufrechtzuerhalten, benötige der Heizofen die Leistung P_H . Wieviel Energie wird pro Monat eingespart, wenn man den Heizofen durch eine Wärmepumpe ersetzt?

Zahlenwerte: $P_H = 2 \text{ kW}$; $T_1 = 25^\circ\text{C}$; $T_2 = 15^\circ\text{C}$.

Lösung: b) $\Delta T = 29,8 \text{ K}$; c) $\Delta W = 957 \text{ kWh}$.

5) Übungsblatt: Elektrostatische Felder, Potentiale und elektrische Spannung

- 1) Vergleichen Sie die Gravitationskraft zwischen Elektron und Proton eines Wasserstoffatoms (mittlerer Abstand $r = a_{Bohr}$) mit der elektrostatischen Kraft zwischen den beiden geladenen Teilchen.

Zahlenbeispiel: $a_{Bohr} = 5,3 \cdot 10^{-11}m$; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}kg$; $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}kg$;
 $q_e = -e$; $q_p = e$.

Ergebnis: $\frac{F_{grav}}{F_{coul}} = 4,41 \cdot 10^{-40}$.

- 2) Ein homogenes elektrisches Feld der Feldstärke E zeige in x-Richtung. Eine im Ursprung ruhende Punktladung Q werde losgelassen. •
- Mit welcher Kraft wird die Ladung beschleunigt?
 - Wie groß ist ihre kinetische Energie bei $x = 4m$?
 - Wie groß ist die Änderung ihrer potentiellen Energie zwischen $x = 0m$ und $x = 4m$?
 - Wie groß ist der Potentialunterschied $\varphi(4m) - \varphi(0m)$?
 - Bestimmen Sie das Potential $\varphi(x)$, wenn $\varphi(1m) = 0$ gewählt wird.

Zahlenbeispiel: $E = 2 \frac{kN}{C}$; $Q = 3\mu C$.

Ergebnis: a) $F = 6mN$; b) $E_{kin} = 24mJ$; c) $E_{pot} = -24mJ$; d) $\Delta\varphi = -8kV$.

- 3) Zwei gleiche, positive Ladungen Q_1 befinden sich in der (xy)-Ebene an den Punkten $(0,a)$ und $(a,0)$. In dem Punkt $(0,0)$ ist eine negative Ladung $-Q_2$ angebracht. •
- Skizzieren Sie die Anordnung. Wie groß muss Q_2 in Einheiten von Q_1 sein, damit eine Ladung im Punkt (a,a) keine Kraft erfährt.
 - Berechnen Sie für diesen Fall das elektrische Potential φ im Punkt (a,a) . Wie üblich sei dabei das Potential im Unendlichen gleich Null.

(Original-Klausuraufgabe Frühjahr 2007)

Ergebnis: b) $\varphi = 0$.

- 4) Elektrischer Quadrupol •
- An den Ecken eines Quadrates der Kantenlänge d befinden sich alternierend Punktladungen q und $-q$. Man berechne die potentielle Energie des so aufgebauten elektrischen Quadrupols.
 - Wie groß ist die potentielle Energie, wenn alle vier Ladungen gleiches Vorzeichen besitzen?
 - Skizzieren Sie grob qualitativ für die Fälle a) und b) den Verlauf der elektrischen Feldlinien sowie der Äquipotentiallinien (ohne Rechnung). Welche Überlegungen kommen Ihnen dabei zu Hilfe?

Zahlenbeispiel: $q = e$; $d = 0,5nm$.

Ergebnis: a) $W = -1,2 \cdot 10^{-18}J$; b) $W = 2,5 \cdot 10^{-18}J$.

- 5) Eine Ladung Q sitzt im Mittelpunkt eines Würfels mit Kantenlänge a .
- Welche Spannung liegt zwischen den Ecken des Würfels?
 - Welche Spannung liegt zwischen den Mittelpunkten der Seitenflächen?
 - Welche Spannung liegt zwischen einer Ecke und einem Seitenmittelpunkt?

Entropie

- 6) Ausgehend von der Temperatur T_0 , dem Druck p_0 und dem Volumen V_0 wird Stickstoff reversibel
- isochor auf die Temperatur T_1 erwärmt bzw.
 - isobar auf die Temperatur T_1 erwärmt und anschließend isotherm auf das Volumen V_0 komprimiert

Wie groß ist in beiden Fällen die Änderung der Entropie?

Zahlenbeispiel: $T_0 = 20^\circ\text{C}$; $p_0 = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$; $V_0 = 1\text{l}$; $T_1 = 500^\circ\text{C}$.

Ergebnis: a) $\Delta S = 0,83 \frac{\text{J}}{\text{K}}$.

6) Übungsblatt: Elektrostatische Felder, Potentiale und elektrische Spannung

- 1) An einer Braunschen Röhre liegt zwischen Kathode und Anode eine Spannung $U_0 = 2000V$. •
- Welche Geschwindigkeit haben Elektronen, die aus der Glühkathode (mit der Geschwindigkeit $v = 0$) emittiert wurden beim Erreichen der Anode?
 - Nach dem Durchtritt durch das Loch in der Anode gelangt der Elektronenstrahl zwischen ein Ablenkplattenpaar der Länge $l = 20mm$ mit dem Abstand $d = 4mm$. Durch Anlegen einer Ablenkspannung U_{\perp} wird zwischen den Ablenkplatten ein homogenes, elektrisches Feld der Feldstärke $E = \frac{U_{\perp}}{d}$ erzeugt, welches senkrecht zur Strahlrichtung steht. Welche Ablenkspannung wird gebraucht, um den Strahl auf dem Schirm im Abstand $s = 20cm$ um $b = 30mm$ auszulenken?
 - Was ändert sich in b), wenn man sowohl die Anodenspannung U_0 als auch die Ablenkspannung U_{\perp} verdoppelt?

Ergebnis: a) $2,6 * 10^7 \frac{m}{s}$; b) $U_{\perp} = 112V$

- 2) Berechnen Sie das elektrische Feld eines unendlich langen unendlich dünnen geraden Leiters, der homogen mit einer Längendichtedichte $\lambda = 2 * 10^{-8} \frac{C}{m}$ geladen ist. Berechnen Sie die Spannung zwischen einem im Abstand von 1 cm und einem im Abstand von 5 cm vom Draht befindlichen Punkt. •

Ergebnis: $U = 579V$

- 3) Eine Ladung Q sei homogen im gesamten Volumen einer nicht leitenden Kugel mit der konstanten Ladungsdichte ρ verteilt. Der Radius der Isolatorkugel sei R . Wie groß ist das elektrische Feld sowie das elektrische Potential als Funktion des Abstandes vom Kugelmittelpunkt

- außerhalb
- innerhalb der Kugel?

- 4) Eine dickwandige metallische Hohlkugel mit dem Innenradius r_i und dem Außenradius r_a trägt die Ladung $Q_K = 2q$. Im Zentrum der Kugel befindet sich eine Punktladung $Q_P = -q$. •
- Skizzieren Sie ein Feldlinienbild.
 - Welchen Verlauf hat die elektrische Feldstärke E als Funktion der Entfernung r vom Mittelpunkt der Kugel für $0 < r < \infty$? Skizzieren Sie die Funktion $E(r)$.
 - Wie groß ist die Feldstärke E an den beiden Oberflächen der Kugel?

7) Übungsblatt: Kondensatoren

- 1) Zwei kleine Metallkugeln vom Radius r befinden sich im Abstand d voneinander, wobei $d \gg r$ ist. Auf den Kugeln befinden sich die Ladungen $+Q$ bzw. $-Q$.
 - a. Skizzieren Sie den Verlauf des Potentials längs der Verbindungslinie der Mittelpunkte der beiden Kugeln.
 - b. Welche Spannung U kann man zwischen den Kugeln messen?
 - c. Mit welcher Kraft ziehen sich die Kugeln an? Welche Arbeit muss man aufwenden, um die Kugeln vom Abstand d aus vollständig auseinander zu ziehen?

- 2) Ein Kugelkondensator besteht aus zwei konzentrischen Hohlkugeln mit den Radien R_i (innere Kugel) und R_a (äußere Kugel), auf denen sich die Ladungen Q bzw. $-Q$ befinden. •
 - a. Wie groß ist die Spannung U zwischen den beiden Kugeln?
 - b. Wie groß ist die Kapazität $C = \frac{Q}{U}$ dieser Kondensatoranordnung?
 - c. Man führe die analogen Berechnungen a) und b) für einen Zylinderkondensator durch, dessen Längenausdehnung groß gegenüber dem Radius R_a des äußeren Zylinders ist.

- 3) Ein luftgefüllter Plattenkondensator mit der Plattenfläche A und dem Plattenabstand d_0 werde auf eine Spannung U_0 aufgeladen. Der Kondensator wird von der Spannungsquelle getrennt. •
 - a. Berechnen Sie die Kapazität C_0 des Kondensators. Wie groß ist die Ladung Q_0 auf den Platten und die in dem Kondensator gespeicherte elektrische Energie W_0 ?
 - b. Der Plattenabstand werde nun auf $2 * d_0$ vergrößert. Wie ändert sich die Ladung Q auf den Platten sowie das elektrische Feld E und die Spannung U zwischen den Platten? Wie ändert sich Kapazität und gespeicherte elektrische Energie?
 - c. Berechnen Sie die mechanische Arbeit, die erforderlich ist, um die Platten auseinanderzuziehen?
 - d. Eine Metallplatte der Dicke d_0 werde zwischen die Platten des Kondensators geschoben. Wie groß ist nun die Spannung über dem Kondensator?
 - e. Anschließend werde ein Kondensator der Kapazität $2C_0$ parallel geschaltet. Welche Spannung kann über dem Kondensator gemessen werden?
 - f. Wie ändern sich die Ergebnisse in Aufgabe b) und c) wenn die Spannungsquelle nicht abgeklemmt wird?

Zahlenbeispiel: $A = 300\text{cm}^2$; $d = 10\text{mm}$; $U_0 = 12\text{V}$.

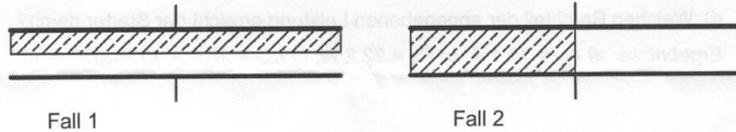
- 4) Ein Kondensator der Kapazität C_1 und ein Kondensator der Kapazität C_2 seien parallel geschaltet. Ein Kondensator der Kapazität C_3 liege dazu in Reihe. Die gesamte Anordnung werde auf die Spannung U geladen.
 - a. Skizzieren Sie die Anordnung.
 - b. Bestimmen Sie die Ladung auf jedem Kondensator.

Zahlenbeispiel: $C_1 = 1\mu\text{F}$; $C_2 = 0,25\mu\text{F}$; $C_3 = 0,3\mu\text{F}$; $U = 10\text{V}$.

Ergebnisse: b) $Q_1 = 1,94\mu\text{C}$; $Q_2 = 0,48\mu\text{C}$; $Q_3 = 2,42\mu\text{C}$.

8) Übungsblatt: Kondensatoren und Dielektrika

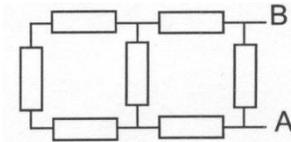
- 1) Ein luftgefüllter Plattenkondensator besitze die Kapazität C_0 und die Ladung Q . •
 - a. Wie ändern sich jeweils die Kapazität C , die elektrische Feldstärke E , die Spannung U , die elektrische Verschiebungsdichte D , die Flächenladungsdichte auf den Kondensatorplatten sowie die im elektrischen Feld gespeicherte Energie, wenn das Volumen zwischen den Platten wie skizziert zur Hälfte mit einem Dielektrikum mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r gefüllt wird?
 - b. Wie ändert sich das Ergebnis, wenn nicht die Ladung Q , sondern die am Kondensator angelegte Spannung U konstant gehalten wird?



Ströme und Spannungen

- 2) Welcher Gesamtwiderstand liegt zwischen den Punkten A und B, wenn die Einzelwiderstände jeweils 3Ω haben? (leicht)

Ergebnis: $R_{ges} = 2,20\Omega$.



- 3) Gegeben sei ein Würfel, dessen Kanten aus Silberdrähten bestehen (Kantenlänge $a = 10\text{cm}$, Durchmesser $d = 1\text{mm}$, $\rho_{Ag} = 1,6 \cdot 10^{-8}\Omega\text{m}$). Skizzieren Sie die Anordnung und berechnen Sie den Gesamtwiderstand zwischen zwei Eckpunkten der Raumdiagonalen. •

Ergebnis: $R_{ges} = 1,70\text{m}\Omega$.

- 4) Von einer Reise aus den USA hat jemand eine 60W -Glühlampe und einen 500W -Tauchsieder mitgebracht, beide ausgelegt für die Spannung 115V . •
 - a. Können Sie Lampe und Tauchsieder in Serie schalten und an unserem Stromnetz mit 230V betreiben?
 - b. Welchen Vorwiderstand benötigen Sie, um beide Geräte parallel geschaltet an unser Stromnetz anzuschließen?
 - c. Welche Leistung wird im Fall b) im Vorwiderstand dissipiert?
 - d. Was passiert im Fall b), wenn der Thermoschalter des Tauchsieders abschaltet?

Ergebnisse: b) $R = 23,6\Omega$; c) $P_R = 560\text{W}$.

- 5) An einer Autobatterie wird eine Leerlaufspannung $U_0 = 12\text{V}$ gemessen. Nach Einschalten von 2 Scheinwerfern (je $12\text{V}/60\text{W}$) plus 2 Rückleuchten (je $12\text{V}/20\text{W}$) sinkt die Spannung an den Klemmen der Batterie auf $U_{Bel} = 10\text{V}$.

- a. Welcher Strom fließt dann insgesamt?
- b. Welche Leistung wird dabei in der Batterie selbst verbraucht?
- c. Welcher Strom fließt durch einen Startermotor dessen Leistung mit $P_A = 500\text{W}$ bei 12V angegeben ist?
- d. Welchen Bruchteil der angegebenen Leistung erreicht der Starter damit?

Ergebnisse: a) $I_{Bel} = 11,1\text{A}$; b) $P_B = 22,2\text{W}$ c) $I_{mot} = 25,6\text{A}$; d) $\frac{P_{mot}}{P_0} = 38\%$.

9) Übungsblatt: Stationäre Ströme

- 1) Eine Autowerkstatt bietet eine Autobatterie mit einer Batteriekapazität von 63 Ah , einer Kurzschluss-Stromstärke von 300 A und einer Leerlaufspannung von 12 V an. (leicht)
- Wie groß ist der Innenwiderstand der Batterie?
 - Mit welcher Leistung wird die Batterie beheizt, wenn man sie kurzschließt?
 - Wie lange brennt das Standlicht (4 Birnchen zu je 5 Watt), wenn die Batterie zuvor voll geladen war?
 - Welche Energie ist in der voll geladenen Batterie gespeichert?
 - Welche Spannung liegt an den Batterieklemmen noch an, wenn ein Strom von 45 A fließt? Wie groß ist dann die Nutzleistung beim Verbraucher?

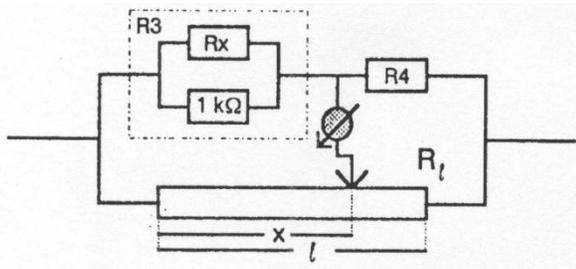
Ergebnisse: a) $R_i = 0,04 \Omega$; b) $P_i = 3,6 \text{ kW}$; c) $t = 38,0 \text{ h}$; d) $W = 2,72 \text{ MJ}$; e) $U = 10,2 \text{ V}$; $P = 459 \text{ W}$.

- 2) Ein Strommessgerät mit dem Innenwiderstand $1 \text{ k}\Omega$ zeigt bei einem Strom von 2 mA Vollausschlag. Wie kann man dieses Instrument durch geeignete Beschaltung mit Widerständen •
- zu einem Strommesser mit dem Vollausschlag 1 A und
 - zu einem Spannungsmesser mit dem Vollausschlag 100 V machen?

Skizzieren Sie jeweils die Schaltungen und geben Sie die Größe der Widerstände an.

Ergebnisse: a) $R = 2 \Omega$; b) $R = 49 \text{ k}\Omega$.

- 3) Wheatstonesche Brückenschaltung (siehe Skizze): Wie groß ist der Widerstand R_x , wenn der Spannungsteiler auf $x = 30 \text{ cm}$ eingestellt werden muss, damit der Brückenstrom I verschwindet ($l = 1 \text{ m}$; $R_1 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega$)? •



Ergebnis: $R_x = 0,75 \text{ k}\Omega$.

- 4) Sie schalten bei Ihrem Auto das Licht ein. Wie lange brauchen die Elektronen für das Durchlaufen des Kabels zwischen dem Schalter und dem Rücklicht (12 V , 5 W)? Nehmen Sie dabei an, dass jedes Rücklicht mit einem 5 m langen Kupferdraht mit einem Querschnitt von $0,75 \text{ mm}^2$ mit dem Schalter verbunden ist und dass pro Kupferatom ein freies Elektron existiert. Berechnen Sie die freie Flugzeit τ in dem Draht.

Dichte: $\rho_{\text{Cu}} = 8,93 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$; Molmasse: $M_{\text{Cu}} = 63,5 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$; $\sigma = 0,59 \cdot 10^6 \cdot \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

Ergebnisse: $t = 33,9 \text{ h}$; $\tau = 2,48 \cdot 10^{-14} \text{ s}$.

Magnetostatik

- 5) Bei Wasserstoffatomen im Grundzustand bewegt sich ein Elektron auf einer Kreisbahn mit Radius $r_B = 5,29 * 10^{-11} m$. •
- Aus dem Kräftegleichgewicht von Coulombkraft und Zentrifugalkraft berechne man die Umlauffrequenz.
 - Welcher mittleren Stromstärke entspricht diese Ladungsbewegung?
 - Wie groß ist das Magnetfeld, das dadurch am Ort des Atomkerns erzeugt wird?

Ergebnisse: a) $f = 6,58 * 10^{15}$; b) $I = 1,05 mA$; c) $B = 12,5 T$.

- 6) Ein Strahl von Elektronen verschiedener Geschwindigkeiten läuft im Vakuum durch ein Gebiet, in dem ein homogenes Magnetfeld B und ein homogenes elektrisches Feld E herrschen. E und B stehen senkrecht aufeinander und senkrecht zu v . Wie groß ist die Geschwindigkeit von Elektronen, die nicht durch die Felder abgelenkt werden? •

Zahlenwerte: $E = 1,1 * 10^4 \frac{V}{m}$; $B = 2,5 * 10^{-3} \frac{Vs}{m^2}$.

Ergebnis: $v = 4,40 * 10^6 \frac{m}{s}$.

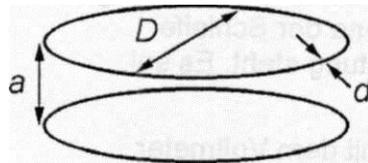
10) Übungsblatt: Magnetostatik

- 1) Ein Strahl einfach ionisierter Ionen der Geschwindigkeit $v = 2 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$ tritt senkrecht in ein Magnetfeld $B = 0,5 \frac{Vs}{m^2}$ ein. Nach Umlenkung um 180° treffen die Ionen auf eine Photoplatte auf (leicht). •

- In welchem Abstand voneinander treffen die Ionen $^{16}O^-$ und $^{18}O^-$ auf?
- In welchem Abstand voneinander treffen die Ionen $^{35}Cl^-$ und $^{37}Cl^-$ auf?
- Wie groß ist der Drehimpuls eines $^{16}O^-$ -Ions bei seiner Bahn im Magnetfeld?

Ergebnisse: a) $d = 1,66cm$; b) $d = 1,66cm$; c) $L = 3,53 \cdot 10^{-22} \frac{kg \cdot m^2}{s}$.

- 2) Zwei Ringe mit Durchmesser D aus Kupferdraht der Dicke $d = 2mm$ sind im Abstand $a = 1cm$ horizontal übereinander angeordnet, wobei $D \gg a$. In den Ringen fließen Ströme betragsmäßig gleicher Stromstärke I . •



- Skizzieren Sie das resultierende Magnetfeld für gleichsinnig und entgegengesetzt fließende Ströme.
- Welche Richtung müssen die Ströme relativ zueinander haben, damit sich die Ringe abstoßen?
- Bei welcher Stromstärke I ist die Abstoßungskraft auf den oberen Ring gleich seiner Gewichtskraft? (Dichte von Kupfer: $\rho_{Cu} = 8,9 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$)

Ergebnis: c) $I = 117 A$.

- 3) Zwei Drehspulinstrumente A und B unterscheiden sich nur in der Konstruktion der Drehspule. Die Spule A hat 50 Windungen und der Innenwiderstand von A beträgt $R_{iA} = 10\Omega$. Die Spule von B hat 100 Windungen und $R_{iB} = 40\Omega$.
- Wenn A und B in einem Stromkreis in Serie geschaltet sind, zeige A einen Ausschlag von 6 Skalenteilen. Welchen Ausschlag zeigt B ?
 - Wenn A und B parallel zu einer Batterie geschaltet sind, zeige A einen Ausschlag von 6 Skalenteilen. Welchen Ausschlag zeigt B ?

Ergebnisse: a) $\varphi_B = 12 \text{ Skt.}$; b) $\varphi_B = 3 \text{ Skt.}$.

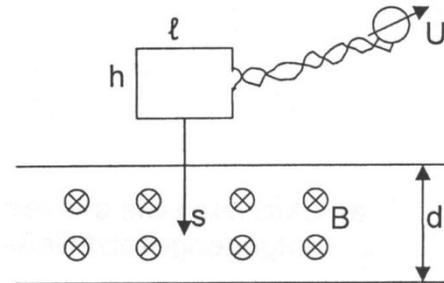
- 4) Eine Hallsonde mit dem Querschnitt $1 \times 1 \text{ cm}^2$ befindet sich in einem transversalen Magnetfeld von $1 T$. Bei einer Stromstärke von $0,1 A$ wird eine Hallspannung von $10^{-3} V$ gemessen. •

- Wie groß ist die Ladungsträgerkonzentration in dem Sondenmaterial?
- Wie groß ist die mittlere Driftgeschwindigkeit der Elektronen?

Ergebnisse: a) $n = 6,25 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$; b) $v = 0,1 \frac{m}{s}$.

- 5) Ein Zug fährt mit einer Geschwindigkeit $v = 200 \frac{km}{h}$ nach Süden über eine gerade Eisenbahnstrecke, deren Schienen einen Abstand d von $1,5 m$ haben. Welche Spannung wird aufgrund der Flussdichte des Erdmagnetfeldes B zwischen den Schienen induziert, wenn $|B| = 4 * 10^{-5} T$ und die \vec{B} -Richtung um 65° gegen die Vertikale geneigt ist?
Ergebnis: $U_{ind} = 1,41 mV$.

- 6) Eine rechteckige Drahtschleife der Länge l und der Höhe h wird mit konstanter Geschwindigkeit v in vertikaler Richtung durch ein örtlich begrenztes, homogenes Magnetfeld B der räumlichen Ausdehnung d geführt, wobei die Ebene der Schleife senkrecht zur Feldrichtung steht. Es sei $h < d$.



- Skizzieren Sie die mit dem Voltmeter gemessene Spannung U in Abhängigkeit vom Weg s .
- Wie groß ist der Betrag der induzierten Spannung U während des Eintauchens in den Feldbereich?
- Das Voltmeter werde entfernt und die Schleife in sich kurzgeschlossen. Der Widerstand der Drahtschleife sei R . Wie groß ist die Stromstärke in der Schleife bei gleicher Bewegung wie zuvor? Welche Kraft F_m wirkt hierbei der Bewegung entgegen?
- Die kurzgeschlossene Schleife (Masse m) wird bei gleicher Ausrichtung zum Magnetfeld frei fallengelassen. Welche Endgeschwindigkeit v_E erreicht die Schleife während des Eintauchens in das Feld?

Zahlenwerte: $B = 1,5 T$; $l = 5 cm$; $v = 10 \frac{cm}{s}$; $m = 2 g$; $R = 3 m\Omega$.

Ergebnisse: b) $U = 7,5 mV$; c) $I = 2,50 A$; $F_m = 188 nM$; d) $v_E = 1,05 \frac{cm}{s}$.

(Klausuraufgabe Frühjahr 2004)

11) Übungsblatt: Induktion und Transformatoren

- 1) Eine ebene Rechteckspule mit 100 Windungen und der Fläche $A = 10 \text{ cm}^2$ rotiert um eine in der Spulenfläche liegenden Achse mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 200 \text{ s}^{-1}$. •
- Wie groß ist die elektrische Spannung an den Enden der Spule, wenn die Rotation in einem zur Rotationsachse senkrechten Magnetfeld $B = 0,2 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$ erfolgt?
 - Die Spule wird mit ihrer Fläche senkrecht zum Magnetfeld festgehalten. Das Magnetfeld wird innerhalb von $0,5 \text{ s}$ mit konstantem dB/dt vom Wert 0 auf den Maximalwert $0,2 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$ hochgefahren. Welche Spannung tritt dabei an den Enden der Spule auf?
 - Anschließend fließe durch Anlegen einer äußeren Spannung ein Strom von $0,5 \text{ A}$ durch die Spule. Wie groß ist das Drehmoment auf die Spule?

Ergebnisse: a) $U_{\text{ind}} = 4 \text{ V} * \sin \omega t$; b) $U_{\text{ind}} = 0,04 \text{ V}$; c) $M = 0 \text{ Nm}$.

- 2) Ein Kabel liegt in $0,5 \text{ m}$ Tiefe in der Erde und wird von einem sinusförmigen Wechselstrom mit der Amplitude I und der Frequenz f durchflössen.
- Welche Amplitude hat die magnetische Flussdichte B an der Erdoberfläche?
 - Zu ihrer Messung werde eine kleine Zylinderspule vom Querschnitt A und der Windungszahl N zusammen mit einem Spannungsmessgerät verwendet. Wie muss die Spule angeordnet werden, um eine maximale Spannung zu erhalten?
 - Welche Amplitude hat dann die Spannung?

Zahlenbeispiel: $I = 50 \text{ A}$; $f = 50 \text{ Hz}$; $A = 1 \text{ cm}^2$; $N = 3000$.

Ergebnisse: a) $B_0 = 2 * 10^{-5} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$; c) $U_0 = 1,9 \text{ mV}$.

- 3) Eine 20 cm lange Spule mit einer Querschnittsfläche $A = 10 \text{ cm}^2$ und einer Windungszahl $N = 2000$ Windungen wird von einem Strom $I = 10 \text{ A}$ durchflössen. •
- Wie groß ist die magnetische Feldstärke in der Spule?
 - Um die Spule wird eine einzige Induktionsschleife gelegt. Wie groß ist der Spannungsstoß beim Ein- bzw. Ausschalten des Stromes?
 - Bei eingeschaltetem Strom ($I = 10 \text{ A}$) wird das Innere der Spule vollständig mit einem Material ausgefüllt. Dabei tritt in der Induktionsschleife ein Spannungsstoß von 10^{-8} Vs auf. Das Vorzeichen des Spannungsstoßes entspricht dem, das man beim Ausschalten des Stromes beobachtet hatte. Wie groß ist die Permeabilität des in die Spule gebrachten Materials? Um welche Art magnetischen Materials handelt es sich dabei?

Ergebnisse: a) $H = 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$; b) Ein: $\int U_{\text{ind}} dt = -1,26 * 10^{-4} \text{ Vs}$;

Aus: $\int U_{\text{ind}} dt = 1,26 * 10^{-4} \text{ Vs}$; c) $\mu_r = 0,99992$.

- 4) Durch eine zylindrische Magnetspule mit der Windungszahl N und der Querschnittsfläche A fließt ein Strom der Stromstärke I und erzeugt im Innern der Spule ein homogenes Magnetfeld der Stärke H . Der ohmsche Widerstand der Spule sei R .
- Wie lang ist die Spule und welche Energie ist in ihr gespeichert?
 - Wie groß ist die Induktivität der Spule?
 - Welche Ladungsmenge fließt, wenn der Feld erzeugende Strom abgeschaltet und gleichzeitig die Spule kurzgeschlossen wird?

Zahlenwerte: $N = 5000$; $A = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$; $I = 60 \text{ A}$; $H = 60 \text{ A}$; $H = 6 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$; $R = 38 \Omega$.

Ergebnisse: a) $l = 0,5 \text{ m}$; $W = 227 \text{ J}$; b) $L = 126 \text{ mH}$; c) $Q = 0,20 \text{ C}$.

- 5) Um Leitungsverluste bei der Übertragung elektrischer Energie über lange Strecken zu vermeiden, wird die in Kraftwerksgeneratoren erzeugte Wechselspannung auf mehrere Kilovolt hochtransformiert, dann über Hochspannungsleitungen geleitet und lokal in der Nähe des Verbrauchers heruntertransformiert. •
- Welches Windungsverhältnis muss ein Transformator besitzen, um Wechselspannung von $4,4 \text{ kV}$ auf 220 V herunterzutransformieren?
 - Eine Leitung habe einen Widerstand pro Länge von $0,002 \frac{\Omega}{\text{km}}$. Etwaige kapazitive und induktive Widerstände seien zu vernachlässigen. Welcher Teil der eingespeisten Leistung geht bei der Übertragung über eine 10 km lange Leitung verloren, wenn 200 kW elektrischer Leistung bei einer Spannung von 230 V eingespeist werden? Wie groß ist die Verlustleistung bei einer Spannung von $4,6 \text{ kV}$?

Ergebnisse: a) $\frac{n_1}{n_2} = 20$; b) $\frac{P_{R,230V}}{P} = 7,6\%$; $P_{R,4,6kV} = 37,8 \text{ W}$.

Elektromagnetische Wellen

- 6) Die elektrische Feldstärke einer Lichtwelle lässt sich folgendermaßen beschreiben: •

$$E(x, t) = 20 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cos(9 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} \cdot t - 6 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \cdot x).$$

- Wie groß sind Schwingungsdauer und Wellenlänge dieser Welle?
- Wie groß ist der Brechungsindex des Mediums, in dem sich die Welle ausbreitet?
- Geben Sie die Intensität der Lichtwelle an.
- Worin besteht der Unterschied zwischen Welle und Schwingung?

Zahlenwerte: $\mu_r \approx 1$

Ergebnisse: a) $T = 0,70 \text{ fs}$; $\lambda = 105 \text{ nm}$; b) $n = 2$.

12) Übungsblatt: Geometrische Optik

- 1) Ein Scheinwerfer, der sich inmitten einer Höhle unter Wasser befindet, soll die Höhle oberhalb des Wassers vollständig ausleuchten. •
- Welchen Öffnungswinkel sollte der Lichtkegel unter Wasser mindestens haben?
 - Welchen Öffnungswinkel benötigt man, wenn eine Ölschicht die Wasseroberfläche bedeckt?
 - Welchen Wert nimmt der erforderliche Öffnungswinkel an, wenn sich der Scheinwerfer unter Öl statt unter Wasser befindet?
 - Was geschieht mit Licht, das vom Scheinwerfer unter einem noch größeren als dem berechneten Öffnungswinkel abgestrahlt wird (Begründung)?

Brechungsindizes: $n_{\text{Wasser}} = 1,3$; $n_{\text{Öl}} = 1,6$;

Ergebnisse: a) $2\alpha = 100,6^\circ$; c) $2\alpha = 77,4^\circ$.

(Original-Klausuraufgabe Frühjahr 2001)

- 2) Im Abstand $g = 10 \text{ cm}$ vor einem Wölbspiegel mit dem Krümmungsradius $r = 10 \text{ cm}$ steht ein $G = 2 \text{ cm}$ großer Gegenstand. •
- Zeichnen Sie den Strahlengang und skizzieren Sie die Lage des (virtuellen) Bildes.
 - Berechnen Sie die Größe und die Lage des Bildes.

Ergebnisse: b) $b = -3,33 \text{ cm}$; $B = 0,67 \text{ cm}$.

- 3) Eine Sammellinse erzeugt von einem Gegenstand (Pfeil der Höhe $G = 2 \text{ cm}$, Gegenstandsweite $g = 10 \text{ cm}$) ein auf die Hälfte verkleinertes Bild. •
- Konstruieren Sie die Lage des Bildes und der Brennpunkte in möglichst korrektem Maßstab und erklären Sie die Konstruktion!
 - Berechnen Sie die Brennweite f der Linse!
 - In welchem Abstand g von der Linse muss der Gegenstand hingestellt werden, damit das Bild gleich groß ist wie der Gegenstand?

(Original-Klausuraufgabe Herbst 2006)

Ergebnisse: b) $f = 3,33 \text{ cm}$; c) $g = 6,67 \text{ cm}$.

- 4) Ein Gegenstand steht im Abstand l vor einem Schirm. In diese Anordnung soll eine Linse so eingefügt werden, dass der Gegenstand auf dem Schirm abgebildet wird.
- Berechnen Sie die maximal mögliche Brennweite f_{max} der Linse.
 - Eine Linse der Brennweite $f < f_{\text{max}}$ wird vom Ort des Gegenstandes bis zum Schirm verschoben. Wie oft sieht man ein scharfes Bild des Gegenstandes auf dem Schirm und wie groß sind jeweils die Gegenstandsweiten g ?
 - Konstruieren Sie für das Beispiel: Gegenstandsgröße $G = 1 \text{ cm}$, $l = 10 \text{ cm}$, $g = 2,5 \text{ cm}$ möglichst maßstabsgerecht den Brennpunkt F der Linse und geben Sie die Brennweite f an. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen!

- 5) Flintglas hat für Licht der Wellenlänge $\lambda = 656 \text{ nm}$ den Brechungsindex $n = 1,608$. Aus diesem Material soll eine Sammellinse mit der Brennweite $f = 100 \text{ mm}$ gefertigt werden. Wie groß müssen die Krümmungsradien r gewählt werden im Falle einer (leicht)

- plankonvexen Linse?
- symmetrisch bikonvexen Linse
- konkavkonvexen Linse mit $|r_1| = 2|r_2|$?

Wie groß ist die Brennweite dieser Linsen für Licht der Wellenlänge $\lambda = 486 \text{ nm}$ ($n = 1,624$)? Welcher Brechkraft entspricht dies? Wie groß ist die Brennweite bzw. die Brechkraft von zwei solchen Linsen im Abstand $d = 3 \text{ cm}$ voneinander (bei dieser Wellenlänge)?

Ergebnisse: a) $r = 60,8 \text{ mm}$; b) $r = 121,6 \text{ mm}$; c) $r_1 = 30,4 \text{ mm}$; $f = 97,4 \text{ mm}$;

$D = 70,3 \text{ dpt}$; $f_2 = 57,6 \text{ mm}$; $D_2 = 17,4 \text{ dpt}$.

- 6) Die abbildende Linse eines Fotoapparates habe einen maximal nutzbaren Durchmesser $D = 2 \text{ cm}$ und eine Brennweite $f = 10 \text{ cm}$. •

- Bis zu welchem kleinsten Abstand g von der Linse werden bei dem für unendliche Entfernung eingestelltem Apparat Gegenstände noch „scharf“ abgebildet, wenn anstelle von Bildpunkten Kreise mit einem Durchmesser $0,1 \text{ mm}$ zugelassen werden.
- Wie lässt sich die Schärfentiefe so weit erhöhen, dass der kleinste Abstand unter den angegebenen Bedingungen $\frac{g}{2}$ wird.

Ergebnisse: a) $g = 20 \text{ m}$, b) $D' = 7 \text{ cm}$.

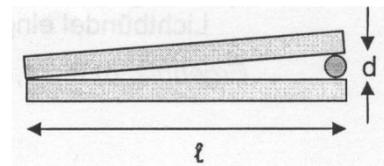
13) Übungsblatt: Wellenoptik

- 1) Die Oberfläche einer Linse mit dem Brechungsindex n_L wird mit einem Material vom Brechungsindex $n < n_L$ vergütet, (leicht)
- Berechnen Sie den Gangunterschied A für die Reflexion zweier senkrecht einfallender Teilstrahlen, die auf der Ober- bzw. auf der Unterseite der Vergütungsschicht reflektiert werden?
 - Welches ist die kleinstmögliche Dicke der Vergütungsschicht, damit senkrecht einfallendes, grünes Licht der Wellenlänge λ_g bei der Reflexion ausgelöscht wird?
 - Welchen Gangunterschied erfährt rotes Licht der Wellenlänge λ_r bei der Reflexion (in Bruchteilen von λ_r ausdrücken)?

Zahlenwerte: $n = 1,2$; $\lambda_g = 550 \text{ nm}$; $\lambda_r = 700 \text{ nm}$.

Ergebnisse: b) $d = 115 \text{ nm}$; c) $\Delta = 0,393 \lambda_r$.

- 2) Es soll der Durchmesser d eines feinen Drahtes bestimmt werden. Hierfür wird der Draht wie abgebildet zwischen zwei planparallele Glasplatten der Länge $l = 20 \text{ cm}$ gelegt. Anschließend wird die Anordnung von oben mit gelbem Licht einer Natriumlampe ($\lambda = 590 \text{ nm}$) beleuchtet. Es lassen sich 19 helle Streifen beobachten. Was lässt sich daraus für die Dicke des Drahtes aussagen?



Ergebnis: $5,46 \mu\text{m} < d < 5,75 \mu\text{m}$.

- 3) Zwei parallele Spalte der Breite a im Abstand d werden mit monochromatischem parallelem Licht der Wellenlänge λ senkrecht beleuchtet.
- Leiten Sie anhand einer Skizze her, unter welchen Winkeln Helligkeitsmaxima auftreten! •
 - Skizzieren Sie den Intensitätsverlauf des Interferenzbildes.
 - Wie ändert sich das Interferenzbild, wenn Sie vor einen der beiden Spalte eine planparallele Glasplatte mit dem Brechungsindex $n = 1,5$ und der Dicke λ anbringen.
 - Wo liegen die Maxima, wenn Sie einen der Spalte abdecken?
- 4) Beugungsgitter •
- Auf ein Beugungsgitter mit der Gitterkonstanten $g = 5 \mu\text{m}$ fällt Licht der Wellenlänge $\lambda = 500 \text{ nm}$ senkrecht ein. Unter welchen Winkeln treten die Beugungsmaxima 1., 2. und 3. Ordnung auf?
 - Wie groß ist die Spaltbreite des Gitters aus a), wenn keine Intensität in der 3. Ordnung auftritt?
 - Ein Beugungsgitter wird mit parallelem weißem Licht beleuchtet. Kann es passieren, dass sichtbares Licht aus dem Spektrum 1. Ordnung unter dem gleichen Winkel gebeugt wird, wie sichtbares Licht aus dem Spektrum 2. Ordnung, d.h. dass sich die beiden Ordnungen teilweise überlappen? (Sichtbarer Spektralbereich: 400 nm bis 780 nm)

Ergebnis: a) $\alpha = 5,74^\circ$; $\alpha_2 = 11,5^\circ$; $\alpha_3 = 17,5^\circ$; b) $b_1 = 1,67 \mu\text{m}$; $b_2 = 3,33 \mu\text{m}$.

Polarisiertes Licht

- 5) Ein paralleles, monochromatisches Lichtbündel fällt unter dem Einfallswinkel 55° auf eine ebene Glasplatte. Das Licht ist parallel zur Einfallsebene linear polarisiert. Unter diesen Bedingungen wird kein reflektiertes Licht beobachtet. •
- Wie kann man das Fehlen des reflektierten Lichtes verstehen?
 - Was folgt aus dieser Beobachtung für den Brechungsindex des Glases?
 - Was geschieht, wenn statt dem linear polarisiertem ein unpolarisiertes Lichtbündel eingestrahlt wird?

Ergebnis: b) $n = 1,43$.

14) Übungsblatt: Moderne Physik

- 1) Eine Rakete bewege sich relativ zu einem ruhenden Beobachter mit 99% der Lichtgeschwindigkeit.
 - a. Um welchen Faktor ändert sich die Masse der Rakete im Vergleich zu ihrer Ruhemasse m_0 ?
 - b. Wie viel Zeit ist nach der Uhr des ruhenden Beobachters vergangen, wenn nach der Uhr, die sich mit der Rakete bewegt, ein Jahr vergangen ist?
 - c. Wie ändern sich für den ruhenden Beobachter die linearen Abmessungen der Körper in der Rakete in Richtung ihrer Bewegung sowie senkrecht dazu?
 - d. Wie ändert sich folglich für den Beobachter die Dichte der Stoffe in dieser bewegten Rakete im Vergleich zum Ruhezustand?(Original-Klausuraufgabe)
- 2) Ein Elektron mit der Ruheenergie $0,511 \text{ MeV}$ bewege sich mit der Geschwindigkeit $v = 0,8 c$. Wie groß sind seine Gesamtenergie, seine kinetische Energie und sein Impuls?
- 3) Wenn monochromatisches Licht der Wellenlänge λ_1 auf eine Metalloberfläche trifft, so lassen sich die emittierten Photoelektronen durch eine Gegenspannung U_1 stoppen. Für Licht der Wellenlänge λ_2 ist dazu die Gegenspannung U_2 notwendig.
 - a. Berechnen Sie aus diesen Daten bei bekannter Vakuumlichtgeschwindigkeit c den Wert von $\frac{h}{e}$.
 - b. Wie groß ist die Austrittsarbeit Φ des Metalls?
 - c. Wie groß ist die maximale Wellenlänge des Lichts, bei der Photoelektronen emittiert werden?
- 4) Paarbildung
 - a. Wie groß darf die Wellenlänge elektromagnetischer Strahlung höchstens sein, damit die Bildung von Elektron-Positron-Paaren möglich ist?
 - b. Wie groß ist die elektrische Spannung U , die an eine Röntgenröhre mindestens angelegt werden muss, um Photonen zu erzeugen, deren Energie der Ruheenergie eines Elektron-Positron-Paares entspricht?
 - c. Welche de Broglie-Wellenlänge haben die mit der Spannung U beschleunigten Elektronen?
- 5) Ein Elektron, ein Proton und ein Photon haben jeweils die (de Broglie-) Wellenlänge $\lambda = 0,2 \text{ nm}$.
 - a. Wie groß sind die Impulse der Teilchen?
 - b. Wie groß sind ihre kinetischen Energien? Rechnen Sie beim Elektron und beim Proton nicht-relativistisch.
 - c. Begründen Sie, warum die nicht-relativistische Betrachtung für das Elektron und das Proton in b) zulässig war.

- 6) Wie groß ist die Unscharfe der Energie von Photonen, die beim Zerfall eines angeregten Atomzustands der Lebensdauer 10^{-17} s emittiert werden?
- 7) Bohr'sches Atommodell
- Wie lauten im Bohr'schen Atommodell die Bedingungen für die erlaubten Bahnen der Elektronen im Wasserstoffatom?
 - Berechnen Sie den Radius r_n der n -ten Bohr'schen Bahn sowie die Geschwindigkeit v_n eines Elektrons auf dieser Bahn.
 - Berechnen Sie die Gesamtenergie eines Elektrons auf der n -ten Bohr'schen Bahn.
(Original-Klausuraufgabe)
- 8) Ein H-Atom im Grundzustand ($n = 1$) absorbiere ein Photon und gehe dadurch in den Zustand mit $n = 2$ über.
- Welcher Impuls wird bei der Absorption auf das H-Atom übertragen?
 - Welcher Anteil der Photonenenergie $h\nu$ wird bei der Absorption in kinetische Energie des H-Atoms umgesetzt?
 - Wie groß ist diese kinetische Energie im Vergleich zur mittleren thermischen Energie eines H_2 -Moleküls im H_2 -Gas bei $T = 300 \text{ K}$?
- 9) ${}^{235}_{92}\text{U}$ geht mit einer Halbwertszeit $T_{\frac{1}{2}} = 7 \cdot 10^8$ Jahre durch α -Zerfall in den Folgekern Th über.
- Wie groß sind Ordnungszahl und Massenzahl des Folgekerns?
 - Die kinetische Energie des emittierten α -Teilchens beträgt $4,7 \text{ MeV}$. Wie groß ist die Rückstoßenergie des Folgekerns?
 - Nach welcher Zeit ist die Aktivität $\left| \frac{dN}{dt} \right|$ auf 5% des ursprünglichen Wertes abgesunken?
(Original-Klausuraufgabe)

VII. LÖSUNGSHINWEISE

Lösungshinweise werden separat von Fabian –vielen Dank an dieser Stelle- erstellt. Sie sind unter www.froos.de/exphysik zu finden.

VIII. VERZEICHNIS

1) Griechisches Alphabet

Bezeichnung	Zeichen
Alpha	A α
Beta	B β
Gamma	Γ γ
Delta	Δ δ
Epsilon	E ϵ
Zeta	Z ζ
Eta	H η
Theta	Θ θ
Jota	I ι
Kappa	K κ
Lambda	Λ λ
My	M μ

Bezeichnung	Zeichen
Ny	N ν
Xi	Ξ ξ
Omikron	O \omicron
Pi	Π π
Roh	P ρ
Sigma	Σ ς
Tao	T τ
Ypsilon	Y υ
Phi	Φ ϕ
Chi	X χ
Psi	Ψ ψ
Omega	Ω ω

2) Zehnerpotenzen

Bezeichnung	Abkürzung	Größe
Yotta	<i>Y</i>	10^{24}
Zetta	<i>Z</i>	10^{21}
Exa	<i>E</i>	10^{18}
Peta	<i>P</i>	10^{15}
Tera	<i>T</i>	10^{12}
Giga	<i>G</i>	10^9
Mega	<i>M</i>	10^6
Kilo	<i>k</i>	10^3
Milli	<i>m</i>	10^{-3}
Mikro	μ	10^{-6}
Nano	<i>n</i>	10^{-9}
Piko	<i>p</i>	10^{-12}
Femto	<i>f</i>	10^{-15}
Atto	<i>a</i>	10^{-18}
Zepto	<i>z</i>	10^{-21}
Yokto	<i>y</i>	10^{-24}

3) Basiseinheiten

Basisgröße	Zeichen	Basiseinheit	Zeichen
Temperatur	T	Kelvin, Celsius, Fahrenheit	K, °C, °F
Druck	p	Pascal	$Pa = N * m^{-2}$
Frequenz	f	Hertz	$Hz = s^{-1}$
Kraft	F	Newton	$N = kg * m * s^{-2}$
Arbeit	W	Joule	$J = N * m = V * A * s = W * s$
Energie	E		
Wärme	Q		
Leistung	P	Watt	$W = V * A = J * s^{-1}$
Elektrische Ladung	Q,q	Coulomb	$C = A * s$
Elektrische Spannung	U	Volt	$V = J * C^{-1}$
Elektrischer Widerstand	R, Z, X	Ohm	$\Omega = V * A^{-1}$
Magnetischer Fluss	φ	Weber	$Wb = V * s$
Magnetische Flussdichte	B	Tesla	$T = Wb * m^{-2}$
Induktivität	L	Henry	$H = Wb * A^{-1}$
Aktivität	A	Becquerel	$Bq = s^{-1}$
Energiedosis	D	Gray	$Gy = J * kg^{-1}$
Äquivalentdosis	H	Sievert	$Sv = J * kg^{-1}$

4) Physikalische Konstanten

Formelzeichen	Größe	Wert
c	Lichtgeschwindigkeit	$2,99792458 * 10^8 \text{ m/s}$
e	Elementarladung	$1,60217653 * 10^{-19} \text{ C}$
f	Gravitationskonstante	$6,6742 * 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg} * \text{s}^2$
F	Faraday-Konstante	$9,64853383 * 10^4 \text{ C/mol}$
h	Plancksches Wirkungsquantum	$6,6260693 * 10^{-34} \text{ J} * \text{s}$
b	Wien-Konstante	$2,8977685 * 10^{-3} \text{ m} * \text{K}$
k	Boltzmann-Konstante	$1,3806505 * 10^{-23} \text{ J/K}$
m_e	Ruhemasse Elektron	$9,1093826 * 10^{-31} \text{ kg}$
m_p	Ruhemasse Proton	$1,67262171 * 10^{-27} \text{ kg}$
m_n	Ruhemasse Neutron	$1,67492728 * 10^{-27} \text{ kg}$
m_α	Ruhemasse α -Teilchen	$6,6447 * 10^{-27} \text{ kg}$
N_A	Avogadro-Konstante	$6,02214115 * 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
N_L	Loschmidt-Konstante	$26,867773 * 10^{24} \text{ m}^{-3}$
R	allgemeine Gaskonstante	$8,314472 \text{ J/mol} * \text{K}$
R_∞	Rydberg-Konstante	$1,0973731568525 * 10^7 \text{ m}^{-1}$
r_e	Elektronenradius	$2,817940325 * 10^{-15} \text{ m}$
T_0	absoluter Temperaturnullpunkt	$-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$
u	atomare Masseneinheit	$1,66053886 * 10^{-27} \text{ kg}$
Z_0	Wellenwiderstand im Vakuum	$3,767303135 * 10^2 \text{ } \Omega$
α	Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante	$7,297352568 * 10^{-3}$
ϵ_0	elektrische Feldkonstante	$8,854187817 \dots * 10^{-12} \text{ F/m}$
μ_0	magnetische Feldkonstante	$4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$
μ_B	Bohrsches Magneton	$9,27400949 * 10^{-24} \text{ J/T}$
μ_K	Kernmagneton	$5,05078343 * 10^{-27} \text{ J/T}$
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5,670400 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 * \text{K}^4$

5) Größen und Einheiten: Mechanik

Formelzeichen	Größe	Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
a	Beschleunigung	m/s^2	
A	Fläche	m^2	
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle	m/s	
c_w	Widerstandsbeiwert	1	
E	Energie	J	$1 J = 1 N * m = 1 kg * m^2 / s^2$
f	Frequenz	Hz	$1 Hz = 1 kg * m / s^2$
F	Kraft	N	$1 N = 1 kg * m / s^2$
g	Fallbeschleunigung	m/s^2	
G	Gewichtskraft	N	$1 N = 1 kg * m^2 / s^2$
J	Trägheitsmoment	$kg * m^2$	
l	Länge	m	
L	Drehimpuls	$kg * m^2 / s$	
m	Masse	kg	
M	Kraftmoment (Moment)	$N * m$	$1 N * m = 1 kg * m^2 / s^2$
n	Drehzahl	s^{-1}	
p	Impuls	$kg * m / s$	
p	Druck	Pa	$1 Pa = 1 N / m^2 = 1 kg / m * s^2$
P	Leistung	W	$1 W = 1 J / s = 1 kg * m^2 / s^3$
t	Zeit	s	
T	Periodendauer	s	
	Zeitkonstante	s	
v	Geschwindigkeit	m/s	
v	Strömungsgeschwindigkeit	m/s	
V	Volumen	m^3	
W	Arbeit	J	$1 J = 1 N * m = 1 kg * m^2 / s^2$
α	Winkelbeschleunigung	rad/s^2	$1 rad/s^2 = 1 s^{-2}$
α	Dämpfungskoeffizient	m^{-1}	

$\alpha, \beta, \gamma, \dots$	ebener Winkel	rad	$1 rad = 1 m/m$ ($\frac{Bogen}{Radius}$)
η	Wirkungsgrad	1	
λ	Wellenlänge	m	
μ	Ausflusszahl	1	
ρ	Dichte	kg/m^3	
σ	mechanische Spannung	N/m^2	$1 N/m^2 = 1 Pa = 1 kg/m * s^2$
τ	Zeitkonstante	s	
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s	$1 rad/s = 1 s^{-1}$
	Kreisfrequenz	s^{-1}	
χ	Kompressibilität	Pa^{-1}	$1 Pa^{-1} = 1 m^2/N = 1 m * s^2/kg$
Ω	Raumwinkel	sr	$1 sr = \frac{1 m^2}{m^2}$ $\left(\frac{Kugeloberflaeche}{Kugelradius^2}\right)$

6) Größen und Einheiten: Akustik

Formelzeichen	Größe	Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
E	Elastizitätsmodul	N/m^2	$1 N/m^2 = 1 kg/m * s^2$
J	Schallintensität	W/m^2	$1 W/m^2 = 1 kg/s^3$
L	Schalldruckpegel	dB	
L_{eq}	äquivalenter Dauerschallpegel	dB	
p	Schalldruck	Pa	$1 Pa = 1 N/m^2 = 1 kg/m * s^2$
R	Schalldämmmaß	dB	
α	Schallabsorptionskoeffizient	dB/m	
Π	Schallstrahlungsdruck	Pa	$1 Pa = 1 N/m^2 = 1 kg/m * s^2$
χ	Kompressibilität	Pa^{-1}	$1 Pa^{-1} = 1 m^2/N = 1 m * s^2/kg$

7) Größen und Einheiten: Thermodynamik

Formelzeichen	Größe	Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s	
c	spezifische Wärmekapazität	$J/kg \cdot K$	$1 J/kg \cdot K = 1 m^2/s^2 \cdot K$
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$J/kg \cdot K$	$1 J/kg \cdot K = 1 m^2/s^2 \cdot K$
c_v	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$J/kg \cdot K$	$1 J/kg \cdot K = 1 m^2/s^2 \cdot K$
C	Wärmekapazität	J/K	$1 J/K = 1 kg \cdot m^2/s^2 \cdot K$
E	Energie	J	$1 J = 1 N \cdot m = 1 kg \cdot m^2/s^2$
f	Feuchte, relativ	1	
h	spezifische Enthalpie	J/kg	$1 J/kg = 1 m^2/s^2$
h_w	spezifische Enthalpie (Wasser)	J/kg	$1 J/kg = 1 m^2/s^2$
h_D	spezifische Enthalpie (Dampf)	J/kg	$1 J/kg = 1 N \cdot m/kg = 1 m^2/s^2$
H	Enthalpie (Wärmeinhalt)	J	$1 J = 1 N \cdot m = 1 kg \cdot m^2/s^2$
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/ml^2 \cdot K$	$1 W/m^2 \cdot K = 1 kg/(s^3 \cdot K)$
K	Abkühlungskonstante	s^{-1}	
M	molare Masse	kg/mol	
M_r	relative Molekülmasse	1	
n	Teilchendichte	m^{-3}	
N	Anzahl der Moleküle	1	
p	Druck	Pa	$1 Pa = 1 N/m^2 = 1 kg/m \cdot s^2$
q_s	spezifische Schmelzwärme	J/kg	$1 J/kg = 1 m^2/s^2$
q_{th}	Wärmestromdichte	W/m^2	$1 W/m^2 = 1 kg/s^3$
q_w	spezifischer Heizwert	J/kg	$1 J/kg = 1 m^2/s^2$
Q	Wärmemenge	J	$1 J = 1 N \cdot m = 1 kg \cdot m^2/s^2$
r	spezifische Verdampfungswärme	J/kg	$1 J/kg = 1 m^2/s^2$
r_m	molare Verdampfungswärme	J/mol	$1 J/mol = 1 kg \cdot m^2/s^2 \cdot mol$

R	allgemeine Gaskonstante	$J/mol * K$	$1 J/mol * K = 1 kg * m^2 / s^2 * mol * K$
R_s	spezifische Gaskonstante	$J/kg * K$	$1 J/kg * K = 1 m^2 / s^2 * K$
s	spezifische Entropie	$J/kg * K$	$1 J/kg * K = 1 m^2 / s^2 * K$
S	Entropie	J/K	$1 J/K = 1 kg * m^2 / s^2 * K$
t	Zeit	s	
T	absolut Temperatur	K	
ΔT	Temperaturdifferenz	K	
U	innere Energie	J	$1 J = 1 N * m = 1 kg * m^2 / s^2$
v	spezifische Volumen	m^3/kg	
V	Volumen	m^3	
V_m	molares Volumen	m^3/mol	
V_n	Normvolumen	m^3	
w	Wasserwert	J/kg	$1 J/kg = 1 m^2 / s^2$
W	Arbeit	J	$1 J = 1 N * m = 1 kg * m^2 / s^2$
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/m^2 * K$	$1 W/m^2 * K = 1 kg / s^3 * K$
α_l	Längenausdehnungskoeffizient	K^{-1}	
α_v	Volumenausdehnungskoeffizient	K^{-1}	
α'	Absorptionsgrad	1	
ε	Emissionsgrad	1	
η	Wirkungsgrad	1	
ϑ	Temperatur, Celsius	$^{\circ}C$	
κ	Adiabatexponent	1	
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/m * K$	$1 W/m * K = 1 kg * m / s^3 * K$
ρ	Dichte	kg/m^3	
ρ_n	Normdichte	kg/m^3	
ρ_w	absolute Feuchte	kg/m^3	
Φ	Wärmestrom	W	$1 W = 1 J/s = 1 kg * m^2 / s^3$

Normzustand	$\vartheta_n = 0^\circ\text{C}$ [Normtemperatur] $p_n = 101,325 \text{ kPa}$ [Normdruck]
molares Normvolumen des idealen Gases	$V_{mn} = 22,4141 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
Nullpunkt der Celsius-Skala	$T_n = 273,15 \text{ K}$
allgemeine Gaskonstante	$R = 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} * \text{K}}$
Avogadro-Konstante	$N_A = 6,02214 * 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

8) Größen und Einheiten: Optik

Formelzeichen	Größe	Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
A	numerische Apertur	1	
D	Brechwert	dpt	$1 dpt = 1 m^{-1}$
E_V	Beleuchtungsstärke	lx	$1 lx = 1 lm/m^2 = 1 cd * sr/m^2$
E_e	Bestrahlungsstärke	W/m^2	$1 W/m^2 = 1 kg/s^2$
f	Brennweite	m	
g	Gitterkonstante	m	
H_V	Belichtung	$lx * s$	$1 lx * s = 1 cd * sr * s/m^2$
H_e	Bestrahlung	J/m^2	$1 J/m^2 = 1 W * s/m^2 = 1 kg/s^2$
I_V	Lichtstärke	cd	
k	Ordnung der Interferenz	1	
L_V	Leuchtdichte	cd/m^2	$1 cd/m^2 = 1 lm/m^2 * sr$
M_V	spezifische Lichtausstrahlung	lm/m^2	$1 lm/m^2 = 1 cd * sr/m^2$
n	Brechzahl	1	
P	Polarisationsgrad	1	
Q_V	Lichtmenge	$lm * s$	$1 lm * s = 1 cd * sr * s$
R	Reflexionsgrad	1	
V	Vergrößerung	1	
α	Absorptionsgrad	1	
α_0	spezifische Drehung	$^{\circ} * m^2/kg$	
δ	Winkel der vollständigen Reflexion	$^{\circ}$	
ε	Emissionsgrad	1	
η	Lichtausbeute	lm/W	$1 lm/W = 1 cd * sr * s^3/kg * m^2$
λ	Wellenlänge	m	
ϱ	Reflexionsgrad	1	
τ	Transmissionsgrad	1	
Φ_V	Lichtstrom	lm	$1 lm = 1 cd * sr$
Φ_e	Strahlungsfluss	W	$1 W = 1 kg * m^2/s^3$
Ψ	Strahlungsflussdichte	W/m^2	$1 W/m^2 = 1 kg/s^3$
Ω	Raumwinkel	sr	$1 sr = 1 m^2/m^2$
E_{es}	Solarkonstante	$1,35 \frac{kW}{m^2}$	

9) Größen und Einheiten: Elektrik

Formelzeichen	Größe	Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
B	magnetische Flussdichte	T	$1 T = 1 V \cdot s / m^2 = 1 kg / A \cdot s^2$
B	Bandbreite	Hz	$1 Hz = 1 s^{-1}$
C	elektrische Kapazität	F	$1 F = C / V = 1 A^2 \cdot s^4 / m^2 \cdot kg$
d	Verlustfaktor	1	
d_m	Piezomodul	V/m	
D	elektrische Flussdichte	C/m^2	
E	elektrische Feldstärke	V/m	
E_p	potentielle Energie	J	$1 J = 1 m^2 \cdot kg / s^2$
E_k	kinetische Energie	J	$1 J = 1 m^2 \cdot kg / s^2$
f	Frequenz	Hz	$1 Hz = 1 s^{-1}$
G	elektrischer Leitwert	S	$1 S = 1 \Omega^{-1} = 1 A / V = 1 A^2 \cdot s^3 / m^2 \cdot kg$
H	magnetische Feldstärke	A/m	
I	elektrische Stromstärke	A	
J	elektrische Stromdichte	A/m^2	
k	Koppelfaktor	1	
L	Induktivität	H	$1 H = 1 Wb / A = 1 m^2 \cdot kg / A^2 \cdot s^2$
m	elektromagnetisches Moment	$A \cdot m^2$	
n	Elektronendichte	m^{-3}	
N	Windungszahl	1	
P	Wirkleistung	W	$1 W = 1 m^2 \cdot kg / s^3$
Q	elektrische Ladung	C	$1 C = 1 A \cdot s$
Q	Blindleistung	var	$1 var = 1 W = 1 m^2 \cdot kg / s^3$
Q	Gütefaktor	1	
R	Wirkwiderstand	Ω	$1 \Omega = 1 V / A = 1 m^2 \cdot kg / A^2 \cdot s^3$
S	elektrische Scheinleistung	VA	$1 VA = 1 V \cdot A = 1 W = 1 m^2 \cdot kg / s^3$
S	Energiestromdichte	W/m^2	$1 W / m^2 = 1 kg / s^3$
T	Periodendauer	s	

u	Ionenbeweglichkeit	$m^2/V * s$	$1 m^2/V * s = A * s^2/kg$
U	elektrische Spannung	V	$1 V = 1 m^2 * kg/A * s^3$
V	magnetische Spannung	A	
W	Arbeit, Energie	J	$1 J = 1 m^2 * kg/s^2$
X	Blindwiderstand	Ω	$1 \Omega = 1 m^2 * kg/A^2 * s^3$
Y	Scheinleitwert	S	$1 S = 1 A^2 * s^3/m^2 * kg$
Z	Scheinwiderstand	Ω	$1 \Omega = 1 m^2 * kg/A^2 * s^3$
α	Dämpfung	m^{-1}	
ϵ_0	elektrische Feldkonstante	F/m	$1 F/m = 1 A * s/V * m = 1 A^2 * s^4/m^3 * kg$
ϵ_r	Permittivitätszahl	1	
η	Raumladungsdichte	C/m^3	$1 C/m^3 = 1 A * s/m^3$
θ	elektrische Durchflutung	A	
κ	elektrische Leitfähigkeit	S/m	$1 S/m = 1 A^2 * s^3/m^3 * kg$
λ	Leistungsfaktor	1	
A	logarithmisches Dekrement	1	
μ_0	magnetische Feldkonstante	H/m	$1 H/m = 1 V * s/A * m = 1 m * kg/A^2 * s^2$
μ_r	Permeabilitätszahl	1	
ϱ	spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega * m$ $\Omega * mm^2/m$	$1 \Omega * m = 1 m^3 * kg/A * s^2$ $1 \Omega * mm^2/m = 10^{-6} \Omega * m$
σ	Flächenladungsdichte	C/m^2	$1 C/m^2 = 1 A * s/m^2$
τ	Zeitkonstante	s	
φ	Phasenwinkel	rad	
Φ	magnetischer Fluss	Wb	$1 Wb = 1 V * s = 1 m^2 * kg/A * s^2$
ψ	elektrischer Fluss	C	$1 C = 1 A * s$
ω	Kreisfrequenz	Hz	$1 Hz = 1 s^{-1}$
$\epsilon_{r Luft}$	Permittivitätszahl für Luft bei 0°C und 101,3 kPa: 1,00058		

10) Größen und Einheiten: Spezielle Relativitätstheorie

Formelzeichen	Größe	Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
E	allgemeine Energie	J	$1 J = 1 N * m = 1 \text{ kg} * \text{m}^2 / \text{s}^2$
f	Frequenz	Hz	$1 Hz = 1 s^{-1}$
l	Länge	m	
Δl	relativistische Längenverkürzung	m	
m	Impulsmasse	kg	
m_0	Ruhemasse	kg	
t	Zeit	s	
Δt	relativistische Zeitverkürzung	s	
U	elektrische Spannung	V	$1 V = 1 \text{ m}^2 * \text{kg} / \text{s}^3 * A$
v	Geschwindigkeit	m/s	
c	Lichtgeschwindigkeit	$c = 2,9979 * 10^8 \text{ m/s}$	
e	elektrische Elementarladung	$e = 1,6022 * 10^{-19} A * s$	
m_e	Ruhemasse des Elektrons	$m_e = 9,1094 * 10^{-31} \text{ kg}$	
m_p	Ruhemasse des Protons	$m_p = 1,6726 * 10^{-27} \text{ kg}$	

11) Größen und Einheiten: Atom- und Kernphysik

Formelzeichen	Größe	Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten
A	Aktivität	Bq	$1 Bq = 1 s^{-1}$
A_r	relative Atommasse	1	
A_s	spezifische Aktivität	Bq/kg	$1 Bq/kg = 1 s^{-1} * kg^{-1}$
$d_{\frac{1}{2}}$	Halbwertsdicke	m	
D	Energiedosis	Gy	$1 Gy = 1 J/kg = 1 m^2/s^2$
\dot{D}	Energiedosisleistung	Gy/s	$1 Gy/s = 1 W/kg = 1 m^2/s^3$
E	Energie	J	$1 J = 1 N * m = 1 kg * m^2/s^2$
H	Äquivalentdosis	Sv	$1 Sv = 1 J/kg = 1 m^2/s^2$
\dot{H}	Äquivalentdosisleistung	Sv/s	$1 Sv/s = 1 J/s * kg = 1 m^2/s^3$
J	Ionendosis	C/kg	$1 C/kg = 1 A * s/kg$
\dot{J}	Ionendosisleistung	A/kg	
m	Masse	kg	
M	molare Masse	kg/mol	
N	Molekülzahl	1	
N	Anzahl der Atomkerne	1	
p	Impuls	$kg * m/s$	
r	materialunabhängige Reichweite	kg/m^2	
R	Reichweite	m	
t	Zeit	s	
$T_{\frac{1}{2}}$	Halbwertszeit	s	
Z	Kernladungszahl	1	
Γ	Dosisleistungskonstante	$J * m^2/kg$	$1 J * m^2/kg = 1 m^4/s^2$
λ	Zerfallskonstante	s^{-1}	
μ	linearer Schwächungskoeffizient	m^{-1}	
μ'	materialunabhängiger Schwächungskoeffizient	m^2/kg	
ψ	Energieflussdichte	W/m^2	$1 W/m^2 = 1 J/s * m^2 = 1 kg/s^3$
R_{∞}	Rydberg-Konstante	$R_{\infty} = 1,0973732 * 10^7 m^{-1}$	
u	atomare Masseneinheit	$1 u = 1,66054 * 10^{-27} kg$	

12) Periodensystem und chemische Zusammensetzungen

Legende Ordnungszahl: 1 Wasserstoff, 2 Helium Name: Wasserstoff, Helium Atomgewicht: 1,0079, 4,0026 Elektronenkonfiguration: 1s ¹ , 1s ² Symbol: H, He Serie: Wasserstoff, Helium Ordnungszahl: schwarz = nicht radioaktiv, gelb = radioaktiv Symbol: schwarz = Feststoff, rot = Gas, blau = Flüssigkeit Serie: Alkalimetalle, Erdalkalimetalle, Übergangsmetalle, Lanthanoide, Actinoide, Metalle, Halbmetalle, Nichtmetalle, Halogenide, Edelgase durchgehend = natürliches Element, schraffiert = künstliches Element		<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td> </tr> <tr> <td>1 1 1</td><td>2 2 2</td><td>3 3 3</td><td>4 4 4</td><td>5 5 5</td><td>6 6 6</td><td>7 7 7</td><td>8 8 8</td><td>9 9 9</td><td>10 10 10</td><td>11 11 11</td><td>12 12 12</td><td>13 13 13</td><td>14 14 14</td><td>15 15 15</td><td>16 16 16</td><td>17 17 17</td><td>18 18 18</td> </tr> <tr> <td>1 H Wasserstoff 1,0079 1s¹</td><td>2 He Helium 4,0026 1s²</td><td>3 Li Lithium 6,941 2s¹</td><td>4 Be Beryllium 9,0122 2s²</td><td>5 B Bor 10,81 2s² 2p¹</td><td>6 C Kohlenstoff 12,011 2s² 2p²</td><td>7 N Stickstoff 14,007 2s² 2p³</td><td>8 O Sauerstoff 15,999 2s² 2p⁴</td><td>9 F Fluor 18,998 2s² 2p⁵</td><td>10 Ne Neon 20,179 2s² 2p⁶</td><td>11 Na Natrium 22,99 3s¹</td><td>12 Mg Magnesium 24,305 3s²</td><td>13 Al Aluminium 26,982 3s² 3p¹</td><td>14 Si Silicium 28,086 3s² 3p²</td><td>15 P Phosphor 30,974 3s² 3p³</td><td>16 S Schwefel 32,06 3s² 3p⁴</td><td>17 Cl Chlor 35,453 3s² 3p⁵</td><td>18 Ar Argon 39,948 3s² 3p⁶</td> </tr> <tr> <td>19 K Kalium 39,098 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁴ 4s¹</td><td>20 Ca Calcium 40,08 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁴ 4s²</td><td>21 Sc Scandium 44,956 3d¹ 4s²</td><td>22 Ti Titan 47,88 3d² 4s²</td><td>23 V Vanadium 50,942 3d³ 4s²</td><td>24 Cr Chrom 51,996 3d⁵ 4s¹</td><td>25 Mn Mangan 54,938 3d⁵ 4s²</td><td>26 Fe Eisen 55,847 3d⁶ 4s²</td><td>27 Co Cobalt 58,933 3d⁷ 4s²</td><td>28 Ni Nickel 58,71 3d⁸ 4s²</td><td>29 Cu Kupfer 63,546 3d¹⁰ 4s¹</td><td>30 Zn Zink 65,38 3d¹⁰ 4s²</td><td>31 Ga Gallium 69,723 3d¹⁰ 4s² 4p¹</td><td>32 Ge Germanium 72,59 3d¹⁰ 4s² 4p²</td><td>33 As Arsen 74,922 3d¹⁰ 4s² 4p³</td><td>34 Se Selen 78,96 3d¹⁰ 4s² 4p⁴</td><td>35 Br Brom 79,904 3d¹⁰ 4s² 4p⁵</td><td>36 Kr Krypton 83,80 3d¹⁰ 4s² 4p⁶</td> </tr> <tr> <td>37 Rb Rubidium 85,468 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁴ 4s² 4p⁶ 5s¹</td><td>38 Sr Strontium 87,62 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁴ 4s² 4p⁶ 5s²</td><td>39 Y Yttrium 88,906 3d¹ 4s² 4p⁶ 5s²</td><td>40 Zr Zirkonium 91,22 3d² 4s² 4p⁶ 5s²</td><td>41 Nb Niob 92,906 3d⁴ 4s¹ 4p⁶ 5s²</td><td>42 Mo Molybdän 95,94 3d⁵ 4s¹ 4p⁶ 5s²</td><td>43 Tc Technetium 98,906 3d⁵ 4s¹ 4p⁶ 5s²</td><td>44 Ru Ruthenium 101,07 3d⁷ 4s¹ 4p⁶ 5s²</td><td>45 Rh Rhodium 102,91 3d⁸ 4s¹ 4p⁶ 5s²</td><td>46 Pd Palladium 106,4 3d¹⁰ 4s¹ 4p⁶ 5s²</td><td>47 Ag Silber 107,87 3d¹⁰ 4s¹ 4p⁶ 5s²</td><td>48 Cd Cadmium 112,41 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s²</td><td>49 In Indium 114,82 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p¹</td><td>50 Sn Zinn 118,69 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p²</td><td>51 Sb Antimon 121,75 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p³</td><td>52 Te Tellur 127,60 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁴</td><td>53 I Iod 126,90 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁵</td><td>54 Xe Xenon 131,30 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶</td> </tr> <tr> <td>55 Cs Cäsium 132,91 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁴ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s¹</td><td>56 Ba Barium 137,33 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁴ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>57-71 Lanthanoide siehe unten</td><td>72 Hf Hafnium 178,49 3d² 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>73 Ta Tantal 180,95 3d³ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>74 W Wolfram 183,85 3d⁴ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>75 Re Rhenium 186,21 3d⁵ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>76 Os Osmium 190,2 3d⁶ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>77 Ir Iridium 192,22 3d⁷ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>78 Pt Platin 195,09 3d⁹ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>79 Au Gold 196,97 3d¹⁰ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s²</td><td>80 Hg Quecksilber 200,59 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p²</td><td>81 Tl Thallium 204,37 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p³</td><td>82 Pb Blei 207,19 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁴</td><td>83 Bi Bismut 208,98 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁵</td><td>84 Po Polonium 209 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶</td><td>85 At Astat 210 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁷</td><td>86 Rn Radon 222 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶</td> </tr> <tr> <td>87 Fr Francium 223 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁴ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s¹</td><td>88 Ra Radium 226,03 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁴ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s²</td><td>89-103 Actinoide siehe unten</td><td>104 Rf Rutherfordium 261 3d² 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p²</td><td>105 Db Dubnium 262 3d³ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p³</td><td>106 Sg Seaborgium 263 3d⁴ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p⁴</td><td>107 Bh Bohrium 264 3d⁵ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p⁵</td><td>108 Hs Hassium 265 3d⁶ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p⁶</td><td>109 Mt Meitnerium 266 3d⁷ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p⁷</td><td>110 Ds Darmstadtium 269 3d⁸ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p⁸</td><td>111 Rg Roentgenium 272 3d⁹ 4s¹ 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p⁹</td><td>112 Uub Ununbium 277 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p¹⁰</td><td>113 Uut Ununtrium 284 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p¹¹</td><td>114 Uuq Ununquadium 289 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p¹²</td><td>115 Uup Ununpentium 288 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p¹³</td><td>116 Uuh Ununhexium 289 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p¹⁴</td><td>117 Uuq Ununseptium 289 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p¹⁵</td><td>118 Uuo Ununoctium 293 3d¹⁰ 4s² 4p⁶ 5s² 5p⁶ 6s² 6p⁶ 7s² 7p¹⁶</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	1 1 1	2 2 2	3 3 3	4 4 4	5 5 5	6 6 6	7 7 7	8 8 8	9 9 9	10 10 10	11 11 11	12 12 12	13 13 13	14 14 14	15 15 15	16 16 16	17 17 17	18 18 18	1 H Wasserstoff 1,0079 1s ¹	2 He Helium 4,0026 1s ²	3 Li Lithium 6,941 2s ¹	4 Be Beryllium 9,0122 2s ²	5 B Bor 10,81 2s ² 2p ¹	6 C Kohlenstoff 12,011 2s ² 2p ²	7 N Stickstoff 14,007 2s ² 2p ³	8 O Sauerstoff 15,999 2s ² 2p ⁴	9 F Fluor 18,998 2s ² 2p ⁵	10 Ne Neon 20,179 2s ² 2p ⁶	11 Na Natrium 22,99 3s ¹	12 Mg Magnesium 24,305 3s ²	13 Al Aluminium 26,982 3s ² 3p ¹	14 Si Silicium 28,086 3s ² 3p ²	15 P Phosphor 30,974 3s ² 3p ³	16 S Schwefel 32,06 3s ² 3p ⁴	17 Cl Chlor 35,453 3s ² 3p ⁵	18 Ar Argon 39,948 3s ² 3p ⁶	19 K Kalium 39,098 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ¹	20 Ca Calcium 40,08 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ²	21 Sc Scandium 44,956 3d ¹ 4s ²	22 Ti Titan 47,88 3d ² 4s ²	23 V Vanadium 50,942 3d ³ 4s ²	24 Cr Chrom 51,996 3d ⁵ 4s ¹	25 Mn Mangan 54,938 3d ⁵ 4s ²	26 Fe Eisen 55,847 3d ⁶ 4s ²	27 Co Cobalt 58,933 3d ⁷ 4s ²	28 Ni Nickel 58,71 3d ⁸ 4s ²	29 Cu Kupfer 63,546 3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn Zink 65,38 3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga Gallium 69,723 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	32 Ge Germanium 72,59 3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	33 As Arsen 74,922 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	34 Se Selen 78,96 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	35 Br Brom 79,904 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	36 Kr Krypton 83,80 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶	37 Rb Rubidium 85,468 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ¹	38 Sr Strontium 87,62 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ²	39 Y Yttrium 88,906 3d ¹ 4s ² 4p ⁶ 5s ²	40 Zr Zirkonium 91,22 3d ² 4s ² 4p ⁶ 5s ²	41 Nb Niob 92,906 3d ⁴ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	42 Mo Molybdän 95,94 3d ⁵ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	43 Tc Technetium 98,906 3d ⁵ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	44 Ru Ruthenium 101,07 3d ⁷ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	45 Rh Rhodium 102,91 3d ⁸ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	46 Pd Palladium 106,4 3d ¹⁰ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	47 Ag Silber 107,87 3d ¹⁰ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	48 Cd Cadmium 112,41 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ²	49 In Indium 114,82 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ¹	50 Sn Zinn 118,69 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ²	51 Sb Antimon 121,75 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ³	52 Te Tellur 127,60 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁴	53 I Iod 126,90 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁵	54 Xe Xenon 131,30 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶	55 Cs Cäsium 132,91 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ¹	56 Ba Barium 137,33 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	57-71 Lanthanoide siehe unten	72 Hf Hafnium 178,49 3d ² 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	73 Ta Tantal 180,95 3d ³ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	74 W Wolfram 183,85 3d ⁴ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	75 Re Rhenium 186,21 3d ⁵ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	76 Os Osmium 190,2 3d ⁶ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	77 Ir Iridium 192,22 3d ⁷ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	78 Pt Platin 195,09 3d ⁹ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	79 Au Gold 196,97 3d ¹⁰ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	80 Hg Quecksilber 200,59 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ²	81 Tl Thallium 204,37 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ³	82 Pb Blei 207,19 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁴	83 Bi Bismut 208,98 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁵	84 Po Polonium 209 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶	85 At Astat 210 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁷	86 Rn Radon 222 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶	87 Fr Francium 223 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ¹	88 Ra Radium 226,03 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ²	89-103 Actinoide siehe unten	104 Rf Rutherfordium 261 3d ² 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ²	105 Db Dubnium 262 3d ³ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ³	106 Sg Seaborgium 263 3d ⁴ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁴	107 Bh Bohrium 264 3d ⁵ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁵	108 Hs Hassium 265 3d ⁶ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶	109 Mt Meitnerium 266 3d ⁷ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁷	110 Ds Darmstadtium 269 3d ⁸ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁸	111 Rg Roentgenium 272 3d ⁹ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁹	112 Uub Ununbium 277 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹⁰	113 Uut Ununtrium 284 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹¹	114 Uuq Ununquadium 289 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹²	115 Uup Ununpentium 288 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹³	116 Uuh Ununhexium 289 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹⁴	117 Uuq Ununseptium 289 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹⁵	118 Uuo Ununoctium 293 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹⁶
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																																																																																															
1 1 1	2 2 2	3 3 3	4 4 4	5 5 5	6 6 6	7 7 7	8 8 8	9 9 9	10 10 10	11 11 11	12 12 12	13 13 13	14 14 14	15 15 15	16 16 16	17 17 17	18 18 18																																																																																																															
1 H Wasserstoff 1,0079 1s ¹	2 He Helium 4,0026 1s ²	3 Li Lithium 6,941 2s ¹	4 Be Beryllium 9,0122 2s ²	5 B Bor 10,81 2s ² 2p ¹	6 C Kohlenstoff 12,011 2s ² 2p ²	7 N Stickstoff 14,007 2s ² 2p ³	8 O Sauerstoff 15,999 2s ² 2p ⁴	9 F Fluor 18,998 2s ² 2p ⁵	10 Ne Neon 20,179 2s ² 2p ⁶	11 Na Natrium 22,99 3s ¹	12 Mg Magnesium 24,305 3s ²	13 Al Aluminium 26,982 3s ² 3p ¹	14 Si Silicium 28,086 3s ² 3p ²	15 P Phosphor 30,974 3s ² 3p ³	16 S Schwefel 32,06 3s ² 3p ⁴	17 Cl Chlor 35,453 3s ² 3p ⁵	18 Ar Argon 39,948 3s ² 3p ⁶																																																																																																															
19 K Kalium 39,098 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ¹	20 Ca Calcium 40,08 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ²	21 Sc Scandium 44,956 3d ¹ 4s ²	22 Ti Titan 47,88 3d ² 4s ²	23 V Vanadium 50,942 3d ³ 4s ²	24 Cr Chrom 51,996 3d ⁵ 4s ¹	25 Mn Mangan 54,938 3d ⁵ 4s ²	26 Fe Eisen 55,847 3d ⁶ 4s ²	27 Co Cobalt 58,933 3d ⁷ 4s ²	28 Ni Nickel 58,71 3d ⁸ 4s ²	29 Cu Kupfer 63,546 3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn Zink 65,38 3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga Gallium 69,723 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	32 Ge Germanium 72,59 3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	33 As Arsen 74,922 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	34 Se Selen 78,96 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	35 Br Brom 79,904 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	36 Kr Krypton 83,80 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶																																																																																																															
37 Rb Rubidium 85,468 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ¹	38 Sr Strontium 87,62 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ²	39 Y Yttrium 88,906 3d ¹ 4s ² 4p ⁶ 5s ²	40 Zr Zirkonium 91,22 3d ² 4s ² 4p ⁶ 5s ²	41 Nb Niob 92,906 3d ⁴ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	42 Mo Molybdän 95,94 3d ⁵ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	43 Tc Technetium 98,906 3d ⁵ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	44 Ru Ruthenium 101,07 3d ⁷ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	45 Rh Rhodium 102,91 3d ⁸ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	46 Pd Palladium 106,4 3d ¹⁰ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	47 Ag Silber 107,87 3d ¹⁰ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ²	48 Cd Cadmium 112,41 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ²	49 In Indium 114,82 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ¹	50 Sn Zinn 118,69 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ²	51 Sb Antimon 121,75 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ³	52 Te Tellur 127,60 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁴	53 I Iod 126,90 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁵	54 Xe Xenon 131,30 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶																																																																																																															
55 Cs Cäsium 132,91 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ¹	56 Ba Barium 137,33 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	57-71 Lanthanoide siehe unten	72 Hf Hafnium 178,49 3d ² 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	73 Ta Tantal 180,95 3d ³ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	74 W Wolfram 183,85 3d ⁴ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	75 Re Rhenium 186,21 3d ⁵ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	76 Os Osmium 190,2 3d ⁶ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	77 Ir Iridium 192,22 3d ⁷ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	78 Pt Platin 195,09 3d ⁹ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	79 Au Gold 196,97 3d ¹⁰ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ²	80 Hg Quecksilber 200,59 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ²	81 Tl Thallium 204,37 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ³	82 Pb Blei 207,19 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁴	83 Bi Bismut 208,98 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁵	84 Po Polonium 209 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶	85 At Astat 210 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁷	86 Rn Radon 222 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶																																																																																																															
87 Fr Francium 223 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ¹	88 Ra Radium 226,03 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ²	89-103 Actinoide siehe unten	104 Rf Rutherfordium 261 3d ² 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ²	105 Db Dubnium 262 3d ³ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ³	106 Sg Seaborgium 263 3d ⁴ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁴	107 Bh Bohrium 264 3d ⁵ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁵	108 Hs Hassium 265 3d ⁶ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶	109 Mt Meitnerium 266 3d ⁷ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁷	110 Ds Darmstadtium 269 3d ⁸ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁸	111 Rg Roentgenium 272 3d ⁹ 4s ¹ 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁹	112 Uub Ununbium 277 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹⁰	113 Uut Ununtrium 284 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹¹	114 Uuq Ununquadium 289 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹²	115 Uup Ununpentium 288 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹³	116 Uuh Ununhexium 289 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹⁴	117 Uuq Ununseptium 289 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹⁵	118 Uuo Ununoctium 293 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ¹⁶																																																																																																															

57 La Lanthan 138,91 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ²	58 Ce Cer 140,12 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ¹	59 Pr Praseodym 140,91 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ²	60 Nd Neodym 144,24 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ³	61 Pm Promethium 144,91 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ⁴	62 Sm Samarium 150,35 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ⁶	63 Eu Europium 151,96 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ⁷	64 Gd Gadolinium 157,25 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ⁸	65 Tb Terbium 158,93 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ⁹	66 Dy Dysprosium 162,50 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ¹⁰	67 Ho Holmium 164,93 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ¹⁰ 6s ¹	68 Er Erbium 167,26 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ¹⁰ 6s ²	69 Tm Thulium 168,93 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹	70 Yb Ytterbium 173,04 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	71 Lu Lutetium 174,97 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³
89 Ac Actinium 227 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ¹	90 Th Thorium 232,04 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ²	91 Pa Protactinium 231,04 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ¹	92 U Uran 238,03 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ²	93 Np Neptunium 237,05 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ³	94 Pu Plutonium 244,10 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ⁴	95 Am Americium 243,10 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ⁵	96 Cm Curium 247,10 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ⁶	97 Bk Berkelium 247,10 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ⁷	98 Cf Californium 251,10 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ⁸	99 Es Einsteinium 254,10 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ⁹	100 Fm Fermium 257,10 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ¹⁰	101 Md Mendelevium 258 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ¹¹	102 No Nobelium 259 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ¹²	103 Lr Lawrencium 260 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴ 4s ² 4p ⁶ 5s ² 5p ⁶ 6s ² 6p ⁶ 7s ² 7p ⁶ 8s ² 8p ¹³



Formel	Bezeichnung
H_2O	Wasser
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	Ethanol

15. Index

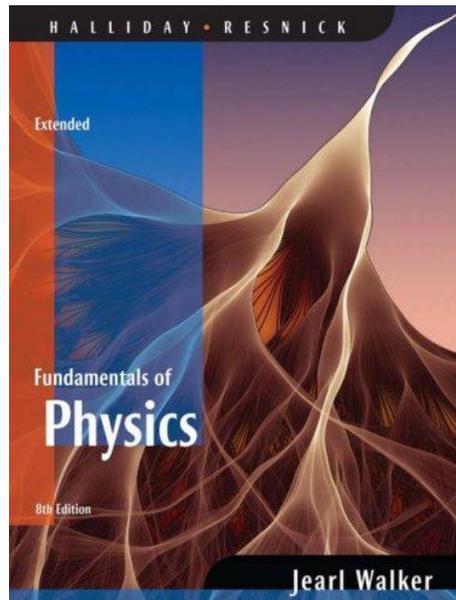
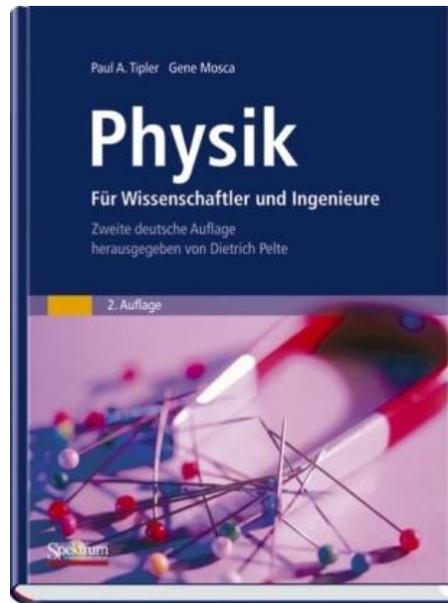
- 2. Hauptsatz der Thermodynamik, 46
- 2. Newtonsches Gesetz, 21
- Abbildungsfehler, 119
- Abbildungsgesetz, 119
- Abbildungsmaßstab, 119
- Adiabatengleichung, 36
- adiabatisch, 36
- Adiabatische Prozesse, 35
- Amperemeter, 83
- Amperesches Durchflutungsgesetz, 89
- Äquipartitionstheorem, 23
- Äquipotentiallinien, 55
- Astigmatismus schiefer Bündel, 120
- Atomkern, 137
- Auge, 120
- Avogadro-Konstante, 17
- Bandgenerator, 65
- Barkhausensprünge, 98
- beschleunigte Ladungen, 110
- Beugung am Spalt, 127
- Bildladungsmethode, 63
- Bimetallthermometer, 12
- Bindungsenergie, 141
- Binnendruck, 27
- Bohrsche Atommodell, 138
- Bohrschen Postulate, 139
- Braunschen Röhre, 58
- Brechungsgesetz, 112
- Brewster-Winkel, 128
- Brownsche Bewegung kleiner Teilchen, 24
- Carnot-Prozess, 37
- Celsius Skala, 9
- chromatische Aberration, 119
- Compton-Effekt, 134
- Coulombsches Gesetz, 53
- Daltonsches Gesetz der Partialdrücke, 26
- Dampfdruck, 26
- Diamagnetismus, 98
- Dielektrika, 74
- Dispersion, 114
- Doppelspalt, 126
- Drehmoment auf Leiterschleife, 95
- Eigenvolumen, 27
- Einsteins Postulate, 130
- Elektrische Arbeit, 80
- elektrische Feldkonstante, 53
- elektrische Feldstärke, 53
- elektrische Ladung, 52
- Elektrische Leistung, 80
- Elektrische Spannung, 54
- Elektrischer Strom, 77
- elektrisches Potential, 54
- Elektromagnetische Strahlung, 110
- Elektromagnetische Wellen, 107
- elektromagnetischer Wellen, 110
- Elektronenhülle, 137
- Elektronentransport im Metall, 85
- Elektroskop, 57
- Energie
 - innere, 29
- Energiebilanz, 40
- Energiedichte, 108
- Entropie, 48
- Entropieänderung, 48
- Experimentelle Bestimmung, 88
- Faraday-Käfig, 64
- Feldlinien, 55
- Fermatsches Prinzip, 112
- Fernrohr, 121
- Ferromagnetismus, 98
- Flächenausdehnungskoeffizient, 12
- Flächenladungsdichte, 76
- Flächenladungszone, 61
- Fluss, 60
- Flüssigkeitsthermometer, 12
- Gasdruck, 21
- Gasthermometer, 10
- Gesamtenergiedichte, 108
- Geschwindigkeit
 - Mittlere, 25
 - quadratisch gemittelte, 25
 - Wahrscheinlichste, 25
- Gesetz von Avogadro, 17
- Gesetz von Biot-Savart, 90
- Gespeicherte Energie, 72
- gewölbte Spiegel, 116
- Gitter, 126
- Gleichnamige Pole, 87

- Gleichverteilungssatz, 23
- Gravitationsgesetz, 53
- Hall-Koeffizient, 96
- HALL-Spannung, 96
- Heißluftmotor, 44
- Helmholtz-Spulenpaare, 91
- Hochspannungstrafo, 105
- Hohlspiegel, 115, 116
- Hüllfläche, 60
- Hysterese der Magnetisierung, 98
- Ideale Gase
 - Merkwürdiges Verhalten, 10
- ideales Gas, 20
- Induktionsgesetz, 99
- Induktionsspannungen, 100
- Induktivitäten, 102
- Induzierte Flächenladungsdichte, 69
- Influenz, 63
- innere Energie, 29
- Intensität, 108
- Interferenz, 122
- Interferenz am Luftkeil, 124
- Interferenz an dünnen Schichten, 122
- Isobare Prozesse, 33
- Isochore Prozesse, 33
- Isolatoren, 52
- isotherm, 36
- Isotherme Prozesse, 34
- Isothermen, 28
- Joule-Thompson-Effekt, 28
- Kältemaschine, 43
- Kältemaschinen, 45
- Kapazität, 69
- Kelvin-Skala, 10
- Kinetische Gastheorie, 21
- Kirchhoffsche Gesetze, 79
- kohärentes Licht, 122
- Kohärenz, 122
- Kondensator
 - Parallelschaltung, 71
 - Serienschaltung, 71
- Konkav-Spiegel, 115
- Konvektion, 46
- Konvexspiegel, 117
- Kreisprozesse, 37
- Kugelkondensator, 70
- Kühlschrank, 43
- Ladungserhaltung, 52
- Ladungsquantisierung, 52
- Ladungstransportmechanismen, 86
- Ladungsverschiebung, 67
- Ladungswolken, 59
- Längenausdehnung, 11
- Laser, 125
- leitende Kugel, 66
- Leiter, 52
- Leitfähigkeit, 78
- Lichtstrahl im Prisma, 113
- Linde Verfahren, 29
- Linsen, 117
- Lochwandverschiebung, 98
- Lorentz-Kraft, 92
- Lupe, 120
- magnetische Erregung, 89
- magnetische Feldkonstante, 92
- Magnetische Feldlinien, 88
- magnetische Flussdichte, 92
- magnetische Permeabilität, 92
- magnetischer Dipol, 87
- magnetischer Fluss, 99
- magnetischer Moment, 95
- Magnetismus, 87
- Masse und Energie, 132
- Massendefekt, 141
- Materiewellen, 135
- Maxwell-Gleichungen, 106
- Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung, 24
- Maxwellsche Verschiebungsstrom, 105
- Messung von Strömen und Spannungen, 83
- Mikroskop, 121
- Netztrafo, 105
- Ohmsches Gesetz, 77
- Orientierungspolarisation, 75
- Paarbildung, 134
- Paramagnetismus, 98
- Permanentmagnete, 87
- Perot-Fabry-Interferometer, 125
- Phasendiagramme, 16
- Photoeffekt, 134
- Planparallele Platte, 113
- Poisson-Gleichung, 36
- Polarisation durch Dichroismus, 130
- Polarisation durch Doppelbrechung, 129
- Polarisation durch Reflexion, 128
- polytrop, 36
- Polytrope Zustandsänderung, 36

Potentiometer, 84
Poynting-Vektor, 109
Punktladung, 55
Quantenoptik, 133
radioaktiver Zerfall, 142
Radioaktivität, 141
Raumladungsdichte, 59
Reale Gase, 27
rechte-Hand-Regel für Spulen, 90
Reduzierte Wärme, 48
Regenbogen, 115
Reibungselektrizität, 52
Relative Luftfeuchtigkeit, 27
Satz von Gauß, 67
Schweißstrafo, 105
Selbstinduktion, 102
Siedepunkt, 27
Spaltung, 88
Spannungsquellen, 81
spezifische Molwärmern, 30
spezifische Wärmekapazität, 13
spezifischer Widerstand, 78
sphärische Aberration, 119
Spiegelbilder, 112
Spiegelladungen, 63
starke Wechselwirkung, 140
Stoffmenge, 17
Strahlungs-pyrometer, 13
Superpositionsprinzip, 55
System, 33
Taupunkt, 27
Temperatur, 21
 absolute, 10
Thermoelemente, 13
Torsionswaage, 57
Totalreflektion, 114
Transformator, 104
Transport von Wärmeenergie, 45
Überlandleitung, 105
Umorientierung, 98
van der Waalsches Kovolumen, 27
Vergrößerung, 119
Verschiebungspolarisation, 75
Voltmeter, 83
Volumenausdehnung, 11
Volumenausdehnungskoeffizient, 11
Wahrscheinlichkeit, 50
Wärmeausdehnung, 11
Wärmeenergie als Energieform
 als Energieform, 9
Wärmeleitung, 45
Wärmeleitungsgleichung, 45
Wärmepumpe, 43
Wärmestrahlung, 46
Wasser
 Anomalie, 17
Welle-Teilchen Dualismus, 135
Wheatstonesche-Brücke, 85
Widerstände
 Parallelschaltung, 79
 Serienschaltung, 79
Widerstandsthermometer, 13
Wirkungsgrad, 41
Wölbspiegel, 117
Zeitdilatation, 131
Zentralkraft, 93
Zerstrahlung, 134
Zustand, 33
Zustandsgrößen, 33
Zylinderkondensator, 70
 α -Zerfall, 141
 β -Zerfall, 142
 γ -Strahlung, 142

16. Literaturempfehlungen

- Tipler, Paul A.. Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. Spektrum Akademischer Verlag, 2004.
- Halliday, David. Fundamentals of Physics. Extended. Wiley & Sons, 2007.



17. Lizenz



Dieses Dokument ist unter der "[Creative Commons Attribution-NonCommercial-Share Alike 3.0 Germany License](#)" veröffentlicht. Weitere Informationen zu dieser Lizenz können der verlinkten Webseite entnommen werden.

Einige Grafiken in diesem Dokument wurden [Wikimedia Commons](#) entnommen und unterliegen der [GNU Free Documentation License](#). Die entsprechenden Grafiken sind mit einem nebenstehenden -Zeichen gekennzeichnet welches mit der Quell-Seite verlinkt ist, der wiederum der Autor oder die Autoren zu entnehmen sind.

Das Copyright der Bilder der Buchcover im Kapitel „Literaturempfehlungen“ liegt bei den jeweiligen Autoren sowie deren Verlagen.