

# Übersichtsprüfung Experimentalphysik 1 bis 3

Jonas Wortmann

May 14, 2024

# Contents

<b>1</b>	<b>Mechanik</b>	<b>3</b>
1.1	Schiefer Wurf . . . . .	3
1.2	NEWTON'sche Kraftgesetze . . . . .	3
1.3	KEPLER'schen Gesetze . . . . .	3
1.4	GALILEI-Transformation . . . . .	4
1.5	Beschleunigte und rotierende Bezugssysteme; Scheinkräfte . . . . .	4
1.6	Raketengleichung . . . . .	4
1.7	FOUCAULT-Pendel . . . . .	5
1.8	Konservative Kräfte . . . . .	5
1.9	Stöße . . . . .	5
1.10	Experimentelle Bestimmung der Gravitationskonstante . . . . .	6
1.11	Fluchtgeschwindigkeit . . . . .	6
1.12	Trägheitstensor . . . . .	7
1.13	Kreisel . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Thermodynamik</b>	<b>8</b>
2.1	Temperaturskala (Kelvin) . . . . .	8
2.2	Wärmeausdehnung von Festkörpern . . . . .	8
2.3	Ideale Gase / VAN-DER-WAALS-Gase . . . . .	8
2.4	Wärme . . . . .	9
2.5	MAXWELL-BOLTZMANN-Verteilung . . . . .	9
2.6	1. Hauptsatz der Wärmelehre . . . . .	10
2.7	2. Hauptsatz der Wärmelehre . . . . .	10
2.8	Kreisprozesse / Zustandsänderung . . . . .	10
2.8.1	CARNOT-Prozess . . . . .	11
2.9	Entropie, Enthalpie . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Elektrostatik</b>	<b>12</b>
3.1	Makroskopische Elektrostatik . . . . .	12
3.2	Bändermodell / Leiter . . . . .	12
3.3	MAXWELL-Gleichungen . . . . .	12
3.4	HERTZ'scher Dipol . . . . .	12
3.5	Kondensator . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b>	<b>14</b>
4.1	Kausalität . . . . .	14
4.2	MINKOWSKI-Diagramm . . . . .	14

<b>5</b>	<b>Optik</b>	<b>15</b>
5.1	Polarisation . . . . .	15
5.2	Interferometer . . . . .	15
5.3	Linsen . . . . .	15
5.4	Resonator . . . . .	15
5.5	Phasen– und Gruppengeschwindigkeit . . . . .	15
5.6	Dispersion . . . . .	15
5.7	SNELLIUS’sche Brechungsgesetz . . . . .	15
5.8	Kohärenz . . . . .	16
5.9	Doppelspalt . . . . .	16
5.10	Totalreflexion . . . . .	16
5.11	BREWSTER–Winkel . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>17</b>

# 1 Mechanik

## 1.1 Schiefer Wurf

Die Bewegungsgleichung des schiefen Wurfs ist gegeben durch

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

$$= \begin{pmatrix} v_0 \cos(\varphi) t \\ -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin(\varphi) t + y_0 \end{pmatrix}. \quad (1.2)$$

Die  $y$ -Richtung berechnet sich aus der Integration der Geschwindigkeit

$$y(t) = \int_0^t dt v_y(t) = \int_0^t dt (v_0 \sin(\varphi) - gt). \quad (1.3)$$

## 1.2 Newton'sche Kraftgesetze

1. Ein kräftefreier Körper bleibt im Zustand der Ruhe, wenn er vorher in Ruhe war bzw. in gleichförmiger Bewegung, wenn er vorher in gleichförmiger Bewegung war. (Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem diese Gesetzmäßigkeit gilt)
2. Die Kraft ist gegeben durch  $\vec{F} = m\vec{a}$ .
3. Übt ein Körper 1 eine Kraft auf einen Körper 2 aus, so übt der Körper 2 eine gleichgroße entgegengerichtete Kraft auf Körper 1 aus.

## 1.3 Kepler'schen Gesetze

1. Alle Planeten kreisen auf elliptischen Bahnen um ihr Zentralgestirn. Das Baryzentrum des Systems liegt in einem der Brennpunkte.
2. Der Fadenstrahl der Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen. Es gilt

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = m(\vec{r} \times \vec{v}) = \text{const.} \quad (1.4)$$

Betrachtet man die Änderung der Fläche über die Zeit, gilt

$$dA = \frac{1}{2} (\vec{r} \times d\vec{r}) \quad (1.5)$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} (\vec{r} \times \vec{v}). \quad (1.6)$$

Daraus folgt, dass

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\vec{L}}{m} = \text{const.} \quad (1.7)$$

3. Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten sind proportional zu den Kuben der großen Halbachse.

## 1.4 Galilei-Transformation

Die GALILEI-Transformation transformiert ein Bezugssystem  $\Sigma$  in ein anderes Bezugssystem  $\Sigma'$ , welches sich mit einer konstanten Geschwindigkeit relativ zu  $\Sigma$  bewegt.

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}t \quad (1.8)$$

$$t' = t. \quad (1.9)$$

Längen und Beschleunigung sind GALILEI-invariant; die Geschwindigkeit selbst nicht.

Die Transformation in das Schwerpunktsystem sieht wie folgt aus

$$R = \frac{m_i r_i}{M} \quad (1.10)$$

$$r_i^* = r_i - R \quad (1.11)$$

$$v_i^* = v_i - v. \quad (1.12)$$

$v$  bezeichnet hier die Geschwindigkeit des Schwerpunktes gegenüber dem Intertialsystem.

## 1.5 Beschleunigte und rotierende Bezugssysteme; Scheinkräfte

Scheinkräfte treten in beschleunigten und rotierenden Bezugssystemen auf, da der Bezugspunkt des Systems auch beschleunigt wird. Die GALILEI-Trafo ist hier nicht mehr anzuwenden, da die Geschwindigkeit nicht konstant ist.

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}t \quad (1.13)$$

$$\ddot{\vec{r}}' = \ddot{\vec{r}} - \dot{\vec{v}}. \quad (1.14)$$

Aus dieser Beschleunigung ergibt sich die Scheinkraft im beschleunigten Bezugssystem. Wichtig sind folgende Kräfte

$$\vec{F}_{\text{Coriolis}} = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (1.15)$$

$$\vec{F}_{\text{Zentrifugal}} = m\vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{\omega}). \quad (1.16)$$

## 1.6 Raketengleichung

Die Rakete ist ein System mit veränderlicher Masse. Die wirkende Kraft ist also abhängig von der Änderung der Masse. Zum Zeitpunkt  $t$  fliegt die Rakete mit einem Impuls von  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Verliert die Rakete durch den Antrieb Masse, so ändert sich der Impuls zu

$$\vec{p}_{+dt} = (m + dm)(\vec{v} + d\vec{v}) + (-dm)(\vec{v} - \vec{v}_{\text{Gas}}) \quad (1.17)$$

$$= m\vec{v} + m d\vec{v} + dm\vec{v} + dm d\vec{v} - dm\vec{v} + dm\vec{v}_{\text{Gas}} \quad (1.18)$$

$$= m\vec{v} + m d\vec{v} + dm\vec{v}_{\text{Gas}} + \underbrace{dm d\vec{v}}_{\approx 0}. \quad (1.19)$$

Da der Gesamtimpuls erhalten ist, gilt  $\vec{p}_{+\text{dt}} = \vec{p} = m\vec{v}$ , also

$$m\vec{v} = m\vec{v} + m\overrightarrow{dv} + dm\vec{v}_{\text{Gas}} \quad (1.20)$$

$$\int_{v_0}^{v(t)} \overrightarrow{dv} = -\vec{v}_{\text{Gas}} \int_{m_0}^{m(t)} dm \frac{1}{m} \quad (1.21)$$

$$\vec{v}(t) - \vec{v}_0 = -\vec{v}_{\text{Gas}} \ln\left(\frac{m(t)}{m_0}\right). \quad (1.22)$$

## 1.7 Foucault–Pendel

Das FOUCAULT–Pendel ist ein Pendel, dessen Schwingebene durch die Corioliskraft gedreht wird. Dadurch kann die Rotationsbewegung der Erde nachgewiesen werden. Die Corioliskraft ist eine Trägheitskraft, die in einem rotierendem Bezugssystem auftritt. Sie tritt auf, wenn sich ein Körper nicht parallel zur Rotationsachse bewegt.

$$\vec{F}_C = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}. \quad (1.23)$$

Da die Kraft senkrecht zur Geschwindigkeit ist, bewirkt sie nur eine Ablenkung zur Seite und keine Vergrößerung oder Verkleinerung der Geschwindigkeit.

Der Zusammenhang mit dem FOUCAULT–Pendel besteht darin, dass das Pendel bei der Pendelbewegung zur Seite abgelenkt wird und so seine Pendelebene dreht. An den Polen (also liegt der Aufhängepunkt des Pendels in der Rotationsachse) rotiert das Pendel genau entgegengesetzt zur Erde. Eine vollständige Rotation der Pendelebene ist nach einer vollständigen Rotation der Erde.

Am Äquator rotiert die Pendelebene gar nicht.

## 1.8 Konservative Kräfte

Eine Kraft ist konservativ, wenn gilt

- Das Kraftfeld ist nicht zeitabhängig.
- Das Kraftfeld ist wirbelfrei.  $\overrightarrow{\text{rot}}\vec{F}(\vec{r}) = \vec{0}$ .
- Die Arbeit über alle geschlossenen Kurven ist null. Die Arbeit über eine nicht geschlossene Kurve ist nur von ihrem Anfangs- und Endpunkt abhängig.  $\forall \mathcal{C} : \oint_{\mathcal{C}} d\vec{r} \vec{F}(\vec{r}) = 0$ .
- Das Kraftfeld ist das Gradientenfeld eines Potentials.  $\vec{F}(\vec{r}) = -\overrightarrow{\text{grad}}V(r)$ .

## 1.9 Stöße

Bei einem elastischen Stoß gilt die Impuls- und Energieerhaltung

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 \quad (1.24)$$

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2. \quad (1.25)$$

Bei einem inelastischen Stoß gilt die Impulserhaltung, allerdings nicht die Energieerhaltung, da Energie in Verformung oder Wärme verloren geht

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 \quad (1.26)$$

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2 - Q. \quad (1.27)$$

$Q$  beschreibt hier die Menge an Energie die verloren geht.

Der Gesamtimpuls im Schwerpunktsystem ist null, da die einzelnen Impulse entgegengerichtet sind,

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2. \quad (1.28)$$

## 1.10 Experimentelle Bestimmung der Gravitationskonstante

Die experimentelle Bestimmung der Gravitationskonstante erfolgt über die Gravitationswaage. Die Gravitationswaage ist aus einem Torsionsdraht aufgebaut, an dem eine Hantel hängt. Die Hantel wird von zwei Massen aufgrund der Gravitationskraft ausgelenkt. Mit der Rückstellkraft des Torsionsdrahtes stellt sich dann ein Gleichgewicht ein

$$F_r = 2F_\gamma \quad (1.29)$$

$$k\varphi = 2\gamma \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \quad (1.30)$$

$$\gamma = \frac{k\varphi r_{12}^2}{2m_1 m_2}. \quad (1.31)$$

Hier ist die Gravitationskraft gleich  $2F_\gamma$ , da zwei Kugeln verwendet werden, um das Pendel auszulenken.

## 1.11 Fluchtgeschwindigkeit

Die Fluchtgeschwindigkeit eines Gravitationspotentials ist erreicht, wenn die kinetische Energie gleich der potentiellen Energie des Potentials ist

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \quad (1.32)$$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}. \quad (1.33)$$

Existieren mehrere Gravitationspotentiale ist die potentielle Energie die Superposition dieser Potentiale (mit korrespondierendem Abstand  $r$ ).

Damit ein Körper auf einer elliptischen Bahn um einen anderen Körper kreist, muss die

Zentripetalkraft gleich der Gravitationskraft sein

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GM}{r^2} \quad (1.34)$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}. \quad (1.35)$$

## 1.12 Trägheitstensor

Das Trägheitsmoment gibt die Trägheit eines Körpers bei der Rotation an. Die Einträge in den Trägheitstensor sind definiert als

$$I_{ij} = \rho \int_V dV [|\vec{r}|^2 \delta_{ij} - r_i r_j]. \quad (1.36)$$

Der Satz von STEINER besagt, dass das zusätzliche Trägheitsmoment, welches durch die Verschiebung der Rotationsachse hinzukommt, addiert werden kann, falls die neue Rotationsachse parallel zur vorherigen Rotationsachse ist. Mit der Distanz  $a$ , um die verschoben wurde, gilt dann

$$I = I' + ma^2. \quad (1.37)$$

## 1.13 Kreisel

Die Hauptträgheitsachsen sind die Achsen eines Körpers auf denen dieser Körper den korrespondierenden Eigenwert als Trägheitsmoment hat.

Ist  $I_1 < I_2 = I_3$ , ist der Körper ein Prolat. Ist  $I_1 = I_2 < I_3$ , ist der Körper ein Oblat. Ist  $I_1 = I_2 = I_3$ , ist der Körper sphärisch.

Ein Kreisel ist symmetrisch, wenn dieser zwei gleiche Hauptträgheitsmomente hat. Ist dieser Körper auch rotationssymmetrisch und diese Achse, so heißt sie Figurenachse.

Präzession beschreibt die Rotation des Drehimpulsvektors eines rotierenden Körpers um eine feste Raumachse. Diese Rotation tritt auf, wenn ein Drehmoment orthogonal zum Drehimpuls wirkt. Da die Kraft orthogonal wirkt, wird nur die Richtung des Drehimpulses und nicht seine Länge verändert.

Nutation beschreibt die Schwingung des Drehimpulsvektors um die Figurenachse, hervorgerufen durch ein Drehmoment weiteres orthogonales Drehmoment.



## 2 Thermodynamik

### 2.1 Temperaturskala (Kelvin)

Die Fixpunkte der Kelvinskala liegen bei

- 0 K: Absoluter Nullpunkt; das System ist enthält keine kinetische Energie mehr.
- 273,16 K und 613 Pa: Tripelpunkt von Wasser (??), der Zustand bei dem alle Phasen von Wasser miteinander im Gleichgewicht stehen.

Der Tripelpunkt ist in dem Phasendiagramm dargestellt, welches eine gängige Methode ist, die Phase eines Stoffes oder Systems mit Hilfe des Drucks und der Temperatur darzustellen.

### 2.2 Wärmeausdehnung von Festkörpern

Stoffe dehnen sich bei Wärmezufuhr aus, da das LENNARD-JONES-Potential eine asymmetrische Form hat. Wird Energie in Form von Wärme zu einem Stoff hinzugefügt, erhöht sich die kinetische Energie der Moleküle und so auch die Schwingungsamplitude. Da das LENNARD-JONES-Potential asymmetrisch ist, erhöht sich der mittlere Abstand zwischen den Molekülen.

Bei genügend Wärme findet ein Phasenübergang statt. Da die Form des LENNARD-JONES-Potential eine Material- bzw. Stoffeigenschaft ist, haben unterschiedliche Materialien unterschiedlich starke Ausdehnung.

Die Länge des Materials nach der Ausdehnung ist gegeben als

$$l = l_0 + l_0 \alpha_V \Delta T = l_0 (1 + \alpha_l \Delta T) \quad \frac{\alpha_l^a}{\alpha_l^b} = \text{const.} \quad (2.1)$$

Analog gilt für das Volumen (auch das Gesetz von GAY-LUSSAC)

$$V = V_0 + V_0 \alpha_V \Delta T = V_0 (1 + \alpha_V \Delta T) \quad \frac{\alpha_V^a}{\alpha_V^b} = \text{const.} \quad (2.2)$$

Für ideale Gase gilt sogar

$$\frac{\alpha_V^a}{\alpha_V^b} = 1. \quad (2.3)$$

### 2.3 Ideale Gase / Van-der-Waals-Gase

Ein ideales Gas besteht aus ausdehnungslosen Massenpunkten, belegen also in ihrem Raum kein Volumen. Zudem sind die Teilchen frei und üben keine Wechselwirkung aufeinander aus. Ideale Gasteilchen rotieren bzw. vibrieren nicht; die Energie ist ausschließlich durch ihre kinetische Energie gegeben. Ein reales Gas ist näherungsweise ein ideales Gas, wenn es sich weit von seinen Phasenübergängen befindet.

Das Gesetz von GAY–LUSSAC besagt

$$V(p_0, \Delta T) = V(p_0, \Delta T) (1 + \alpha \Delta T). \quad (2.4)$$

Das Gesetz von BOYLE–MARIOTTE besagt

$$pV(p, \Delta T) = p_0 V(p_0, \Delta T). \quad (2.5)$$

Es folgt also das BOYLE–MARIOTTE–GAY–LUSSAC Gesetz

$$pV = p_0 V(p_0, \Delta T) = p_0 V_0 (1 + \alpha \Delta T). \quad (2.6)$$

Für ideale Gase ist  $\alpha = (273,15^\circ\text{C})^{-1}$  bei einer Temperatur von  $T = 0^\circ\text{C}$ .

Es folgt das ideale Gasgesetz für ein System aus  $n$  mol Teilchen

$$pV = nRT \qquad R = \frac{p_N V_M}{T_{>0}}, \quad (2.7)$$

mit  $V_M$  dem Molvolumen und  $p_N$  dem Normaldruck.

Für ein reales Gas gilt allerdings näherungsweise

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - b) = nRT, \quad (2.8)$$

mit  $a$  dem Binnendruck, hervorgerufen durch den Druck der einzelnen Moleküle, und  $b$  dem Kovolumen, dem Eigenvolumen der Moleküle.

## 2.4 Wärme

Wärme ist der Teil der Energie, der von einem thermodynamischen System aufgenommen oder abgegeben wird. Es gibt verschiedene Arten des Wärmeaustausch.

- Wärmestrahlung: Wärme wird in der Form von elektromagnetischen Wellen aufgrund von Molekülschwingungen abgestrahlt.
- Konduktion: Wärme wird an der Grenze zwischen zwei Oberflächen in Richtung der kälteren Oberfläche abgegeben.
- Konvektion: Wärme wird von einem kälteren strömenden Material aufgenommen, indem dieses durch seinen Bewegung immer wieder mit seiner kalten Oberfläche Wärme abtransportieren kann.

## 2.5 Maxwell–Boltzmann–Verteilung

Die MAXWELL–BOLTZMANN–Verteilung beschreibt die statistische Geschwindigkeitsverteilung eines idealen Gases. Wichtig dabei ist, dass die Verteilung eine lang auslaufende Kurve besitzt.

Es können also Gasmoleküle existieren, die noch kinetische Energie haben, obwohl der peak der Kurve bei einer Geschwindigkeit von null liegt.

Die kinetische Energie von idealen Gasen ist über ihre Freiheitsgrade gegeben

$$E_{\text{kin}} = \frac{f}{2} kT. \quad (2.9)$$

## 2.6 1. Hauptsatz der Wärmelehre

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Energie in einem abgeschlossenen System konstant bleibt.

$$dU = dQ - p dV. \quad (2.10)$$

Es existiert kein Perpetuum Mobile erster Art, welches mehr Energie produziert, als mechanisch oder über Wärmezufuhr hineingegeben.

## 2.7 2. Hauptsatz der Wärmelehre

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Wärme stets von einem wärmeren Objekt zu einem kälteren Objekt und nie von sich selbst auch umgekehrt, fließt.

Es existiert kein Perpetuum Mobile zweiter Art, welches Wärmeenergie aus einer kälteren Umgebung gewinnen kann.

## 2.8 Kreisprozesse / Zustandsänderung

Kreisprozesse bezeichnen eine Abfolge von Zustandsänderungen eines Arbeitsmediums (Gas, Dampf, Fluid) im Zustandsraum (Druck, Temperatur, Volumen). Das Medium durchläuft ausschließlich Zustände, die im thermodynamischen Gleichgewicht liegen.

- isobar: Konstanter Druck.
- isochor: Konstantes Volumen.
- isotherm: Konstante Temperatur.
- adiabatisch: Kein Wärmeaustausch mit der Umgebung. Ein adiabatisch reversibler Prozess ist immer isentrop, die Umkehrung allerdings nicht.
- Isentrop: Konstante Entropie.
- Isenthalp: Konstante Enthalpie.

Der Wirkungsgrad eines System ist definiert als

$$\eta := \frac{E_{\text{nutz}}}{E_{\text{zugef}}}. \quad (2.11)$$

Er bezeichnet die Effizienz eines Systems.

### 2.8.1 Carnot-Prozess

Der CARNOT-Prozess ist ein Kreisprozess, der einen reversiblen Prozess zur Umwandlung von Wärme in Arbeit darstellt (??). Das  $T$ - $S$ -Diagramm ist ein Rechteck, da der adiabatische Prozess isentrop verläuft.

Der Wirkungsgrad des CARNOT-Prozess ist definiert durch die höchste ( $T_h$ ) und niedrigste ( $T_n$ ) im Prozess auftretende Temperatur

$$\eta := \frac{T_h - T_n}{T_h}. \quad (2.12)$$

## 2.9 Entropie, Enthalpie

Die Entropie beschreibt das Maß an Chaos in einem System. Sie steigt durch verschiedene thermodynamische Prozesse (Wärmeleitung, Diffusion, Erzeugung von Reibungswärme, chemische Reaktionen, ...) immer mit der Zeit. Der Gleichgewichtszustand eines Systems ist dann erreicht, wenn die Entropie am größten ist; dann bleibt die Entropie konstant. Die Entropie kann nie vernichtet werden. Ein Prozess bei dem Entropie entsteht, kann nicht rückgängig gemacht werden, ohne, dass die entstandene Entropie an die Umgebung abgegeben wird.

Die Entropie kann definiert werden über

$$S := k_B \ln \Omega \quad \delta S := \frac{\delta Q}{T}, \quad (2.13)$$

mit  $\Omega$  dem Phasenraumvolumen ( $d\Omega = d^{3N}q d^{3N}p$ ) wobei  $(\vec{p}, \vec{q})$  den Mikrozustand eines Teilchens im  $6N$ -dimensionalen Raum angibt und  $\delta Q$  der dem System bei einer Temperatur  $T$  zugeführten Wärme. Wird an dem System nur mechanische Arbeit durch Volumenänderung verrichtet, ändert sich die Entropie nicht.

Die Enthalpie ist eine systemspezifische Rechengröße, dargestellt als Summe aus innerer Energie und der Volumenarbeit

$$H := U + pV. \quad (2.14)$$

Die „Bruttoenergie“, die einem System zugeführt werden muss, ist gegeben als die Änderung der Energie  $dU$  und die durch die isobare Volumenarbeit  $p dV$  verbrauchte Energie

$$dH = dU + p dV. \quad (2.15)$$

## 3 Elektrostatik

### 3.1 Makroskopische Elektrostatik

### 3.2 Bändermodell / Leiter

Das Bändermodell wird verwendet, um die quantenmechanischen Energieniveaus der Elektronen in einem Kristall darzustellen. Dabei existiert das Valenz- und Leitungsband. Im Valenzband sind die Elektronen an die Atomrümpfe gebunden. Im Leitungsband können sich die Elektronen frei durch den Kristall bewegen.

Betrachtet man einen Leiter, so befindet sich das Leitungsband unmittelbar über dem Valenzband; es muss also nur eine verschwindend geringe Energie aufgebracht werden, um die Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband zu befördern. Leiter sind im Allgemeinen Kaltleiter, da sich bei zu hohen Temperaturen zu viele Elektronen im Leitungsband befinden.

In Halbleitern muss eine gewisse Energie aufgebracht werden, damit Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband gelangen. Halbleiter sind im Allgemeinen Heißeiter, da sich bei hohen Temperaturen ausreichend viele Elektronen im Leitungsband befinden.

Bei Nichtleitern ist die Energie zwischen Valenz- und Leitungsband so hoch, dass es für die Elektronen im Allgemeinen nicht möglich ist in das Leitungsband zu gelangen.

### 3.3 Maxwell-Gleichungen

Die MAXWELL-Gleichungen sind

$$\operatorname{div} \vec{E} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \operatorname{div} \vec{B} = 0 \qquad (3.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\partial_t \vec{B} \qquad \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} - \frac{1}{c^2} \partial_t \vec{E}. \qquad (3.2)$$

### 3.4 Hertz'scher Dipol

Der HERTZ'sche Dipol ist ein langer gerader Draht, in dem Ladung zwischen den Enden schwingen. Er beruht darauf, dass die Enden des Drahtes einen Kondensator bilden, dessen Feldlinien ähnlich den Feldlinien eines Dipols sind und, dass der Draht selbst ein konzentrisches Magnetfeld aufbaut. Durch die oszillierende Entstehung des elektrischen und magnetischen Feldes sendet der Dipol elektromagnetische Strahlung.

Seine Ursprungsform ist ein elektrischer Schwingkreis mit Spule und Plattenkondensator.

### 3.5 Kondensator

Ein Kondensator besteht aus zwei unterschiedlich geladenen Polen, welcher Energie eines Gleichstromkreises zwischen den Platten mit Hilfe eines elektrischen Feldes speichert. Die Kapazität eines Kondensators ist gegeben durch

$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (3.3)$$

Die Energie

$$E = \frac{1}{2}CU^2. \quad (3.4)$$

Für einen Plattenkondensator gelten folgende Formeln

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \qquad E = \frac{Q}{\varepsilon A}, \quad (3.5)$$

mit  $d$  dem Plattenabstand und  $A$  der Fläche, die die Platten gegenseitig durchsetzen.

## 4 Spezielle Relativitätstheorie

### 4.1 Kausalität

### 4.2 Minkowski–Diagramm

## 5 Optik

### 5.1 Polarisation

Die Polarisation einer Welle beschreibt die Richtung der Schwingung. Für elektromagnetische Wellen bilden  $\vec{E}$ -,  $\vec{B}$ -Feld und Wellenvektor  $\vec{k}$  ein orthogonales System, also  $\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{k}$ .

- Linearpolarisierung: Eine Welle, bei der die Richtung der Schwingung konstant ist.
- zirkulare Polarisation: Eine Welle, bei der der Betrag der Schwingung konstant ist, die Richtung sich aber zirkular ändert.
- elliptische Polarisation: Eine Wellen, bei der sich der Betrag und und Richtung der Schwingung elliptisch ändert.

### 5.2 Interferometer

### 5.3 Linsen

### 5.4 Resonator

### 5.5 Phasen– und Gruppengeschwindigkeit

Die Phasen– und Gruppengeschwindigkeit einer Welle ist gegeben durch

$$v_{\text{Ph}} = \frac{\omega}{k} \qquad v_{\text{Gr}} = \frac{\partial \omega}{\partial k}. \qquad (5.1)$$

### 5.6 Dispersion

Dispersion beschreibt die wellenlängenabhängige Änderung des Brechungsindex, also

$$A = \frac{dn}{d\lambda}. \qquad (5.2)$$

Dispersion kann z.B. für Spektroskopie verwendet werden: Ein paralleler Lichtstrahl trifft in einem Winkel auf eine Seite eines Prismas. In diesem Prisma tritt Dispersion auf, also wird Licht mit einer geringen Wellenlänge nicht so stark abgelenkt, wie Licht mit einer größeren Wellenlänge. Dadurch lassen sich z.B. einzelne Emissionslinien aufteilen und beobachten.

### 5.7 Snellius'sche Brechungsgesetz

Das SNELLIUS'sche Brechungsgesetz gibt an, unter welchem Winkel Licht an der Grenzschicht zwischen zwei Medien gebrochen wird

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \qquad (5.3)$$



mit  $\alpha$  dem Eintritts- und  $\beta$  dem Austrittswinkel.

Die Herleitung dieses Gesetzes folgt aus dem FERMAT'schen Prinzip, welches besagt, dass Licht immer den kürzesten Weg durch ein Medium wählt. Allgemeiner das Prinzip der stationären Wirkung.

Quantenmechanisch betrachtet ist das Licht gleichzeitig auf allen Wegen zu finden, allerdings löschen sich die Wege, die nicht dem kürzesten entsprechen, aus.

## 5.8 Kohärenz

Kohärenz beschreibt die Fähigkeit einer Welle mit einer anderen Welle destruktiv oder konstruktiv zu Überlagern.

Eine Welle ist zeitlich Kohärent, wenn sie über ein Zeitintervall auf vorhersagbare Weise schwingt. Eine höhere Kohärenzzeit entspricht einer längeren Zeit, in der das Licht interferieren kann. Zeitliche Kohärenz ist dann relevant, wenn Licht zu einer zeitlich verschobenen Kopie ihrer selbst kohärent sein soll. Der Wellenzug muss dann so lange auf vorhersagbare Weise schwingen, dass das kohärente Licht noch die andere Quelle erreichen kann.

Eine Welle ist räumlich Kohärent, wenn sie mit einer räumlich verschobenen Quelle noch interferieren kann. Wie weit diese andere Quelle weg sein darf, beschreibt die Größe des räumlichen Kohärenzgebietes.

## 5.9 Doppelspalt

Ein Doppelspalt kann verwendet werden, um die Wellenlänge eines Lichtbündels zu berechnen. Es gilt die Gleichung für konstruktive Interferenz

$$d \sin \alpha = m \lambda = g, \quad (5.4)$$

mit  $d$  dem Spaltabstand / Gitterkonstante,  $\alpha$  dem Winkel des Interferenzmaximums,  $m \in \mathbb{N}$  der Zahl des Maximums und  $g$  dem Gangunterschied. Für destruktive Interferenz werden die korrespondierenden Größen für  $m \in \mathbb{N} + \frac{1}{2}$  verwendet. Bei der Beugung ist die Verteilung der Extremstellen genau andersherum, also ist für  $m \in \mathbb{N}$  ein Minimum und für  $m \in \mathbb{N} + \frac{1}{2}$  ein Maximum.

Die Herleitung dieser Formel folgt aus der Geometrie des Doppelspaltes und aus der Bedingung, dass für konstruktive bzw. destruktive Interferenz die Wellenberge und -täler überlagern, bzw. sich auslöschen müssen.

## 5.10 Totalreflexion

## 5.11 Brewster-Winkel

## 6 Anhang

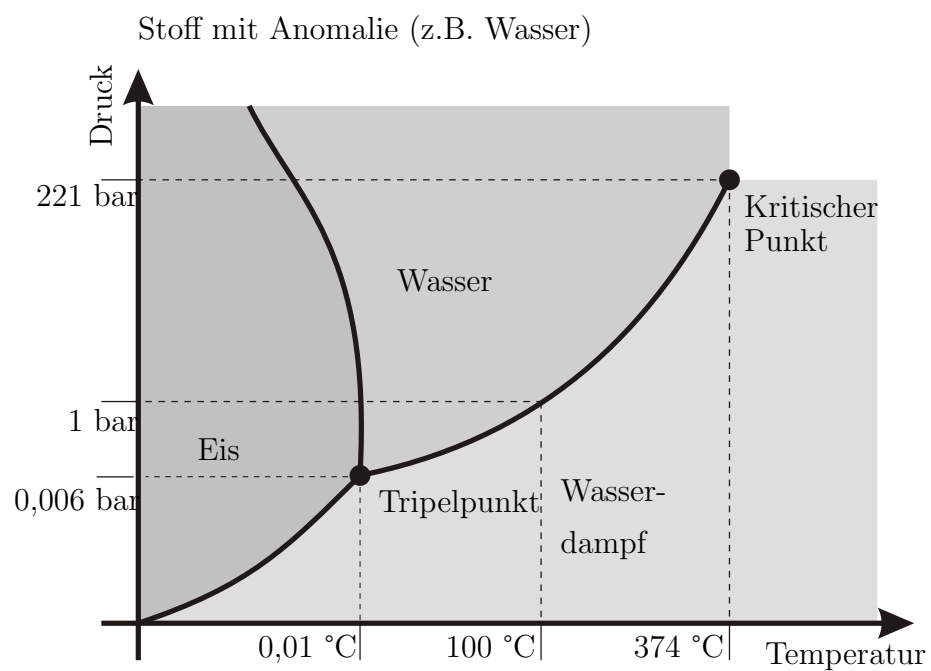
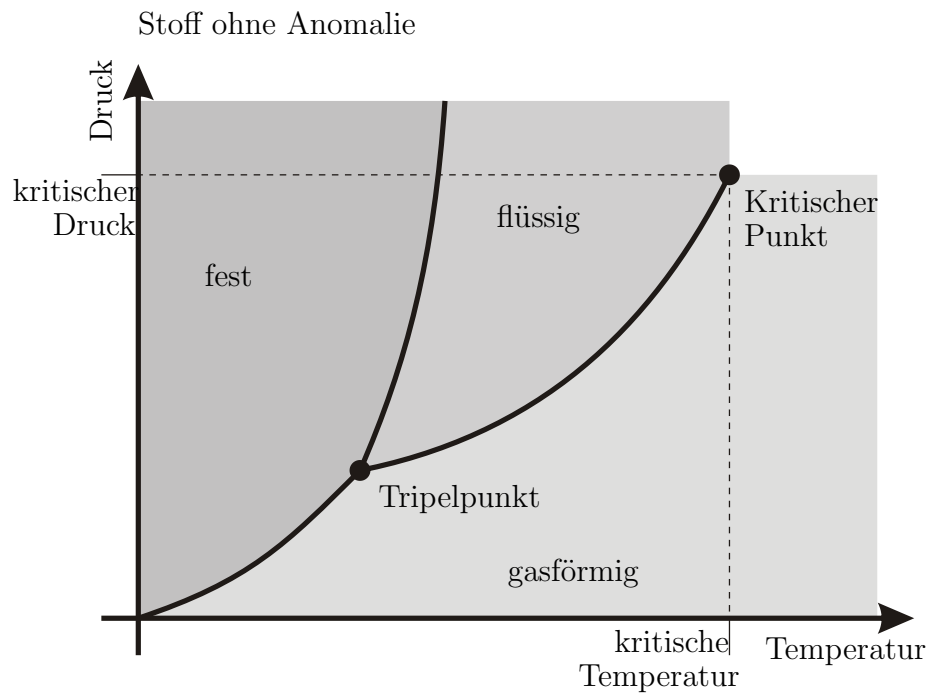


Figure 1: Phasendiagramm.

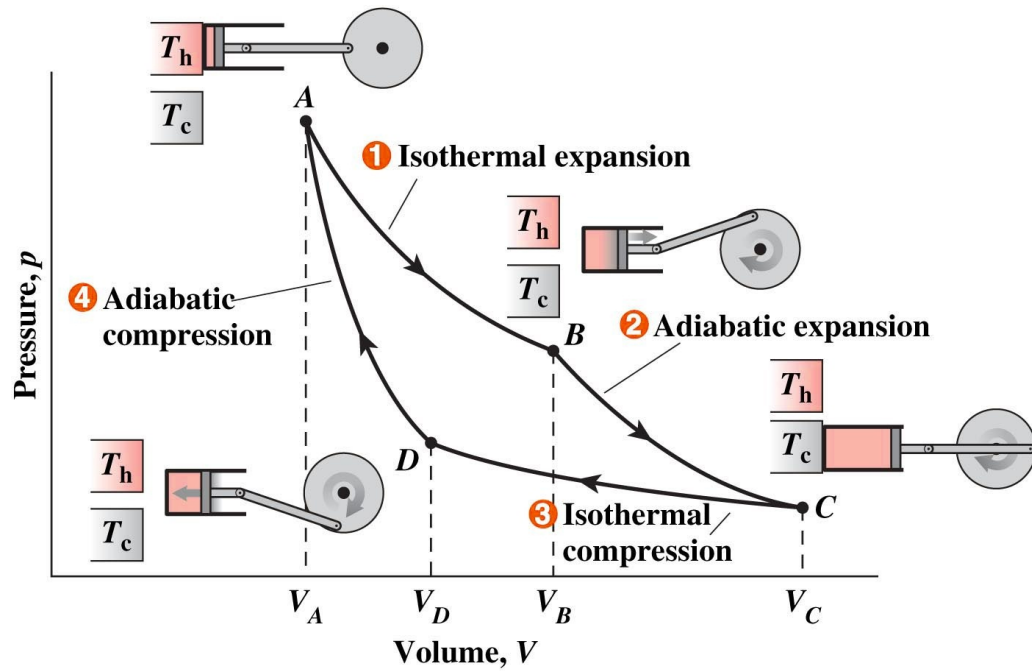


Figure 2: CARNOT-Prozess im p-V-Diagramm.

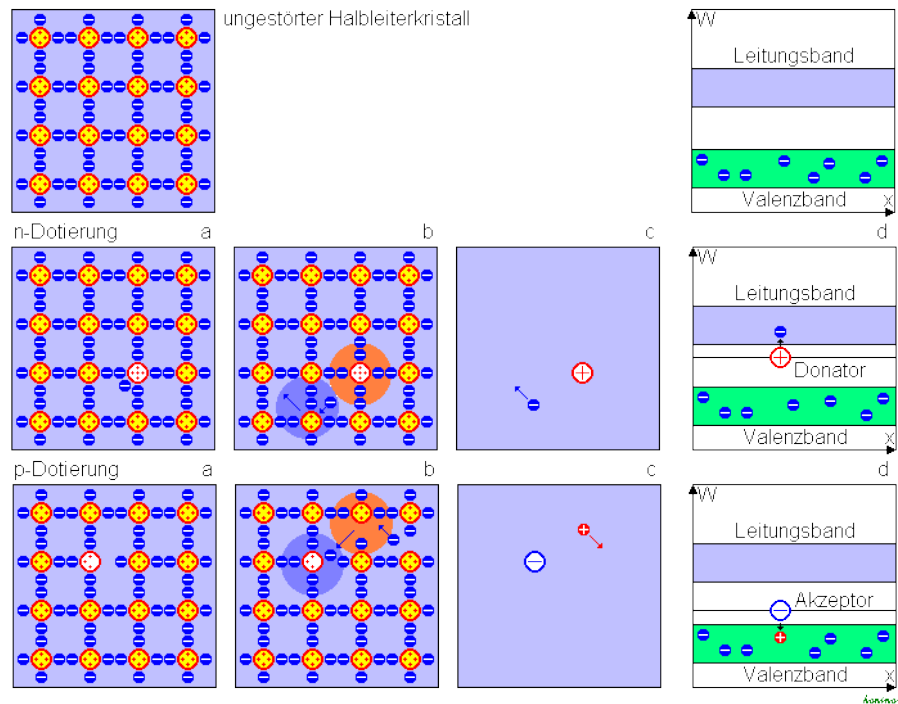


Figure 3: Bändermodell verschiedener Leiter bzw. Nichtleiter.