

Zusammenfassung Physik

Universität Köln 2006

Autor: Denis Meuthen

Bei Verbesserungsvorschlägen, Fragen und sonstigem
Kontaktinteresse wenden Sie sich über denmeu@web.de an mich.
Ich übernehme keine Garantie auf Vollständigkeit und Korrektheit.

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine physikalische Grundlagen	8
1.1	kinetische Energie	8
1.2	Freiheitsgrad	8
1.3	Harmonischer Oszillator	8
1.3.1	Potential eines harmonischen Oszillators	8
2	Mechanik	9
2.1	Einheiten der Mechanik	9
2.2	Größen der Mechanik	9
2.2.1	intensive Zustandsgrößen	9
2.2.2	extensive Zustandsgrößen	9
2.2.3	andere Größen, keine Zustandsgrößen	9
2.3	Wichtige Konstanten der Mechanik	10
2.4	Geschwindigkeit und Beschleunigung	10
2.5	Die Newton'schen Axiome	10
2.5.1	1.tes Newton'sches Axiom	10
2.5.2	2.tes Newton'sches Axiom	10
2.5.3	3.tes Newton'sches Axiom	10
2.6	Gravitation	10
2.7	beschleunigte Bewegungen	10
2.7.1	eindimensionale beschleunigte Bewegung	10
2.7.2	zweidimensionale beschleunigte Bewegung	11
	Freier Fall/Schiefer Wurf	11
	Kreisbewegung	11
2.8	Impuls	11
2.8.1	Impulserhaltung	11
2.9	Arbeit	11
2.9.1	Hubarbeit	11
2.9.2	Spannarbeit	11
2.9.3	kinetische Energie	12
2.9.4	Energieerhaltungssatz	12
2.10	Leistung	12
2.11	Rotationsbewegungen	12
2.11.1	Drehbewegung	12
2.11.2	Trägheitsmoment	12
2.11.3	Rotationsenergie	13
2.12	Allgemeine Bewegungsgleichung	13
2.13	Mathematisches Pendel	13
2.14	Gekoppelte Pendel	14
2.14.1	Schwingungen gekoppelter Pendel	14
2.15	Freie ungedämpfte Schwingung	14
2.16	Freie gedämpfte Schwingung	14
2.17	Schwingungen	15
2.18	konservative Kräfte	15

2.19	Zentralkraft	15
2.20	Die Keplerschen Gesetze	15
2.20.1	Erstes Keplersches Gesetz (Ellipsensatz)	15
2.20.2	Zweites Keplersches Gesetz (Flächensatz)	15
2.20.3	Drittes Keplersches Gesetz	16
2.21	Die Stoßgesetze	16
2.21.1	Der elastische Stoß	16
2.21.2	Der teilweise unelastische Stoß	16
2.21.3	Der ruckartige Stoß	16
2.21.4	Stoßparameter	16
2.22	Wellen	16
2.23	Oberflächenspannung	17
2.24	Kapillarkräfte	17
2.25	Auftrieb	17
2.26	Dichte	17
2.27	Das spezifische Gewicht	17
2.28	Newtonsche Flüssigkeiten	18
2.29	Innere Reibung	18
2.30	Arrhenius-Gleichung	18
2.31	Gesetz von Hagen-Poiseuille	18
2.32	Viskosität	19
2.32.1	Dynamische Viskosität	19
2.32.2	kinematische Viskosität	19
2.33	Kreisel	19
2.33.1	Nutation	19
2.33.2	Präzession	20
3	Wärme	21
3.1	Einheiten der Thermodynamik	21
3.2	Größen der Thermodynamik	21
3.2.1	intensive Zustandsgrößen	21
3.2.2	extensive Zustandsgrößen	21
3.2.3	andere Größen, keine Zustandsgrößen	21
3.3	Wichtige Konstanten der Thermodynamik	22
3.4	Die Hauptsätze der Thermodynamik	22
3.4.1	0.ter Hauptsatz	22
3.4.2	1.ter Hauptsatz (=Energieerhaltungssatz)	22
3.4.3	2.ter Hauptsatz	22
3.4.4	3.ter Hauptsatz (=Nernst-Theorem)	22
3.5	Temperatur	23
3.6	Physikalische Definition der Temperatur	23
3.7	Reibungskraft	23
3.8	Methoden zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents	23
3.9	Gasgesetze/Gasgleichungen	24
3.9.1	Allgemeine kinetische Gastheorie	24
3.9.2	Ideale Gasgleichung	24

	Allgemeines	24
	Molvolumen	25
	pV-Diagramm	25
	Gesetz von Gay-Lussac	26
	Gesetz von Amontons	26
3.9.3	Reale Gasgleichung	26
3.10	Carnot'scher Kreisprozess	27
3.11	Wärmetransport/Diffusion	28
	3.11.1 Konvektion	28
	3.11.2 Wärmeleitung	28
	3.11.3 Strahlung	28
	3.11.4 Diffusion	29
3.12	Clausius-Clapeyron'sche Differentialgleichung	29
3.13	Thermoelement	30
3.14	Gasthermometer	30
3.15	Äquipartitionsgesetz/Gleichverteilungssatz	30
3.16	Adiabatindex	30
3.17	Wärmekapazität	31
	3.17.1 Spezifische Wärmekapazität	31
	3.17.2 Atomwärme/Molwärme	31
	Dulong-Petit-Gesetz	31
	3.17.3 Schmelzwärme	31
	3.17.4 Verdampfungswärme	31
3.18	Tripelpunkt	32
3.19	kalorische Begriffe	33
	3.19.1 Temperaturgradient	33
3.20	Aufbau von Festkörpern	33
3.21	Thermische Ausdehnung	33
	3.21.1 lineare Wärmeausdehnung	34
	3.21.2 kubische Wärmeausdehnung	34
3.22	Thermospannung	34
	3.22.1 Seebeck-Effekt	34
	3.22.2 Peltier-Effekt	34
	3.22.3 Thomson-Effekt	35
3.23	Barometrische Höhenformel	35
3.24	Boltzmann-Faktor	35
3.25	Strahlungsgesetze	35
	3.25.1 Schwarzer Strahler	35
	3.25.2 Plancksche Strahlungsformel	36
	3.25.3 Rayleigh-jeans'sches Gesetz	36
	3.25.4 Wiensches Gesetz	36
	3.25.5 Stefan-Boltzmann Gesetz	36

4	Optik	37
4.1	Grundbegriffe der Optik	37
4.1.1	Frequenz	37
4.1.2	Wellenlänge	37
4.1.3	Ausbreitungsgeschwindigkeit	37
4.1.4	Brechzahl/Brechungsindex	37
4.1.5	Dispersion	37
4.2	Fresnel'sche Formeln	37
4.3	Gangunterschied	38
4.4	Lichtinterferenz	38
4.4.1	Kohärenz	38
	zeitliche Kohärenz	38
	räumliche Kohärenz	39
	Kohärenzlänge	39
	Kohärenzzeit	39
4.4.2	Interferenzfilter	39
4.5	Das Kirchhoff'sche Beugungsintegral	39
4.5.1	Fraunhofer-Beugung	39
4.5.2	Fresnel-Beugung	40
4.6	Lichtstrahlenbeugung	40
4.6.1	Huygen'sches Prinzip	40
4.6.2	Beugung am Einzelspalt	40
4.6.3	Beugung am Doppelspalt	40
4.6.4	Beugung am Gitter	41
4.7	Geißler-Röhre	41
4.7.1	Glimmentladung	41
4.7.2	Bogenentladung	41
4.8	Snellius'sches Brechungsgesetz	42
4.9	Totalreflexion	42
4.10	Linse	42
4.11	Polarisation	44
4.11.1	Polarisation durch Absorption	44
4.11.2	Polarisation durch Reflexion	44
4.11.3	Polarisation durch Streuung	44
4.11.4	Polarisation durch Doppelbrechung	44
4.12	Optische Aktivität	45
4.13	Abbildungen	45
4.14	Vergrößerungen	46
4.15	Numerische Apertur	46
4.16	Auflösungsvermögen	46
4.16.1	Helmholtz'sche Theorie	46
4.16.2	Abbesche Theorie	46
4.17	Abberationen	47
4.17.1	chromatische Abberation	47
4.17.2	sphärische Abberation	47
4.18	Prismenspektrometer	47

4.19	Kondensorlinse	48
4.20	Newton'sche Ringe	48
4.21	Laser	48
4.21.1	spontane Emission	49
4.21.2	induzierte Emission	49
4.21.3	Besetzungszahlinversion	49
4.21.4	Resonator	50
4.22	Bildentstehung bei sphärischen Spiegeln	50
4.22.1	Konkavspiegel/Hohlspiegel und Konvexspiegel/Wölbspiegel	50
5	Elektrodynamik	51
5.1	Die Kirchhoff'schen Sätze	51
5.1.1	Der 1.Kirchhoff'sche Satz, die Knotenregel	51
5.1.2	Der 2.Kirchhoff'sche Satz, die Maschenregel	51
5.2	Die Faradayschen Gesetze	51
5.2.1	1. Faradaysches Gesetz	51
5.2.2	2. Faradaysches Gesetz	51
5.2.3	Formeln	51
5.3	Die maxwellschen Gleichungen	52
5.3.1	Gauß'scher Satz	52
5.3.2	Induktionsgesetz	52
5.3.3	Durchflutungsgesetz	52
5.4	Wechselstrom	52
5.4.1	Wechselspannung	52
5.5	Thermoelement	53
5.5.1	Seebeck-Effekt	53
5.5.2	Thermospannung	53
5.5.3	Kontaktspannung	54
5.5.4	Thermokraft	54
5.5.5	Anwendungen eines Thermoelements	54
5.5.6	Thermoelementmaterialien	54
5.6	Drehspulinstrument	54
5.6.1	Lorentzkraft	55
5.6.2	Messbereichserweiterung eines Drehspulinstrumentes	55
5.6.3	Galvanometer	55
5.6.4	Spiegelgalvanometer	55
5.6.5	Ballistisches Galvanometer	56
5.7	Ohm'sches Gesetz	56
5.7.1	Widerstand	56
5.7.2	Spezifischer Widerstand	57
5.7.3	Scheinwiderstand, Impedanz	57
5.7.4	Wirkwiderstand, Resistanz	57
5.7.5	Blindwiderstand, Reaktanz	58
5.8	Elektrische Leistung	58
5.8.1	Wirkleistung	59
5.8.2	Blindleistung	59

5.8.3	Scheinleistung	59
5.9	Spannungsteiler	59
5.10	Leitung von Stoffen	59
5.10.1	Beweglichkeit und Driftgeschwindigkeit von Ladungen	61
5.10.2	Supraleitung	61
BCS-Theorie	62	
Hochtemperatursupraleiter	62	
5.11	Halbleiterdiode	63
5.11.1	p-n-Übergang	63
5.11.2	Zenerdiode	63
5.11.3	Kennlinie einer Diode	64
5.11.4	Dotierung, Eigenleitung, Störstellenleitung	64
5.12	Elektronenstrahloszilloskop/Braunsche Röhre	65
5.13	Brennstoffzelle	66
5.14	Halleffekt	66
5.14.1	Hall-Koeffizient	67
5.15	Fermi-Verteilung	67
5.15.1	Fermienergie	67
5.16	Wheatstonesche Brückenschaltung für Gleichstrom	67
5.17	Magnetfelder	68
5.17.1	Magnetische Feldstärke	68
5.17.2	Magnetische Induktion	68
5.17.3	Magnetfeld der Erde	69
Inklination	69	
Deklination	69	
5.18	Kondensator	69
5.19	Spule	69
5.19.1	Induktionsgesetz	70
5.20	Tangentenbussole	70
5.21	Wellenwiderstand	71
5.22	Lecherleitung	71
5.22.1	Stehende Wellen	71
5.23	Fadenstrahlrohr	71
5.23.1	Glühemission	72
5.23.2	Stoßionisation	72
5.24	Biot-Svart-Gesetz	72
5.25	Elektromotorische Kraft	72
5.26	Klemmenspannung	73
5.27	Kurzschlussstrom	73
5.28	Transistor	73
5.28.1	Bipolartransistor	73
5.29	Vierpol	74

1 Allgemeine physikalische Grundlagen

1.1 kinetische Energie

Die Kinetische Energie oder auch Bewegungsenergie ist die Energie, die in der Bewegung eines Körpers steckt.

Sie ist abhängig von der Masse m und der Geschwindigkeit v des Körpers und berechnet sich für Translationsbewegungen (geradlinigen Bewegungen) aus.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot mv^2$$

1.2 Freiheitsgrad

Moleküle können nicht nur Translationsenergie haben, sondern auch Rotationsenergie.

Außerdem können ihre Bestandteile, Atome, Ionen und sogar Elektronen, gegeneinander schwingen.

Jede solche unabhängige Bewegungsmöglichkeit nennt man einen Freiheitsgrad.

Beispielsweise hat ein Massenpunkt drei Freiheitsgrade, die Translationsfreiheitsgrade, also seine drei Raumkoordinaten, ein starrer Körper hingegen sechs, drei Translationsfreiheitsgrade und drei Rotationsfreiheitsgrade, beschrieben durch dessen Drehwinkel.

Die innere Energie U eines Körpers wird definiert durch die Anzahl der Freiheitsgeraden und seiner Temperatur:

$$U = \frac{f}{2} k_B T.$$

1.3 Harmonischer Oszillator

Ein harmonischer Oszillator ist ein System, dessen Bestandteile eine harmonische Schwingung ausführen.

Als harmonisch schwingend bezeichnet man den Verlauf einer physikalischen Größe, wenn sie einer Kreisfunktion (Sinus, Cosinus) folgt. Ein mechanisches Beispiel eines harmonischen Oszillators ist das Federpendel, bei der eine Masse an einer hängenden Schraubenfeder so befestigt ist, dass Federkraft und Gewichtskraft einander ausgleichen und die Masse in Ruhe ist.

Das Modell des harmonischen Oszillators ist in der Physik von besonderem Interesse da es eines der wenigen Systeme ist, dessen Gleichungen sich exakt und nicht nur näherungsweise lösen lassen.

Die Periodendauer eines harmonischen Oszillators beträgt $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

1.3.1 Potential eines harmonischen Oszillators

Das Potential $V(x)$ eines harmonischen Oszillators ist zu jeder Koordinate x ermittelbar über die Formel: $V(x) = D \cdot x^2$. Hierbei handelt es sich bei D um die Proportionalitätskonstante, die bei einem Federpendel auch Federkonstante genannt wird.

2 Mechanik

2.1 Einheiten der Mechanik

1 Kg (Kilogramm) = 1000g = 1.000.000 mg
1 km (Kilometer) = 1000 m (Meter) = 100.000 cm (Zentimeter) = 10.000.000 mm (Millimeter)
 $1m^3 = 1.000.000cm^3 = 1.000.000.000mm^3$
1 h (Stunde) = 60 min (Minuten) = 3600 s (Sekunden)
 $1 N \text{ (Newton)} = 1 \frac{kg \cdot m}{s^2}$
 $1 J \text{ (Joule)} = 1 N \cdot m = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$
 $1 W \text{ (Watt)} = 1 \frac{J}{s} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$
 $1 Nm \text{ (Newtonmeter)} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$

2.2 Größen der Mechanik

2.2.1 intensive Zustandsgrößen

Eine intensive Größe ist eine Zustandsgröße, die sich bei unterschiedlicher Größe des betrachteten Systems nicht ändert.

GRÖSSE	SYMBOL	EINHEIT
Temperatur	T	[K]
Druck	p	[Pa]

2.2.2 extensive Zustandsgrößen

Eine extensive Größe ist eine Zustandsgröße, die sich mit der Größe des betrachteten Systems ändert und ist somit das Gegenstück der intensiven Größe.

GRÖSSE	SYMBOL	EINHEIT
Masse	M	[kg]
Stoffmenge	n	[mol]
Volumen	V	[m ³]
Geschwindigkeit	v	$[\frac{m}{s}]$
Beschleunigung	a	$[\frac{m}{s^2}]$
Winkelgeschwindigkeit	ω	$[\frac{1}{s}]$
Impuls	p	$[\frac{kg \cdot m}{s}]$
Arbeit	W	[J]
Leistung	P	[W]
Drehmoment	M	[Nm]
Trägheitsmoment	J	[kg · m ²]

2.2.3 andere Größen, keine Zustandsgrößen

GRÖSSE	SYMBOL	EINHEIT
Kraft	F	[N]

2.3 Wichtige Konstanten der Mechanik

Gravitationskonstante: $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2}$
Gravitationsbeschleunigung: $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

2.4 Geschwindigkeit und Beschleunigung

Die Geschwindigkeit \vec{v} ergibt sich aus der zurückgelegten Entfernung $\Delta\vec{r}$ in der Zeit Δt : $\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$

Die Beschleunigung \vec{a} ist die Änderung der Geschwindigkeit \vec{v} über die Zeit Δt :
 $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$.

Das bedeutet, dass wenn $\vec{v} = \text{const.}$, $\vec{a} = 0$

2.5 Die Newton'schen Axiome

2.5.1 1.tes Newton'sches Axiom

Ein Körper verharrt in Ruhe oder bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit, wenn keine äußeren Kräfte auf ihn wirken: $\vec{a}=0$, wenn $\vec{F}=0$

2.5.2 2.tes Newton'sches Axiom

Die Kraft setzt sich aus Masse und Beschleunigung zusammen, wenn die Masse konstant bleibt: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$

2.5.3 3.tes Newton'sches Axiom

Wechselwirken die Kräfte zweier Körper, so ist die Kraft des ersten Körpers, die er auf den zweiten Körper ausübt genauso groß wie die entgegengesetzte Kraft, die vom zweiten auf den ersten Körper wirkt. Aktio = Reaktio. $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

2.6 Gravitation

Unter Gravitation versteht man die Kraft, die 2 Massen aufeinander ausüben.

Es gilt $F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$.

Hierbei ist r der Abstand der 2 Massen m_1 und m_2

Umgeformt gilt also für die Gravitationsbeschleunigung g:

$$g = G \cdot \frac{m_{Erde}}{r_{Erde}^2} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

2.7 beschleunigte Bewegungen

2.7.1 eindimensionale beschleunigte Bewegung

Der zurückgelegte Weg s hängt von Beschleunigung und Zeit ab:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2, \text{ allgemein: } s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2.$$

Beim allgemeinen Fall ist die Ausgangsstrecke s_0 und die Ausgangsgeschwindigkeit v_0 relevant.

2.7.2 zweidimensionale beschleunigte Bewegung

Freier Fall/Schiefer Wurf Bei einem freien Fall oder einem schiefen Wurf lassen sich die Bewegungen in senkrechte (y) und waagrechte (x) Achse zerteilen: Für die Senkrechte gilt die Gravitationskraft: $y = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$, in der Waagrechten erfolgt mangels Krafteinwirkung: $x = v \cdot t$.

Kreisbewegung Bei einer Kreisbewegung verändert sich der Winkel φ linear zur Zeit t: $\varphi = \omega \cdot t$. bzw. $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Hierbei ist T die Umlaufzeit für eine Runde.

Durch Anwendung der Kettenregel kommt man zum Schluss auf die Zentripetalbeschleunigung \vec{a} : $\vec{a} = -\omega^2 \vec{r} = -\frac{v^2}{r}$

2.8 Impuls

Der Impuls ist eine physikalische Größe, die der Bewegung eines Massenpunktes zugeordnet werden kann. Jeder bewegte Körper trägt einen Impuls, den er bei Stößen oder durch andere Wechselwirkungen (d. h. Kräfte zwischen den Körpern) ganz oder teilweise auf andere Körper übertragen kann. Er setzt sich aus dem Produkt der Masse und Geschwindigkeit zusammen:

$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$. Die Kraft ist die zeitliche Änderung des Impulses: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

2.8.1 Impulserhaltung

Es gilt der Impulserhaltungssatz. Danach ist der Gesamtimpuls in abgeschlossenen Systemen konstant, d.h. der Impuls ist eine Erhaltungsgröße.

$p_1 + p_2 = const.$ bzw. $\Sigma \vec{p} = const.$

2.9 Arbeit

Die physikalische Arbeit ist eine Energiemenge, die von einem System in ein anderes System übertragen wird. Diese Übertragung erfolgt durch das Wirken einer Kraft entlang eines Weges. Demzufolge setzt sich die Arbeit aus dem Produkt von Kraft und Weg zusammen:

$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$. Allgemein gilt: $W = \int_s \vec{F}(\vec{s}) d\vec{s}$

2.9.1 Hubarbeit

Für die Hubarbeit auf einer schiefen Ebene gilt der Zusammenhang

$W_{pot} = \vec{F} \cdot \vec{s} = m \cdot g \cdot h$.

Ergo ist die Arbeit unabhängig vom Winkel und nur abhängig von der Höhe.

2.9.2 Spannarbeit

Für die Spannarbeit einer Feder gilt der Zusammenhang $\vec{F}(x) = -D \cdot \vec{x}$. Diese Formel wird auch als das Hooke'sche Gesetz bezeichnet. Für die Arbeit gilt hier

$W_{Feder} = \frac{1}{2} D \cdot s^2$

2.9.3 kinetische Energie

Für die kinetische Energie eines freien Falls gilt der Zusammenhang:

$$W_{kin} = \frac{1}{2}m \cdot v^2$$

2.9.4 Energieerhaltungssatz

Der Energieerhaltungssatz oder Energiesatz besagt, dass die Summe aus kinetischer und potentieller Energie in einem abgeschlossenen System konstant bleibt:

$$E = W_{kin} + W_{pot} = const.$$

2.10 Leistung

Unter Leistung versteht man die in einem bestimmten Zeitrahmen verrichtete Arbeit. Es gilt: $P = \frac{W}{t}$

2.11 Rotationsbewegungen

Eine Rotationsbewegung lässt sich in eine Translations- und Rotationsbewegung zerlegen.

2.11.1 Drehbewegung

Als Drehmoment bezeichnet man jene physikalische Größe, die bei der Beeinflussung einer Drehbewegung wirkt. Sie spielt dabei dieselbe Rolle wie die Kraft bei einer fortschreitenden Bewegung. Sie setzt sich aus dem Weg und der Kraft zusammen: $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$

Bei Drehbewegungen existiert statt dem Impuls der Drehimpuls, der sich aus Impuls und Weg zusammensetzt:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \sum_i r_i \Delta m_i v_i.$$

Bei letzterem zerlegt man den Körper in mehrere Massepunkte. Zwischen Drehimpuls und Drehmoment ist also folgender Zusammenhang: $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$

Genauso gilt der Drehimpulserhaltungssatz: $\Sigma \vec{L} = const.$

2.11.2 Trägheitsmoment

Das Trägheitsmoment beschreibt in der Mechanik die Trägheit eines starren Körpers gegenüber einer Änderung der Rotationsbewegungen. Das Trägheitsmoment hängt ab von der Körperform, der Lage der Drehachse und der Massenverteilung. Es gilt nur in Bezug auf die jeweilige Drehachse. Um den Trägheitsmoment zu bestimmen, muss man den Körper in mehrere Massepunkte teilen und deren Abstand berücksichtigen:

$$J = \sum_i \Delta m_i r_i^2. \text{ Es gilt im Zusammenhang mit dem Drehimpuls: } \vec{L} = J \cdot \vec{\omega}.$$

Der Satz von Steiner ermöglicht die Ermittlung des Trägheitsmoment, wenn die Drehachse nicht durch den Schwerpunkt verläuft:

$J = J_s + m \cdot l_s^2$, wobei J_s der Trägheitsmoment durch den Schwerpunkt parallel zur Drehachse und l_s der Abstand der Drehachse vom Schwerpunkt ist. Bei

Anwendung des Steinerschen Satzes ist zweierlei zu beachten:

* Das Massenträgheitsmoment eines Körpers ist dann am geringsten, wenn die Drehachse durch den Schwerpunkt geht. Das folgt daraus, dass der Steinersche Anteil stets positiv ist, wenn man eine Verschiebung vom Schwerpunkt weg durchführt.

* Der Steinersche Anteil (ml) ist negativ anzusetzen, wenn das Trägheitsmoment um eine beliebige Achse bekannt ist, und daraus das Trägheitsmoment um den Schwerpunkt berechnet werden soll.

2.11.3 Rotationsenergie

Durch Umformung der kinetischen Energie entdeckt man, dass sich die Rotationsenergie aus Trägheitsmoment und Winkelgeschwindigkeit zusammensetzt:

$$W_{rot} = \frac{1}{2} J \omega^2$$

2.12 Allgemeine Bewegungsgleichung

Unter einer Bewegungsgleichung versteht man eine mathematische Gleichung (oder auch ein Gleichungssystem), welche die räumliche und zeitliche Entwicklung eines physikalischen Systems unter Einwirkung äußerer Einflüsse vollständig beschreibt. In der Regel handelt es sich um Differentialgleichungen.

Um eine gute mathematische Modellierung des zu betrachtenden physikalischen Systems zu erhalten, sind möglichst alle auf das System wirkenden Kräfte zu berücksichtigen. Dies gestaltet sich in der Praxis oftmals sehr aufwändig, so dass man häufig zur Verwendung geeigneter Näherungsverfahren gezwungen ist. Eine allgemeine Form der Bewegungsgleichung in der klassischen Physik lautet:

$$m \cdot \frac{d^2 \vec{r}(t)}{dt^2} = \sum_i \vec{F}_i(\vec{r}, t).$$

Auf der linken Seite steht der Trägheitsterm für das Teilchen der Masse m , auf der rechten Seite werden alle auf das Teilchen wirkenden Kräfte $\vec{F}_i(\vec{r}, t)$ aufsummiert.

2.13 Mathematisches Pendel

Ein mathematisches Pendel ist eine Idealisierung eines realen Pendels. Es ist ein grundlegendes Modell zum Verständnis von Pendelschwingungen. Mathematische Pendel sind durch zwei wesentliche Eigenschaften charakterisiert:

* Es herrscht keine Reibung in irgendeiner Form, also weder Strömungswiderstand, noch innere Reibung in Faden und Aufhängepunkt

* Die gesamte Masse des Pendels ist in einem einzigen Punkt konzentriert. Der Faden wird als masselos betrachtet, die Massenverteilung des Pendelkörpers wird durch ihren Massenmittelpunkt dargestellt.

In der Praxis kann man ein mathematisches Pendel annähern, wenn der verwendete Faden möglichst lang und dünn, der Pendelkörper möglichst klein und schwer ist. Betrachtet man die Schwingungen in einer nicht allzu ausgedehnten Zeitspanne, kann man die Reibung meist ebenfalls vernachlässigen. Eine typische Eigenschaft bei der Schwingung eines mathematischen Pendels ist, dass die

Frequenz nur von der Länge des Pendels abhängt, nicht aber von der anfänglichen Auslenkung oder der angehängten Masse.

Die allgemeine Bewegungsgleichung für ein mathematisches Pendel lautet:

$$m \cdot l \cdot \ddot{\varphi} = -m \cdot g \cdot \sin(\varphi).$$

Hierbei ist g die Fallbeschleunigung, l die Länge des Fadens und m die Masse des Pendels.

2.14 Gekoppelte Pendel

Zwei Pendel, zwischen denen ein Energieaustausch stattfinden kann (beispielsweise durch eine Schraubenfeder), werden als gekoppelte Pendel bezeichnet; die ausgeführten Schwingungen werden auch als Koppelschwingung bezeichnet. In jedem Pendel wirkt ein Richtmoment, das durch die Schwerkraft hervorgerufen wird und bestrebt ist, das Pendel in Ruhelage zurückzuziehen. Außerdem macht sich die vorhandene Kopplung in Form eines zusätzlichen Richtmoments bemerkbar, das so wirkt, dass die Feder möglichst entspannt wird. Die Bewegungsgleichungen gekoppelter Pendel lauten:

$$\text{Pendel 1: } m \cdot \ddot{x}_1 = -D_o \cdot x_1 - D_F(x_1 - x_2)$$

$$\text{Pendel 2: } m \cdot \ddot{x}_2 = -D_o \cdot x_2 + D_F(x_1 - x_2)$$

2.14.1 Schwingungen gekoppelter Pendel

Es gibt gleichsinnige (beide Pendel schwingen mit gleicher Amplitude und Phase) und gegensinnige (Die Pendel schwingen mit entgegengesetzter Amplitude und Phase) Schwingung. Bei der gleichsinnigen ergibt sich $x_1 = x_2$, während die gegensinnige ergibt: $x_1 = -x_2$. Überdies gibt es noch den Schwebfall, bei dem zu Beginn nur eines der beiden Pendel aus seiner Ausgangslage ausgelenkt wird, und die Schwingungsenergie langsam zwischen den beiden Pendeln hin- und herwandert.

2.15 Freie ungedämpfte Schwingung

Die allgemeine Bewegungsgleichung einer freien ungedämpften Schwingung lautet: $\frac{d}{dt}[I \cdot \dot{\varphi}(t)] = -D\varphi(t)$.

Hierbei ist t die Zeit, φ der Winkelausschlag des Kupferinges, I das Trägheitsmoment und D die Richtkonstante der rüctreibenden Spiralfeder. Deren Lösung lautet für die Bedingungen $\varphi(0) = A$ und $\dot{\varphi}(0) = 0$: $\varphi(t) = A \cdot \cos\omega_o t$ ($\omega_o = \sqrt{\frac{D}{I}}$)

2.16 Freie gedämpfte Schwingung

Die allgemeine Bewegungsgleichung einer freien gedämpften Schwingung lautet:

$$\frac{d}{dt}[I \cdot \dot{\varphi}(t)] = -D\varphi(t) - k\dot{\varphi}(t).$$

k ist hierbei die Reibungskonstante. Deren Lösung lautet für die Bedingungen

$$\varphi(0) = A \text{ und } \dot{\varphi}(0) = -\delta \cdot A:$$

$$\varphi(t) = A \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega_f \cdot t).$$

2.17 Schwingungen

Es gibt 3 relevante Schwingungen:

Beim Schwingfall gilt $\omega_o^2 - \delta^2 > 0$.

Beim aperiodischen Grenzfall gilt $\omega_o^2 - \delta^2 = 0$.

Beim Kriechfall gilt $\omega_o^2 - \delta^2 < 0$.

2.18 konservative Kräfte

In der Physik heißt ein Kraftfeld $F = F(r)$ konservativ, wenn es nur vom Ort abhängig ist und eine der drei folgenden äquivalenten Eigenschaften besitzt.

* Es gibt ein skalares Feld $V(r)$, mit $F(r) = -\nabla V(r)$, wobei ∇ der Gradient ist.

* Die Arbeit $W = \int_S F(r) dr$ entlang eines beliebigen Weges S durch das Kraftfeld ist nur vom Anfangs- und Endpunkt des Weges, nicht aber von seinem Verlauf abhängig. Insbesondere ist die Arbeit entlang einer geschlossenen Kurve C gleich Null.

* Für die Rotation gilt $\nabla \times F(r) = 0$

2.19 Zentralkraft

Eine Zentralkraft ist eine physikalische Kraft, die immer auf einen festen Punkt (das Kraftzentrum Z) zeigt. Die Schwerkraft und die Coulomb-Kraft stellen Beispiele für Zentralkräfte dar. Genau genommen hängt es vom Bezugssystem ab, ob die genannte Definition zutrifft; so ist etwa die Schwerkraft nur im Schwerpunktsystem (und allen relativ zu diesem ruhenden Systemen) eine Zentralkraft.

2.20 Die Keplerschen Gesetze

Die Keplerschen Gesetze sind nach dem Astronomen Johannes Kepler benannt. Er hatte diese Gesetzmäßigkeiten für die Umlaufbahnen der Planeten um die Sonne entdeckt. Sie beschreiben die Lage und Form der Bahnkurve und die Dynamik der Planetenbewegung.

2.20.1 Erstes Keplersches Gesetz (Ellipsensatz)

Die Umlaufbahn eines Planeten ist eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

2.20.2 Zweites Keplersches Gesetz (Flächensatz)

(Konstanz der Flächengeschwindigkeit; Erhaltung des Drehimpulses) Die Verbindung zwischen Zentralkörper und Trabant überstreicht in gleichen Zeitabschnitten gleiche Flächen.

2.20.3 Drittes Keplersches Gesetz

Die Quadrate der Umlaufzeiten (T) je zweier Planetenbahnen sind proportional zu den dritten Potenzen ihrer großen Halbachsen (a).

2.21 Die Stoßgesetze

Die Stoßgesetze sagen aus, dass es drei Arten von Stößen gibt:

2.21.1 Der elastische Stoß

Bei elastischen Stößen werden die stoßenden Körper weder unelastisch verformt noch erwärmt, die Reibung ist vernachlässigbar. Das bedeutet, dass die Energie vollständig von einem auf den anderen Körper übertragen werden kann. Es gelten der Energieerhaltungssatz sowie der Impulserhaltungssatz.

2.21.2 Der teilweise unelastische Stoß

Beim teilweise unelastischen Stoß werden Teile der kinetischen Energie in Rotations- und Wärmeenergie umgewandelt, die Energie wird nicht vollständig übertragen.

2.21.3 Der ruckartige Stoß

Der ruckartige Stoß beinhaltet keinerlei Energieübertragung, die gesamte kinetische Energie wird in Rotations- bzw. Wärmeenergie übertragen.

2.21.4 Stoßparameter

Unter einem Stoßparameter versteht man den minimalen Abstand der beiden Massen, bei dem zwischen den Massen keine Kraft wirken würde, so dass die Massen einander auf geradlinigen Bahnen passieren würden.

2.22 Wellen

Eine Longitudinalwelle, auch Längswelle genannt, ist eine physikalische Welle, bei der die Bewegungsrichtung der schwingenden Teilchen in Ausbreitungsrichtung verlaufen. Das Gegenteil ist bei einer Transversalwelle, auch Querwelle genannt, der Fall. Longitudinalwellen sind sehr oft Druckwellen. Das bedeutet, dass sich ein Überdruck (bzw. Unterdruck oder Zug) in einem Medium in der Ausbreitungsrichtung fortpflanzt. Das typische Beispiel einer longitudinalen Welle ist die Ausbreitung von Schall in Gasen und Flüssigkeiten. Da die Kopplung der Moleküle in diesen Stoffen meist sehr schwach ist, kann sich eine Welle nicht transversal ausbreiten sondern nur durch direkte Stöße, d.h. Druck.

2.23 Oberflächenspannung

Oberflächenspannung ist eine Eigenschaft der Oberfläche (Grenzfläche) zwischen einer Flüssigkeit und eines Gases wie z.B. der Luft. Die Oberfläche einer Flüssigkeit verhält sich ähnlich einer gespannten, elastischen Folie. Das Verhältnis aus der verrichteten Arbeit und der daraus resultierenden Oberflächenvergrößerung wird Oberflächenspannung oder auch Oberflächenarbeit genannt. $\sigma = \left(\frac{\Delta W}{\Delta A}\right)$ (SI – Einheit : $J/m^2 = N/m$).

2.24 Kapillarkräfte

Kapillarität oder Kapillareffekt (lat. capillaris, das Haar betreffend) ist das Verhalten von Flüssigkeiten, das sie bei Kontakt mit engen Röhren (-i Kapillare), Spalten oder anderen Hohlräumen in Feststoffen zeigen. Beispiel: Taucht man ein Glasröhrchen senkrecht in Wasser, steigt das Wasser in der engen Glasröhre ein Stück gegen die Gravitationskraft nach oben. Diese Effekte werden durch die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten selbst und der Grenzflächenspannung von Flüssigkeiten mit der festen Oberflächen (im Beispiel: des Glases) hervorgerufen.

2.25 Auftrieb

Der statische Auftrieb ist eine Kraft, die entgegen der Schwerkraft wirkt. Er entsteht, wenn sich ein Körper in einem Fluid (also einer Flüssigkeit oder einem Gas) befindet, es also verdrängt. Dieser Effekt wird mit dem Archimedischen Prinzip beschrieben.

$$F = \rho \cdot V \cdot g$$

Dabei ist V das verdrängte Volumen, ρ ist dessen Dichte, also ist $\rho \cdot V$ die verdrängte Masse, und $\rho \cdot V \cdot g$ ihre Gewichtskraft. Das Archimedische Prinzip ist also erfüllt. Gleichwohl ist die 'verdrängte Masse' $m = \rho \cdot V$ kein tatsächlicher Körper, sondern eine durch den verdrängenden Körper geprägte Verformung (V) der Flüssigkeit (relativ zu ihrem Oberflächen-spiegel), welcher eine virtuelle Dichte ρ zugemessen wird. Der Effekt ist also auch dann zu beobachten, wenn die vorhandene Flüssigkeit ein geringeres Volumen besitzt als der eingetauchte Teil des Schwimmkörpers.

2.26 Dichte

Die Dichte, Formelzeichen: ρ , ist eine physikalische Eigenschaft eines Materials. Sie ist über das Verhältnis der Masse m eines Körpers zu seinem Volumen V definiert: $\rho = \frac{m}{V}$

2.27 Das spezifische Gewicht

Das spezifische Gewicht eines Körpers ist das Verhältnis seiner Gewichtskraft zu seinem Volumen. Im Unterschied zur Dichte ρ bezeichnet das spezifische Gewicht eine Angabe der Gewichtskraft F_G (bei der Dichte ist es die Masse) bezogen auf

das Volumen, das heißt die Dichte und das spezifische Gewicht unterscheiden sich um den Faktor der Fallbeschleunigung g : $\gamma = \frac{F_G}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g$

2.28 Newtonsche Flüssigkeiten

Ein Newtonsches Fluid, benannt nach Isaac Newton, ist eine Flüssigkeit oder ein Gas, dessen Scherspannung t proportional zur Verzerrungsgeschwindigkeit du/dy ist: $\tau = \mu \frac{du}{dy}$;

Hierbei ist u die Strömungsgeschwindigkeit parallel zur Wand und y die Ortskoordinate normal zur Wand. Die Proportionalitätskonstante wird auch als dynamische Viskosität bezeichnet. Newtonsche Fluide sind z.B. Wasser, Luft, viele Öle und Gase. Die meisten im Alltagsbereich bekannten Flüssigkeiten verhalten sich in diesem Sinne. Abweichend verhalten sich nichtnewtonsche Fluide wie beispielsweise Ketchup, die ein nichtproportionales, sprunghaftes Fließverhalten zeigen.

2.29 Innere Reibung

Innere Reibung ist ein Energieverzehr bei Bewegung der Atome bzw. Moleküle eines Stoffes gegeneinander, zum Beispiel bei Strömungen innerhalb eines Öles. Es können äußere Kräfte wie die Schwerkraft auf jedes Flüssigkeitsteilchen wirken und Druckdifferenzen können Beschleunigungen hervorrufen. Reibungskräfte bewirken die Zähigkeit von Materialien bzw. die Viskosität in Flüssigkeiten. Für jedes Flüssigkeitsteilchen müssen sich die äußeren Kräfte, die Druckkräfte, die Reibungskräfte und die Trägheitskräfte das Gleichgewicht halten. Die innere Reibung ist mit den Mitteln der statistischen Physik einer ganz anderen und ungleich präziseren Beschreibung zugänglich, als die Reibung zwischen unsauberen Festkörperoberflächen. Anders als in der Mechanik, in der Reibung so lange wie möglich vernachlässigt wird, ist innere Reibung in der Standardtheorie der Hydrodynamik - den Navier-Stokes-Gleichungen - fest enthalten.

2.30 Arrhenius-Gleichung

Die Arrhenius-Gleichung (nach Svante Arrhenius) beschreibt quantitativ die Temperaturabhängigkeit der chemischen Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k .

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T}}$$

A präexponentieller Faktor oder Frequenzfaktor, entspricht nach der Stoßtheorie dem Produkt aus der Stoßzahl Z und dem Orientierungsfaktor P ,

E_A Aktivierungsenergie (Einheit: J/mol),

$R = 8,314 \text{ J/(K mol)}$ allgemeine Gaskonstante,

T absolute (thermodynamische) Temperatur (Einheit: K).

2.31 Gesetz von Hagen-Poiseuille

Der Volumenstrom \dot{V} , d.h. das geflossene Volumen V pro Zeiteinheit, bei einer laminaren Strömung einer viskosen Flüssigkeit durch ein Rohr (Kapillare) mit

dem Radius r und der Länge l wird mit dem Gesetz von Hagen-Poiseuille beschrieben. Es lautet: $\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{l} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\partial p}{\partial z}$

mit

\dot{V} Volumenstrom durch die Kapillare $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

r Innenradius der Kapillare m

l Länge der Kapillare m

η dynamische Viskosität der strömenden Flüssigkeit Pas

Δp Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite der Kapillare Pa

z Flussrichtung m

2.32 Viskosität

2.32.1 Dynamische Viskosität

Die dynamische Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Je größer die Viskosität ist, desto dickflüssiger, d.h. weniger fließfähig ist das Fluid, weil seine Teilchen desto stärker aneinander gebunden und damit unbeweglicher sind. Man spricht daher auch von der inneren Reibung. Die dynamische Viskosität der meisten Flüssigkeiten nimmt mit steigender Temperatur ab und kann oft mit der Arrhenius-Andrade-Beziehung beschreiben werden: $\eta = \eta_0 e^{\frac{E_A}{R \cdot T}}$

Wobei η_0 eine Materialkonstante und E_A die Aktivierungsenergie (auch Platzwechselenergie), R die allgemeinen Gaskonstante und T die absolute Temperatur sind.

2.32.2 kinematische Viskosität

Darüber hinaus wird das Verhältnis zwischen der dynamischen Viskosität η und der Dichte ρ definiert als kinematische Viskosität: $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

2.33 Kreisel

Im physikalischen Sinne ist jede schnell um eine Achse rotierende Masse mit hohem Trägheitsmoment ein Kreisel. Mathematisch betrachtet sind Kreisel rotierende feste Körper. Technische Anwendungen sind Gyroskope als Kreiselkompass oder Kreisel als Energiespeicher. Das Verhalten des Kreisels beruht auf dem gyroskopischen Effekt. Normalerweise wackelt der Kreisel erst, bis die Interaktion der Spitze und der Unterfläche den Kreisel in eine aufrechte Lage zwingt. Nach einer längeren aufrecht drehenden Phase lässt der Drehimpuls und demnach der gyroskopische Effekt allmählich nach. Dies führt zu einer sich steigenden Präzession, was schließlich in einer starken Kippneigung schleifend endet.

2.33.1 Nutation

Die Nutation beschreibt in der Physik die Bewegung der Rotationsachse eines Kreisels um die Achse des Drehimpulses. Diese Bewegung wird dadurch verursacht, dass der Drehimpuls L nicht parallel zu einer Figurenachse, d.h. der Achse

größten oder kleinsten Trägheitsmoments T des Kreisels, ausgerichtet ist. Eine stabile Rotationsachse ist nur bei einer momentenfreien Drehung um eine Figurenachse möglich. Unabhängig davon kann ein Kiesel, auf den Momente wirken, auch noch eine Präzessionsbewegung ausführen.

2.33.2 Präzession

Präzession ist allgemein die Lageveränderung der Achse eines rotierenden Kreisels, wenn äußere Kräfte auf ihn einwirken. Im Speziellen ist damit die Präzession der Erdachse gemeint. Die Präzession lässt sich bei jedem Spielzeugkiesel beobachten. Steht die Drehachse des Kreisels genau senkrecht zur Erdoberfläche, wirkt kein Drehmoment auf ihn ein, da die Schwerkraft parallel zu dieser Drehachse ist. Deshalb bleibt die Achse senkrecht, es findet keine Präzession statt. Setzt man einen Kiesel schräg auf, würde er durch die Schwerkraft umkippen, wenn er nicht rotieren würde. Dieses Kippmoment (analog F_1) bewirkt bei einem rotierenden Kiesel, dass seine Drehachse aufgrund der Ausweichbewegung (durch F_2) eine Bewegung ausführt, die Präzession. Ist die Drehachse des Kreisels insbesondere parallel zur Erdoberfläche, und ist der Kiesel auf der Drehachse, jedoch nicht im Schwerpunkt gestützt, so rotiert die gesamte Anordnung um den Stützpunkt des Kreisels.

3 Wärme

3.1 Einheiten der Thermodynamik

1 Kg (Kilogramm) = 1000g = 1.000.000 mg

1 Pa (Pascal) = 0,001 hPa

1 Mol = $6,0221415(10) \cdot 10^{23}$ Teilchen

$1m^3 = 1.000.000cm^3 = 1.000.000.000mm^3$

1 J (Joule) = $1N \cdot 1m = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$

1 kJ (Kilojoule) = 1000 J

1 cal (Kalorie) = $4,1868 \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = 4,1868 J$

273 K (Kelvin) = $0^\circ C$ (Grad) bzw. $x K = x + 273^\circ C$

1 W (Watt) = $1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 1 \frac{J}{s}$

3.2 Größen der Thermodynamik

3.2.1 intensive Zustandsgrößen

Eine intensive Größe ist eine Zustandsgröße, die sich bei unterschiedlicher Größe des betrachteten Systems nicht ändert.

GRÖSSE	SYMBOL	EINHEIT
Temperatur	T	[K]
Druck	p	[Pa]

3.2.2 extensive Zustandsgrößen

Eine extensive Größe ist eine Zustandsgröße, die sich mit der Größe des betrachteten Systems ändert und ist somit das Gegenstück der intensiven Größe.

GRÖSSE	SYMBOL	EINHEIT
Masse	M	[kg]
Stoffmenge	n	[mol]
Volumen	V	[m^3]
Enthalpie	H	[$\frac{kJ}{mol}$]
Innere Energie	U	[$\frac{J}{kg}$]
Entropie	S	[$\frac{J}{K}$]

3.2.3 andere Größen, keine Zustandsgrößen

GRÖSSE	SYMBOL	EINHEIT
Arbeit	W	[J]
Wärme	Q	[J]

(Die Wärme ist die Energie, die man einer Stoffmenge zufügen muss, um sie auf eine bestimmte Temperatur zu bringen.)

3.3 Wichtige Konstanten der Thermodynamik

Boltzmann-Konstante: $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$
Avogadrozahl: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} mol^{-1}$

3.4 Die Hauptsätze der Thermodynamik

3.4.1 0.ter Hauptsatz

Wenn 2 Systeme sich im thermischen Gleichgewicht befinden, haben sie genau die gleiche Temperatur.

3.4.2 1.ter Hauptsatz (=Energieerhaltungssatz)

Es gilt: $dU = dQ + dW$. und $dW = -Fs = -pdV$

Hierbei ist dU die innere Energie des Systems, dQ die Wärme des Systems und dW die in das System gesteckte Arbeit.

Energie kann sich in einem abgeschlossenen System nicht ändern, sie kann weder aus dem Nichts erzeugt noch vernichtet werden.

Aus diesem Grund kann kein Perpetuum mobile erster Art existieren, das ohne Wärmeaustausch oder Änderung der inneren Energie Arbeit abgibt.

3.4.3 2.ter Hauptsatz

Es gibt eine Entropie s , eine Zustandsgröße, die in einem abgeschlossenen System nicht abnehmen kann. Es gilt: $ds \geq \frac{dQ}{T}$

T ist hierbei die Temperatur. Liegt die Entropieänderung über Null, so ist der abgelaufene Prozess irreversibel, ist sie gleich Null, so ist er reversibel.

Die Einheit der Entropie s ist $\frac{J}{K}$.

Wenn sich zwei Körper unterschiedlicher Temperatur berühren, fließt die Wärme vom wärmeren zum kälteren Körper.

Es gibt kein Perpetuum mobile 2ter Art, also keine Maschine, die Wärme aus kalter Umgebung entnehmen kann, um in warmer Umgebung Arbeit zu verrichten.

3.4.4 3.ter Hauptsatz (=Nernst-Theorem)

Es ist unmöglich, ein System auf die Temperatur von 0 K abzukühlen.

3.5 Temperatur

Temperatur ist der Bewegungszustand der Teilchen innerhalb eines Stoffes.

Die Atome und Moleküle in einem festen Stoff sind nicht in Ruhe, sondern schwingen um ihre jeweilige Ruhelage.

Je größer die mittlere Bewegungsenergie dieser Teilchen, d.h. je größer ihr Bewegungszustand um so höher ist die Temperatur des Stoffes. Temperatur ist also nicht gleichzusetzen mit dem Begriff Wärme.

Temperatur hat deshalb auch ein anderes Formelzeichen und eine andere Maßeinheit als Wärme.

Unter Wärme versteht man nämlich eine Zustandsänderung des Stoffes, während die Temperatur den Zustand beschreibt.

3.6 Physikalische Definition der Temperatur

Die Temperatur ist damit ein Maß für den durchschnittlichen ungerichteten, also zufälligen, Bewegungsenergieanteil (kinetische Energie) einer Ansammlung von Teilchen.

Die Teilchen sind hierbei die Luftmoleküle bzw. die Moleküle oder Atome eines Gases, einer Flüssigkeit oder eines Festkörpers.

In der statistischen Mechanik steht die Temperatur mit der Energie pro Freiheitsgrad in Zusammenhang.

Im idealen Gas aus einatomigen Molekülen sind das drei Translationsfreiheitsgrade pro Molekül und bei mehratomigen Gasen können weitere Rotationsfreiheitsgrade hinzu kommen.

3.7 Reibungskraft

Die Reibung hängt vom Gewicht des Körpers und der Rauheit der Oberfläche ab.

Sie ist bei gleichbleibendem Untergrund aber unabhängig von der Größe der Reibungsfläche.

Durch Reibung wird ein Teil der Arbeit in Wärmeenergie umgesetzt. Alle Prozesse, bei denen Arbeit über Reibung in Wärme umgewandelt wird, sind irreversibel.

3.8 Methoden zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents

Zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents wurde im Rahmen des Physikpraktikums die Umwandlung von Arbeit in Wärmeenergie benutzt. Dazu muss die Arbeit [W] durch die Wärme [Q] dividiert werden. Das mechanische Wärmeäquivalent muss im Normalfall 1 betragen. Es gilt also: $\frac{W}{Q} = 1$

3.9 Gasgesetze/Gasgleichungen

3.9.1 Allgemeine kinetische Gastheorie

Die wichtigsten Aussagen der Theorie sind:

1. Die Teilchen eines Gases (Atome, Moleküle) sind ständig in ungeordneter, nur statistisch fassbarer Bewegung.
2. Zwischen ihren Zusammenstößen bewegen sie sich gleichförmig und unabhängig voneinander, ohne Bevorzugung einer Richtung.
3. Die Teilchen üben keine Kräfte aufeinander aus, solange sie sich nicht berühren.
4. Zusammenstöße der Teilchen und mit der Gefäßwand gehorchen dem Gesetz des elastischen Stoßes und verursachen den Gasdruck.

Obige Aspekte beschreiben das so genannte ideale Gas.

3.9.2 Ideale Gasgleichung

Allgemeines Unter einem idealen Gas versteht man sich kräftefrei bewegende Atome, die sich bei Berührung elastisch abstoßen.

Das Eigenvolumen eines solchen Gases ist vernachlässigbar.

Die ideale Gasgleichung lautet $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$.

n ist die Stoffmenge in mol, sie wird ermittelt aus dem Quotienten der Teilchenzahl pro mol des Stoffes N und der Avogadrozahl N_A : $n = \frac{N}{N_A}$. Die universelle Gaskonstante R lässt sich aus der Boltzmann-Konstanten K_b und der Avogadrozahl N_A zusammensetzen.

Sie lautet $R = 8,314472 \frac{J}{mol \cdot K}$.

Die ideale Gasgleichung stellt den Grenzfall aller thermischen Zustandsgleichungen für verschwindende Dichte $\rho \rightarrow 0$ dar, das heißt für verschwindenden Druck bei genügend hoher Temperatur.

Sie ist für viele Gase wie zum Beispiel wasserdampfgesättigte Luft auch bei Normalbedingungen eine gute Näherung.

Aus der Idealen Gasgleichung folgt, dass die Innere Energie eines Idealen Gases unabhängig von Druck und Volumen ist und nur von der Temperatur abhängt. Sie besteht nur aus der kinetischen Energie der Wärmebewegung der Moleküle.

Molvolumen Das Molvolumen ist das Volumen von einem Mol eines idealen Gases (unter Standard-Druck und Temperatur).

Avogadro formulierte: Gleiche Volumina aller Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleich viele kleinste Teilchen.

Bei einer Temperatur von 20°C entspricht 1 Mol Luft 22,4 Litern, d.h. in 22,4 Litern Luft sind N_A Teilchen enthalten.

N_A , die Avogadrozahl, ist definiert mit $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$

pV-Diagramm Es existieren verschiedene Zustandsgrößen idealer Gase, die in Abb. 1 aufgezeigt werden.

Bei der isochoren Zustandsänderung ist $dV=0$ bzw. $dW=0$ und die zugeführte Wärme dQ geht völlig in die innere Energie dU über: $dU = dQ$

Bei der adiabatischen Zustandsänderung ist $dQ=0$, es wird keine Wärme zugeführt oder abgeführt, die Arbeit geht vollständig in die innere Energie über: $dU = -pdV$. Auch gilt: $p \cdot V^{\gamma} = \text{const.}$ (γ ist der Adiabatenindex.)

Bei der isothermen Zustandsänderung ist $dU=0$, die Temperatur bleibt konstant und die zugeführte Wärme wird vollständig in Arbeit umgesetzt: $dQ = pdV$. Es gilt auch: $p \cdot V = \text{const.}$

bei der isobaren Zustandsänderung ist $p = \text{const.}$, sie liegt immer vor, wenn bei konstantem Luftdruck gearbeitet wird.

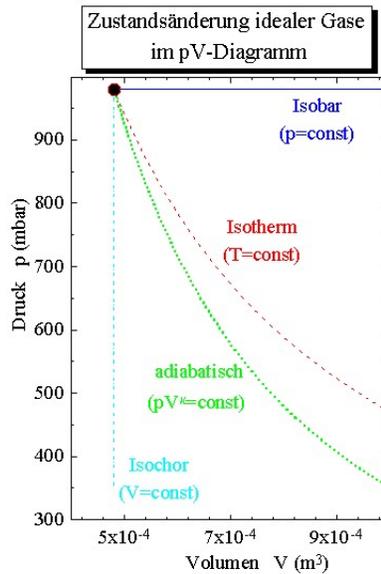


Abbildung 1: p-V-Diagramm

Gesetz von Gay-Lussac Das Gesetz von Gay-Lussac besagt, dass das Volumen idealer Gase bei gleich bleibendem Druck und gleich bleibender Stoffmenge direkt proportional zur Temperatur ist.

Ein Gas dehnt sich also bei einer Erwärmung aus und zieht sich bei einer Abkühlung zusammen.

Für $p = \text{const}$ und $n = \text{const}$ gilt:

$$T \sim V \qquad \frac{V}{T} = \text{const} \qquad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Gesetz von Amontos Das Gesetz von Amontos sagt aus, dass der Druck idealer Gase bei gleichbleibendem Volumen und gleichbleibender Stoffmenge direkt proportional zur Temperatur ist.

Bei einer Erwärmung erhöht sich also der Druck und bei einer Abkühlung wird er geringer.

Für $V = \text{const}$ und $n = \text{const}$ gilt:

$$p \sim T \qquad \frac{p}{T} = \text{const} \qquad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

3.9.3 Reale Gasgleichung

Die reale Gasgleichung, die die wesentlichen Probleme der idealen Gasgleichung korrigiert, lautet:

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

Sie wird auch Van der Waals Gleichung genannt. Die Konstante a beschreibt hierbei die innere Druckerhöhung (Reduktion des nach außen gerichteten Drucks) durch die zusätzliche kinetische Energie im anziehenden Potential (Kohäsion). Die Konstante b beschreibt die Reduktion des freien Volumens durch die endliche Ausdehnung der Moleküle.

3.10 Carnot'scher Kreisprozess

Wärmekraftmaschinen arbeiten für gewöhnlich auf der Basis eines Kreisprozesses. Klassisch ist der Carnotprozess für Kolbenmaschinen. Der Einfachheit wegen beschränkt man sich für gewöhnlich anfangs auf eine Einzylindermaschine.

Die Idee des Kreisprozesses ist einfach. Beginnend von einem Ausgangspunkt finden mehrere Zustandsübergänge des Gases statt, bis der Ausgangspunkt wieder erreicht ist.

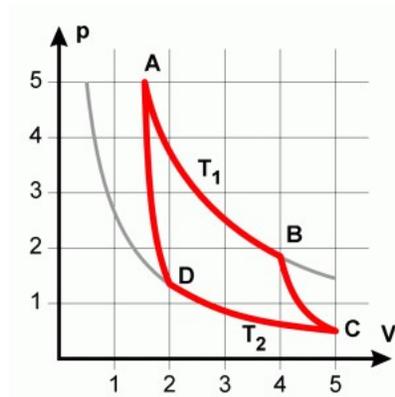


Abbildung 2: Der Carnotprozess

- A Ausgangspunkt des Kreisprozesses
- A-B Isotherme Expansion des Gases
- B-C Adiabatischer Übergang
- C-D Isotherme Kompression
- D-A Adiabatische Kompression

Da bei einem Durchlauf die Temperatur wieder die Anfangstemperatur ist, hat sich die innere Energie des Gases nicht verändert, die aufgenommene Wärme muss deshalb als Arbeit abgegeben worden sein: $\Delta W = \Delta Q$.

Wenn man den Carnot-Prozess als Wärmekraftmaschine betrachtet, da er Arbeit in Wärme umsetzt, beschreibt der Wirkungsgrad η das Verhältnis von abgegebener Arbeit zu aufgenommener Wärme: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$. Der Carnotprozess ist ein idealisierter Prozess, er hat den größtmöglichen Wirkungsgrad.

Deshalb gibt es keine zyklisch arbeitende Maschine, die Wärme vollständig in Arbeit umsetzen kann.

Entscheidend für die Energieausbeute im Sinne der nutzbaren Abgabeleistung, ist die Fläche, die von den begrenzenden Zustandsübergängen umschlossen wird.

Der Umlaufsinn ist ebenfalls wichtig, denn von ihm hängt ab, ob die Fläche positiv oder negativ bewertet wird. Anders ausgedrückt, ob die Maschine Arbeit leistet, oder Arbeit hineingesteckt werden muß. Die Umkehrung des Prozesses ist auf diese Weise auch möglich. In dem Fall wird mechanische Arbeit in Wärme umgewandelt.

Je nach Richtung wird eine nach dem Carnot-Prozess arbeitende Maschine als Wärmepumpe oder Kältemaschine betrachtet.

3.11 Wärmetransport/Diffusion

Der Wärmeaustausch zwischen 2 Körpern kann über 3 verschiedene Prozesse erfolgen:

3.11.1 Konvektion

Konvektion ist eine Komponente der Wärmeübertragung, bei der die Wärme in ein oder aus einem Fluid übertragen wird, indem das Fluid die Oberfläche eines anderen Volumens überströmt und dabei eine Temperaturangleichung erfolgt. Ein Fluid ist ein Gas oder eine Flüssigkeit.

3.11.2 Wärmeleitung

Unter Wärmeleitung versteht man den Transport der Bewegungsenergie der Teilchen innerhalb eines Stoffes. d.h. die Fortpflanzung der Temperatur in einem Stoff.

Wird durch äußere Wärmeenergiezufuhr der Schwingungszustand der Teilchen erhöht, dann stoßen diese stärker mit ihren Nachbarteilchen zusammen und regen auch diese zu stärkeren Schwingungen an. Die Fortpflanzung der Temperatur kommt also durch Stöße der Teilchen untereinander zustande. Wärme fließt dabei aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik von selbst immer nur in Richtung geringerer Temperatur.

Aufgrund des Energieerhaltungssatzes geht dabei keine Wärme verloren.

Die Wärmestromdichte j ist definiert durch den Zusammenhang: $j = \frac{dQ}{A \cdot dt}$, also die Wärme pro Fläche und Zeit.

Hier ist j die Wärmestromdichte, A die Fläche, durch die die Wärme geleitet wird.

Die Wärmeleitungsgleichung beschreibt die Zusammensetzung der Wärmestromdichte j : $j = \delta \frac{dT}{dx}$.

δ ist hier als eine Stoffkonstante, die Wärmeleitfähigkeit, zu verstehen. Sie liegt in der Einheit $[\frac{W}{K \cdot m}]$ vor.

3.11.3 Strahlung

Ein Körper mit der Temperatur T gibt Wärme über Strahlung ab. Hierbei gilt die Plank'sche Strahlungsformel: $U_\nu^o(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{d\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$

vereinfacht: $\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$.

c ist hierbei die Lichtgeschwindigkeit, h das Planck'sche Wirkungsquantum und ν die Frequenz.

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz besagt, dass das Intensitätsmaximum der thermischen Strahlung proportional zur Temperatur ist und beträgt:

$$\nu_{max} = 5,9 \cdot 10^{10} \frac{T}{sK}.$$

Die gesamt emittierte Strahlung ist proportional zur vierten Potenz der Temperatur $S \propto T^4$:

$$M = \sigma \cdot T^4 \text{ mit der Stefan Boltzmann-Konstante } \sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

3.11.4 Diffusion

Wie jeder aus der Biologie wissen sollte, versteht man unter Diffusion den Austausch von verschiedenen Teilchen in 2 Körpern/Flüssigkeiten.

Dieser Prozess ist sehr ähnlich zu den Wärmetransportmechanismen.

Der Konzentrationsgradient ist verantwortlich für den Teilchenfluss, da das System in den Zustand maximaler Entropie strebt.

Der Konzentrationsgradient ist die Verteilung der n Teilchen über die Fläche x : $\frac{dn}{dx}$.

Der Teilchenstrom j ist proportional zum Konzentrationsgradienten, die Proportionalitätskonstante ist der Diffusionskoeffizient:

$$j = -D \cdot \frac{dn}{dx}. \text{ Dieses Gesetz bezeichnet man als das 1. Fick'sche Gesetz.}$$

Das negative Vorzeichen bedeutet, dass der Fluss immer in die Richtung zum negativeren Gradienten hin erfolgt.

3.12 Clausius-Clapeyron'sche Differentialgleichung

Die Clausius-Clapeyron'sche Differentialgleichung lautet: $\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{(V_D - V_F) \cdot T}$.

Hierbei ist λ die zum Verdampfen eines Mols erforderliche Wärmemenge. (=Enthalpie)

V_D ist das Molvolumen des Dampfes und V_F der Flüssigkeit beim Druck p und der Temperatur T .

Mit ihr kann man den Dampfdruck einer Flüssigkeit in Abhängigkeit der Temperatur berechnen.

3.13 Thermoelement

Ein Thermoelement ist ein Bauteil aus zwei unterschiedlichen und miteinander verbundenen Metallen oder Halbleitern, das aufgrund des Seebeck-Effektes eine elektrische Spannung erzeugt, wenn die Verbindungsstellen unterschiedliche Temperaturen haben.

Der Seebeck-Effekt besagt, dass zwei unterschiedliche Metalle, die miteinander verbunden sind, an ihrer Anschlussstelle eine thermoelektrische Spannung entstehen lassen, wenn entlang der Metalle ein Temperaturgefälle besteht.

Diese thermoelektrische Spannung (auch Thermokraft genannt) ist temperaturabhängig und hat bei Metallen eine Größe von wenigen Mikrovolt pro Kelvin Temperaturunterschied.

3.14 Gasthermometer

Das Gasthermometer ist ein Ausdehnungsthermometer, bei dem die beobachtete Zustandsgröße das Volumen eines idealen Gases ist.

Das heißt die Temperaturmessung basiert auf einer Druckmessung.

Da für ein ideales Gas ein linearer Zusammenhang zwischen der Volumenänderung und der Temperatur besteht, entfällt die ansonsten notwendige Eichung aufgrund nicht-linearer Volumenänderung.

Jedoch muss eine Zweipunkteichung nach wie vor durchgeführt werden.

Während der Messung muss entweder der Druck oder das Volumen konstant gehalten werden.

3.15 Äquipartitionsgesetz/Gleichverteilungssatz

Nach dem Äquipartitionsgesetz trägt jeder der drei Gitterschwingungsfreiheitsgeraden jeden Teilchens bei der Temperatur T im Mittel die kinetische Energie $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot k_B \cdot T$.

3.16 Adiabatenindex

Der Verhältnis zwischen der isobaren c_p (spezifischen Wärme der Luft bei konstantem Druck) zur isochoren Wärmeänderung c_v (spezifischen Wärme der Luft bei konstantem Volumen) eines Stoffes heißt Adiabatenexponent/Adiabatenindex:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{f}{2}.$$

Bei einem Einatomigen Gas gilt $f=3$ und $\gamma=1,66$.

Da Luft hauptsächlich aus biatomaren Gasen besteht, kommen zu den drei Freiheitsgeraden der Translation zwei weitere hinzu (Rotation um die Achsen, senkrecht zur Hauptträgheitsachse), also $f=5$.

Deshalb gilt bei Luft $\gamma = 1,4$ als zu erwartender Adiabatenindex.

3.17 Wärmekapazität

Die Wärmekapazität bezeichnet das Vermögen eines Körpers, Energie in Form von thermischer Energie zu speichern. Sie wird im Allgemeinen durch das Formelzeichen C dargestellt.

Per definitionem gibt C die Wärmemenge Q (in Joule) an, die einem Körper zugeführt werden muss, um einen Anstieg der Temperatur T (in Kelvin) zu erreichen.

Die Formel hierfür lautet also: $C = \frac{\delta Q}{dT}$

3.17.1 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität oder kurz spezifische Wärme eines Stoffes ist eine seiner physikalischen Eigenschaften und bezeichnet dessen auf die Masse bezogene Wärmekapazität.

Sie gibt also an, welche Energie man einem Kilogramm eines Stoffes zuführen muss, um seine Temperatur um ein Kelvin zu erhöhen.

3.17.2 Atomwärme/Molwärme

Die Atomwärme ist die atomare Wärmekapazität d.h. die Wärmemenge, die notwendig ist, um 1 Mol eines Elements um $1^\circ C$ zu erwärmen.

Parallel dazu steht die Molwärme, die molare Wärmekapazität (die Wärmemenge die notwendig ist, um 1 Mol eines Elements um 1° zu erwärmen).

Dulong-Petit-Gesetz Das Dulong-Petit-Gesetz besagt, dass die molare Wärmekapazität eines aus einzelnen Atomen zusammengesetzten Festkörpers einen universalen und konstanten Wert habe, nämlich das Dreifache der universellen Gaskonstante R :

$$C_{mol} = 3 \cdot N_A k_B = 24,9 \frac{J}{mol \cdot K}.$$

Ein Mol solcher Teilchen trägt auch eine innere Energie von: $U = 3RT$

3.17.3 Schmelzwärme

Schmelzwärme bezeichnet die Energie, die benötigt wird, um eine Stoffprobe von dem festen in den flüssigen Aggregatzustand zu überführen.

Dabei werden Bindungskräfte zwischen Molekülen bzw. Atomen überwunden, ohne deren kinetische Energie und damit ihre Temperatur zu erhöhen.

Bei Wasser (H_2O) beträgt die Schmelzwärme $334 \frac{kJ}{kg}$

Die Formel zur Berechnung der Schmelzwärme lautet $Q = m \cdot q$.

Hierbei ist q die stoffspezifische Schmelzwärme, sie liegt in der Einheit $\frac{J}{g}$ vor.

3.17.4 Verdampfungswärme

Die Verdampfungswärme ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um eine bestimmte Menge einer Flüssigkeit vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzu-

stand zu bringen. Bei Wasser (H_2O) beträgt die Verdampfungswärme $2088 \frac{kJ}{kg}$. Die Abtrennarbeit ist für Wasser wegen der Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wassermolekülen relativ hoch. Die Formel zur Berechnung der Schmelzwärme lautet $Q = m \cdot r$. Hierbei ist r die stoffspezifische Verdampfungswärme, sie liegt wie die Schmelzwärme der Einheit $\frac{J}{g}$ vor.

3.18 Tripelpunkt

Der Tripelpunkt (auch Dreiphasenpunkt) ist der Punkt, beschrieben durch Druck und Temperatur, an dem drei Phasen eines Systems mit genau einer Komponente im Gleichgewicht sind.

Er kann in einem Dampfdruckdiagramm, einer Form der Phasendiagramme, gut dargestellt werden.

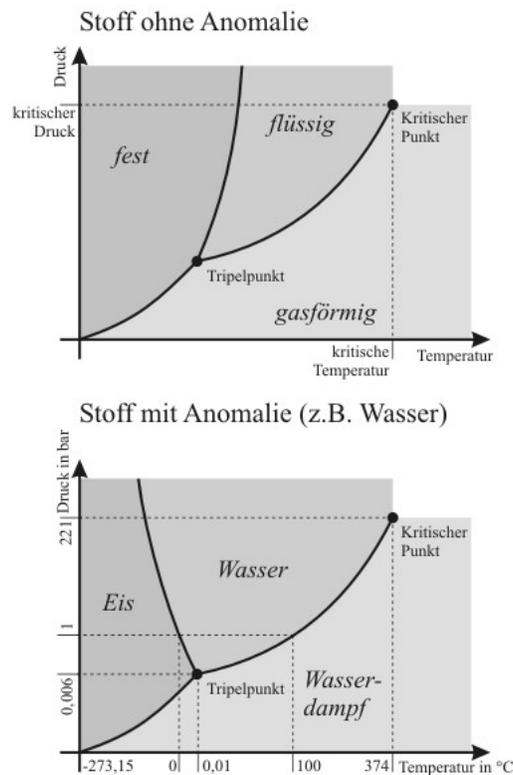


Abbildung 3: Dampfdruckdiagramm

3.19 kalorische Begriffe

3.19.1 Temperaturgradient

Als Temperaturgradienten bezeichnet man einen räumlichen Temperaturunterschied, der durch einen mathematischen Gradienten beschrieben wird.

Der Temperaturgradient ist üblicherweise in alle drei Raumrichtungen ausgeprägt und gibt daher den Temperaturunterschied in x-, y-, und z-Richtung an. Für spezielle Anwendungen ist jedoch auch nur ein zwei- oder gar eindimensionaler Temperaturgradient von Belang, wobei sich dieser auch wesentlich einfacher auf mathematischem Wege beschreiben lässt.

3.20 Aufbau von Festkörpern

Der Zusammenhalt eines Festkörpers beruht auf attraktiven Wechselwirkungen zwischen den Atomen bzw. Molekülen auf großen Distanzen und einer repulsiven auf kurzen.

Den energetisch günstigsten Abstand nennt man Gleichgewichtsabstand.

Ist die thermische Energie der Atome zu niedrig um dieser Potenzialfalle zu entkommen, so bilden sich starre Anordnungen aus die Atome sind aneinander gebunden.

Es gibt im wesentlichen vier Bindungsarten, welche den Aufbau und die Eigenschaften eines Festkörpers maßgeblich beeinflussen: Ionenbindung, Kovalente Bindung, Metallbindung und die Vand-der-Waals-Bindung.

Die Metallbindung ist ein Extremfall der kovalenten Bindung. Auch diese Bindung ist durch eine Absenkung der elektronischen Energie bedingt. Nur ist hier der Überlapp der Orbitale der Atome so groß, dass diese auch noch mit denen seinen übernächsten (oder noch mehr) Nachbarn wechselwirken.

Man kann es sich so vorstellen, dass die Ionenrümpfe der Atome in einen Elektronensee eingebettet sind.

Wie der Name bereits andeutet, bilden Metalle diese Bindung aus.

3.21 Thermische Ausdehnung

Unter Thermischer Ausdehnung versteht man die Längen- bzw. Volumenänderung eines Körpers, hervorgerufen durch eine Veränderung seiner Temperatur. Der Begriff Temperatur stellt die mittlere Bewegungsenergie der Teilchen eines Stoffes dar.

Wird die Temperatur eines Stoffes erhöht ,dann nimmt auch der Bewegungszustand der Teilchen zu.

Hierdurch wird der Platzbedarf der schwingenden Teilchen erhöht, d.h. der Stoff dehnt sich aus.

Diese Wärmeausdehnung ist reversibel, d.h. ein Stoff dehnt sich aus bei Erwärmung und schwindet bei Abkühlung.

3.21.1 lineare Wärmeausdehnung

Ein Draht der Länge L wird bei Erhitzung um das Stück ΔL größer. Die Verlängerung durch die Erhitzung hängt von der Ausgangslänge, einem stoffspezifischen Faktor sowie der Temperatur ab.

Also gilt folgende Formel: $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$

α ist der Wärmeausdehnungskoeffizient, er besagt, um wieviel sich ein Stoff eines Meters Länge verändert, wenn man die Temperatur um 1 K erhöht.

3.21.2 kubische Wärmeausdehnung

Ein räumlicher Körper dehnt sich bei Erwärmung nicht nur in einer Richtung sondern nach allen Seiten aus.d.h. ein Körper mit dem Volumen V_0 wird bei Erwärmung um ΔV größer. Der kubische Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht dem dreifachen linearen Koeffizienten, deshalb lautet die Formel:

$$\Delta V = 3 \cdot \alpha \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

Eine Ausnahme ist Wasser (Anomalie des Wassers). Bei Wasser nimmt das Volumen mit steigender Temperatur nicht kontinuierlich zu.

Es hat sein kleinstes Volumen bei 4C und bei dieser Temperatur seine größte Dichte, nämlich $1 \frac{g}{cm^3}$.

3.22 Thermospannung

Unter Thermospannung versteht man die Umsetzung und gegenseitige Beeinflussung von Temperatur und Elektrizität. Seebeck-Effekt, Peltier-Effekt und Thomson-Effekt beschreiben jeweils eine reversible Wechselwirkung zwischen den beiden physikalischen Größen.

3.22.1 Seebeck-Effekt

Der Seebeck-Effekt ist die Umsetzung einer Temperaturdifferenz in einen elektrischen Strom.

Thomas Johann Seebeck entdeckte, dass zwischen zwei Enden einer Metallstange eine elektrische Spannung entsteht, wenn in der Stange ein Temperaturunterschied herrscht. Nach dem Verbinden beider Enden fließt ein elektrischer Strom, dessen Magnetfeld er mit einer Kompassnadel nachwies.

3.22.2 Peltier-Effekt

Der Peltier-Effekt ist die Umkehrung des Seebeck-Effekts; das Erzeugen einer Temperaturdifferenz durch einen elektrischen Strom. Er tritt auf, wenn zwei unterschiedliche Metalle (oder Halbleiter) an zwei Stellen miteinander verbunden und von elektrischem Strom durchflossen werden.

Der Strom verursacht in Abhängigkeit von seiner Stärke und Richtung einen Wärmetransport von einer Verbindungsstelle zur anderen. Diese Entdeckung machte Jean Peltier 1834 dreizehn Jahre nach Seebeck.

3.22.3 Thomson-Effekt

Der Thomson-Effekt, benannt nach William Thomson, 1. Baron Kelvin 1856, beschreibt das Erwärmen oder Abkühlen eines Leiters mittels eines Temperaturgradienten. Jeder stromdurchflossene Leiter mit einer Temperaturdifferenz zwischen zwei Punkten wird, abhängig vom Metall, entweder Wärme aufnehmen oder Wärme abgeben.

Dieser Effekt überlagert sich mit der größeren normalen Erwärmung eines elektrischen Leiters durch den Strom auf Grund seines Widerstandes.

3.23 Barometrische Höhenformel

Die barometrische Höhenformel beschreibt die vertikale Verteilung der (Gas-)Teilchen in der Atmosphäre der Erde, also die Änderung des Luftdruckes mit der Höhe.

Man spricht daher auch von einem vertikalen Druck-Gradienten, der jedoch aufgrund der hohen Wetterdynamik innerhalb der unteren Atmosphäre nur mit Näherungen auf mathematischem Wege beschrieben werden kann.

Die klassische barometrische Höhenformel gilt für den Spezialfall, dass die Temperatur T in jeder Höhe gleich, die Atmosphäre also isotherm ist.

$$p(h_1) = p(h_0)e^{-\frac{Mg\Delta h}{RT}}$$

Hierbei ist P der Druck in der erwünschten Höhe h_1 und in der Ausgangshöhe h_0 , M die mittlere molare Masse der Atmosphärgase ($M = 0,02896 \text{ kg mol}^{-1}$), g die Schwerebeschleunigung ($g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$), R die Gaskonstante ($R = 8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) und T die absolute Temperatur. Δh ist die Höhendifferenz. Diese Formel gilt nicht nur für den Druck p sondern auch für die Dichte ρ .

3.24 Boltzmann-Faktor

Befinden sich viele Teilchen bei der Temperatur T im thermischen Gleichgewicht, so ist die Wahrscheinlichkeit, $W(E)$ ein Teilchen mit der Energie E anzutreffen, proportional zum Boltzmann-Faktor.

$$W(E) \propto e^{-\frac{E}{k_B T}}$$

Man verwendet den Boltzmann-Faktor in der Barometrischen Höhenformel, um folgenden Zustand zu beschreiben: Die potenzielle Energie eines Luftmolekül mit Masse m in der Höhe h ist mgh .

Die Wahrscheinlichkeit es in dieser Höhe anzutreffen ist proportional zu

$$W(h) \propto e^{-\frac{mgh}{k_B T}}$$

3.25 Strahlungsgesetze

3.25.1 Schwarzer Strahler

Ein Schwarzer Strahler nimmt auftreffende elektromagnetische Strahlung, etwa Licht, vollständig auf (Absorption). Er lässt weder Strahlung durch sich hindurch (Transmission), noch spiegelt oder streut er sie zurück (Reflexion). In der

Realität können diese idealen Eigenschaften nur angenähert auftreten. Aufgrund seiner thermischen Energie (Temperatur) gibt der Schwarze Strahler Strahlung einer bestimmten Intensität und spektralen Verteilung ab (Emission). Die Herstellung eines guten Schwarzen Körpers ist schwierig, da sein Absorptionsgrad für alle Frequenzen möglichst ideal sein müsste. Eine berußte Oberfläche (Absorptionsgrad ca. 0,96) genügt für einfache Zwecke, kann höhere Ansprüche aber nicht erfüllen. Da in der Regel nur die Absorptions- und Emissionseigenschaften der Strahlungsquelle von Belang sind, kann jedoch anstelle eines physisch vorhandenen Körpers die Öffnung eines Hohlraumstrahlers verwendet werden, mit der sich die gewünschten Eigenschaften leichter realisieren lassen.

3.25.2 Plancksche Strahlungsformel

Die Planck'sche Strahlungsformel lautet: $U_\nu^o(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{d\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$

c ist hierbei die Lichtgeschwindigkeit, h das Planck'sche Wirkungsquantum und ν die Frequenz.

Diese Variablen gelten auch für die nachfolgenden Gesetze.

3.25.3 Rayleigh-jeans'sches Gesetz

Das Rayleigh-jeans'sches Gesetz gilt für den Grenzfall $h\nu \gg kT$:

$$U_\nu^{RJ}(\nu, T)d\nu = \frac{8\pi kT\nu^2 d\nu}{c^3}$$

3.25.4 Wiensches Gesetz

Das Wiensche Gesetz gilt für den Grenzfall $h\nu \ll kT$:

$$U(\nu) = 8\pi \frac{\nu^3}{c^3} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

3.25.5 Stefan-Boltzmann Gesetz

Jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, sendet Wärmestrahlung aus.

Ein Schwarzer Körper ist ein idealisierter Körper, der alle auf ihn treffende Strahlung vollständig absorbieren kann (Absorptionsgrad = 1).

Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz erreicht daher auch sein Emissionsgrad den Wert 1 und er sendet die bei der betreffenden Temperatur maximal mögliche thermische Leistung aus.

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz sagt aus, dass die Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur ist.

Es gilt also: $S \propto T^4$.

Hierbei ist S die Strahlungsleistung des Körpers.

4 Optik

4.1 Grundbegriffe der Optik

4.1.1 Frequenz

Für die Frequenz gilt: $f = \frac{v}{\lambda}$, wobei v die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im jeweiligen Medium und λ die Wellenlänge ist.

4.1.2 Wellenlänge

Als Wellenlänge, Symbol λ , wird der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle bezeichnet. Dabei haben zwei Punkte die gleiche Phase, wenn sie sich in gleicher Weise begegnen, d.h. wenn sie im zeitlichen Ablauf die gleiche Auslenkung (Amplitude) und die gleiche Bewegungsrichtung haben. Es gilt $\lambda = \frac{c}{f}$ wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit oder die Phasengeschwindigkeit und f die Frequenz der Welle ist.

4.1.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit

$c = \frac{c_0}{n}$, c_0 = Geschwindigkeit von Licht im Vakuum (Lichtgeschwindigkeit) = 300.000 km/s. n = Faktor der Phasengeschwindigkeit

4.1.4 Brechzahl/Brechungsindex

Die Brechzahl (oft auch als Brechungsindex bezeichnet) ist eine physikalische Größe in der Optik. Sie kennzeichnet die Brechung einer elektromagnetischen Welle beim Übergang zwischen zwei Medien und ist das Verhältnis zwischen der Phasengeschwindigkeit des Lichtes c_0 im Vakuum und seiner Phasengeschwindigkeit c im jeweiligen Medium: $n = \frac{c_0}{c}$

4.1.5 Dispersion

Unter Dispersion versteht man in der Physik die Abhängigkeit einer Größe von der Wellenlänge. Es ist die Abhängigkeit der Brechzahl n von der Wellenlänge λ in Medien. Dispersion als Ableitung ausgedrückt ist: $dn(\lambda)/d\lambda$.

4.2 Fresnel'sche Formeln

Die Fresnelschen Formeln (nach Augustin Jean Fresnel) beschäftigen sich mit dem Reflexionsgrad bzw. Transmissionsgrad von Licht an einer dielektrischen Grenzfläche, also z. B. an der Oberfläche einer Linse oder an einer Wasseroberfläche. Es gilt für den Reflexionsgrad (reflektierter Anteil der Strahlungsintensität):

$$R_s = \left[\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta} \right]^2$$

und $R_p = \left[\frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right]^2 = \left[\frac{n_2 \cos \alpha - n_1 \cos \beta}{n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta} \right]^2$

R_s = Reflexionsgrad bei senkrecht zur Einfallsebene polarisiertem Licht
 R_p = Reflexionsgrad bei parallel zur Einfallsebene polarisiertem Licht
 α = Einfallswinkel
 β = Transmissionswinkel (kann nach dem Brechungsgesetz von Snellius berechnet werden)
 n_1 = Brechzahl des Mediums 1
 n_2 = Brechzahl des Mediums 2

4.3 Gangunterschied

Der Gangunterschied ist die Wegdifferenz (Wegunterschied) zweier oder mehrerer kohärenter Wellen gleicher Wellenlänge. Die Wegdifferenz ist entscheidend für das Auftreten von Interferenzerscheinungen.

Der Gangunterschied wird auch als Phasendifferenz bezeichnet

4.4 Lichtinterferenz

Wellen können sich überlagern. Falls sie die (annähernd) gleiche Frequenz und Wellenlängen haben, entsteht dabei eine neue Welle, die je nach Phasenbeziehung der sich überlagernden Wellen verstärkt oder abgeschwächt ist, im Vergleich zu den ursprünglichen Wellen. Dieses Phänomen nennt man Interferenz; die Verstärkung (die auftritt, wenn die Phasenverschiebung einer ganzen Wellenlänge entspricht, d.h. $\Delta\varphi = \lambda * n, n = 0, 1, 2, \dots$) heißt konstruktive Interferenz, die Auslöschung (die auftritt, wenn $\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots$, d.h. einer halben Wellenlänge entspricht) heißt destruktive Interferenz.

4.4.1 Kohärenz

Damit Lichtquellen Interferenzerscheinungen hervorrufen können, müssen sie kohärent sein. Kohärenz ist die Fähigkeit unterschiedlicher Wellen, stationäre Interferenzerscheinungen hervorzurufen. Zwei oder mehrere Wellen sind genau dann kohärent, wenn sie zeitlich unveränderliche Interferenzerscheinungen erzeugen können. Notwendige Voraussetzung für die Kohärenz zweier Wellen ist, dass sie einen zeitlich konstanten Gangunterschied aufweisen.

zeitliche Kohärenz Unter zeitlicher Kohärenz versteht man die Fähigkeit einer Lichtquelle, an einem festen Ort, mit Licht, das zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten die Lichtquelle verlassen hat, noch stationäre Interferenzerscheinungen hervorzurufen. Reale Lichtquellen emittieren keine unendlichen langen sinusförmigen Wellenzüge sondern sehr viele sehr kurze Wellenzüge. Daher besteht in der Regel (Ausnahme siehe Laser) nur dann eine feste Phasenbeziehung zwischen Licht, das zu zwei verschiedenen Zeitpunkten die Lichtquelle verlassen hat, wenn die Zeitdifferenz zwischen ihnen relativ klein ist.

räumliche Kohärenz Unter räumlicher Kohärenz versteht man die Fähigkeit einer Lichtquelle, an zwei verschiedenen Orten, aber zum jeweils gleichen Zeitpunkt stationäre Interferenzerscheinungen hervorzurufen.

Kohärenzlänge Die Kohärenzlänge ist der maximale Gangunterschied, bei dem die Wellenzüge am Punkt des Aufeinandertreffens noch miteinander interferieren.

Kohärenzzeit Die von derselben Lichtquelle ausgesandten Wellenzüge legen ihre jeweilige Wegestrecke in unterschiedlichen Laufzeiten zurück. Der maximale Laufzeitunterschied, bei dem die Wellenzüge am Punkt des Aufeinandertreffens noch miteinander interferieren, wird Kohärenzzeit genannt.

4.4.2 Interferenzfilter

Ein Interferenzfilter ist eine Anordnung von mehreren dünnen Schichten bestimmter Eigenschaften auf einer Trägerschicht. Tritt ein Lichtstrahl durch den Filter, so interferieren die an den Grenzflächen der Schichten reflektierten (R1, R2) und transmittierten (T1, T2) Strahlanteile sodass es zur Auslöschung (destruktive Interferenz) und Verstärkung (konstruktive Interferenz) Strahlen bestimmter Wellenlängen am Ausgang des Filters kommt. Auslöschung und Verstärkung bestimmter Wellenlängen sind abhängig von den gewählten Schichtdicken (l) des Filters und des Einfallswinkels (θ) der Strahlen.

4.5 Das Kirchhoff'sche Beugungsintegral

Das Beugungsintegral ermöglicht es in der Optik die Beugung von Licht durch eine beliebig geformte Blende zu berechnen. Speziell wird dabei, ausgehend von einer einfallenden Elementarwelle und der Blendenfunktion, die die Lichtdurchlässigkeit der Blende beschreibt, die an einem Punkt des Beobachtungsschirms auftreffende Intensität des Lichtes berechnet.

$$\psi_P = \frac{a_Q k_0}{2\pi i} \int_{Blende} dS f_S \frac{e^{i k_0(d+d_1)}}{d \cdot d_1} \left[\frac{\cos \theta + \cos \theta'}{2} \right]$$
 Zwei Grenzfälle des Beugungsintegrals sind die Näherungen für das Fernfeld (Fraunhofer-Beugung) und für das Nahfeld (Fresnel-Beugung).

4.5.1 Fraunhofer-Beugung

Die Fraunhofer-Beugung wird auch Fernfeldnäherung genannt, das heißt dass sowohl die Blendenöffnung als klein, wie auch die Entfernung des Beobachtungsschirms als groß angenommen werden. Hier befindet sich die Lichtquelle im Brennpunkt einer konvexen Linse und damit für den Betrachter im Unendlichen. Durch die Einfügung des Bildes in den Brennpunkt einer zweiten Linse wird auch der Aufpunkt ins Unendliche verlagert. Also kommen nur Strahlen zur Wirkung, die mit gleichem Beugungswinkel vom geradlinigen Verlauf abgelenkt sind, es wird mit parallelem Licht gearbeitet.

4.5.2 Fresnel-Beugung

Bei der Fresnel-Beugung, die auch Nahfeldnäherung genannt wird, werden die Strahlen in verschiedenen Winkeln abgelenkt, es wird mit divergentem Licht gearbeitet.

4.6 Lichtstrahlenbeugung

Lassen wir Wellen auf ein Hindernis fallen, welches einen Teil der Wellenfront durch Absorption oder Reflexion am Weiterlaufen hindert, den Rest aber durchlässt, so erscheint am Rande des durchgelassenen Strahls die sogenannte Beugung: die Wellen laufen nicht nur geradeaus, sondern werden seitlich zu den Rändern des Hindernis abgelenkt.

4.6.1 Huygen'sches Prinzip

Dies kann man sich durch die Huygens'sche Konstruktion klarmachen: demnach stellt jeder Punkt einer Wellenfront (eigentlich reichen Punkte, die jeweils um $1/2$ voneinander entfernt sind) den Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle dar. Die Elementarwellen breiten sich kreis- oder kugelförmig aus, sie heben sich durch Interferenz in allen Richtungen auf, bis auf die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung. Dort bildet die Einhüllende der Elementarwellen die neue Wellenfront. Wenn die Welle ein Hindernis trifft, werden einige Elementarwellen ausgeschaltet, die verbleibende Welle ist an den Rändern gekrümmt:

4.6.2 Beugung am Einzelspalt

Eine Welle passiert einen Spalt, der so breit ist, daß viele Elementarwellen durchgelassen werden. Diese Teilwellen interferieren miteinander und erzeugen in der Bildelebene ein Beugungsmuster mit einem breiten zentralen Maximum und schwächeren Nebenmaxima. Die Amplitudenverteilung auf dem Bildschirm hat die Form $\frac{\sin \Delta\phi/2}{\Delta\phi}$, wo $\Delta\phi$ die gesamte Phasenverschiebung (über die gesamte Spaltbreite) angibt. Diese Funktion, die Spaltbeugungsfunktion, kann als Fouriertransformierte der räumlichen Form des Spaltes hergeleitet werden; das Beugungsbild ist die Fouriertransformierte des beugenden Objektes und umgekehrt. Sie kann auch 'zu Fuß' durch Summation über alle Teilwellen (s. Bild) bzw. durch Integration über die Spaltbreite erhalten werden. Der Winkel, bei dem das erste Minimum auftritt, ist gegeben durch: $\sin \alpha_{Min} = \frac{n*\lambda}{D}$, ($n = 1$) wobei D die Spaltbreite angibt. Die resultierende Amplitude des zentralen Maximums lautet $A_{max} = N * A_0$, wobei N die Anzahl der Quellen und A_0 die Amplitude der Wellen ist.

4.6.3 Beugung am Doppelspalt

Eine Welle passiert zwei Spalte, die im Abstand d zueinander stehen und jeweils so schmal sind (Spaltbreite $D < \frac{\lambda}{2}$), daß nur eine Elementarwelle von

jedem Spalt ausgeht. Die Verteilung der Amplituden in der Beobachtungsebene ist kosinusförmig; die Maxima sind durch die Bedingung gegeben: $\sin \alpha_{Max} = \frac{n \cdot \lambda}{d}$, ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$), d.h. am Bildschirm $Z = 0, 1, 2, 3, \dots$, da dann die Phasenverschiebung der Wellen von den beiden Spalten (Gangunterschied!) einem Vielfachen einer ganzen Wellenlänge entspricht, es entsteht konstruktive Interferenz. Dazwischen liegen Minima, wo die Wellen destruktive Interferenz erleiden.

4.6.4 Beugung am Gitter

Wir nehmen nun eine große Anzahl von Einzelspalten (p Spalte, d.h. $N = p/B$ pro Längeneinheit, wo B die Gesamtbreite des Gitters bezeichnet), die nebeneinander stehen, jeweils mit dem Abstand g zueinander ($g = \text{'Gitterkonstante'}$, d.h. $g = 1/N$). Die Teilwellen von den Spalten geben in der Beobachtungsebene scharfe, gut getrennte Hauptmaxima (0., 1., 2.... Ordnung). Es bilden sich Hauptmaxima aus, die restlichen Maxima im Interferenzbild werden mit wachsendem p zunehmend schwächer. So sind bei 4 Spalten immer 2 Nebenmaxima und bei 8 Spalten immer 6 Nebenmaxima vorhanden. Die Amplitude am Beobachtungsschirm ist proportional der Gitterbeugungs-Funktion $\frac{\sin p \cdot \Delta\phi/2}{\sin \Delta\phi/2}$, wo nun $\Delta\phi$ die Phasenverschiebung von Teilwellen aus benachbarten Spalten, $\Delta\phi = k \cdot g \sin \alpha = (2\pi/\lambda)g \cdot \sin \alpha$. Daraus ergibt sich die Bedingung für ein Hauptmaximum der n . Ordnung in der Beobachtungsebene:

$$\sin \alpha_{Max} = \frac{n \cdot \lambda}{g}$$

Das Auflösungsvermögen des Gitters ist als $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = n \cdot p$ definiert.

4.7 Geißler-Röhre

Unter einer Geißler-Röhre versteht man eine gläserne Niederdruck-Gasentladungsröhre, in der an zwei enthaltenen Elektroden durch Anlegung einer Spannung von einigen 1000 Volt ein elektrischer Strom fließt.

4.7.1 Glimmentladung

Dadurch können die Ladungsträger so stark beschleunigt werden, dass sie beim Zusammentreffen mit normalen Molekülen neue Ladungsträger erzeugen. Diesen Effekt nennt man selbstständige Gasentladung oder auch Glimmentladung.

4.7.2 Bogenentladung

Ein Lichtbogen ist eine sich selbst erhaltende Gasentladung zwischen zwei Elektroden, die eine ausreichend hohe elektrische Spannungsdifferenz aufweisen, um durch Stoßionisation die benötigte hohe Stromdichte aufrechtzuerhalten. Die Gasentladung bildet ein Plasma (Als Plasma bezeichnet man ein (teilweise) ionisiertes Gas, das zu einem nennenswerten Anteil freie Ladungsträger wie Ionen oder Elektronen enthält, in dem die Teilchen (Atome oder Moleküle) teilweise ionisiert sind.) Die Ladungsträger haben zur Folge, dass das Gas elektrisch

leitfähig wird. Die Plasmen sind quasi neutral, d. h. die Zahl der Ionen und Elektronen ist identisch. Da die schweren Ionen gegenüber den leichten Elektronen wesentlich langsamer sind, sind die Elektronen fast ausschließlich für den Stromtransport relevant. Im Vergleich zur Glimmentladung ist der im Vergleich zur Kathodenfall relativ gering und eine hohe Stromdichte in der Entladung,

4.8 Snellius'sches Brechungsgesetz

Das snelliussche Brechungsgesetz besagt, dass eine Welle (z.B. ein Lichtstrahl) ihre Richtung ändert - man sagt gebrochen wird - wenn sie von einem transparenten Medium in ein anderes transparentes Medium mit einer anderen Phasengeschwindigkeit übergeht. Das Gesetz gilt für alle Wellenarten. Es besagt nur, in welche Richtung die Welle abgelenkt wird, nicht aber, wie viel von der Welle an dem Übergang zwischen den beiden Medien transmittiert bzw. reflektiert wird. Im Fall der Totalreflexion ist das reelle Brechungsgesetz ungültig. Es gilt:

$$\frac{\sin(\delta_1)}{\sin(\delta_2)} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

wobei n_1 und n_2 die Brechzahlen der jeweiligen Medien sind. c_1 und c_2 sind die Phasengeschwindigkeiten des Lichtes in den beiden Materien. Und δ_1 wie δ_2 sind Ein- bzw. Ausfallswinkel. Es gilt: $c = \frac{\lambda}{t}$ Die Brechzahl hat keine Einheit und ist somit eine Zahl. Diese hängt sowohl von der Art des Mediums als auch von der Wellenlänge des Lichts ab. Der sich aus dieser Abhängigkeit ergebende Effekt, dass durch den Übergang von einem optischen Medium ins andere Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge voneinander getrennt werden, wird in der Optik als Dispersion bezeichnet.

4.9 Totalreflexion

Die Totalreflexion ist ein optisches Phänomen, bei dem elektromagnetische Strahlung an der Grenzfläche zweier Medien nicht gebrochen, sondern vollständig reflektiert wird. Ein Lichtstrahl, der aus einem optisch dichteren Medium (Brechzahl n_1) kommt und auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren Medium (Brechzahl n_2) fällt, wird vollständig reflektiert, wenn der Winkel des einfallenden Lichtes zum Einfallslot (der Einfallswinkel θ) größer ist, als der Grenzwinkel der Totalreflexion θ_c .

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \text{ mit } n_1 > n_2$$

Für Einfallswinkel, welche größer als θ_c sind, müsste der Ausfallswinkel gemäß dem Snelliusschen Gesetz größer als 90 Grad werden. Dies stünde im Widerspruch zur Voraussetzung, dass der ausfallende Strahl immer durch die Oberfläche hindurchgeht. Man beobachtet in der Tat keinen gebrochenen Lichtstrahl in einem Ausfallswinkel größer als 90 Grad. Es bleibt dann alleine der reflektierte Lichtstrahl erkennbar. Daher spricht man von einer Totalreflexion.

4.10 Linsen

Die Abbildungsgleichungen gelten auch bei Konkavlinen. Die Brennweite wird dabei in negativer Größe angegeben. Linsenformel:

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

Dabei sind f die Brennweite der Linse, g die Gegenstandsweite und b die Bildweite.

Die Brennweite von dicken Linsen lässt sich nach der Abbe'schen Methode ermitteln:

$f = \frac{b_1 - b_2}{V_1 - V_2}$, wobei hier die Vergrößerungen und Bildweiten zweier Objekte genommen werden.

Abbildungsmaßstab:

$$A = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

Dabei sind B die Bildgröße, G die Gegenstandsgröße, b die Bildweite und g die Gegenstandsweite. Die Brechkraft ist der Kehrwert der Brennweite.

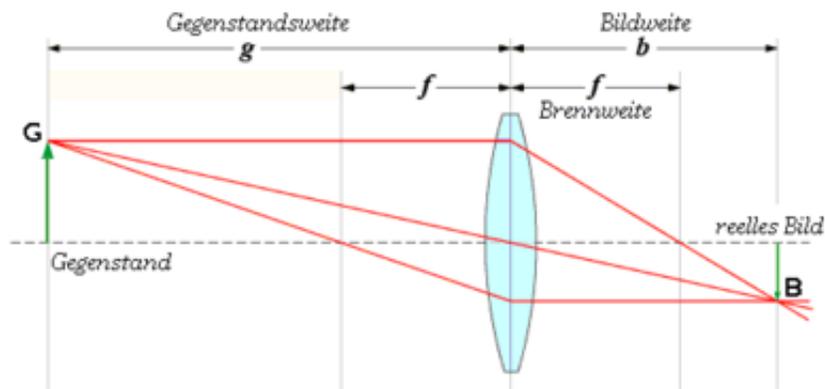


Abbildung 4: Konvexlinse

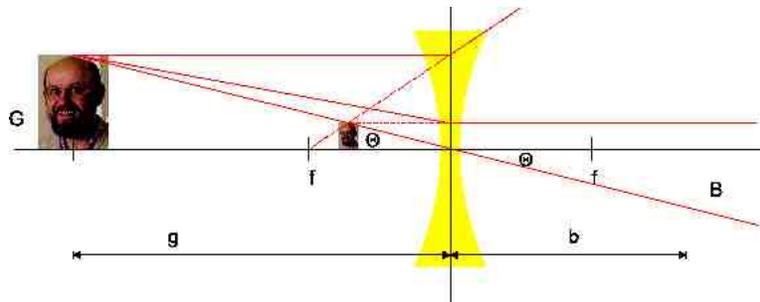


Abbildung 5: Konkavlinse

4.11 Polarisation

Natürliches Licht ist unpolarisiert, d.h. es schwingt in alle Richtungen. Polarisiertes Licht hingegen ist gerichtet, d.h. es schwingt in nur einer Richtung. Polarisation einer Welle ist eine Eigenschaft von Transversalwellen, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen. Bei Longitudinalwellen kann kein Polarisationsphänomen auftreten, da die Schwingung in Ausbreitungsrichtung erfolgt. Da Licht eine Transversalwelle ist, kann es polarisiert werden.

Licht kann durch die 4 folgenden Methoden polarisiert werden:

4.11.1 Polarisation durch Absorption

Polarisation durch Absorption kann durch einen Polarisationsfilter hervorgerufen werden. Durchdringt Licht einen solchen, so werden die meisten Polarisationsrichtungen des Lichtes herausgefiltert und nur eine durchgelassen, d.h. es wird polarisiert.

4.11.2 Polarisation durch Reflexion

Wird unpolarisiertes Licht an einer ebenen Grenzfläche zwischen zwei durchsichtigen Medien reflektiert, so ist das reflektierte Licht teilweise polarisiert. Bei einem bestimmten Einfallswinkel, den man Brewsterwinkel nennt, ist das reflektierte Licht sogar vollständig polarisiert. Bei diesem Einfallswinkel stehen reflektierter und gebrochener Strahl senkrecht aufeinander. Das Brewstersche Gesetz lautet:

$\tan(\alpha) = n_b$ bzw. beim Übergang zwischen zwei Medien:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_b}{n_a}\right)$$

wobei n_a die Brechzahl des Mediums ist, in dem der Winkel gemessen wird und n_b die Brechzahl des anderen Mediums. Man kann also eine Glasplatte als Polarisator verwenden, indem man sie im Brewsterwinkel bestrahlt. Wenn der einfallende Strahl allerdings schon polarisiert ist, wird kein Licht reflektiert und der gebrochene Strahl ist ebenfalls polarisiert.

4.11.3 Polarisation durch Streuung

Im Falle der Polarisation durch Streuung schwingt das elektrische Feld parallel zur Achse des Teilchens, an dem das Licht gebrochen wird, es verursacht Oszillationen des Streuzentrums der Teilchen in eben diese Richtung und verursacht dadurch polarisiertes Licht.

4.11.4 Polarisation durch Doppelbrechung

Polarisation durch Doppelbrechung tritt in manchen Stoffen wie Kalkspat auf, die Polarisation erfolgt dadurch, dass dieser wie ein Nicol'sches Prisma wirkt, und der Lichtstrahl beim Auftreffen auf den Stoff in einem vom Brewsterwinkel verschiedenen Winkel zur optischen Achse in 2 polarisierte Strahlen gespalten wird. Bei diesen 2 Strahlen, die in verschiedene Richtungen laufen, handelt es

sich um den ordentlichen Strahl, der an der Kittfläche unter Ausnutzung der Totalreflexion seitlich heraus reflektiert wird und den außerordentlichen Strahl, der die Kittfläche leicht parallelverschoben durchdringt. Ein Nicol'sches Prisma besteht aus 2 Kalkspatprismen, die unter Beachtung des Verlaufs der optischen Achse des Kristalls entlang ihrer Längsachse zusammengesetzt und mit Kanadabalsam verkittet werden. Die Kittschicht muss für den außerordentlichen Strahl ein dichteres und für den ordentlichen Strahl ein dünneres Medium bilden.

4.12 Optische Aktivität

Beim Durchgang von linear polarisiertem Licht durch Substanzen mit chiralen Molekülen wird die Polarisationssebene des Lichts gedreht. Man spricht dann von optischer Aktivität und sagt, die Substanz ist optisch aktiv. Man unterscheidet zwischen rechtsdrehenden (die Polarisationssebene vom Beobachter aus nach rechts drehend) und linksdrehenden Substanzen sowie dem Racemat, der gleichteiligen Mischung aus beidem, das optisch inaktiv ist. Jedes Molekül jeder Verbindung enthält Ladungsschwerpunkte und somit ein elektrisches Feld, das mit der Welle in Wechselwirkung tritt und die Schwingungsebene leicht drehen kann. Der Grad dieser Drehung hängt offenbar entscheidend von der räumlichen Orientierung des Moleküls zur Welle ab. Durch das exakte Spiegelbild eines Moleküls (das Enantiomer) wird eine erfolgte Drehung genau wieder rückgängig gemacht. In einer Lösung sind die Moleküle durch die thermische Bewegung in jede möglichen Lage statistisch verteilt. Man kann also sagen, ein durch ein Molekül gedrehter Strahl wird auf ein Molekül treffen, das so gedreht ist, dass es genau dem Spiegelbild des ersten entspricht und die Drehung rückgängig machen. Im Allgemeinen sind Substanzen also nicht optisch aktiv. Genau bei der Spiegelbild-Vorstellung liegt nun der Grund für die optische Aktivität chiraler Substanzen: Nach Definition lassen sie sich ja nicht mit ihrem Spiegelbild in Deckung bringen, die Drehung kann also nicht genau rückgängig gemacht werden. Daraus resultiert tatsächlich eine makroskopische Drehung der Polarisation. Die spezifische Drehung eines Stoffes lässt sich über die folgende Formel ermitteln:

$$\alpha = \frac{\alpha_a}{d \cdot c},$$

wobei c die Stoffkonzentration, α_a der gemessene Drehwinkel und d die Schichtdicke des Stoffes ist.

4.13 Abbildungen

Ein reales Bild ist eine zweidimensionale, optische Abbildung, die im Gegensatz zu einem virtuellen Bild auf einem Schirm abgebildet werden kann. Um Gegensatz dazu steht das virtuelle Bild, das nicht auf einem Schirm abbildbar ist und eine weitere Linse braucht, um es für das Auge sichtbar zu machen. Der Beobachter interpretiert ein vom tatsächlichen Bild ein in Größe und Position abweichendes Bild.

4.14 Vergrößerungen

Die Vergrößerung eines optischen Instrumentes ist als der Vergleich zwischen Gegenstands- und Bildgröße ermittelbar: $V = \frac{b}{g}$.

Bei einem Mikroskop ist die Vergrößerung das Produkt aus Okularvergrößerung und Objektivvergrößerung: $V = V_{Ob} * V_{Ok}$.

Die Objektivvergrößerung lautet: $V_{Ob} = \frac{d - f_{Ob}}{f_{Ob}}$. Hierbei ist d der Abstand vom Objektiv zur Brennebene des Okulars. Die Okularvergrößerung wird wie bei einer Lupe berechnet: die deutliche Sehweite durch die Brennweite der Linse:

$$V_{Ok} = \frac{25cm}{f_{Ok}}$$

4.15 Numerische Apertur

Die numerische Apertur eines optischen Instrumentes ist ein Maß für seine Lichtstärke bzw. Auflösungsvermögen. Sie ist als $N_A = n * \sin(\frac{\alpha}{2})$ definiert. α ist hierbei der halbe Öffnungswinkel des Objektivs und n die Brechzahl des Mediums. Luft hat eine Brechzahl von 1, Immersionsöl eine von 1,5. Aus diesem Grund erlaubt Immersionsöl eine gesteigerte Auflösung des Mikroskops.

4.16 Auflösungsvermögen

Der Begriff Auflösungsvermögen bezeichnet die Unterscheidbarkeit feiner Strukturen, also den kleinst- und noch wahrnehmbaren Abstand zweier Punkte.

4.16.1 Helmholtzsche Theorie

Die Helmholtzsche Theorie untersucht den minimalen Winkelabstand, den zwei Lichtquellen haben müssen, um noch getrennt wahrgenommen zu werden. Sie stellt folgende Formel auf:

$A = 0,82 * k \frac{N_A}{\lambda}$. Hierbei ist k ein physiologischer Faktor, λ die Lichtwellenlänge und N_A die numerische Apertur. Diese Formel setzt selbstleuchtende Objekte voraus.

4.16.2 Abbesche Theorie

Die Abbesche Theorie ist besonders zur Beurteilung des Auflösungsvermögens von Mikroskopen geeignet. Dabei interessiert im wesentlichen, welchen linearen Abstand zwei Punkte eines Objekts mindestens haben müssen, um noch getrennt wahrgenommen zu werden. Hierzu kann man sich diese Punkte als zwei benachbarte Spalte eines Gitters denken, das mit parallelem Licht durchstrahlt wird. In der Brennebene hinter der Linse des Objektivs entsteht daher das Beugungsbild der Fraunhoferbeugung an einem Gitter. Für den minimalen Abstand zweier Punkte d gilt:

$d = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$. Hierbei ist α wie schon vorher der halbe Öffnungswinkel des Objektivs. Diese Formel gilt für nichtselbstleuchtende Objekte.

4.17 Abberationen

In der Optik versteht man unter Abbildungsfehlern oder Aberrationen Abweichungen von der idealen optischen Abbildung, die ein unscharfes oder verzerrtes Bild bewirken.

4.17.1 chromatische Abberation

Die chromatische Aberration ist ein Abbildungsfehler optischer Linsen, der von der Wellenlänge bzw. Farbe des Lichts abhängt.

4.17.2 sphärische Abberation

Die sphärische Aberration ist ein Abbildungsfehler optischer Linsen, bei dem von der optischen Achse entfernte Strahlen stärker gebrochen werden.

4.18 Prismenspektrometer

Ein Prismenspektrometer ist ein optisches Spektrometer, welches als dispersives Element ein Prisma verwendet. Man kann mit ihm ein komplettes Spektrum gleichzeitig aufnehmen. Ein Prismenspektrometer zerlegt das einfallende Licht in seine einzelnen Farben bzw. Wellenlängen. Da ein Prisma nur eine Winkeldispersion besitzt, muss man mit einem drehbaren Objektiv den Ablenkwinkel ermitteln. Kennt man die Brechzahl des Prismas, so lässt sich daraus die Wellenlänge bestimmen. Der Lichtstrahl, der von links unten kommt, trifft auf die

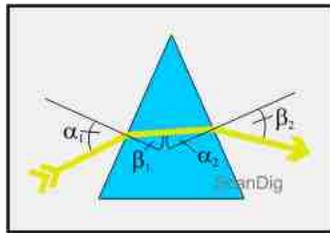


Abbildung 6: Strahlengang eines Prismas

linke Seite des Glasprismas und wird dort gebrochen. Da das Glas im Vergleich zur umgebenden Luft das optisch dichtere Medium ist, wird der Lichtstrahl zum Einfallslot hingebrochen; der Winkel β_1 ist also kleiner als der Einfallswinkel α_1 . Im Innern des Glasprismas verläuft der Lichtstrahl geradlinig weiter bis er an die zweite Kante des Prismas trifft. Dort gilt wieder das Brechungsgesetz, wobei ein Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium stattfindet. Der Lichtstrahl, der also unter dem Eintrittswinkel α_2 auf die Grenzfläche trifft, wird vom Lot weggebrochen und tritt mit dem Winkel β_2 aus dem Prisma aus. Anhand der Abbildung wird ersichtlich, dass der Lichtstrahl am Prisma also

zwei Mal in die gleiche Richtung abgelenkt wird. Insgesamt hat das Glasprisma also die Wirkung, dass der Lichtstrahl von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird. Für das Auflösungsvermögen eines Prismas gilt wie schon beim optischen Gitter $A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$

4.19 Kondensorlinse

Eine Kondensorlinse Bündelt das Licht zusätzlich und erreicht somit eine noch bessere Randschärfe.

4.20 Newton'sche Ringe

Newtonsche Ringe (nach Isaac Newton) oder allgemein Interferenzfarben nennt man Farbsäume (ineinander übergehende Farben), die durch Interferenz an dünnen transparenten Schichten entstehen. Die Ringe entstehen durch Interferenz der an der oberen und unteren Grenzfläche des Luftkeils reflektierten Lichtwellen und heißen Newtonsche Ringe. Wird monochromatisches Licht von oben auf die Versuchsanordnung gestrahlt, erscheinen durch konstruktive und destruktive Interferenz abwechselnd helle und dunkle konzentrische Kreise, deren Zentren im Berührungspunkt der Linse mit der Glasplatte liegen. Das hängt damit zusammen, dass die dunklen Ringe durch destruktive und die hellen Ringe durch konstruktive Interferenz entstehen. Interferieren können die Lichtwellen, weil sie einmal an der Grenzfläche beim Übergang von der Linse in die Luft und einmal an der Grenzfläche beim Übergang von der Luft in die Glasplatte reflektiert werden. Überlagern sich die jeweils reflektierten Lichtwellen so, dass sie sich gegenseitig auslöschen, entstehen dunkle Ringe, bei gegenseitiger Verstärkung entstehen helle Ringe. Da das mit zunehmendem Abstand vom Auflagepunkt mehrmals der Fall ist und der Abstand zwischen Linsenoberfläche und Glasplatte immer stärker zunimmt, entstehen mehrere Ringe, die mit zunehmendem Radius immer enger zusammenliegen. Wird weißes Licht verwendet, entstehen bunte Ringe, weil sich die einzelnen Farben wegen ihren unterschiedlichen Wellenlängen bei unterschiedlichen Radien verstärken.

4.21 Laser

Laser sind Strahlungsquellen (Infrarot, sichtbares Licht, Ultraviolett), deren Gemeinsamkeit im Entstehungsprozess der Strahlung liegt, nämlich in der sogenannten induzierten Emission. So gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Lasermodelle mit den verschiedensten Eigenschaften. Ein Laser besteht dabei immer aus einem optisch aktiven Medium, in dem die Strahlung erzeugt wird, und meist einem Resonator, der für die Eigenschaften des Laserstrahls, wie Parallelität oder Strahlprofil, mitverantwortlich ist. Laser haben faszinierende Eigenschaften, die sie stark von klassischen Lichtquellen (wie z. B. einer Glühlampe) unterscheiden. Aufgrund ihrer hohen Kohärenz kann mittels Lasern die Wellennatur des Lichts direkt beobachtet werden (z. B. durch Interferenzeffekte). Laserlicht kann zeitlich kohärent sein. Dadurch ist es einfarbig (monochromatisch).

Wegen der hohen räumlichen Kohärenz kann Laserstrahlung hoch intensiv und gut gebündelt (fokussiert) werden, was sie für Anwendungen als Schneid- und Schweißwerkzeug oder auch als Laserskalpell in der Medizin geeignet macht.

4.21.1 spontane Emission

Befindet sich ein Atom oder Molekül in einem energetisch angeregten Zustand, so gibt es mehrere Möglichkeiten, diese in ihm gespeicherte Energie wieder abzugeben. Eine davon ist die spontane Emission von Strahlung: Ein Elektron oder ein Molekül-Schwingungszustand wechselt in einen energetisch günstigeren Zustand und strahlt ein Photon (Lichtquant) entsprechender Energie bzw. Wellenlänge ab. Wesentlich für die spontane Emission ist, dass das Abstrahlen zufällig geschieht (spontan [lateinisch], von selbst erfolgend). Die Abstrahlung ist zufällig, falls sie nicht von außen induziert/stimuliert wird.

4.21.2 induzierte Emission

Bei herkömmlichen Lichtquellen erfolgt der Übergang von einem Energieniveau zum anderen durch spontane Emission, das heißt, sowohl der Zeitpunkt als auch die Richtung, in die das Photon ausgesendet wird, sind zufällig. Beim Laser hingegen erfolgt dieser Übergang durch induzierte Emission: Ein Lichtteilchen stimuliert diesen Übergang, und dadurch entsteht ein zweites Lichtteilchen, dessen Eigenschaften (Frequenz, Phase, Polarisation und Ausbreitungsrichtung) mit dem des ersten identisch sind. Das Resultat ist eine Lichtverstärkung. Der entgegengesetzte Vorgang ist die Absorption, bei der durch die Energie eines Photons ein Elektron in ein höheres Energieniveau gehoben wird.

4.21.3 Besetzungszahlinversion

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon durch Absorption ein Elektron auf ein höheres Niveau anhebt, ist in einem Zwei-Niveau-System genauso hoch wie die Wahrscheinlichkeit, dass es eine stimulierte Emission auslöst. Um eine Verstärkung von Licht zu erreichen, müssen daher mehr Zustände im höheren Niveau vorliegen als im niedrigen, so dass aufgrund der Besetzung die Wahrscheinlichkeit für die stimulierte Emission höher ist als für die Absorption. Diesen Zustand nennt man Besetzungsinversion. Aus diesem Grund ist eine Realisierung eines Lasers mittels Zwei-Niveau-Systemen nicht möglich. Vielmehr werden Laser mittels Drei- oder Mehr-Niveau-Systemen konstruiert. Im Drei-Niveau-System wird ein Elektron aus dem Grundzustand in einen hochliegenden atomaren oder molekularen Zustand angeregt. Dieser angeregte Zustand zerfällt schnell in das obere Niveau des Laserübergangs, der metastabil (d.h. langsam zerfallend) ist. Durch diesen Effekt werden die Atome/Moleküle des Lasermediums in den oberen Zustand des Laserüberganges gepumpt; eine Besetzungsinversion ist die Folge.

4.21.4 Resonator

Laserresonatoren werden bei allen Lasergeräten verwendet, um den Strahl kohärent zu machen. Ohne den Resonator wäre der Aufbau nur ein Lichtverstärker. Die Güte des Resonators beeinflusst die Strahlqualität und die Kohärenzeigenschaften des Laserstrahls. Ein Resonator besteht prinzipiell aus zwei Spiegeln, zwischen denen Licht reflektiert wird, so dass sich der Weg des Lichtes durch das Lasermedium verlängert. Dadurch kann ein Photon sehr oft stimulierte Emission hervorrufen. Im Resonator werden nur bestimmte Frequenzen verstärkt, die die Resonanzbedingung erfüllen, für die also gilt:

$$L = q \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \nu = q \frac{c}{2L}$$

Dabei ist q eine natürliche Zahl und L die Resonatorlänge. Alle anderen Frequenzen werden durch destruktive Interferenz ausgelöscht.

4.22 Bildentstehung bei sphärischen Spiegeln

Am Hohlspiegel entsteht ein reelles, umgekehrtes Bild, das von einem Betrachter im Bildpunkt B aufgefangen werden kann. Am Wölbspiegel entsteht ein virtuelles, aufrechtes Bild, das von keinem Schirm aufgefangen werden kann. Der Hohlspiegel sammelt die Lichtstrahlen eines Gegenstandes G , der Wölbspiegel zerstreut die Lichtstrahlen.

4.22.1 Konkavspiegel/Hohlspiegel und Konvexspiegel/Wölbspiegel

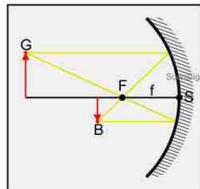


Abbildung 7: Strahlengang eines konkaven Spiegels

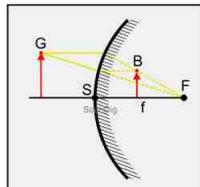


Abbildung 8: Strahlengang eines konvexen Spiegels

5 Elektrodynamik

5.1 Die Kirchhoff'schen Sätze

5.1.1 Der 1.Kirchhoff'sche Satz, die Knotenregel

Die Summe der zufließenden Ströme in einem elektrischen Knotenpunkt ist gleich der Summe der abfließenden Ströme:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

n ist hierbei die Anzahl der Ströme.

5.1.2 Der 2.Kirchhoff'sche Satz, die Maschenregel

Alle Teilspannungen eines Umlaufs in einem elektrischen Netzwerk addieren sich zu Null:

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0.$$

n ist hierbei die Anzahl der Teilspannungen.

5.2 Die Faradayschen Gesetze

Die nach ihrem Entdecker Michael Faraday benannten Faradayschen Gesetze beschreiben den Zusammenhang zwischen Ladung und Stoffumsatz bei der Elektrolyse. Sie sind daher die Grundgesetze der Elektrolyse.

5.2.1 1. Faradaysches Gesetz

Die Stoffmenge, die an einer Elektrode während der Elektrolyse abgeschieden wird, ist proportional zur Ladung, die durch den Elektrolyten geschickt wird.

5.2.2 2. Faradaysches Gesetz

Die durch eine bestimmte Ladung abgeschiedene Masse eines Elements ist proportional zum Atomgewicht des abgeschiedenen Elements und umgekehrt proportional zu seiner Wertigkeit, daher zur Anzahl von einwertigen Atomen, die sich mit diesem Element verbinden können.

5.2.3 Formeln

Um ein Mol eines einwertigen Ions elektrolytisch abzuscheiden, braucht es die Ladungsmenge bzw. Ladung Q:

$Q = e \cdot N_A = F$ Dabei ist e die Elementarladung und N_A ist die Avogadrozahl, die besagt, wie viele Teilchen ein Mol enthält. F ist Faraday-Konstante und sie ist gleich der Ladung, die zur Abscheidung eines Mols eines einwertigen Stoffes benötigt wird. Sie ist auch gleich dem Betrag der Ladung eines Mols Elektronen, der zur Abscheidung benötigt bzw. abgegeben wird.

$t = \frac{m \cdot z \cdot F}{M \cdot I}$ Diese Gleichung besagt, wie lange die Elektrolysezeit sein muss, um

eine bestimmte Masse eines abgeschiedenen Stoffes bei einer gegebenen konstanten Stromstärke elektrolytisch abzuscheiden. Hierbei ist m die Masse, z die Ladungszahl des Stoffes, M die molare Masse und I die Stromstärke.

5.3 Die maxwellschen Gleichungen

Die vier maxwellschen Gleichungen beschreiben die Erzeugung von elektrischen und magnetischen Feldern durch Ladungen und Ströme, sowie die Wechselwirkung zwischen diesen beiden Feldern, die bei zeitabhängigen Feldern in Erscheinung tritt. Sie sind die Grundlage der Elektrodynamik und der theoretischen Elektrotechnik.

5.3.1 Gauß'scher Satz

Das \vec{D} -Feld ist ein Quellenfeld. Die Ladung (Ladungsdichte ρ) ist Quelle des elektrischen Feldes. $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$ $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$ Der (elektrische) Fluss durch die Oberfläche ∂V eines Volumens V ist gleich der elektrischen Ladung in seinem Inneren. $\int_V \rho \, dV$ Das \vec{B} -Feld ist quellenfrei. Es gibt keine magnetischen Monopole. Der magnetische Fluss durch die Oberfläche eines Volumens ist gleich der magnetischen Ladung in seinem Inneren, nämlich Null, da es keine magnetischen Monopole gibt. $\operatorname{div} \vec{B} = 0$

5.3.2 Induktionsgesetz

Jede Änderung des \vec{B} -Feldes führt zu einem elektrischen Gegenfeld. Die Wirbel des elektrischen Feldes sind von der zeitlichen Änderung der magnetischen Induktion abhängig. $\operatorname{rot} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$

5.3.3 Durchflutungsgesetz

Die Wirbel des Magnetfeldes hängen von der elektrischen Stromdichte \vec{J} und von der elektrischen Flussdichte \vec{D} ab. $\operatorname{rot} \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}$

5.4 Wechselstrom

Wechselstrom bezeichnet elektrischen Strom, der seine Richtung (Polung) periodisch und in steter Wiederholung meist sinusförmig ändert.

5.4.1 Wechselspannung

Wenn sich nen Leiter im Magnetfeld bewegt, wird eine Spannung induziert. Es gilt: $U = n * B * A$

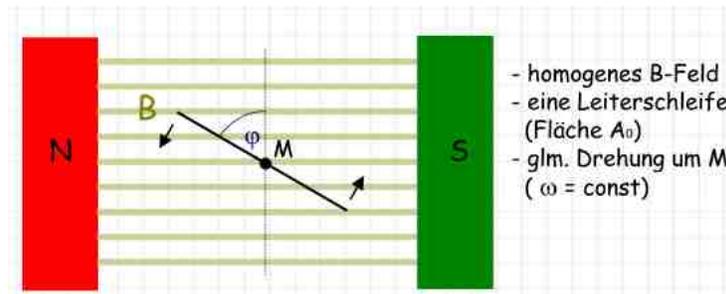


Abbildung 9: Erzeugung von Wechselspannungen

5.5 Thermoelement

Ein Thermoelement ist ein Bauteil aus zwei unterschiedlichen und an einem Ende miteinander verbundenen Metallen oder Halbleitern. Am offenen Ende wird aufgrund des Seebeck-Effektes eine elektrische Spannung (die Thermospannung) erzeugt, wenn die Verbindungsstelle und die freien Enden unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt sind.

5.5.1 Seebeck-Effekt

Der Seebeck-Effekt besagt, dass zwei unterschiedliche Metalle, die miteinander verbunden sind, an ihrer Anschlussstelle eine thermoelektrische Spannung entstehen lassen, wenn entlang der Metalle ein Temperaturgefälle besteht. Diese thermoelektrische Spannung (auch Thermokraft genannt) ist temperaturabhängig und hat bei Metallen eine Größe von wenigen Mikrovolt pro Kelvin Temperaturunterschied. Der Zusammenhang zwischen Spannung und Temperatur ist bei den meisten Metallen und Legierungen nahezu linear. Bei genauen Messungen oder großen Messbereichen muss die Nichtlinearität berücksichtigt werden. Es gilt:

$U = (Q_A - Q_B)(T_1 - T_2)$, wobei Q_A und Q_B die Seebeck-Koeffizienten und T_1 wie T_2 die Temperaturen der beiden Metalle A und B sind.

5.5.2 Thermospannung

Unter der Thermospannung versteht man die Temperaturabhängigkeit der Kontaktspannung zwischen 2 Metallen, wenn man eine Lötstelle am Thermoelement erwärmt, so herrscht an der anderen eine andere Kontaktspannung als an der anderen Lötstelle. Die Differenz der Kontaktspannungen ist dann die Thermospannung. Die Thermospannung lässt sich aus der Boltzmann-Konstante k , der Elementarladung e , dem Verhältnis der Teilchenzahldichten $\frac{n_2}{n_1}$ und der Temperaturdifferenz der Verbindungsstellen ΔT ermitteln:

$$U_{Therm} = \frac{k}{e} * \ln \frac{n_2}{n_1} * \Delta T, \text{ allgemein } U_{Therm} = a\Delta T + b\Delta T^2$$

5.5.3 Kontaktspannung

Bei der Berührung zweier verschiedener Metalle entsteht noch eine Kontaktspannung, die sich durch einen Elektronenübertritt zwischen den Metallen einstellt. Die Kontaktspannung ergibt sich aus dem Verhältnis der Teilchenzahldichten:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{\frac{-e \cdot \Delta U}{k \cdot T}} \rightarrow \Delta U = \frac{k \cdot T}{e} * \ln \frac{n_2}{n_1}$$

5.5.4 Thermokraft

Um mittels eines Thermoelements Temperaturen zu messen, müssen die sogenannten Thermokräfte der verwendeten unterschiedlichen Materialien (meist Metalle) bekannt sein. Die Thermokraft bezeichnet die Empfindlichkeit des Thermoelements, unter ihr versteht man die Änderung der Thermospannung mit der Temperatur:

$$\frac{dU_{Therm}}{dT} = a + 2b\Delta T$$

Unter differentieller Thermokraft versteht man den Seebeck-Koeffizienten, die absoluten Thermokräfte des Metalls. Die integrale Thermokraft ist die Thermospannung.

5.5.5 Anwendungen eines Thermoelements

In Gasherden und Heizungsanlagen dienen Thermoelemente dazu, die brennende Flamme zu überwachen. Das durch die Flamme erwärmte Thermoelement liefert den für das Offenhalten eines elektromagnetisch betätigten Brennstoffventils notwendigen elektrischen Strom. Verlischt die Flamme, erkaltet das Thermoelement, das Elektromagnetventil schließt, die weitere Brennstoffzufuhr wird unterbrochen.

5.5.6 Thermoelementmaterialien

Als Materialien für Thermoelemente werden viele verschiedene Metalle eingesetzt, gebräuchliche sind Thermoelemente aus FeNi, exotischere Bi_2Te_3 , $PbTe$, $SiGe$, $BiSb$ und $FeSi_2$. Diese Metalle haben alle einen Wirkungsgrad von 3-8 Prozent, bessere sind bisher unbekannt.

5.6 Drehspulinstrument

Ein Drehspulinstrument dient zur Anzeige von elektrischen Strömen, welches die Stromstärke als einen entsprechenden Zeigerausschlag darstellt. In diesem befindet sich eine drehbare Spule im Feld eines Magneten. Zwei Spiralfedern dienen sowohl der Stromzufuhr als auch der Rückstellung in die Ruhelage. Wird jetzt über die Anschlussklemmen Strom durch die Spule geleitet, so wirkt auf die Spule eine Kraft (Lorentzkraft), die sie um ihre Achse verdreht, bis die Federkraft die selbe Stärke erreicht hat. In dieser Stellung bleibt die Spule stehen, und der an ihr befestigte Zeiger gibt auf einer Skala den entsprechenden Wert der Stromstärke an. Nach Abschalten des Stroms stellen die Federn den

Zeiger wieder in die Nullstellung zurück. Da sowohl die Federkraft proportional zur Drehung ist (Hookesches Gesetz) als auch die Lorentzkraft proportional zur Stromstärke, ergibt sich eine lineare Skala. Der Innenwiderstand einer Spule kann die ausgegebenen Messergebnisse verfälschen. Drehspulinstrumente können als Nullinstrumente (geeichte, kalibrierte Instrumente) für Wechselstrom eingesetzt werden.

5.6.1 Lorentzkraft

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird oft nur die magnetische Komponente als Lorentzkraft bezeichnet.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

- * \vec{F} = Kraft
- * q = Elektrische Ladung
- * \vec{v} = Geschwindigkeit der Ladung
- * \vec{E} = Elektrisches Feld
- * \vec{B} = Magnetische Flussdichte
- * \times = Vektoriell Kreuzprodukt

5.6.2 Messbereichserweiterung eines Drehspulinstrumentes

Um den Messbereich eines Drehspulinstrumentes, mit dem man die Stromstärke misst zu erweitern, schaltet man parallel zum Messgerät einen Widerstand R , so dass der Strom, der durch das Meßgerät fließt, konstant gehalten wird. Misst man keine Stromstärke, sondern eine Spannung, schaltet man einen weiteren Widerstand in Reihe. Der Widerstand muss hierbei sowohl das Zuviel an Spannung wie das Zuviel an Stromstärke aufnehmen.

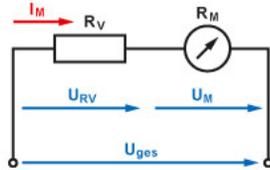
5.6.3 Galvanometer

Unter dem Begriff Galvanometer versteht man Strommessgeräte und Antriebe nach dem Prinzip eines Drehspulmesswerkes. Im Gegensatz zu normalen Drehspulmesswerken ist die Spule nicht auf einen Aluminiumrahmen gewickelt, dadurch entfällt die Dämpfung durch Wirbelstrom. Die Spule wird entweder auf einen nichtmetallischen Träger gewickelt oder wird freitragend vergossen oder verbacken ausgeführt.

5.6.4 Spiegelgalvanometer

Spiegelgalvanometer besitzen an Stelle des Zeigers einen kleinen Spiegel an der Drehspule. Eine von einer Projektionslampe oder einem Laser erzeugte Strichmarke wird vom Spiegel reflektiert und auf eine getrennt vom Galvanometer aufgestellte Skala projiziert. Spiegelgalvanometer können sehr empfindlich ausgelegt werden, da der masselose Lichtzeiger, entsprechend lichtstarke Projektionslampen bzw. Laser vorausgesetzt, nahezu beliebig lang gemacht werden kann. Auch verdoppelt sich durch die Reflexion der Ablenkwinkel. Nachteilig ist, dass

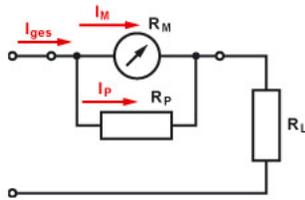
Messbereichserweiterung bei Spannungsmessgeräten



$$U_{RV} = U_{ges} - U_M \quad R_V = \frac{U_{RV}}{I_M}$$

$$I_M = \frac{U_{ges}}{R_V + R_M} \quad I_M = \frac{U_M}{R_M}$$

Messbereichserweiterung bei Strommessgeräten



$$\frac{I_P}{I_M} = \frac{R_M}{R_P} \quad R_P = \frac{R_M}{n-1} \quad I_P = I_{ges} - I_M$$

Abbildung 10: Messbereichserweiterungen

es sich um drei getrennte Komponenten handelt, die aufeinander eingerichtet und justiert sein müssen.

5.6.5 Ballistisches Galvanometer

Das ballistische Galvanometer besitzt vergrößertes Trägheitsmoment. Die durch den Stromstoß ausgelöste Schwingung erfolgt so langsam, daß der Umkehrpunkt abgelesen werden kann. Der Ausschlag ist ein Maß für die Ladung (Strommenge) $I \cdot t$, wobei der zeitliche Verlauf des Stromes beliebig sein kann. Nur muß t kurz sein gegen die Schwingdauer des Galvanometers.

5.7 Ohm'sches Gesetz

Als ohmsches Gesetz wird die Tatsache bezeichnet, dass der Spannungsabfall U über bestimmte metallische Leiter bei konstanter Temperatur proportional zu dem hindurchfließenden elektrischen Strom mit der Stromstärke I ist. Die Proportionalitätskonstante wird dabei als elektrischer Widerstand R des Bauteils bezeichnet und es gilt $R = \frac{U}{I}$. Die Einheit von R ist $[\frac{V}{A}]$, auch Ohm $[\Omega]$ genannt.

5.7.1 Widerstand

Der elektrische Widerstand (R) ist ein Begriff der Elektrotechnik. Er charakterisiert die Eigenschaft von Bauteilen (bzw. Schaltungsteilen), den Stromfluss

zu hemmen. Er ist ein Maß dafür, welche Spannung erforderlich ist, um einen bestimmten Strom durch einen elektrischen Leiter fließen zu lassen.

5.7.2 Spezifischer Widerstand

Der spezifische Widerstand (kurz für spezifischer elektrischer Widerstand oder auch Resistivität) ist eine temperaturabhängige Materialkonstante mit dem Formelzeichen ρ . Der Kehrwert des spezifischen Widerstands ist die elektrische Leitfähigkeit. Der spezifische Widerstand eines Materials wird häufig für die Einordnung als Leiter, Halbleiter oder Isolator verwendet. Die Unterscheidung erfolgt anhand des spezifischen Widerstands:

- * Leiter: $\rho \lesssim 10^{-4} \Omega \text{cm}$
- * Halbleiter: $\rho = 10^{-4} \Omega \text{ cm} \dots \rho = 10^{12} \Omega \text{ cm}$
- * Isolatoren oder Nichtleiter: $\rho \gtrsim 10^{12} \Omega \text{ cm}$

5.7.3 Scheinwiderstand, Impedanz

Die Impedanz ist in der Elektrotechnik der komplexe Wechselstromwiderstand Z eines linearen passiven Zweipols. Weil es sich hierbei nicht um konkrete Widerstände als Einzelobjekte handeln muss, wird unter Fachleuten vorgezogen, zur Unterscheidung diesen Begriff zu nutzen. Die Impedanz hat große Bedeutung bei der Anpassung von Hochfrequenzleitungen, aber auch bei der Wellenausbreitung im freien Raum. Wenn zum Beispiel die Eingangsimpedanz eines Gerätes nicht mit der Impedanz der Leitung übereinstimmt, kommt es zu Reflexionen, was die Leistungsübertragung mindert und was zu Resonanzerscheinungen und damit zu einem nichtlinearen Frequenzgang führen kann. Analog zum ohmschen Gesetz, wo der elektrische Widerstand der Quotient aus Gleichspannung und Gleichstrom ist, ist die komplexe Impedanz der Quotient aus der komplexen zeitabhängigen Wechselspannung $\underline{u}(t)$ und der komplexen zeitabhängigen Wechselstromstärke $\underline{i}(t)$. $\underline{Z} = \frac{\underline{u}(t)}{\underline{i}(t)}$

Sie ergibt sich jedoch nicht als Quotient aus der reellen zeitabhängigen Wechselspannung $u(t)$ und der reellen zeitabhängigen Wechselstromstärke $i(t)$. Der Betrag der komplexen Impedanz ist der Scheinwiderstand Z :

$Z = |\underline{Z}|$ Er ergibt sich als Quotient aus den Amplituden oder den Effektivwerten der zeitabhängigen Wechselspannung $u(t)$ und der zeitabhängigen Wechselstromstärke $i(t)$: $Z = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$

5.7.4 Wirkwiderstand, Resistanz

Man bezeichnet im Wechselstromkreis den Widerstand R als Wirkwiderstand, weil er vom Gleichstromwiderstand abweicht. Wenn er keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung erzeugt, dann spricht man auch von einem Wirkwiderstand. Sind dazu die Augenblickswerte des Stromes der Spannung proportional, dann ist es ein ohmscher Widerstand. In der komplexen Wechselstromrechnung bezeichnet der Wirkwiderstand R den Realteil des komplexen

Widerstandes Z . $R = \operatorname{Re}\{Z\}$ und $R = Z \cos \varphi = \frac{U}{I} \cos \varphi$

5.7.5 Blindwiderstand, Reaktanz

Der Blindwiderstand (oder auch Reaktanz genannt) ist eine Größe der Elektrotechnik, die bei Wechselstrom eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom verursacht. Im Gegensatz zum Wirkwiderstand ist der Blindwiderstand frequenzabhängig. Der Zusatz blind rührt daher, dass in Blindwiderständen keine Wirkleistung umgesetzt wird. Der Blindwiderstand X entspricht dem Imaginärteil des komplexen Widerstandes Z (Impedanz). Der Realteil von Z wird als Wirkwiderstand R bezeichnet. Die geometrische Summe von Wirk- und Blindwiderstand bezeichnet man als Scheinwiderstand Z . $X = \operatorname{Im} Z = \operatorname{Im} \left(\frac{U}{I} \right)$

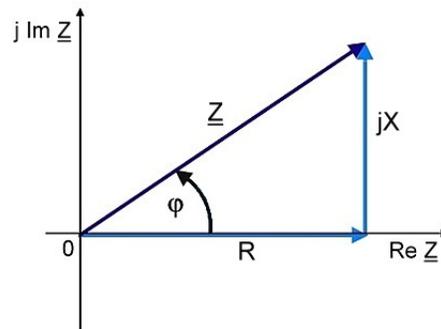


Abbildung 11: Zeigerdiagramm eines komplexen Widerstands

5.8 Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung, die in einem Bauteil umgesetzt wird, ist bei Gleichstrom das Produkt aus Spannung und Stromstärke: $P = U * I$. Die Einheit von P ist hierbei [VA] bzw. Watt [W].

5.8.1 Wirkleistung

Die Wirkleistung P ist die elektrische Leistung, die für die Umwandlung in andere Leistungen (z. B. mechanische, thermische oder chemische) verfügbar ist.

5.8.2 Blindleistung

Blindleistung entsteht, wenn in einem mit Wechsel- bzw. Drehstrom betriebenen Netz nicht ausschließlich ohmsche Verbraucher vorhanden sind. Sie quantifiziert die dabei entstehende Leistungs-Pendelung, die eine Folge der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist. Bei Einbezug einer Phasenver-

schiebung mit dem Phasenwinkel φ zwischen Strom und Spannung lautet die allgemeine Formel der komplexen Wechselstromrechnung für die Blindleistung $Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin \varphi$ und für die Wirkleistung: $P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$ wobei I_{eff} und U_{eff} die Effektivwerte von Strom und Spannung sind.

5.8.3 Scheinleistung

Scheinleistung ist die geometrische Summe aus Wirkleistung und Blindleistung. In Wechselstromnetzwerken ist die Scheinleistung der Betrag einer komplexen Größe (siehe unten), in Gleichspannungsnetzwerken ist Sie gleich der Wirkleistung, da hier der Blindleistungsanteil 0 beträgt. In Gleichspannungsnetzwerken ergibt sich die Scheinleistung aus der Multiplikation des elektrischen Stromes I und der elektrischen Spannung U eines Verbrauchers: $S = U \cdot I$, wobei S das übliche Formelzeichen für die Scheinleistung ist. In Wechselstromnetzwerken ist die Scheinleistung der Betrag der komplexen Leistung. $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, hierbei steht P für die Wirkleistung und Q für die Blindleistung.

5.9 Spannungsteiler

Der Spannungsteiler ist eine Vorrichtung aus meist gleichartigen elektronischen passiven Bauteilen, die eine eingehende Spannung um einen bestimmten Pegel absenkt. Für Gleichspannungen werden als Bauteile elektrische Widerstände eingesetzt, bei Wechselspannungen ist eine Realisierung mittels Widerständen, Kondensatoren, Transformatoren und Spulen möglich. Der Standardaufbau besteht aus einer Reihenschaltung zweier Widerstände R_1 und R_2 . Die Eingangs-

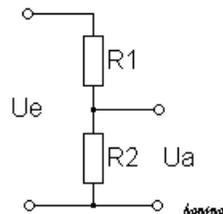


Abbildung 12: Spannungsteiler

spannung U_e wird an die Gesamtschaltung angelegt, die Ausgangsspannung U_a nur an einem der Widerstände, im Bild R_2 , abgegriffen. Dann gilt für den unbelasteten Spannungsteiler die Spannungsteilerformel:

$$U_a = U_e \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

5.10 Leitung von Stoffen

Der Aufenthaltsort von Elektronen in einem Stoff kann durch das Bändermodell dargestellt werden. Es gibt Valenzband und Leitungsband in diesem und

stellen Bereiche dar, in denen Elektronen vorkommen können. Im Valenzband sind die Elektronen an die Atome gebunden, während sie im Leitungsband frei beweglich sind und zur Leitungsfähigkeit beitragen. Die Anordnung von Valenz- und Leitungsband sind jedoch bei Metallen und Halbleitern sowie Nichtleitern unterschiedlich.

Bei Metallen bzw. Leitern überlappen sich die beiden Bänder und beim An-

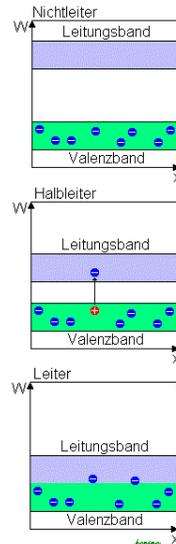


Abbildung 13: Bändermodell bei Nichtleitern, Halbleitern und Leitern

legen eines Stroms können die Elektronen leicht vom Valenz- ins Leitungsband übergehen.

Bei Halbleitern gibt es eine so große Bandlücke, dass bei Raumtemperatur nur sehr wenige Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband thermisch angeregt werden. Allerdings kann sie durch thermische Zufuhr überwunden werden, da mehr Energie zugeführt wird. Dadurch dass Metalle auch bei Raumtemperatur gute Leiter sind, ist ihr Widerstand stark temperaturabhängig. Es gibt allerdings eine Möglichkeit, ihren Widerstand konstant zu halten: Das Vorhandensein des hervorragenden Wärmeleiters Wasserstoff, der in der Lage ist, die Wärme abzuführen und so die Temperatur konstant zu halten. Aus diesem Grund existieren Eisen-Wasserstoff-Widerstände. Metalle sind insofern temperaturabhängig, dass die kinetische Energie der in ihnen enthaltenen Atome durch Temperaturerhöhung erhöht. Dadurch beginnen die Atomrümpfe, stärker zu schwingen und behindern dabei die sich durch Zufuhr elektrischen Stroms bewegenden Elektronen. Also wird mit höher Temperatur bei Metallen der Widerstand größer. Bei Halbleitern hingegen erhalten die Elektronen durch Temperaturerhöhung Energie und können dadurch die Energielücke überwinden, was den Widerstand

vermindert. Die elektrische Leitfähigkeit ist eine physikalische Größe, die die Fähigkeit eines Stoffes angibt, elektrischen Strom zu leiten, d.h. in seinem Inneren die Bewegung von Ladungsträgern zu ermöglichen. Sie ist definiert als die Proportionalitätskonstante zwischen der Stromdichte \vec{j} und der elektrischen Feldstärke \vec{E} in der allgemeinen Form des Ohmschen Gesetzes: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ Wichtig ist hierbei auch die Formel für die Leitfähigkeit σ , die die Einheit $\frac{1}{\Omega}$ hat: Wenn man in einem allgemeinen Festkörper die Beweglichkeit μ der Ladungsträger berücksichtigt, ergibt sich die Formel: $\sigma = n * e * \mu$, die für Metalle und Halbleiter gilt, wobei n die Ladungskörperdicke, e die Ladung und μ die Beweglichkeit der Ladungsträger ist.

5.10.1 Beweglichkeit und Driftgeschwindigkeit von Ladungen

In der Elektrodynamik wird die Beweglichkeit in leicht abgewandelter Form definiert. Ausgehend von $\vec{v} \sim \vec{E}$ erhält man $\vec{v} = \mu \vec{E}$, wobei sich mit $\vec{F} = q \vec{E}$ die Einheit $\frac{As^2}{kg} = \frac{m^2}{Vs}$ ergibt. In diesem Fall ist v die mittlere Driftgeschwindigkeit der beweglichen Ladungsträger, also Elektronen im Leitungs- oder Löcher im Valenzband. m ist dabei nicht die Masse eines Elektrons sondern die effektive Masse, die sich aus der Bandstruktur berechnen lässt.

5.10.2 Supraleitung

Supraleiter sind Materialien, die beim Unterschreiten einer kritischen Temperatur T sprunghaft ihren elektrischen Widerstand vollständig verlieren. Die Temperatur T_c , unterhalb der die Supraleitung einsetzt, nennt man Sprungtemperatur oder kritische Temperatur. Ihr Wert ist materialabhängig und kann durch (von außen anliegende) Magnetfelder gesenkt werden. Sie sinkt beim sogenannten kritischen Magnetfeld $H_c(0)$ bei Typ-I-Supraleitern bzw. $H_c2(0)$ bei Typ-II-Supraleitern sogar bis auf nahezu Null Kelvin. Es handelt sich beim Übergang zur Supraleitung um einen Phasenübergang zweiter Art. Mit der Supraleitung geht der Meißner-Ochsenfeld-Effekt einher, wonach Magnetfelder bis zu einer bestimmten Stärke aus dem Leiter verdrängt werden. Aufgrund des verschwindenden Widerstandes kann sich im Inneren eines Supraleiters bis zu einer kritischen Feldstärke kein Magnetfeld ausbilden. Ein von außen angelegtes Magnetfeld induziert sofort einen Kreisstrom, der im Inneren des Supraleiters ein entgegengesetztes Feld aufbaut, welches das äußere kompensiert. Aufgrund des nicht vorhandenen elektrischen Widerstandes wird der Kreisstrom nicht mehr schwächer, das Magnetfeld bleibt erhalten. Durch den Effekt kann eine kleine supraleitende Probe im Magnetfeld zum Schweben gebracht werden. Diese Interpretation erklärt aber nicht das Verdrängen von Magnetfeldern, die vor dem Überschreiten der Sprungtemperatur im Körper stattgefunden hat.

BCS-Theorie Die BCS-Theorie ist eine Vielteilchentheorie zur Erklärung der Supraleitung in Metallen.

Die Grundlage der BCS-Theorie war die experimentelle Beobachtung, dass die

Supraleitung vieler Metalle eine relativ starke Abhängigkeit der kritischen Temperatur vom Isotop des untersuchten Metalls zeigt. Dies legt nahe, dass ein Mechanismus der Supraleitung die Wechselwirkung mit den masseabhängigen, quantisierten Gitterschwingungen (deren Quanten Phononen genannt werden) sein müsse. Dies kann man sich folgendermaßen vorstellen: Ein erstes Elektron verändert das Gitter (respektive eine Gitterschwingung) durch Energieabgabe derart, dass ein zweites Elektron (z.B. durch Veränderung seiner Bahn oder Aufnahme eines Phonons) einen gleichgroßen Energiegewinn erzielt. Dies ist nur möglich, falls die Gitterbausteine und die Elektronen sich langsam genug (daher nur unterhalb einer kritischen Stromdichte) bewegen. Die Idee der BCS-Schöpfer besteht darin, die Bildung sogenannter Cooper-Paare aus je zwei Elektronen durch eine schwache anziehende Wechselwirkung zu postulieren. Elektronen sind aufgrund ihres Spins ($1/2$) nämlich Fermionen und können als solche nicht den gleichen Zustand besetzen. Im Gegensatz dazu sind die Cooper-Paare mit ihrem Spin 0 (antiparallele Anordnung der Elektronenspins) Bosonen und dürfen alle gleichzeitig in den Grundzustand. Dies ist nicht nur energetisch sinnvoll, sondern äußert sich auch in einer, den ganzen Festkörper überspannenden, Bose-Einstein (BE)-Wellenfunktion. Diese Wellenfunktion kann von lokalen Hindernissen (Atomkerne und Störstellen des Gitters allgemein) nicht mehr beeinflusst werden und garantiert somit einen widerstandslosen Ladungstransport. Dadurch wird eine Wechselwirkung mit dem Rest des Metalls verhindert und die typischen Eigenschaften eines Supraleiters wie der verschwindende elektrische Widerstand begründet.

Hochtemperatursupraleiter Als Hochtemperatursupraleiter (HTSL) wird eine Klasse von keramischen Supraleitern (sog. Kuprate) mit besonders hohen Sprungtemperaturen bezeichnet. Sie zählen zu den unkonventionellen Supraleitern, da ihr Verhalten nicht mit der BCS-Theorie beschrieben werden kann. Allerdings erfolgt der Ladungstransport ebenfalls mit Cooper-Paaren. Der Wortbestandteil Hochtemperatur bezieht sich darauf, dass diese Materialien bei höheren Temperaturen als metallische Supraleiter supraleitend sind, es handelt sich dabei aber noch immer um sehr niedrige Temperatur im herkömmlichen Sinn (unter -140 C).

5.11 Halbleiterdiode

Die Grundlage der Halbleiterdiode ist ein n-p-dotierter Halbleiterkristall, dessen Leitfähigkeit von der Polung der Betriebsspannung an Anode (p-dotiert) und Kathode (n-dotiert) abhängt.

5.11.1 p-n-Übergang

Ein p-n-Übergang ist die Übergangszone zwischen einem p-dotierten und einem n-dotierten Halbleiterkristall. Sie zeichnet sich durch ein Fehlen beweglicher Ladungsträger aus, da die positiven des p-Kristalls sich hier mit den negativen

des n-Kristalls ausgeglichen (rekombiniert) haben. Da die ebenfalls vorhandenen ortsfesten Ladungen nicht rekombinieren können, herrscht innerhalb der Zone ein elektrisches Feld, welches einen Ladungstransport unterbindet. Dieses Feld kann durch eine von außen angelegte Spannung - je nach Polung - kompensiert werden, dann wird der p-n-Übergang leitfähig, oder es kann verstärkt werden, dann bleibt er gesperrt. Diese von der Polung abhängige Leitfähigkeit ist die Grundlage der Halbleiterdiode, der wichtigsten Anwendung des p-n-Übergangs. Deren Funktionsweise kann im Bändermodell erklärt werden. Im n-Kristall befinden sich bewegliche Elektronen im Leitungsband, im p-Kristall bewegliche Elektronenfehlstellen im Valenzband (siehe unten, Bild a). An der Berührungsstelle können zunächst Elektronen in den p-Kristall eindringen und sich hier die Elektronenfehlstellen auffüllen (Bild b). Die zuvor elektrisch neutralen Kristalle erhalten durch die zurück bleibenden festen Ladungen nunmehr eine Raumladung, die den p-Kristall negativ, den n-Kristall positiv auflädt. Durch die Ladungsträgerwanderung entsteht zwischen p- und n-Schicht eine elektrische Spannung. Sie wird Diffusionsspannung U_D genannt. In der von beweglichen Ladungen freien Zone (der Sperrschicht) entsteht ein elektrisches Feld. Die Elektronen müssen nun gegen einen Potenzialwall anlaufen, um noch in den p-Kristall zu gelangen (Bild c). Der Prozess kommt zum Erliegen, wenn sich die Fermi-niveaus der beiden Kristalle angeglichen haben. Durch Anlegen einer äußeren Spannung in Sperrrichtung (+ am n-Kristall, - am p-Kristall) wird das Feld der Sperrschicht verstärkt und der Potenzialwall vergrößert. Elektronen bzw. Defektelektronen werden von der Sperrschicht weg gezogen, so dass diese sich verbreitert. Es fließt kein Strom. Bei Polung in Durchlassrichtung (+ am p-Kristall, - am n-Kristall) wird der Potenzialwall abgebaut. Neue Ladungsträger fließen von der äußeren Quelle auf die Sperrschicht zu und rekombinieren hier fortwährend. Es fließt Strom. Wie oben gezeigt leitet der einfache p-n-Übergang elektrischen Strom in eine Richtung sehr gut, in die Andere fast nicht. Einen solchen p-n-Übergang nennt man Diode, eine wichtige Anwendung dieser ist daher der Gleichrichter zur Umwandlung von Wechselströmen in Gleichströme.

5.11.2 Zenerdiode

Eine normale Halbleiterdiode kann durch eine zu hohe Spannung durchlässig und damit zerstört werden. Zenerdioden hingegen haben dagegen als Schutzmechanismus einen Durchbruch schon bei relativ niedrigen Spannungen. So findet zwar der Durchbruch statt, allerdings wird die Diode dadurch nicht zerstört. Diese Eigenschaft wird ausgenutzt, um die empfindliche Diode vor zu hohen Spannungen zu schützen.

5.11.3 Kennlinie einer Diode

Unter einer Kennlinie einer Diode versteht man ihr $I(U)$ -Diagramm. In der Flußrichtung steigt die Stromstärke linear mit der Spannung, ab einem bestimmten geringen Schwellspannungswert fast exponentiell an. In Sperrichtung hingegen bleibt die Stromstärke bis zu einer relativ großen Durchbruchsspannung relativ

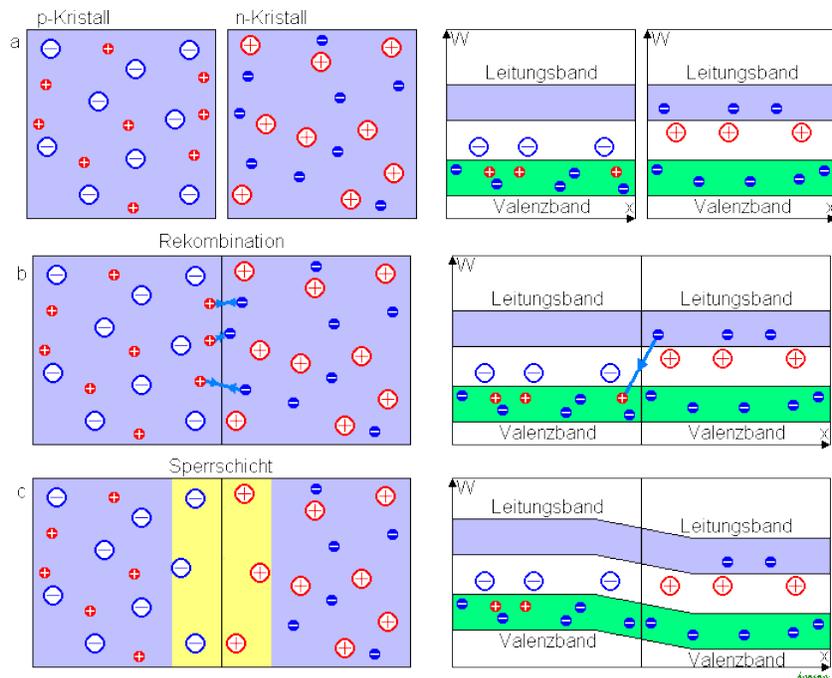


Abbildung 14: Sperrichtung

gering. Die Überschreitung einer Durchbruchsspannung führt, wie oben schon erklärt, zur Zerstörung der Diode.

5.11.4 Dotierung, Eigenleitung, Störstellenleitung

Wenn man Fremdatome in das Kristallgitter eines Halbleitermaterials einbaut, nennt man das Dotieren. Durch das Dotieren wird die Leitfähigkeit der reinen Halbleiter vergrößert, indem bewegliche Ladungsträger erzeugt werden. Wurde die Temperatur so weit erhöht, dass alle Dotieratome ionisiert sind, d. h. zur Leitung beitragen, spricht man von Störstellenerschöpfung. Die Eigenleittemperatur stellt den Übergang zwischen der Störstellenerschöpfung zur Eigenleitung des Halbleiters dar.

5.12 Elektronenstrahloszilloskop/Braunsche Röhre

Ferdinand Braun benutzte um 1900 Elektronenstrahlen als Zeiger für schnell veränderliche elektrische Spannungen, die diese Elektronen ablenkten. Die braunsche Röhre des Elektronenstrahloszilloskops ist zu einem der wichtigsten Messgeräte entwickelt worden. Aus der Glühkathode treten Elektronen und werden durch die Anodenspannung zwischen der Glühkathode und der durchbohrten

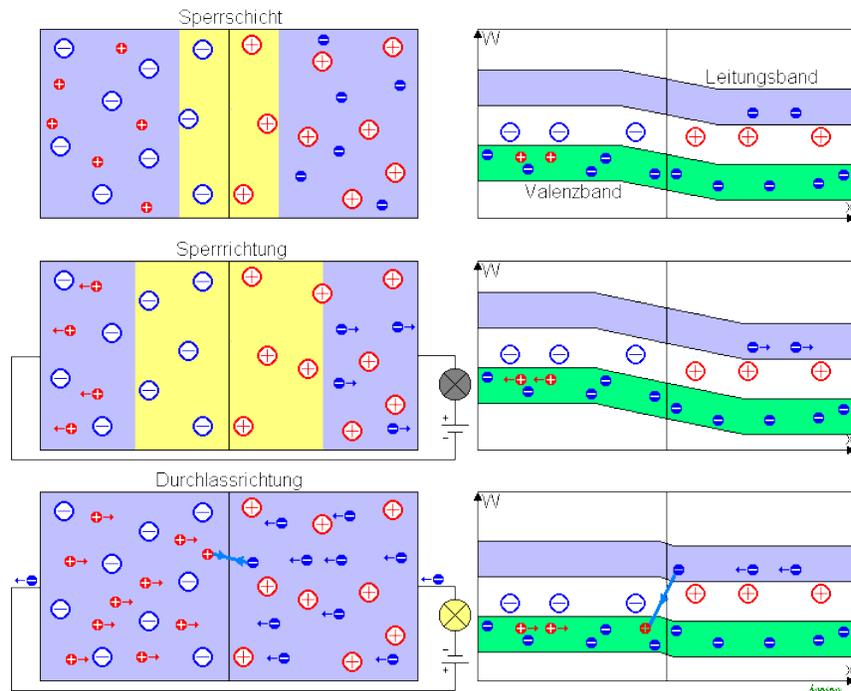


Abbildung 15: Durchlassrichtung

Anode beschleunigt. Durch das Loch in der Anode treten sie hindurch und werden bei passender Formgebung (Wehnelt-Zylinder) sogar noch enger gebündelt bzw. fokussiert. Sie treten dann durch den Ablenkkondensator und treffen auf den Leuchtschirm. Ist diese Spannung eine periodische Wechselfspannung, so wird der Leuchtfleck zu einem vertikalen Strich auseinandergezogen. Will man den zeitlichen Verlauf beobachten, dann legt man an den hinter dem Ablenkkondensator angebrachten, um 90 Grad gedrehten Kondensator eine sägezahnförmige Kippspannung, deren zeitlicher Verlauf auf dem Schirm angezeigt wird.

5.13 Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden, die durch eine Membran oder Elektrolyt (Ionenleiter) voneinander getrennt sind. Die Anode wird mit dem Brennstoff umspült (also Wasserstoff, Methan, Methanol, Glukoselösung), der dort oxidiert wird. Die Kathode wird mit dem Oxidationsmittel umspült (zum Beispiel Sauerstoff, Wasserstoffperoxid, Kaliumthiocyanat), das dort reduziert wird. Die verwendeten Materialien sind unterschiedlich. Die Elektrodenplatten/Bipolarplatten bestehen meist aus Metall oder Nano-Carbon-Röhrchen. Zur besseren Katalyse sind sie mit einem Katalysator beschichtet, zum Beispiel Pla-

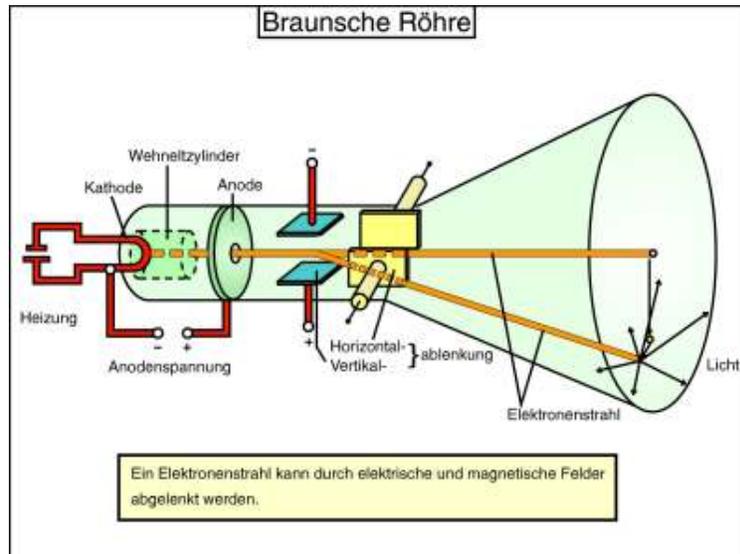


Abbildung 16: Braun'sche Röhre

tin oder Palladium. Als Elektrolyten können beispielsweise gelöste Laugen oder Säuren, Alkalicarbonatschmelzen, Keramiken oder Membrane dienen.

5.14 Halleffekt

Der Hall-Effekt ist das Auftreten einer elektrischen Spannung in einem stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem stationären Magnetfeld befindet. Die Spannung fällt dabei senkrecht zur Stromfluss- als auch Magnetfeldrichtung am Leiter ab und wird Hall-Spannung U_H genannt. Die Größe der Spannung kann mit Hilfe der Formel:

$U_H = A_H \frac{IB}{d}$, aus Stromstärke I , magnetischer Flussdichte B , Dicke der Probe d (parallel zu B) und einer Materialkonstanten der so genannten Hall-Konstanten (auch: Hall-Koeffizient) A_H berechnet werden.

5.14.1 Hall-Koeffizient

Die Hall-Konstante A_H , die auch Hall-Koeffizient genannt wird, ist eine (temperaturabhängige) Materialkonstante, die in Kubikmeter pro Coulomb angegeben wird. Die Hall-Konstante ist durch $A_H = \frac{U_H d}{IB_z} = \frac{E_y}{j_x B_z}$ gegeben. Wenn die Hall-Konstante aus dem Strom I und der Hall-Spannung U_H berechnet wird, ist die Schichtdicke d zu berücksichtigen, was nicht notwendig ist, wenn hierfür die Stromdichte j_x und die elektrische Feldstärke E_y herangezogen werden.

5.15 Fermi-Verteilung

Die Fermi-Verteilung gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Fermion eine Energie E zu gegebener Temperatur T hat. Fermionen sind Teilchen im physikalischen Sinn, die einen halbzahligen Spin besitzen. Die Fermi-Verteilung ist dabei nur für ein System aus nicht miteinander wechselwirkenden Fermionen gültig. Sie ergibt sich aus der Fermi-Dirac-Statistik und ist nach dem italienischen Physiker Enrico Fermi benannt. In einem System der Temperatur T lautet die Fermi-Verteilung $W(E)$ wie folgt: $W(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-\mu}{k_B T}\right)+1}$ Dabei ist das chemische Potenzial im wesentlichen durch die Teilchenzahl im System festgelegt.

5.15.1 Fermienergie

Jedes hinzugefügte Fermion besetzt den tiefstmöglichen Energiezustand, welcher noch nicht von einem anderen Fermion besetzt ist. Die Fermi-Verteilung hat bei $T=0\text{ K}$ also eine scharfe Kante bei einer Energie, deren Höhe von der Anzahl der Fermionen in dem betrachteten System abhängt und als Fermi-Kante oder Fermi-Energie E_f bezeichnet wird. Ganz wichtig ist hierbei, dass die Fermi-Verteilung nur eine Wahrscheinlichkeit angibt, mit der ein Zustand besetzt wird. Ob der Zustand auch besetzt wird, hängt davon ab, ob ein entsprechender Zustand existiert. Bei einem Halbleiter existiert zur Fermi-Energie kein erlaubter Zustand, er kann nicht besetzt werden (verbotene Zone).

5.16 Wheatstonesche Brückenschaltung für Gleichstrom

Eine Wheatstonesche Messbrücke ist eine Parallelschaltung zweier Spannungsteiler. Mit ihr lässt sich ein unbekannter Widerstand bestimmen. Die Messbrücke ist abgeglichen, wenn die Brückendiagonalspannung $U_A = 0$ ist - bei einer Realisierung mit vier Widerständen also genau dann, wenn das Widerstandsverhältnis in beiden Spannungsteilern gleich ist. Mit Hilfe einer abgeglichenen Messbrücke kann man einen unbekanntes Widerstand bestimmen. Dazu muss man einen Spannungsteiler durch ein Potentiometer ersetzen und die Abgleichbedingung benutzen: $R_1/R_2 = R_v/R_x$ oder $U_1/U_2 = U_v/U_x$. Diese Einrichtung zur Messung von Widerständen nennt man Wheatstonesche Messbrücke oder nur Wheatstonebrücke. Damit ergibt sich nun R_x nach den Ohmschen Gesetzen zu: $\frac{R_x}{R_v} = \frac{R_2}{R_1}$ und U_A zu: $U_A = U_E \cdot \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_x}{R_x+R_v}\right)$

5.17 Magnetfelder

5.17.1 Magnetische Feldstärke

Die magnetische Feldstärke kennzeichnet die Stärke eines Magnetfeldes. Sie ist die Ursache für den magnetischen Fluss. Die Größe der magnetischen Feldstärke im Inneren einer stromdurchflossenen Spule ist abhängig von Stromstärke, Spulenlänge und Windungszahl. Wenn H magnetische Feldstärke innerhalb einer Spule ist, I die Stärke des die Spule durchfließenden Stroms, N die Windungszahl der Spule, l die Länge der eisenlosen Spule, bzw. der Feldlinien im homogenen

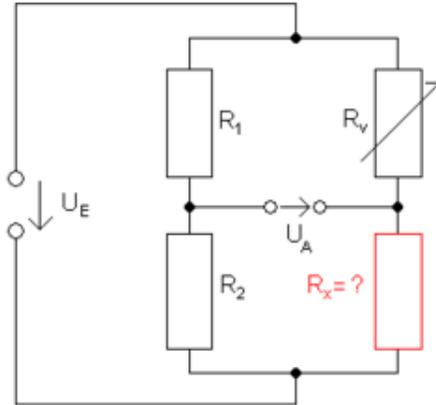


Abbildung 17: Wheatstonesche Brückenschaltung

Feld ist, dann gilt:

$H = \frac{I \cdot N}{l}$ Die Einheit der magnetischen Feldstärke H ist Ampere pro Meter:
 $[H] = \frac{A}{m}$

5.17.2 Magnetische Induktion

Die magnetische Induktion bzw. magnetische Flussdichte hat das Formelzeichen B und steht für die Stärke des magnetischen Flusses welcher durch ein bestimmtes Flächenelement hindurch tritt. Es ist außerdem zu beachten, dass \vec{B} eine gerichtete Größe ist, also ein Vektor. Die magnetische Flussdichte wird in der Elektrodynamik definiert als der Quotient aus der Kraft F, die ein vom Strom I durchflossener Leiter der Länge l in einem Magnetfeld erfährt, und dem Produkt dieser Stromstärke I und Leiterlänge l. Dabei fließt der Strom senkrecht zu den magnetischen Feldlinien:

$$B = \frac{F}{I \cdot l}$$

$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$, wobei \vec{H} die magnetische Feldstärke und μ die Permeabilität ist. Die Einheit der magnetischen Flussdichte ist im SI das Tesla mit dem Einheitenzeichen T:

$$[B] = 1 \frac{N}{Am} = 1 \frac{Nm}{Am^2} = 1 \frac{J}{Am^2} = 1 \frac{Ws}{Am^2} = 1 \frac{Vs}{m^2} = 1 T$$

5.17.3 Magnetfeld der Erde

Die Größe des Erdmagnetfeldes ist ca. $5 \cdot 10^{-5}$ Tesla.

Inklination Inklination bezeichnet in der Geophysik den Neigungswinkel des Erdmagnetfeldes zur Horizontalen. Da die Feldlinien die Materie durchdringen,

verlaufen sie auch in den Erdkörper hinein. Dies führt dazu, dass eine horizontal gelagerte Magnetnadel eine Neigung zeigt, die Inklination. Sie beträgt in Deutschland etwa 66 gegenüber der Horizontalen, an den Polen ca. 90, am Äquator 0.

Deklination Die Winkelabweichung zwischen magnetischem und geographischem Pol wird magnetische Deklination oder auch Missweisung genannt.

5.18 Kondensator

Ein Kondensator ist ein elektrisches Bauelement, das Energie in einem elektrischen Feld speichert. Er besteht aus zwei elektrisch leitenden Flächen, den Elektroden, und einem dazwischenliegenden Isolator, dem Dielektrikum. In den nebenstehenden Schaltzeichen symbolisieren die horizontalen Flächen die separierten Elektroden. Werden die Elektroden mit den Polen einer Gleichspannungsquelle verbunden, so fließt kurzzeitig ein elektrischer Strom, er lädt eine Elektrode positiv, die andere negativ auf. Diese Ladung des Kondensators bleibt erhalten, wenn er von der Spannungsquelle getrennt wird: der Kondensator behält deren Spannung bei. Entnimmt man dem Kondensator Ladung bzw. einen Strom, sinkt seine Spannung wieder. Die gespeicherte Ladung ist proportional zu der Spannung des Kondensators. Die Proportionalitätskonstante wird als Kapazität bezeichnet, sie ist das wesentliche Merkmal eines Kondensators. Je größer die Kapazität ist, umso mehr Ladung kann ein Kondensator bei einer bestimmten Spannung speichern. Die Gleichung $Q = C \cdot U$ fasst dies zusammen, Q bezeichnet die Ladung in Coulomb (C) oder Amperesekunden (As), C die Kapazität in Farad (F) und U die Spannung in Volt (V).

5.19 Spule

In der Elektrotechnik ist eine Spule ein passives Bauelement zur Erzeugung einer Induktivität. Die Induktivität (auch Eigeninduktivität oder Selbstinduktion) ist eine elektrische Eigenschaft eines stromdurchflossenen elektrischen Leiters. Sie gibt das Verhältnis zwischen dem mit dem Leiter verketteten magnetischen Fluss und dem durch den Leiter fließenden Strom an. Die Wirkung der Eigeninduktivität ist eine Selbstinduktionsspannung entlang der Leiterschleife bei einer zeitlichen Stromänderung in der Leiterschleife. Weiters wird zwischen innerer und äußerer Induktivität unterschieden. Wenn ausschließlich magnetische Stoffe mit einer konstanten Permeabilitätszahl in der Umgebung des Stromkreises vorhanden sind, dann folgt aus dem Durchflutungsgesetz, dass die magnetische Flussdichte dem Stromfluss i im Leiter proportional ist. Daher ist auch der insgesamt vom Stromfluss i erzeugte magnetischer Fluss F_g direkt proportional dem Momentanwert der Stromstärke i . Der dabei auftretende Proportionalitätsfaktor wird als Induktivität L bezeichnet: $\Phi_g = L \cdot i$ Die Maßeinheit für die Induktivität ist im SI-Einheitensystem das Henry, benannt nach dem US-amerikanischen Physiker Joseph Henry. Abgekürzt wird die Einheit mit H. Betragsmäßig liegt eine Induktivität von 1 H dann vor, wenn bei gleichförmiger

Stromänderung von einem Ampere in einer Sekunde eine Selbstinduktionsspannung von einem Volt entlang des Leiters entsteht.

5.19.1 Induktionsgesetz

Das Gesetz der elektromagnetischen Induktion, kurz Induktionsgesetz, beschreibt, unter welchen Bedingungen eine elektrische Spannung in einer Spule oder in einem Leiter hervorgerufen (induziert) wird. Eine Induktionsspannung kann durch die Änderung der magnetischen Feldstärke und damit der Flussdichte B (Transformatorprinzip) oder durch eine Änderung der vom Feld senkrecht durchsetzten Fläche A (Generatorprinzip) erfolgen. Beiden Anwendungen ist die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses gemeinsam. Ändert sich der Magnetfluss linear mit der Zeit gilt für die Induktionsspannung in einer Spule mit der Windungszahl N :

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta(A \cdot B)}{\Delta t}$$

5.20 Tangentenbussole

Die Tangentenbussole besteht aus einem kreisförmig gebogenen Kupferstreifen, dessen geradlinig nach abwärts gebogene Enden unten mit Klemmschrauben zur Aufnahme der von den Polen der galvanischen Batterie kommenden Drähte versehen sind. Im Mittelpunkt des kupfernen Ringes sitzt auf einer Spitze inmitten eines in Grade geteilten Kreises eine Magnetnadel; der Ring kann in seinem Fußgestell so gedreht werden, daß seine Ebene mit der Magnetnadel in ihrer Ruhelage (d. h. mit dem magnetischen Meridian) zusammenfällt. Sobald nun ein galvanischer Strom durch den Kupferring geht, wird die Nadel aus ihrer Ruhelage so weit abgelenkt, bis das Drehungsbestreben der erdmagnetischen Kraft, welche die Nadel in die Ebene des Ringes zurückführen will, demjenigen des galvanischen Stroms, welcher sie senkrecht zu dieser Ebene zu stellen strebt, das Gleichgewicht hält. Da die Wirkung des Erdmagnetismus auf ein und dieselbe Magnetnadel als unveränderlich angesehen werden kann, so läßt sich aus den Ablenkungen, welche verschiedene Ströme hervorbringen, auf die Stärke dieser Ströme schließen, und zwar ergibt sich aus obiger Gleichgewichtsbedingung, daß die Stromstärken sich verhalten wie die trigonometrischen Tangenten der Ablenkungswinkel. Eine Tangentenbussole zeigt, an welcher Stelle eines Schließungskreises man sie auch einschalten mag, immer die gleiche Ablenkung und gibt dadurch kund, daß die Stromstärke in einer geschlossenen Leitung überall gleich groß ist.

5.21 Wellenwiderstand

Mit Wellenimpedanz, sehr oft als Wellenwiderstand bezeichnet, wird eine Eigenschaft eines Mediums bezeichnet, in dem sich eine physikalische Welle fortpflanzt. Man kann ihn sich anschaulich etwa als die Härte oder Weichheit vorstellen, die das Medium der sich ausbreitenden Welle entgegengesetzt. Dadurch stehen z. B. Kraft und Bewegung (bei akustischen Wellen) oder Strom und Spannung

(bei elektromagnetischen Wellen) in einem bestimmten Verhältnis zueinander, das Wellenwiderstand genannt wird. Der Wellenwiderstand ist eine Kenngröße von längshomogenen Leitungen, wie Hohlleitern, Kabeln oder Einzeldrähten, die zur Beschreibung der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen auf ihnen wichtig ist. Je enger die Leiter beieinander sind, je dicker sie sind und je größer die Kapazität zwischen ihnen, desto geringer ist der Wellenwiderstand.

5.22 Lecherleitung

Die Lecher-Leitung ist eine Anordnung aus einer Zweidrahtleitung für Resonanzuntersuchungen und als Impedanzanpassung bei hohen elektrischen Frequenzen. Eine Lecherleitung ihrer ursprünglichen Art besteht aus zwei parallelen Drähten bestimmter Länge, die an ihrem Ende entweder offen oder miteinander verbunden sind. Längs dieses Leitungsstückes bilden sich Stehende Wellen entsprechend der speisenden Frequenz aus.

5.22.1 Stehende Wellen

Bei Überlagerung zweier sich gegenläufig ausbreitender Wellen derselben Frequenz und Amplitude kommt es zur Ausbildung von stehenden Wellen. Diese breiten sich nicht aus, sondern bilden räumlich konstante Schwingungsmuster: An den sogenannten Bewegungsbäuchen schwingen sie mit der verdoppelten Amplitude und der ursprünglichen Frequenz, an den dazwischenliegenden Bewegungsknoten ist die Amplitude zu allen Zeiten Null. Diese Erscheinung ist ein Sonderfall der Interferenz. Sie tritt insbesondere vor einer reflektierenden Wand auf oder auch zwischen zwei passend abgestimmten Wänden, die gemeinsam einen Resonator bilden.

5.23 Fadenstrahlrohr

In einen evakuierten Glaskolben wird etwas Wasserstoffgas gefüllt, so dass im Kolben eine Wasserstoffatmosphäre bei niedrigem Druck (ca. 1 Pa) entsteht. Der Druck ist so bemessen, dass die Elektronen durch Zusammenstöße möglichst wenig abgebremst werden (Änderung der kinetischen Energie), die Zahl der Zusammenstöße aber zu einem sichtbaren Leuchten ausreicht. Im Kolben befindet sich eine Elektronenkanone. Diese besteht aus einer Heizspirale, einer Kathode und einer Lochanode. Aus der Kathode treten Elektronen aus, die zur positiv geladenen Anode hin beschleunigt werden. Durch ein Loch in der Anode verlassen die Elektronen das Strahlerzeugungssystem. Beim Einschalten der Heizspannung erhitzt sich die Heizspirale und Elektronen treten aus ihr heraus. In dem elektrischen Feld zwischen Anode und Kathode wirkt das elektrische Feld auf die Elektronen, das diese auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt, sodass die Elektronen durch eine kleine Öffnung in der Anode diese als Elektronenstrahl verlassen. Da der Spulenstrom nicht eingeschaltet ist, wirkt keine Kraft auf den Strahl und er behält seine Richtung bei. Wird nun aber der Spulenstrom zusätzlich eingeschaltet, lenkt die Lorentzkraft die Elektronen auf eine

Kreisbahn.

5.23.1 Glühemission

Durch Beheizen einer im Vakuum befindlichen Glühwendel (Aufheizung der Wendel bei Stromfluss) gelingt es, Elektronen ins Vakuum zu bringen. Man nennt diesen Effekt Glühemission. Man kann die Elektronenemission einer beheizten Glühwendel mit dem Verdampfen von Wasser vergleichen: Im kalten Zustand können die Elektronen nicht aus der Metalloberfläche austreten, da dies die rücktreibenden Kräfte der positiven Atomrümpfe verhindern. Mit zunehmender Aufheizung der Glühwendel durch den Strom erreicht die thermische Geschwindigkeit von immer mehr Elektronen einen Wert, der das Verlassen des Metalls gestattet. Um die Wendel bildet sich eine negative Ladungswolke (Raumladung), die das weitere Austreten nachfolgender Elektronen hemmt.

5.23.2 Stoßionisation

Bei der Stoßionisation in der ursprünglichen Wortbedeutung werden Elektronen durch einfallende, hinreichend schnelle Elektronen aus Atomen oder Molekülen herausgeschlagen und diese dadurch ionisiert. Im weiteren Sinne kann man jede Ionisation so bezeichnen, die durch irgend einen Stoßvorgang (also beispielsweise beim photoelektrischen Effekt) erfolgt und nicht durch Wirkung eines elektrischen Feldes oder auf andere Weise.

5.24 Biot-Svart-Gesetz

Das Biot-Savart-Gesetz beschreibt das Magnetfeld, das durch bewegte elektrische Ladungen erzeugt wird. Es stellt neben dem Ampreschen Gesetz über die Kraftwirkung magnetischer Felder auf bewegte elektrische Ladungen eines der beiden Grundgesetze der Magnetostatik, eines Teilgebiets der Elektrodynamik, dar. Danach erzeugt eine Punktladung Q , die sich am Ort \vec{r}_Q mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegt, im SI-Einheitensystem ein Magnetfeld $\vec{B}(\vec{r})$ nach $\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 Q}{4\pi} \frac{\vec{v} \times (\vec{r} - \vec{r}_Q)}{\|\vec{r} - \vec{r}_Q\|^3}$. Dabei ist μ_0 die Permeabilität.

5.25 Elektromotorische Kraft

Die elektromotorische Kraft (Abkürzung EMK) ist die historische Bezeichnung für die stromlos gemessene Klemmenspannung einer Galvanischen Zelle oder allgemein einer jeden Spannungsquelle. Der Begriff wird auch für die Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden einer elektrochemischen Zelle verwendet. Die elektromotorische Kraft wird in Formeln mit dem Symbol ΔE gekennzeichnet, die Einheit ist Volt. Aufgrund der EMK ist das Galvanische Element in der Lage elektrische Arbeit zu leisten. Die EMK berechnet sich aus der Differenz der beiden Halbzellenpotentiale, die durch die jeweiligen Redox-Reaktionen bestimmt werden.

5.26 Klemmenspannung

Klemmenspannung oder Polspannung ist ein Begriff aus der Elektrotechnik. Sie bezeichnet die elektrische Spannung (Formelzeichen U), die zwischen den zwei Anschlüssen einer Strom- oder Spannungsquelle gemessen werden kann. Die Bezeichnung leitet sich von den Anschlüssen der Stromquellen her, hier werden bei höheren Stromstärken die verbindenden Leiter mittels einer Schraubverbindung festgeklemmt. Sie ist die Differenz aus Leerlaufspannung (U_0) (historische Bezeichnung: Elektromotorische Kraft EMK) und dem Produkt aus Ausgangswiderstand (im allgemeinen Fall die Impedanz: Z_i) der Spannungsquelle und dem Strom (I) oder einfach Strom mal Eingangswiderstand (Z_a). $U = U_0 - I \cdot Z_i$

5.27 Kurzschlussstrom

Ein hoher Kurzschlussstrom kann nur entstehen, wenn zwischen der Verbindung kein Wirk- oder Blindwiderstand mehr liegt. Hat der Widerstand zwischen den spannungsführenden Leitern noch einen sehr geringen Wert, dann spricht man von einem kurzschlussähnlichen Vorgang. Bei einem Kurzschluss zwischen den Polen einer Batterie oder Spannung führenden Außenleitern beziehungsweise einem Außen- und dem Neutralleiter einer Drehstromanlage erreicht der Strom seinen Maximalwert, den Kurzschluss-Strom. Dieser Strom wird nur durch den Widerstand der Leitung und den in Reihe liegenden Innenwiderstand R_i der Stromquelle begrenzt. Der Kurzschluss-Strom beträgt daher: $I_K = \frac{U}{Z}$, wobei U die Spannung der Stromquelle, Z die Summe aller Impedanzen (Wirk- und Blindwiderstände) in der Kurzschluss-Strombahn bedeutet.

5.28 Transistor

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zum Schalten und zum Verstärken von elektrischen Strömen und Spannungen verwendet wird. Die Bezeichnung ist eine Kurzform für die englische Bezeichnung Transfer Varistor oder Transformation Resistor die den Transistor als einen durch Strom steuerbaren Widerstand (engl. resistor) beschreiben sollte.

5.28.1 Bipolartransistor

Ein Bipolartransistor, ist ein Transistor, bei dem Ladungsträger beider Polarität (Elektronen und Defektelektronen) zur Funktion beitragen. Es gibt npn-Typen und pnp-Typen, die Buchstaben geben die Reihenfolge und den Dotierungstyp der Schichtung an. Somit bildet ein Bipolartransistor im Wesentlichen immer zwei gegeneinander geschaltete Dioden. Die drei Anschlüsse werden Kollektor (C, collector) Basis (B, base) und Emitter (E, emitter) genannt. Ein Transistor ist nun eine Kombination aus drei abwechselnden p- und n-dotierten Halbleiterschichten (nnp beziehungsweise pnp). Sie werden als Kollektor (C), Basis (B) und Emitter (E) bezeichnet. Die Basis ist besonders dünn und liegt zwischen Kollektor und Emitter. Dieser asymmetrische Aufbau bewirkt ein unterschiedliches Verhalten im Normal- und Inversbetrieb.

5.29 Vierpol

Ein Vierpol (auch Zweitor genannt) beschreibt in der Elektrotechnik ein Bauelement mit vier Anschlüssen (Klemmen) bzw. zwei Klemm-Paaren (Toren). Das Klemmverhalten eines Vierpols wird durch seine Übertragungsfunktion oder seinen Frequenzgang beschrieben. Hieraus lassen sich so genannte Vierpolgleichungen gewinnen, aus denen wiederum verschiedene Vierpolparameter abgelesen werden können.