

---

# Spinelektronik

---

Vorlesungsskript zur Vorlesung im SS 2004

Prof. Dr. Rudolf Gross

und

Dr. Achim Marx

Walther-Meissner-Institut

Lehrstuhl für Technische Physik (E23)

Walther-Meissner-Strasse 8

D-85748 Garching

Rudolf.Gross@wmi.badw.de



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>9</b>
<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I Grundlagen</b>	<b>9</b>
<b>1 Grundbegriffe und Messmethoden</b>	<b>11</b>
1.1 Grundbegriffe des Magnetismus . . . . .	12
1.2 Messmethoden . . . . .	13
<b>2 Spinabhängiger Transport</b>	<b>15</b>
2.1 Magnetoresistive Effekte – ein phänomenologischer Überblick . . . . .	16
2.1.1 Der positive Magnetwiderstand . . . . .	16
2.1.2 Der negative Magnetwiderstand – Streuung an Spinunordnung . . . . .	17
2.1.3 Der anisotrope Magnetwiderstand – AMR . . . . .	18
2.1.4 Der Riesenmagnetwiderstand – GMR . . . . .	19
2.1.5 Der Tunnelmagnetwiderstand – TMR . . . . .	22
2.1.6 Der kolossale Magnetwiderstand – CMR . . . . .	24
2.2 Elektrischer Transport in unmagnetischen Metallen . . . . .	28
2.2.1 Boltzmann-Gleichung und Relaxationszeit . . . . .	28
2.2.2 Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	33
2.2.3 Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Einbandmodell . . . . .	36
2.2.4 Vertiefungsthema: Magnetwiderstand und Hall-Effekt im Zweibandmodell . . . . .	38
2.2.5 Streuprozesse . . . . .	42
2.2.6 Streuprozesse in dünnen metallischen Schichten . . . . .	48
2.3 Elektrischer Transport in magnetischen Metallen . . . . .	52

2.3.1	Experimentelle Beobachtungen . . . . .	52
2.3.2	Das Zwei-Spinkanal-Modell . . . . .	54
2.3.3	Streuung in magnetischen Systemen . . . . .	57
2.3.4	Streuung von Leitungselektronen an lokalisierten magnetischen Momenten	61
2.3.5	Vertiefungsthema: Der Kondo-Effekt . . . . .	67
2.3.6	Vertiefungsthema: Einfluss der Leitungselektronen auf lokale magnetische Momente . . . . .	69
2.3.7	Vertiefungsthema: Der Kondo-Widerstand . . . . .	73
2.3.8	Hall-Effekt in ferromagnetischen Metallen . . . . .	75
<b>II</b>	<b>Magneto-resistive Effekte</b>	<b>83</b>
<b>3</b>	<b>AMR-Effekt</b>	<b>85</b>
3.1	Experimentelle Beobachtungen . . . . .	86
3.2	Anschauliche Erklärung des AMR . . . . .	88
3.3	Widerstandstensor und AMR-Effekt . . . . .	91
3.3.1	Anwendungsaspekte . . . . .	92
3.4	Außergewöhnlicher Hall-Effekt . . . . .	94
<b>4</b>	<b>CMR-Effekt</b>	<b>95</b>
4.1	Experimentelle Beobachtungen . . . . .	97
4.2	Kristallstruktur . . . . .	99
4.2.1	Toleranzfaktor . . . . .	99
4.2.2	Vertiefungsthema: Ruddlesden-Popper-Serie . . . . .	102
4.3	Elektronische Struktur . . . . .	103
4.3.1	Das Kristallfeld . . . . .	103
4.3.2	Jahn-Teller-Effekt . . . . .	108
4.4	Grundlagen zur magnetischen Struktur . . . . .	113
4.4.1	Experimentelle Beobachtungen . . . . .	113
4.4.2	Der Superaustausch . . . . .	114
4.4.3	Vertiefungsthema: Ladungstransfer- und Mott-Hubbard-Isolatoren . . . . .	117
4.4.4	Die Goodenough-Kanamori-Anderson Regeln . . . . .	120

4.4.5	Der Doppelaustausch . . . . .	124
4.5	Elektrische Transporteigenschaften . . . . .	132
4.5.1	Temperatur- und Magnetfeldabhängigkeit des spezifischen Widerstands .	132
4.5.2	Skalenverhalten des CMR-Effektes . . . . .	134
<b>5</b>	<b>GMR-Effekt</b>	<b>137</b>
5.1	Zwischenschicht-Austauschkopplung . . . . .	139
5.1.1	Experimentelle Beobachtungen . . . . .	139
5.1.2	Kopplungsarten . . . . .	140
5.1.3	Phänomenologische Beschreibung der Zwischenschichtkopplung . . . . .	143
5.1.4	Mikroskopisches Modell der Zwischenschichtkopplung . . . . .	144
5.1.5	RKKY-Wechselwirkung . . . . .	152
5.2	Der Riesenmagnetwiderstand . . . . .	154
5.2.1	Einfache Modellvorstellungen . . . . .	154
5.2.2	Intrinsischer GMR . . . . .	157
5.2.3	Extrinsischer GMR . . . . .	160
5.3	Skalenverhalten des GMR . . . . .	165
5.3.1	Anwendungsaspekte . . . . .	166
<b>6</b>	<b>Spinventile</b>	<b>169</b>
6.1	Austausch-Anisotropie . . . . .	171
6.1.1	Phänomenologische Beschreibung der Austausch-Anisotropie . . . . .	171
6.1.2	Theoretische Modelle zur Austausch-Anisotropie . . . . .	176
6.2	Realisierung von Spinventilen . . . . .	187
6.2.1	Optimierung des magnetoresistiven Effekts von Spinventilen . . . . .	188
6.2.2	Wahl des Antiferromagneten . . . . .	190
<b>7</b>	<b>TMR-Effekt</b>	<b>195</b>
7.1	Theoretische Behandlung des Tunnelns von Elektronen . . . . .	198
7.1.1	Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitunabhängiger Ansatz . . . . .	198
7.1.2	Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale rechteckförmige Barriere – zeitabhängiger Ansatz . . . . .	202
7.1.3	Elastisches Tunneln durch eine eindimensionale Barriere beliebiger Form – WKB-Näherung . . . . .	203
7.1.4	Elastisches Tunneln in planaren Metall/Isolator/Metall-Kontakten . . . . .	204

7.1.5	Tunneln unter Berücksichtigung des Bildpotenzials . . . . .	208
7.1.6	Bandstruktureffekte beim elastischen Tunneln . . . . .	209
7.1.7	Resonantes Tunneln . . . . .	210
7.2	NIN- und NIS-Kontakte . . . . .	213
7.3	Ferromagnet/Isolator/Supraleiter-Kontakte . . . . .	217
7.3.1	Zeemann-Aufspaltung der Quasiteilchen-Zustandsdichte in Supraleitern	217
7.3.2	Zustandsdichte und Spinpolarisation in Ferromagneten . . . . .	219
7.4	FM/S-Kontakte – Andreev-Reflexion . . . . .	227
7.4.1	Andreev-Streuung an Metall/Supraleiter-Grenzflächen . . . . .	227
7.4.2	Andreev-Streuung an Ferromagnet/Supraleiter-Grenzflächen . . . . .	234
7.5	FM/I/FM-Tunnelkontakte . . . . .	239
7.5.1	Jullière – Modell . . . . .	241
7.5.2	Weiterentwicklungen des Jullière-Modells . . . . .	242
7.6	Experimente zu FM/I/FM-Tunnelkontakten . . . . .	249
7.6.1	Untersuchung und Verbesserung der Barriereneigenschaften . . . . .	251
7.6.2	Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des JMR . . . . .	253
7.6.3	Dotierung der Tunnelbarriere . . . . .	256
7.6.4	FM/I/FM Tunnelkontakte mit nichtmagnetischen Zwischenschichten . .	258
7.6.5	Grenzflächeneffekte und Vorzeichen der Spinpolarisation . . . . .	259
7.6.6	Neue Materialsysteme . . . . .	261
7.6.7	Rastertunnelmikroskopie . . . . .	263
7.7	Inelastisches Tunneln . . . . .	266
7.7.1	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in der Barriere . . .	266
7.7.2	Inelastisches Tunneln mit Wechselwirkungsprozessen in den Tunnelek- troden . . . . .	269
7.7.3	Tunneln über Zwischenzustände – Glazmann-Matveev Modell . . . . .	269
7.8	Tunneln durch ferromagnetische Barrieren – Spinfilter . . . . .	275
7.9	Austauscheffekte an Grenzflächen zu Ferromagneten . . . . .	278
<b>8</b>	<b>EMR- und BMR-Effekt</b>	<b>281</b>

<b>III</b>	<b>Spininjektion und Spintransport</b>	<b>283</b>
<b>IV</b>	<b>Materialien für die Spinelektronik</b>	<b>285</b>
<b>V</b>	<b>Anwendungen</b>	<b>287</b>
<b>9</b>	<b>XMR-Effekte – Anwendungen</b>	<b>289</b>
9.1	Sensoren . . . . .	292
9.1.1	GMR Sensoren . . . . .	295
9.1.2	Anwendungen von GMR-Sensoren . . . . .	301
9.2	Magnetoresistive Leseköpfe . . . . .	306
9.2.1	Design von Lese- und Schreibköpfen . . . . .	308
9.3	Magnetic Random Access Memory – MRAM . . . . .	313
9.3.1	Geschichtlicher Hintergrund . . . . .	313
9.3.2	MRAM basierend auf AMR und GMR . . . . .	316
9.3.3	MRAM basierend auf Spinventilen . . . . .	318
9.3.4	MRAM basierend auf magnetischen Tunnelkontakten . . . . .	318
9.3.5	Ansteuerkonzepte für MRAMs . . . . .	320
<b>VI</b>	<b>Quanten-Spinelektronik</b>	<b>325</b>
<b>VII</b>	<b>Appendix</b>	<b>327</b>
A	Literatur . . . . .	329
B	SI-Einheiten . . . . .	330
B.1	Geschichte des SI Systems . . . . .	330
B.2	Die SI Basiseinheiten . . . . .	332
B.3	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten . . . . .	333
B.4	Vorsätze . . . . .	335
B.5	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren . . . . .	336
C	Physikalische Konstanten . . . . .	340

**Teil I**

**Grundlagen**





## **Teil II**

# **Magnetoresistive Effekte**





## **Teil III**

# **Spininjektion und Spintransport**



## **Teil IV**

# **Materialien für die Spinelektronik**



**Teil V**

**Anwendungen**





## **Teil VI**

# **Quanten-Spinelektronik**



**Teil VII**

**Appendix**



## B SI-Einheiten

Das aus dem metrischen System weiterentwickelte Internationale Einheitensystem SI (*Système Internationale d'Unités*) enthält als die 7 Basiseinheiten *Meter* (m), *Kilogramm* (kg), *Sekunde* (s), *Ampère* (A), *Kelvin* (K), *Candela* (Cd) und *Mol* (mol). Hinzu kommen die beiden ergänzenden Einheiten *Radiant* und *Steradian*. Seit dem 01. 01. 1978 ist in der Bundesrepublik Deutschland die Verwendung des SI-Einheitensystems im amtlichen und geschäftlichen Verkehr gesetzlich vorgeschrieben.

Abgeleitete SI-Einheiten werden durch Multiplikation und Division aus den SI-Basiseinheiten, immer mit dem Faktor 1 (kohärent), gebildet.

Für viele abgeleitete SI-Einheiten wurden besondere Namen und Einheitenzeichen festgelegt, z.B. Newton (N) für die Einheit der Kraft und Volt (V) für die der elektrischen Spannung.

Das SI ist weltweit von der internationalen und nationalen Normung übernommen worden (z.B. ISO 1000, DIN 1301). In den EU-Mitgliedstaaten ist es die Grundlage für die Richtlinie über Einheiten im Messwesen (EU-Richtlinien 80/181 und 89/617).

Ausführliche Informationen zum SI Einheitensystem findet man bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt unter <http://www.ptb.de> oder dem National Institut of Standards unter <http://www.physics.nist.gov>.

### B.1 Geschichte des SI Systems

Bis kurz vorm Mars war noch alles in Ordnung. Doch dann passierte das Unglück: Statt eine stabile Umlaufbahn einzunehmen, kam der Mars Climate Orbiter dem roten Planeten zu nahe und verglühte in seiner Atmosphäre. Das war im September 1999. Sofort begann eine fiebrige Suche nach der Ursache für den Fehler. Das Ergebnis war kaum zu glauben: Die beiden NASA-Kontrollzentren in Denver und Pasadena hatten mit unterschiedlichen Maßeinheiten gerechnet: das eine Team in Metern und Kilogramm, das andere in Foot und Pound – über ein Jahrhundert, nachdem sich die USA und 16 andere Staaten darauf geeinigt hatten, künftig nur noch das metrische System zu verwenden – und 40 Jahre, nachdem nahezu weltweit die (auf dem metrischen System beruhenden) SI-Einheiten eingeführt waren.

Ein peinlicher Vorfall – und ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wie wichtig es ist, dass alle Welt mit gleichem Maß misst. *Für alle Welt, für alle Völker* – dieses Motto wurde zur Zeit der Französischen Revolution geprägt, als in Frankreich die neue Längeneinheit "Meter" entstand. Das neue Maß wurde zur Grundlage des internationalen metrischen, dezimalen Maßsystems, das ein großes Durcheinander bei den Maßeinheiten beendete. Über die Einhaltung und Weiterentwicklung des metrischen Systems wachen die Organe der Meterkonvention. Ihr ausführendes Organ, die Generalkonferenz für Maß und Gewicht, tagte zum ersten Mal im Jahr 1889. Sie genehmigte Prototypen für das Meter und das Kilogramm und verteilte sie an die Mitgliedstaaten. Auf den folgenden Treffen ging es vor allem um ein Ziel: ein neues internationales Einheitensystem zu schaffen. 1948 verabschiedete die 9. Generalkonferenz für Maß und Gewicht einen Entwurf für ein solches Einheitensystem, das zunächst auf sechs Basiseinheiten beruhte. Alle anderen Einheiten sind mit diesen Basiseinheiten ausschließlich über Multiplikation und Division verbunden. Der große Vorteil dieses Systems: Sämtliche Umrechnungsfaktoren fielen weg.

Die 10. Generalkonferenz für Maß und Gewicht im Jahr 1954 nahm die sechs Basiseinheiten offiziell an: Länge (Meter), Masse (Kilogramm), Zeit (Sekunde), elektrische Stromstärke (Am-

pere), thermodynamische Temperatur (Kelvin) und Lichtstärke (Candela). Eine siebte Basiseinheit, die der Stoffmenge (Mol), kam erst 1973 dazu. Sie wird heute üblicherweise an sechster Stelle genannt. Diese Änderung der historisch gewachsenen Reihenfolge hat das Internationale Büro für Maß und Gewicht (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) veranlasst, um auszudrücken, dass die Entwicklung in der Optik möglicherweise zu einer Diskussion über die Candela als Basiseinheit führen wird.

Im Jahr 1960 bekam das neue System seinen Namen: *Système International d'Unités*, abgekürzt SI. Die 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht im Jahr 1960 vereinbarte, dass diese Abkürzung in allen Sprachen zu verwenden ist, und verabschiedete Vorsätze zur Bezeichnung der dezimalen Vielfache und Teile von Einheiten. In Deutschland wurde das neue System mit dem Gesetz über Einheiten im Messwesen (Einheitengesetz) vom 2. Juli 1969 und der Ausführungsverordnung zu dem Gesetz vom 5. Juli 1970 eingeführt. Seit dem 1. Januar 1978 sind die alten Einheiten in Deutschland verboten.

## B.2 Die SI Basiseinheiten

Größe	Abkürzung	Name der Einheit	Symbol	Definition
Länge	$l$	Meter	m	Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $(1/299\,792\,458)$ Sekunden durchläuft.
Masse	$m$	Kilogramm	kg	Das Kilogramm ist die Einheit der Masse; es ist gleich der Masse des Internationalen Kilogrammprototyps (Ur-Kilogramm, 1889).
Zeit	$t$	Sekunde	s	Die Sekunde ist das $9\,192\,631\,770$ fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids $^{133}\text{Cs}$ entsprechenden Strahlung.
elektrische Stromstärke	$I$	Ampère	A	Das Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von einem Meter voneinander angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je einem Meter Leiterlänge die Kraft $2 \times 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.
Temperatur	$T$	Kelvin	K	Das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist der $273.16$ -te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.
Lichtstärke	$J$	Candela	cd	Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \times 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $(1/683)$ Watt durch Steradian beträgt.

*Fortsetzung auf nächster Seite*

---

*Fortsetzung von letzter Seite*

---

Größe	Abkürzung	Name der Einheit	Symbol	Definition
Stoffmenge	$n$	Mol	mol	Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviel Einzelteilchen besteht, wie Atome in 0,012 Kilogramm des Kohlenstoffnuklids $^{12}\text{C}$ enthalten sind. Bei Benutzung des Mol müssen die Einzelteilchen spezifiziert sein und können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen sowie andere Teilchen oder Gruppen solcher Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein.

### ergänzende SI Einheiten:

ebener Winkel	$\vartheta$	Radian	rad
Raumwinkel	$\Omega$	Steradian	sr

---

### B.3 Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten

---

Größe	Abkürzung	Name der Einheit	Symbol	SI-Einheit
Frequenz	$\nu$	Hertz	Hz	$\text{s}^{-1}$
Kreisfrequenz	$\omega$	Radian/Sekunde		$\text{s}^{-1}$
Geschwindigkeit	$v$	Meter/Sekunde		$\text{ms}^{-1}$
Beschleunigung	$a$	Meter/Sekunde <sup>2</sup>		$\text{ms}^{-2}$
Winkelgeschwindigkeit	$\omega$	Radian/Sekunde		$\text{s}^{-1}$
Winkelbeschleunigung	$\alpha$	Radian/Sekunde <sup>2</sup>		$\text{s}^{-2}$
Kraft	$F$	Newton	N	
Energie	$E$	Joule	J	$\text{m}^2\text{kgs}^{-2}$
Leistung	$P$	Watt	W	$\text{m}^2\text{kgs}^{-3}$
Druck	$p$	Pascal	Pa	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$
Ladung	$Q$	Coulomb	C	As
Spannung (Potenzial)	$U$	Volt	V	$\text{m}^2\text{kgs}^{-3}\text{A}^{-1}$
elektrische Feldstärke	$E$	Volt/Meter	V/m	$\text{mkgs}^{-3}\text{A}^{-1}$
elektrische Polarisierung	$P$	Coulomb/Meter	C/m	$\text{Asm}^{-1}$

*Fortsetzung auf nächster Seite*

---

---

*Fortsetzung von letzter Seite*

---

<b>Größe</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Name der Einheit</b>	<b>Symbol</b>	<b>SI-Einheit</b>
elektrische Flussdichte	$D$	Coulomb/Meter <sup>2</sup>	$C/m^2$	$Asm^{-2}$
elektrischer Widerstand	$R$	Ohm	$\Omega$	$m^2kgs^{-3}A^{-2}$
elektrische Leitfähigkeit	$\sigma$	Siemens/Meter	$S/m$	$m^{-3}kg^{-1}s^3A^2$
magnetische Flussdichte	$B$	Tesla	$T=Vs/m^2$	$kgs^{-2}A^{-1}$
magnetische Feldstärke	$H$	Ampère/Meter		$A/m$
magnetischer Fluss	$\Phi$	Weber	$Wb=Vs/m^2$	$m^2kgs^{-2}A^{-1}$
Selbstinduktion	$L$	Henry	$H=Vs/Am^2$	$m^2kgs^{-2}A^{-2}$
Wärmekapazität	$C$	Joule/Kelvin	$J/K$	$m^2kgs^{-2}K^{-1}$
Entropie	$S$	Joule/Kelvin	$J/K$	$m^2kgs^{-2}K^{-1}$
Enthalpie	$J$	Joule	$J$	$m^2kgs^{-2}$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	Watt/Meter Kelvin	$W/mK$	$mkgs^{-3}K^{-1}$

---

**B.4 Vorsätze**

<b>Faktor</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Abkürzung</b>
$10^{18}$	Exa	E
$10^{15}$	Peta	P
$10^{12}$	Tera	T
$10^9$	Giga	G
$10^6$	Mega	M
$10^3$	Kilo	k
$10^2$	Hekto	h
$10^1$	Deka	da
$10^{-1}$	Dezi	d
$10^{-2}$	Zenti	c
$10^{-3}$	Milli	m
$10^{-6}$	Mikro	$\mu$
$10^{-9}$	Nano	n
$10^{-12}$	Pico	p
$10^{-15}$	Femto	f
$10^{-18}$	Atto	a

## B.5 Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren

In der Bundesrepublik Deutschland ist das Gesetz über Einheiten im Messwesen die Rechtsgrundlage für die Angabe physikalischer Größen in gesetzlichen Einheiten. Es verpflichtet zu ihrer Verwendung im geschäftlichen und amtlichen Verkehr. Die gesetzlichen Einheiten sind in den folgenden Tabellen farbig hinterlegt. Die Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Messwesen (Einheitenverordnung) verweist auf die Norm DIN 1301.

### Länge, Fläche, Volumen

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Ångström	Å	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$
Astronomische Einheit	AE	$1 \text{ AE} = 1.4960 \times 10^{11} \text{ m}$
Fermi	fm	$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
inch	inch	$1 \text{ inch} = 0.254 \text{ m}$
foot	ft	$1 \text{ ft} = 0.3038 \text{ m}$
yard	yd	$1 \text{ yard} = 0.9144 \text{ m}$
mile	mile	$1 \text{ mile} = 1609 \text{ m}$
Lichtjahr	Lj	$1 \text{ Lj} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$
Parsekunde	pc	$1 \text{ pc} = 30.857 \times 10^{15} \text{ m}$
Ar	a	$1 \text{ a} = 100 \text{ m}^2$
Hektar	ha	$1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$
barn	b	$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$
Liter	l	$1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
gallon	gal (US)	$1 \text{ gal} = 3.7851 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
barrel	bbl	$1 \text{ bbl} = 158.988 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

### Masse

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Atomare Masseneinheit	u	$1 \text{ u} = 1.660\,565\,5 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Tonne	t	$1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$
metrisches Karat		$1 \text{ Karat} = 2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
pound	lb	$1 \text{ lb} = 0.4536 \text{ kg}$
ounce	oz	$1 \text{ oz} = 1/16 \text{ lb} = 0.02835 \text{ kg}$

## Zeit, Frequenz

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Tag	d	1 d = 86400 s
Stunde	h	1 h = 3600 s
Minute	min	1 min = 60 s
Jahr (tropisches)	a	1 a = 365.24 d = $3.156 \times 10^7$ s
Hertz	Hz	1 Hz = $1 \text{ s}^{-1}$

## Temperatur

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Grad Celsius	°C	$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 (\text{K})$
Grad Fahrenheit	°F	$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} T(^{\circ}\text{C}) + 32$

## Winkel

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Radian	rad	1 rad = 1 m/m
Grad	°	$1^{\circ} = (2\pi/360) \text{ rad} = 1.745 \times 10^{-2} \text{ rad}$
Winkelminute	'	$1' = 2.91 \times 10^{-4} \text{ rad}$
Winkelsekunde	"	$1'' = 4.85 \times 10^{-6} \text{ rad}$
Neugrad	gon	$1 \text{ gon} = 2\pi/400 \text{ rad}$

## Kraft, Druck, Viskosität

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/s}^2$
Dyn	dyn	$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N} = 1 \text{ gcm/s}^2$
Kilopond	kp	$1 \text{ kp} = 1 \text{ kg} \cdot g = 9.8067 \text{ N}$
Pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/ms}^2$
Bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
Atmosphäre (physikalisch)	atm	$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$
Atmosphäre (technisch)	at	$1 \text{ at} = 98\,066 \text{ Pa}$
Torr, mmHg	Torr	$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa}$
Poise	P	$1 \text{ P} = 0.1 \text{ Pa s}$
psi	lb/in <sup>2</sup>	$1 \text{ psi} = 6895.0 \text{ Pa s}$

## Energie, Leistung, Wärmemenge

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$
Kilowattstunde	kWh	$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 860 \text{ kcal}$
Kalorie	cal	$1 \text{ cal} = 4.187 \text{ J}$
Erg	erg	$1 \text{ erg} = 1 \text{ g cm}^2/\text{s}^2 = 10^{-7} \text{ kgm}^2/\text{s}^2 = 10^{-7} \text{ J}$
Elektronenvolt	eV	$1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}$ $1 \text{ eV}$ entspricht $11\,604 \text{ K}$ ( $E = k_B T$ ) $1 \text{ eV}$ entspricht $2.4180 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ( $E = h \nu$ )
Watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^3$
Pferdestärke	PS	$1 \text{ PS} = 735.6 \text{ W}$

## Elektromagnetische Einheiten

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Coulomb	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A s}$
Volt	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ J/A s} = 1 \text{ kg m}^2/\text{A s}^3$
Farad	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V} = 1 \text{ A}^2 \text{ s}^4/\text{kg m}^2$
Ohm	$\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ kg m}^2/\text{A}^2 \text{ s}^3$
Siemens	S	$1 \text{ S} = 1/\Omega$
Tesla	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ kg/A s}^2$
Gauß	G	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
Oersted	Oe	$1 \text{ Oe} = (10^3/4\pi) \text{ A/m}$ , entspricht $1 \text{ G}$ ( $B = \mu_0 H$ )
Henry	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/A} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg/A}^2 \text{ s}^2$
Weber	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V s} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg/A s}^2$
Maxwell	M	$1 \text{ M} = 10^{-8} \text{ Wb}$