
Physik IV

Atome, Moleküle, Wärmestatistik

Vorlesungsskript zur Vorlesung im SS 2003

Prof. Dr. Rudolf Gross

Walther-Meissner-Institut
Bayerische Akademie der Wissenschaften
und
Lehrstuhl für Technische Physik (E23)
Technische Universität München

Walther-Meissner-Strasse 8
D-85748 Garching
Rudolf.Gross@wmi.badw.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	xiii
I Physik der Atome und Moleküle	1
1 Einführung in die Quantenphysik	3
1.1 Der Welle-Teilchen Dualismus	4
1.1.1 Dualismus des Lichtes	4
1.1.2 Dualismus der Materie	6
1.2 Materiewellen und Wellenfunktionen	10
1.2.1 Wellenpakete	11
1.2.2 Die Heisenbergsche Unschärferelation	13
1.2.3 Messprozess und Observable	17
1.2.4 Dispersion von Materiewellen	17
1.2.5 Gegenüberstellung Quantenphysik – klassische Physik	19
1.3 Grundlagen der Quantenmechanik	22
1.3.1 Schrödinger-Gleichung und Materiewellen	22
1.3.2 Operatoren	29
1.3.3 Erwartungswerte	33
1.3.4 Eigenwerte und Eigenfunktionen	34
1.3.5 Zulässige Operatoren	36
1.3.6 Vertiefungsthema: Quantenmechanische Bewegungsgleichung	37
1.3.7 Vertiefungsthema: Vertauschungsrelationen und Heisenbergsche Unschärferelation	38
1.3.8 Anwendungen	40
1.4 Ununterscheidbarkeit	41
1.5 Fermionen und Bosonen	45

1.5.1	Der Spin von Quantenteilchen	45
1.5.2	Quantenteilchen mit ganz- und halbzahligem Spin	46
1.6	Austauschsymmetrie und Pauli-Verbot	48
1.6.1	Die Austauschsymmetrie	48
1.6.2	Das Pauli-Verbot	50
1.7	Vertiefungsthema: Zur Axiomatik der Quantenmechanik	52
2	Aufbau der Atome	57
2.1	Historisches	58
2.2	Experimenteller Nachweis der Existenz von Atomen	59
2.3	Größe, Masse und elektrischer Aufbau von Atomen	63
2.3.1	Größe von Atomen	63
2.3.2	Der elektrische Aufbau von Atomen	64
2.3.3	Bestimmung der Atommasse	65
2.4	Die Struktur von Atomen	69
2.4.1	Geschichtliche Entwicklung	69
2.4.2	Grundlagen zu Streuexperimenten	71
3	Das Einelektronenatom	81
3.1	Experimentelle Grundlagen	82
3.1.1	Spektralanalyse	82
3.1.2	Anregung von Atomen	83
3.1.3	Das Spektrum des Wasserstoffs	84
3.2	Das Bohrsche Atommodell	88
3.3	Die Schrödinger-Gleichung für Einelektronenatome	94
3.3.1	Schwerpunkt- und Relativbewegung	94
3.3.2	Teilchen im kugelsymmetrischen Potenzial	96
3.3.3	Winkelabhängigkeit	98
3.3.4	Der Drehimpuls	106
3.3.5	Die Radialabhängigkeit	113
3.3.6	Quantenzahlen	119
3.3.7	Aufenthaltswahrscheinlichkeiten	122
3.4	Der Elektronenspin	125
3.4.1	Experimentelle Fakten	125
3.4.2	Vertiefungsthema: Theoretische Beschreibung des Spins	127

4	Das Wasserstoffatom	135
4.1	Experimentelle Befunde	136
4.2	Relativistische Korrektur der Energieniveaus	137
4.3	Die Spin-Bahn-Kopplung: Feinstruktur	139
4.3.1	Der Spin-Bahn-Kopplungsterm	139
4.3.2	Der Gesamtdrehimpuls	141
4.3.3	Energieniveaus des Wasserstoffatoms bei Spin-Bahn-Kopplung	143
4.3.4	Die Feinstruktur beim Wasserstoffatom	145
4.4	Die Lamb-Shift	148
4.5	Die Hyperfeinstruktur	154
4.6	Das Wasserstoffatom im Magnetfeld: Normaler Zeeman-Effekt	159
4.6.1	Klassisches Teilchen im Magnetfeld	159
4.6.2	Vertiefungsthema: Quantenmechanische Beschreibung	165
4.7	Anomaler Zeeman- und Paschen-Back-Effekt	168
4.7.1	Der anomale Zeeman-Effekt	168
4.7.2	Der Paschen-Back-Effekt	172
4.8	Der Stark-Effekt	175
4.9	Vollständiges Termschema des Wasserstoffatoms	176
4.10	Vertiefungsthemen	178
4.10.1	Das Modell des Elektrons	178
4.10.2	Vertiefungsthema: Das Korrespondenzprinzip	180
5	Wasserstoffähnliche Systeme	185
5.1	He^+ , Li^{++} und Be^{+++}	186
5.2	Die schweren Wasserstoffisotope	187
5.3	Rydbergatome	188
5.4	Exotische Atome	191
5.4.1	Myonische Atome	191
5.4.2	Anti-Wasserstoff	193
5.4.3	Positronium	194
5.5	Quarkonium	196
5.6	Exzitonen	196

6	Übergänge zwischen Energieniveaus	199
6.1	Übergangswahrscheinlichkeiten	200
6.1.1	Spontane und stimulierte Übergänge	200
6.2	Lebensdauer angeregter Zustände	205
6.3	Linienbreiten von Spektrallinien	208
6.3.1	Natürliche Linienbreite	209
6.3.2	Dopplerverbreiterung	211
6.3.3	Stoßverbreiterung	213
6.4	Übergangsmatrixelemente	217
6.4.1	Parität	219
6.4.2	Auswahlregeln	221
6.4.3	Auswahlregeln für die Bahndrehimpulsquantenzahl – Paritätsauswahlregeln . . .	222
6.4.4	Auswahlregeln für die magnetische Quantenzahl	223
6.4.5	Auswahlregeln für die Spinquantenzahl	227
6.4.6	Stärke des Dipolübergangs	228
6.4.7	Vertiefungsthema: Multipol-Übergänge höherer Ordnung	232
6.4.8	Vertiefungsthema: Zwei-Photonen-Übergänge	232
6.4.9	Vertiefungsthema: Spektrales Lochbrennen	234
7	Mehrelektronenatome	237
7.1	Das Heliumatom	238
7.1.1	Die Zentralfeldnäherung	239
7.1.2	Symmetrie der Wellenfunktion	243
7.2	Numerische Methoden und Näherungsverfahren	249
7.2.1	Das Modell unabhängiger Elektronen	249
7.2.2	Das Hartree-Verfahren	250
7.3	Der Gesamtdrehimpuls	252
7.3.1	Die L-S - oder Russel-Saunders-Kopplung	252
7.3.2	Die j-j -Kopplung	253
7.3.3	Termschema bei L-S-Kopplung	255
7.3.4	Beispiele für Drehimpulskopplungen und Termschemata	256
7.4	Der Grundzustand des Vielelektronenatoms – Hundzsche Regeln	258

7.5	Vertiefungsthema: Atomarer Magnetismus	261
7.6	Die Elektronenstruktur von Vielelektronenatomen	262
7.6.1	Schalen und Unterschalen	263
7.6.2	Aufbau der Atomhülle mit zunehmender Kernladungszahl	265
7.6.3	Das Periodensystem der Elemente	270
7.7	Spektren der Mehrelektronenatomen	273
7.7.1	Termschema des Heliumatoms	273
7.7.2	Alkalimetalle	275
7.7.3	Erdalkalimetalle	278
8	Angeregte Atomzustände	281
8.1	Einfachanregungen	283
8.1.1	Anregung und Rekombination durch Stoßprozesse	284
8.2	Komplexere Anregungsprozesse	286
8.2.1	Anregung mehrerer Elektronen – Autoionisation	286
8.2.2	Innerschalenanregungen	287
8.3	Röntgenstrahlung	289
8.3.1	Erzeugung von Röntgenstrahlung	290
8.3.2	Das Röntgenspektrum	292
8.3.3	Die Feinstruktur der Röntgenlinien	301
8.3.4	Vertiefungsthema: Streuung und Absorption von Röntgenstrahlung	303
8.3.5	Vertiefungsthema: Röntgenfluoreszenz	307
8.3.6	Vertiefungsthema: Monochromatisierung von Röntgenstrahlung	308
9	Moleküle	313
9.1	Das Einelektronen-Molekül — H_2^+ -Molekülion	316
9.1.1	Die Schrödinger-Gleichung des Einelektronenmoleküls	316
9.1.2	Die adiabatische Näherung	317
9.1.3	Lösung der elektronischen Wellengleichung	318
9.2	Das Vielelektronen-Molekül — H_2 -Molekül	328
9.2.1	Die Molekülorbitalnäherung	328
9.2.2	Die Heitler-London Näherung	330

9.2.3	Vergleich der Näherungen	332
9.2.4	Die Molekülbindung	334
9.3	Elektronische Zustände zweiatomiger Moleküle	336
9.4	Die Kernbewegung	340
9.4.1	Der starre Rotator	340
9.4.2	Molekülschwingungen	343
II	Wärme-statistik	349
10	Grundlagen der Wärmelehre	351
10.1	Systeme, Phasen und Gleichgewicht	352
10.1.1	Systeme	352
10.1.2	Phasen	352
10.1.3	Gleichgewicht	353
10.2	Zustandsgrößen	355
10.2.1	Definitionen	355
10.2.2	Die Temperatur	357
10.2.3	Der Druck	357
10.2.4	Teilchenzahl, Stoffmenge und Avogadrozahl	358
10.2.5	Die Entropie	359
10.3	Die thermodynamischen Potenziale	360
10.3.1	Prinzip der maximalen Entropie und minimalen Energie	360
10.3.2	Innere Energie als Potenzial	360
10.3.3	Entropie als thermodynamisches Potenzial	361
10.3.4	Die freie Energie oder das Helmholtz-Potenzial	361
10.3.5	Die Enthalpie	362
10.3.6	Die freie Enthalpie oder das Gibbsche Potenzial	363
10.3.7	Die Maxwell-Relationen	364
10.3.8	Thermodynamische Stabilität	365
10.4	Die kinetische Gastheorie	367
10.4.1	Druck und Temperatur	367
10.4.2	Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung	368
10.4.3	Freiheitsgrade	369
10.4.4	Der Gleichverteilungssatz	370

10.5	Energieformen, Zustandsänderungen und Hauptsätze	371
10.5.1	Energieformen	371
10.5.2	Energieumwandlung	373
10.5.3	Die Wärmekapazität	374
10.5.4	Zustandsänderungen	375
11	Statistische Beschreibung	377
11.1	Grundbegriffe der Statistik	379
11.1.1	Wahrscheinlichkeiten	379
11.1.2	Mittelwert, Mittelwert der Abweichung, Schwankung	380
11.2	Phasenraum und Verteilungen	382
11.2.1	Mikro- und Makrozustände	382
11.2.2	Der Phasenraum	382
11.2.3	Verteilungen	383
11.3	Das Spin-1/2 System	386
11.3.1	Die Magnetisierung	387
11.3.2	Entartung der Zustände	388
11.3.3	Statistische Eigenschaften der Magnetisierung	390
11.3.4	Die Gauß-Verteilung für große N	392
11.3.5	Die Energie des Spin-1/2-Systems	393
11.4	Grundlegende Annahmen der Wärmephysik	394
11.4.1	Zeitmittel und Scharmittel	396
11.5	Systeme in thermischem Kontakt	399
11.6	Entropie, Temperatur und chemisches Potenzial	406
11.6.1	Entropie	406
11.6.2	Statistische Definition der Temperatur	408
11.6.3	Statistische Definition des chemischen Potenzials	408
11.6.4	Der 3. Hauptsatz	409
11.6.5	Der 2. Hauptsatz	409
11.6.6	Wärmefluss	410
11.6.7	Teilchenfluss	411
11.6.8	Zusammenhang zwischen statistischen und thermodynamischen Größen	412
11.7	Der Zeitpfeil	415
11.8	Magnetische Kühlung	416

12 Verteilungsfunktionen	423
12.1 Repräsentative Ensemble	424
12.1.1 Abgeschlossenes System	424
12.1.2 System in Kontakt mit einem Wärmereservoir	424
12.1.3 System in Kontakt mit einem Wärme- und Teilchenreservoir	425
12.2 Gibbs- und Boltzmann-Faktoren	426
12.2.1 Der Gibbs-Faktor	428
12.2.2 Der Boltzmann-Faktor	428
12.3 Zustandssummen und Mittelwerte	431
12.3.1 Große Zustandssumme	431
12.3.2 Mittelwerte	431
12.3.3 Zustandssumme	433
12.3.4 Verteilungsfunktionen und ihre Eigenschaften	436
12.4 Anwendungen der Verteilungsfunktionen	438
12.4.1 Das ideale einatomige Gas	438
12.4.2 Gültigkeit der klassischen Näherung	441
12.4.3 Der Gleichverteilungssatz	442
12.5 Die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung	446
12.5.1 Verteilung des Geschwindigkeitsbetrages	448
12.5.2 Verteilung einer Geschwindigkeitskomponente	451
12.5.3 Die barometrische Höhenformel	453
12.5.4 Thermalisierung	454
13 Quantenstatistik	461
13.1 Identische Teilchen	462
13.1.1 Klassischer Fall: Maxwell-Boltzmann-Statistik	462
13.1.2 Quantenmechanischer Fall	462
13.2 Die quantenmechanischen Verteilungsfunktionen	465
13.2.1 Quantenstatistische Beschreibung	465
13.2.2 Photonen-Statistik	468
13.2.3 Die Fermi-Dirac-Statistik	469
13.2.4 Die Bose-Einstein-Statistik	472
13.2.5 Quantenstatistik im klassischen Grenzfall	473
13.3 Die Zustandsdichte	477

13.3.1	Das freie Elektronengas	480
13.3.2	Das Photonengas	484
13.4	Vertiefungsthema:	
	Die Bose-Einstein Kondensation	487
13.4.1	Historische Entwicklung	487
13.4.2	Temperatur der Bose-Einstein Kondensation	488
13.4.3	Realisierung eines Bose-Einstein Kondensats	494
13.4.4	Beobachtung der Bose-Einstein Kondensation	498
13.4.5	Atomlaser und Kohärenz	500
III	Anhang	505
A	Rutherfordsche Streuformel	507
B	Krummlinige Koordinaten	512
C	\hat{L}_i, \hat{L}^2 in Kugelkoordinaten	518
D	Vertauschungsrelationen \hat{L}_i, \hat{L}^2	520
E	Heliumatom	522
F	Literatur	525
G	SI-Einheiten	527
G.1	Geschichte des SI Systems	527
G.2	Die SI Basiseinheiten	529
G.3	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten	530
G.4	Vorsätze	532
G.5	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	533
H	Physikalische Konstanten	537

G 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>.

G.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 fieberhafte 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 Prototype 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 (Ampere), 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.

G.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}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 2×10^{-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 540×10^{12} Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $(1/683)$ Watt durch Steradian beträgt.
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}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:

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von letzter Seite

Größe	Abkürzung	Name der Einheit	Symbol	Definition
ebener Winkel	ϑ	Radian	rad	
Raumwinkel	Ω	Steradian	sr	

G.3 Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten

Größe	Abkürzung	Name der Einheit	Symbol	SI-Einheit
Frequenz	ν	Hertz	Hz	s^{-1}
Kreisfrequenz	ω	Radian/Sekunde		s^{-1}
Geschwindigkeit	v	Meter/Sekunde		ms^{-1}
Beschleunigung	a	Meter/Sekunde ²		ms^{-2}
Winkelgeschwindigkeit	ω	Radian/Sekunde		s^{-1}
Winkelbeschleunigung	α	Radian/Sekunde ²		s^{-2}
Kraft	F	Newton	N	
Energie	E	Joule	J	m^2kgs^{-2}
Leistung	P	Watt	W	m^2kgs^{-3}
Druck	p	Pascal	Pa	$kgm^{-1}s^{-2}$
Ladung	Q	Coulomb	C	As
Spannung (Potenzial)	U	Volt	V	$m^2kgs^{-3}A^{-1}$
elektrische Feldstärke	E	Volt/Meter	V/m	$mkgs^{-3}A^{-1}$
elektrische Polarisierung	P	Coulomb/Meter	C/m	Asm^{-1}
elektrische Flussdichte	D	Coulomb/Meter ²	C/m^2	Asm^{-2}
elektrischer Widerstand	R	Ohm	Ω	$m^2kgs^{-3}A^{-2}$
elektrische Leitfähigkeit	σ	Siemens/Meter	S/m	$m^{-3}kg^{-1}s^3A^2$
magnetische Flussdichte	B	Tesla	$T=Vs/m^2$	$kg^{-2}A^{-1}$
magnetische Feldstärke	H	Ampère/Meter		A/m
magnetischer Fluss	Φ	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	$m^2kgs^{-2}K^{-1}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von letzter Seite

Größe	Abkürzung	Name der Einheit	Symbol	SI-Einheit
Enthalpie	J	Joule	J	$\text{m}^2\text{kg}\text{s}^{-2}$
Wärmeleitfähigkeit	λ	Watt/Meter Kelvin	W/m K	$\text{mkg}\text{s}^{-3}\text{K}^{-1}$

G.4 Vorsätze

Faktor	Bezeichnung	Abkürzung
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	μ
10^{-9}	Nano	n
10^{-12}	Pico	p
10^{-15}	Femto	f
10^{-18}	Atto	a

G.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 = 3.156×10^7 s
Hertz	Hz	1 Hz = 1 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	$1 \text{ P} = 0.1 \text{ Pas}$
psi	lb/in ²	$1 \text{ psi} = 6895.0 \text{ Pas}$

Energie, Leistung, Wärmemenge

Einheit	Abkürzung	Umrechnung
Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$
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	$1 \text{ erg} = 1 \text{ gcm}^2/\text{s}^2 = 10^{-7} \text{ kgm}^2/\text{s}^2 = 10^{-7} \text{ J}$
Elektronenvolt	eV	$1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}$ 1 eV entspricht $11\,604 \text{ K}$ ($E = k_B T$) 1 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	Ω	$1\Omega = 1\text{ V/A} = 1\text{ kg m}^2/\text{A}^2\text{ s}^3$
Siemens	S	$1\text{ S} = 1/\Omega$
Tesla	T	$1\text{ T} = 1\text{ V s/m}^2 = 1\text{ kg/A s}^2$
Gauß	G	$1\text{ G} = 10^{-4}\text{ T}$
Oersted	Oe	$1\text{ Oe} = (10^3/4\pi)\text{ A/m}$, entspricht 1 G ($\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H}$)
Henry	H	$1\text{ H} = 1\text{ V s/A} = 1\text{ m}^2\text{ kg/A}^2\text{ s}^2$
Weber	Wb	$1\text{ Wb} = 1\text{ V s} = 1\text{ m}^2\text{ kg/A s}^2$
Maxwell	M	$1\text{ M} = 10^{-8}\text{ Wb}$