

Chemische Tabellen und Rechentafeln für die analytische Praxis



Edition
Harri 
Deutsch

Chemische Tabellen und Rechentafeln für die analytische Praxis

Prof. Dr. K. Rauscher †, Dr. J. Voigt,
Dr. I. Wilke und Dr. habil. K.-Th. Wilke †

weitergeführt von Dr. R. Friebe

11. Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 54500

Die Autoren

Prof. Dr. K. Rauscher †, Dr. J. Voigt, Dr. I. Wilke und Dr. habil. K.-Th. Wilke †,
weitergeführt von Dr. R. Friebe

11. Auflage 2000

Druck 6

ISBN 978-3-8085-5450-0

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

© 2014 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG,
42781 Haan-Gruiten

<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Druck: Medienhaus Plump, 53619 Rheinbreitbach

Vorwort zur 8. Auflage

Im Jahre 1961 erschien nach mehrjähriger Vorbereitung die 1. Auflage dieses Tabellenwerkes. Die chemischen Tabellen und Rechentafeln waren als Hilfsmittel für die analytische Praxis gedacht und fußten auf den Erfahrungen, die die damaligen vier Autoren im analytischen Labor gesammelt hatten. Aufgrund seiner Praxisbezogenheit hat das Buch rasch Eingang in die Laboratorien gefunden; die bisher erschienenen 7 Auflagen sind ein Zeugnis dafür. Jede Neuauflage stellte zumindest eine Aktualisierung, in einigen Fällen eine umfangreiche Überarbeitung des Tabellenbestandes dar.

Nachdem physikalische und physikalisch-chemische Methoden zunehmend Eingang in die Analytik gefunden hatten, haben wir bereits in der 6. und 7. Auflage inhaltliche Veränderungen im Hinblick auf eine künftige tiefergehende Überarbeitung und völlige Neugestaltung des Tabellenwerkes vorgenommen. In die nun vorliegende 8. Auflage wurden deshalb für eine Reihe von Methoden der instrumentellen Analytik geeignete Tabellen neu aufgenommen. Das betrifft die Abschnitte 21. bis 26. zur Gaschromatographie, Atomabsorptionsspektrometrie, Röntgenspektroskopie, Massenspektrometrie, Infrarotspektroskopie und kernmagnetischen Resonanzspektroskopie. Neu sind weiterhin der Abschnitt 28. (Mathematische Hilfsmittel) sowie die Tabellen 12.4. (Elektrodenpotentiale bei verschiedenen Temperaturen) und 13.2.5. (Dichte von Perchlorsäure).

Die Neuauflage gestattete auch einige Umstellungen und Ergänzungen. So wurde der vollständig überarbeitete Abschnitt »Größen und Einheiten« seiner allgemeinen Bedeutung entsprechend an den Anfang gestellt. Umrechnungen verschiedener Einheiten, insbesondere der Konzentrationseinheiten, wurden in diesen Abschnitt einbezogen. Durch die Zusammenfassung der Tabellen zur Gasanalyse sowie zur Thermometrie und Thermodynamik gewinnen die Abschnitte 9. und 15. an Übersichtlichkeit. Die Tabelle der Elemente (Abschnitt 2.) konnte bei Weglassung der fremdsprachigen Elementnamen um die Schmelz- und Siedepunkte sowie die Dichte der Elemente ergänzt werden. Der Abschnitt 4.2. zur Nomenklatur organischer Verbindungen wurde überarbeitet und erweitert. Gleiches gilt für die Abschnitte 11.4. (Pufferlösungen), 27. (Auswertung von Analysen) sowie für zahlreiche Einzeltabellen in den übrigen Abschnitten.

Platz für Neues wurde durch Verzicht auf Entbehrliches gewonnen. So wurden die Logarithmen aus mehreren Tabellen und die 27 Seiten umfassende Logarithmentafel eliminiert, da dem analytisch Tätigen elektronische Taschenrechner oder andere Kleincomputer in zunehmendem Maße zur Verfügung stehen. Der bisherige Abschnitt »Auswertung von Kristallpulveraufnahmen mittels Röntgenstrahlen« wurde durch wichtiger erscheinende Tabellen zur Röntgenspektroskopie ersetzt.

Bei der Überarbeitung konnte eine Vielzahl von Fachkollegen konsultiert werden. Unser Dank gilt diesen Kollegen ebenso wie den Herren Professor Dr. habil. G. ACKERMANN und Dr. W. SPICHALE, die auch für die 8. Auflage als Gutachter tätig waren und eine Reihe wesentlicher Hinweise gegeben haben, sowie den Mitarbeitern des Verlages, die der Neugestaltung des Tabellenbuches stets fördernd gegenüberstanden.

Schließlich gilt unser Dank dem Verlag für die fast 25jährige Zusammenarbeit, während der die ersten sieben Auflagen erscheinen konnten. Wir wünschen auch der 8. Auflage und den zu erwartenden weiteren eine ebenso positive Aufnahme, wie das bisher der Fall gewesen ist, und wären den Nutzern weiterhin für Kritik und Anregungen dankbar.

Dr. J. VOIGT
Dr. I. WILKE
Dr. R. FRIEBE

Vorwort zur 9. und 10. Auflage

Nachdem die Chemischen Tabellen und Rechentafeln für die analytische Praxis acht Auflagen durch den Deutschen Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, erfahren haben, hat sich freundlicherweise der Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, bereit gefunden, die Edition dieses Titels in der 9. Auflage fortzusetzen.

Ich danke allen, die zum Wiedererscheinen des Buches beigetragen haben, insbesondere Herrn Harri Deutsch und seinen Mitarbeitern, Herrn Bönisch und Herrn Müller, sowie Frau Dr. Walburg vom Naturwissenschaftlichen Technikum Landau für Hinweise und Ergänzungsvorschläge, und bitte auch in Zukunft alle Leser und Benutzer des Tabellenwerkes um Anregungen und kritische Hinweise. Die jetzt vorliegende 10. Auflage ist ein überarbeiteter Nachdruck der durchgesehenen vorigen, in dem alle uns bekanntgewordenen Druckfehler beseitigt worden sind. Aufmerksamen Lesern möchten wir an dieser Stelle für ihre freundlichen Hinweise danken.

Potsdam, im Januar 1996

Reiner Friebe

Inhaltsverzeichnis

1.	Größen und Einheiten	13
1.1.	Allgemeines	13
1.2.	Das Internationale Einheitensystem (SI)	13
1.2.1.	SI-Basiseinheiten	14
1.2.2.	Ergänzende SI-Einheiten	14
1.2.3.	Abgeleitete SI-Einheiten	15
1.2.4.	SI-Vorsätze	17
1.2.5.	SI-fremde Einheiten	17
1.2.6.	Hinweise für den Gebrauch der Einheiten mol, l, °C, Pa	18
1.3.	Umrechnung von Einheiten	19
1.3.1.	Umrechnung von ungültigen Einheiten in SI-Einheiten	19
1.3.2.	Umrechnung von englisch-amerikanischen Einheiten in SI-Einheiten	21
1.3.3.	Umrechnung von t in $1/T$	23
1.3.4.	Umrechnung von Temperatureinheiten	25
1.3.5.	Einheiten der Wasserhärte und ihre Umrechnung	26
1.4.	Konzentrationsgrößen	27
1.4.1.	Erläuterungen	27
1.4.2.	Chemische Konzentrationsgrößen	28
1.4.3.	Umrechnung von Konzentrationsgrößen	29
1.5.	Konstanten	30
2.	Namen, relative Atommassen und ausgewählte Eigenschaften der Elemente	31
3.	Periodensystem der Elemente	36
3.1.	Elektronenkonfiguration der Elemente	38
4.	Nomenklatur chemischer Verbindungen	41
4.1.	Anorganische Verbindungen	41
4.1.1.	Elemente	41
4.1.2.	Multiplikativzahlen für die Nomenklatur	42
4.1.3.	Formeln und Namen für Verbindungen	43
4.1.4.	Ionen	46
4.1.5.	Säuren	47
4.1.6.	Salze	49
4.1.7.	Koordinationsverbindungen	51
4.1.8.	Additionsverbindungen	52
4.1.9.	Zusammenstellung von Namen für Ionen und Radikale	52
4.2.	Organische Verbindungen	55
4.2.1.	Alkyl-, Aryl-, Alkoxy-, Aroxy- und Acylreste	55
4.2.2.	Charakteristische Gruppen funktioneller Klassen	56
4.2.3.	Formeln und Bezifferungen ausgewählter Ringsysteme	57
5.	Relative Molekülmassen M_r der Atome, Moleküle, Äquivalente, Formel-einheiten gebräuchlicher Atomgruppen und Verbindungen	61

6.	Faktoren zur Umrechnung chemischer Verbindungen	84
7.	Maßanalytische Äquivalente	116
7.1.	Acidimetrie	116
7.2.	Alkalimetrie	116
7.3.	Argentometrie	117
7.4.	Iodometrie	118
7.5.	Permanganometrie	119
7.6.	Titanometrie	119
7.7.	Cerimetrie	120
7.8.	Chromometrie	120
7.9.	Bromatometrie	120
7.10.	Chromatometrie	121
7.11.	Iodatometrie	121
7.12.	Spezielle Titrationsverfahren	121
7.13.	Kompleximetrie	122
8.	Indikatoren	123
8.1.	Indikatoren für die Maßanalyse und pH-Bestimmung	123
8.1.1.	pH-Indikatoren	123
8.1.2.	Indikatorgemische	127
8.1.3.	Fluoreszenzindikatoren	128
8.2.	Redoxindikatoren	129
8.3.	Adsorptionsindikatoren	130
8.4.	Indikatoren für kompleximetrische Titrationen	131
9.	Gasanalyse	135
9.1.	Gasvolumetrie	135
9.2.	Umrechnung von Gasvolumina auf den Normzustand	135
9.3.	Barometerkorrektur	136
9.4.	Kapillardepression bei Barometerablesungen	136
9.5.	Faktoren zur Umrechnung von Gasvolumina auf den Normzustand	137
9.6.	Absorptionsmittel für die Gasanalyse	146
10.	Elektrochemische Äquivalente	148
11.	Elektrolytgleichgewichte	149
11.1	Aktivitätskoeffizienten	149
11.1.1.	Erläuterungen	149
11.1.2.	Mittlere Aktivitätskoeffizienten $f_{m\pm}$ in wäßrigen Lösungen bei 25 °C	151
11.1.3.	Mittlere Aktivitätskoeffizienten $f_{m\pm}$ von HCl-Lösungen bei verschiedenen Temperaturen	153
11.1.4.	Mittlere Aktivitätskoeffizienten $f_{m\pm}$ von H ₂ SO ₄ -Lösungen bei verschiedenen Temperaturen	154

11.1.5.	Mittlere Aktivitätskoeffizienten $f_{m\pm}$ von NaOH-Lösungen bei verschiedenen Temperaturen	155
11.1.6.	Mittlere Aktivitätskoeffizienten $f_{m\pm}$ von KOH-Lösungen bei verschiedenen Temperaturen	155
11.1.7.	Mittlere Aktivitätskoeffizienten $f_{m\pm}$ von NaCl-Lösungen bei verschiedenen Temperaturen	156
11.1.8.	Mittlere Aktivitätskoeffizienten $f_{m\pm}$ von KCl-Lösungen bei verschiedenen Temperaturen	156
11.2.	Ionenprodukt des Wassers und pH-Wert	157
11.3.	Dissoziationskonstanten von Säuren und Basen	158
11.3.1.	Erläuterungen	158
11.3.2.	Dissoziationskonstanten anorganischer Säuren in wäßrigen Lösungen	159
11.3.3.	Dissoziationskonstanten organischer Säuren in wäßrigen Lösungen	159
11.3.4.	Dissoziationskonstanten anorganischer Basen in wäßrigen Lösungen	160
11.3.5.	Dissoziationskonstanten organischer Basen in wäßrigen Lösungen	161
11.4.	Pufferlösungen	162
11.4.1.	Standard-Bezugslösungen und deren pH-Werte	162
11.4.2.	Arbeitspufferlösungen für pH-Werte von 1,0 bis 13,0	163
11.5.	Löslichkeiten und Löslichkeitsprodukte von Elektrolyten	169
11.5.1.	Erläuterungen	169
11.5.2.	Löslichkeiten anorganischer Verbindungen in Wasser bei 20 °C	170
11.5.3.	Löslichkeitsprodukte von in Wasser schwer löslichen Verbindungen	174
11.6.	Komplexstabilitätskonstanten	176
11.6.1.	Erläuterungen	176
11.6.2.	Stabilitätskonstanten von ausgewählten Komplexionen	177
11.6.3.	pK-Werte einiger Komplexe der Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) und der Nitrilotriessigsäure (NTE) für die Ionenstärke 0,1 und die Temperatur 20 °C	178
12.	Elektrodenpotentiale	179
12.1.	Standardelektrodenpotentiale	179
12.1.1.	Erläuterungen	179
12.1.2.	Werte des NERNST-Faktors bei verschiedenen Temperaturen	179
12.1.3.	Standardelektrodenpotentiale U_{H}^{\ominus} von Elektroden 1. Art	180
12.1.4.	Standardelektrodenpotentiale U_{H}^{\ominus} von Elektroden 2. Art	180
12.1.5.	Standardelektrodenpotentiale U_{H}^{\ominus} von Redoxelektroden (pH-unabhängige Redoxsysteme)	181
12.1.6.	Standardelektrodenpotentiale U_{H}^{\ominus} von Redoxelektroden (pH-abhängige Redoxsysteme)	181
12.2.	Elektrodenpotentiale von Bezugselektroden	183
12.3.	Normalelemente	183
12.4.	Elektrodenpotentiale U_{H} in Volt bei verschiedenen Temperaturen	184
13.	Dichte von Gasen und Lösungen	185
13.1.	Erläuterungen	185
13.2.	Dichtetabellen	186
13.2.1.	Dichte von Gasen	186
13.2.2.	Dichte von trockener Luft	186
13.2.3.	Dichte von Wasser	187

13.2.4.	Dichte von Schwefelsäure/Schwefeltrioxid	188
13.2.5.	Dichte von Perchlorsäure	190
13.2.6.	Dichte von Salzsäure	191
13.2.7.	Dichte von Salpetersäure/Stickstoff(V)-oxid	192
13.2.8.	Dichte von Phosphorsäure/Phosphor(V)-oxid	194
13.2.9.	Dichte von Essigsäure	195
13.2.10.	Dichte von Kalilauge	196
13.2.11.	Dichte von Natronlauge	197
13.2.12.	Dichte von Ammoniaklösung	198
13.2.13.	Dichte von Ethanol-Wasser-Mischungen bei 20 °C	199
13.2.14.	Dichte von Quecksilber	200
14.	Herstellung verdünnter Säuren und Basen	201
15.	Temperatur und Temperaturmessung	202
15.1.	Definitionspunkte der IPTS-68	202
15.2.	Sekundäre Fixpunkte der IPTS-68	203
15.3.	Fadenkorrektur für Quecksilberthermometer	204
15.4.	Kältemittel, Kühlsolen und Heizbäder	205
15.5.	Kryoskopische und ebullioskopische Konstanten von Lösungsmitteln (Mol- massebestimmungen)	206
15.6.	Abhängigkeit des Siedepunktes vom Druck	208
16.	Trockenmittel.	210
16.1.	Wirksamkeit einiger Trockenmittel	210
16.2.	Dampfdruck des Wassers in kPa über Trockenmitteln, die bereits bestimmte Wassermengen aufgenommen haben	210
16.3.	Dampfdruck des Wassers über H ₂ SO ₄ bei 20 °C	210
16.4.	Zeitliche Abhängigkeit der Wasseraufnahme einiger Trockenmittel für Ex- sikkatorfüllungen bei Wasserstrahlpumpenvakuum	211
16.5.	Wirkung verschiedener Trockenmittel in organischen Flüssigkeiten	211
16.6.	Einstellung definierter Luftfeuchtigkeit (über Salzlösungen mit viel Boden- körper in geschlossenen Gefäßen)	211
17.	Justierung und Volumenprüfung von Volumenmeßmitteln aus Glas	212
18.	Organische Verbindungen	215
18.1.	Eigenschaften häufig verwendeter organischer Verbindungen	215
18.2.	Mischbarkeit organischer Lösungsmittel	228
19.	Filtermaterialien	230
19.1.	Filterpapiere für die qualitative Analyse	230
19.2.	Filterpapiere für die quantitative Analyse	230
19.3.	Filtrationstabelle für analytische Arbeiten	231
19.4.	Porzellan- und Keramik-Filtriertiegel	233
19.5.	Glasfilter	233

20.	Ionenaustauscherharze und Molekularsiebe	234
20.1.	Eigenschaften von Ionenaustauscherharzen	234
20.1.1.	Wofatite	234
20.1.2.	Lewatite	236
20.1.3.	Austauscher der Fa. Merck	238
20.1.4.	Vergleich von Ionenaustauscherharzen verschiedener Herkunft	240
20.1.5.	Hersteller von Ionenaustauschern	241
20.2.	Eigenschaften von Molekularsieben	241
20.2.1.	Aufnahmefähigkeit von Molekularsieben	242
20.2.2.	Hersteller von Molekularsieben	242
21.	Gaschromatographie	243
21.1.	Kehrwerte $1/j$ des Druckkorrekturfaktors j in Abhängigkeit von p_e/p_a	243
21.2.	Säulenfüllmaterialien für die Gaschromatographie	244
21.3.	Trennflüssigkeiten für die Gaschromatographie	246
21.4.	Derivatisierungsreagenzien	255
21.5.	Korngrößen	256
22.	Atomabsorptionsspektrometrie (AAS)	257
23.	Röntgenspektroskopie	260
23.1.	Wellenlängen charakteristischer Spektrallinien in pm	260
23.2.	Wellenlängen λ in pm und Anregungsenergien E in keV von K- und L-Absorptionskanten	261
23.3.	Massenabsorptionskoeffizienten μ/ρ in cm^2/g	263
24.	Massenspektrometrie	269
24.1.	Relative Atommassen und natürliche Isotopenverteilungen ausgewählter Elemente	269
24.2.	Charakteristische Massendifferenzen $M-X$ zwischen Molekülion und Fragmention	270
24.3.	Massenzahlen wichtiger Schlüsselfragmente	272
25.	Infrarotspektroskopie (IR)	275
25.1.	Durchlässigkeitsbereiche von Lösungsmitteln	275
25.2.	COLTHUP-Tabelle	276
26.	Kernmagnetische Resonanzspektroskopie (NMR)	280
26.1.	Multipllett-Aufspaltungen zweier koppelnder Protonengruppen	280
26.2.	^1H -Chemische Verschiebungen	280

26.2.1.	Protonen in charakteristischen Gruppen	280
26.2.2.	Methylprotonen	281
26.2.3.	Methylenprotonen	281
26.2.4.	Methinprotonen	282
26.2.5.	Olefinische Protonen	283
26.2.6.	Aromatische Protonen	284
26.2.7.	Protonen in cyclischen Systemen	285
26.3.	^{19}F -Chemische Verschiebungen	286
26.4.	^{13}C -Chemische Verschiebungen	286
26.5.	^{31}P -Chemische Verschiebungen	287
26.6.	Chemische Verschiebungen von Lösungsmitteln	288
26.7.	Kopplungskonstanten	289
26.7.1.	$^1\text{H} - ^1\text{H}$ -Kopplungskonstanten	289
26.7.2.	$^{13}\text{C} - ^1\text{H}$ -Kopplungskonstanten zwischen benachbarten ^{13}C - und ^1H -Kernen	292
26.7.3.	$^{19}\text{F} - ^1\text{H}$ -Kopplungskonstanten	292
26.7.4.	$^{31}\text{P} - ^1\text{H}$ -Kopplungskonstanten	293
26.7.5.	$^{19}\text{F} - ^{19}\text{F}$ -Kopplungskonstanten	293
26.7.6.	Kopplungskonstanten verschiedener Kerne	293
27.	Auswertung von Analysen	294
27.1.	Rechenhilfen	294
27.1.1.	Berechnung der empirischen Formel einer chemischen Verbindung	294
27.1.2.	Gravimetrische Berechnungen	294
27.1.3.	Indirekte Analyse eines Substanzgemisches	295
27.1.4.	Kreuzregel	296
27.2.	Fehlerrechnung und Statistik	297
27.2.1.	Allgemeine Begriffe	297
27.2.2.	Berechnung statistischer Größen	299
27.3.	Regeln für die Angabe von Analyseergebnissen	303
28.	Mathematische Hilfsmittel	304
28.1.	Potenzen, Wurzeln, Logarithmen	304
28.2.	Umrechnungen von Logarithmen	304
28.3.	Differentialrechnung	305
28.4.	Integralrechnung	306
28.5.	Integralgrenzen der t -Verteilung	307
28.6.	Integralgrenzen der F -Verteilung in Abhängigkeit von den Freiheitsgraden f_1 und f_2	308
28.7.	Integralgrenzen der χ^2 -Verteilung in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit P und dem Freiheitsgrad f	312
Literaturhinweise		313
Sachwörterverzeichnis		317

1. Größen und Einheiten

1.1. Allgemeines

Größen sind qualitative Merkmale (Eigenschaften) von Objekten, Zuständen oder Vorgängen, die sich quantitativ bestimmen (messen) lassen. Eine Größe wird durch das Produkt von Zahlenwert und Einheit dargestellt:

$\text{Größe} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}$.

Einheiten sind durch Übereinkunft festgelegte und benannte Vergleichsgrößen mit dem Zahlenwert 1.

Der Zahlenwert einer Größe gibt an, wie oft die Einheit in der betrachteten Größe enthalten ist:

$\text{Zahlenwert} = \text{Größe}/\text{Einheit}$.

Größensysteme bestehen aus Basisgrößen und abgeleiteten Größen, Einheitensysteme aus Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten. Einem Größensystem ist ein adäquates Einheitensystem zugeordnet. Basiseinheiten sind durch eine verbale Definition und ein Verfahren zu ihrer fundamentalen Darstellung charakterisiert. Abgeleitete Einheiten werden durch Gleichungen definiert, die ihre Beziehung zu bereits definierten Einheiten festlegen. Abgeleitete Einheiten werden kohärent genannt, wenn in der Gleichung, die ihre Beziehung zu den Basiseinheiten beschreibt, nur der Zahlenfaktor 1 auftritt; andernfalls heißen sie inkohärent. Einheitenzeichen sind festgelegte Symbole, die anstelle der Benennung der Einheiten verwendet werden können.

1.2. Das Internationale Einheitensystem (SI)

Das Internationale Einheitensystem SI (Système International d'Unités) wurde 1960 von der 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CPGM) angenommen und nachfolgend systematisch ergänzt und erweitert. Das SI ist ein kohärentes Einheitensystem. Es umfaßt SI-Basiseinheiten, ergänzende SI-Einheiten und abgeleitete SI-Einheiten. Die Resolutionen der DPGM enthalten Festlegungen für die Anwendung des SI, für den Gebrauch von SI-Vorsätzen zur Bildung von dezimalen Vielfachen und Teilen der SI-Einheiten sowie Empfehlungen für die zulässige Benutzung SI-fremder Einheiten. In der Bundesrepublik Deutschland sind die SI-Einheiten durch das Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 2.7.1969 und das Gesetz zur Änderung des Gesetzes über Einheiten im Meßwesen vom 6.7.1973 als gesetzliche Einheiten eingeführt worden. Beide Gesetze schreiben die Anwendung der gesetzlichen Einheiten im geschäftlichen und amtlichen Verkehr verbindlich vor.

Die folgenden Tabellen enthalten SI-Einheiten, SI-fremde Einheiten, Umrechnungen für nicht mehr zulässige und für angelsächsische Einheiten in SI-Einheiten, Hinweise für den Gebrauch der Einheiten Mol, Liter, °C und Pascal sowie Umrechnungen von Temperatureinheiten und Einheiten der Wasserhärte.

1.2.1. SI-Basiseinheiten

Größe	Benennung der Einheit	Einheitenzeichen	Definition
Länge	Meter	m	Das Meter ist die Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum während der Dauer von $\frac{1}{299\,792\,458}$ Sekunden durchläuft.
Masse	Kilogramm	kg	Das Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps.
Zeit	Sekunde	s	Die Sekunde ist die Dauer von 9192631770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms Caesium 133 entspricht.
elektrische Stromstärke	Ampere	A	Das Ampere ist die Stärke des zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die den Abstand 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im leeren Raum je 1 m der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7}$ N beträgt.
Temperatur (thermodynamische)	Kelvin	K	Das Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.
Stoffmenge	Mol	mol	Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus so vielen gleichartigen, elementaren Einheiten besteht, wie Atome in 0,012 kg Kohlenstoff 12 enthalten sind.
Lichtstärke	Candela	cd	Die Candela ist die Lichtstärke, die ein schwarzer Körper der Fläche $\frac{1}{600\,000}$ m ² bei der Erstarrungstemperatur des Platins beim Druck von 101325 Pa senkrecht zu seiner Oberfläche ausstrahlt.

1.2.2. Ergänzende SI-Einheiten

Größe	Benennung der Einheit	Einheitenzeichen	SI-Einheit
ebener Winkel	Radian	rad	m/m
räumlicher Winkel	Steradian	sr	m ² /m ²

1.2.3. Abgeleitete SI-Einheiten

Abgeleitete SI-Einheiten sind alle aus den SI-Basiseinheiten (und gegebenenfalls aus den ergänzenden SI-Einheiten) kohärent, d. h. als Potenzprodukt mit dem Zahlenfaktor 1 gebildeten Einheiten. Es gibt drei Arten von abgeleiteten SI-Einheiten: Sie können aus SI-Einheiten gebildet werden, sie können einen selbständigen Namen und ein besonderes Einheitenzeichen haben und sie können mit Hilfe von SI-Basiseinheiten und abgeleiteten SI-Einheiten mit selbständigem Namen gebildet werden.

Abgeleitete SI-Einheiten, aus SI-Basiseinheiten gebildet

Größe	Benennung der Einheit	Einheitenzeichen
Wellenzahl	Eins je Meter	1/m
Fläche	Quadratmeter	m ²
Volumen	Kubikmeter	m ³
Geschwindigkeit	Meter je Sekunde	m/s
Beschleunigung	Meter je Sekundenquadrat	m/s ²
Volumenstrom	Kubikmeter je Sekunde	m ³ /s
Dichte	Kilogramm je Kubikmeter	kg/m ³
Spezifisches Volumen	Kubikmeter je Kilogramm	m ³ /kg
Impuls	Kilogrammmeter je Sekunde	kg · m/s
Drehimpuls	Kilogramm mal Quadratmeter je Sekunde	kg · m ² /s
kinematische Viskosität	Quadratmeter je Sekunde	m ² /s
Massestrom	Kilogramm je Sekunde	kg/s
elektrische Feldstärke	Ampere je Meter	A/m
elektrische Stromdichte	Ampere je Quadratmeter	A/m ²
Leuchtdichte	Candela je Quadratmeter	cd/m ²
Stoffmengenkonzentration	Mol je Kubikmeter	mol/m ³
molare Masse	Kilogramm je Mol	kg/mol
Molares Volumen	Kubikmeter je Mol	m ³ /mol
Molalität	Mol je Kilogramm	mol/kg

Abgeleitete SI-Einheiten mit selbständigem Namen

Größe	Name der Einheit	Einheitenzeichen	Ausgedrückt durch andere SI-Einheiten	Ausgedrückt durch SI-Basiseinheiten
Frequenz	Hertz	Hz		1/s
Kraft	Newton	N		m · kg/s ²
Druck, Spannung	Pascal	Pa	N/m ²	kg/(m · s ²)
Energie, Arbeit, Wärmemenge	Joule	J	N · m	m ² · kg/s ²
Leistung, Energiestrom	Watt	W	J/s	m ² · kg/s ³
elektrische Ladung, Elektrizitätsmenge	Coulomb	C		s · A
elektrische Spannung, elektrisches Potential	Volt	V	W/A	m ² · kg/(s ³ · A)

Größe	Name der Einheit	Einheitenzeichen	Ausgedrückt durch andere SI-Einheiten	Ausgedrückt durch SI-Basiseinheiten
elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	V/A	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A}^2)$
elektrischer Leitwert	Siemens	S	A/V	$\text{s}^3 \cdot \text{A}^2/(\text{m}^2 \cdot \text{kg})$
elektrische Kapazität	Farad	F	C/V	$\text{s}^4 \cdot \text{A}^2/(\text{m}^2 \cdot \text{kg})$
magnetischer Fluß	Weber	Wb	V · s	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{A})$
magnetische Flußdichte, Induktion	Tesla	T	Wb/m ²	$\text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{A})$
Induktivität	Henry	H	Wb/A	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{A}^2)$
Celsius-Temperatur	Grad Celsius	°C		K
Lichtstrom	Lumen	lm		cd · sr
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	lm/m ²	cd · sr/m ²
Aktivität	Becquerel	Bq		1/s
Energiedosis	Gray	Gy	J/kg	m ² /s ²

Abgeleitete SI-Einheiten, aus SI-Basiseinheiten und Einheiten mit selbständigem Namen gebildet

Größe	Benennung der Einheit	Einheitenzeichen	Ausgedrückt durch SI-Basiseinheiten
dynamische Viskosität	Pascalsekunde	Pa · s	kg/(m · s)
Moment einer Kraft	Newtonmeter	N · m	m ² · kg/s ²
Oberflächenspannung	Newton je Meter	N/m	kg/s ²
spezifische Energie	Joule je Kilogramm	J/kg	m ² /s ²
Entropie, Wärmekapazität	Joule je Kelvin	J/K	m ² · kg/(s ² · K)
spezifische Wärmekapazität, spezifische Entropie	Joule je Kilogramm und Kelvin	J/(kg · K)	m ² /(s ² · K)
Wärmestromdichte	Watt je Quadratmeter	W/m ²	kg/s ³
Wärmeleitfähigkeit	Watt je Meter und Kelvin	W/(m · K)	m · kg/(s ³ · K)
elektrische Feldstärke	Volt je Meter	V/m	m · kg/(s ³ · A)
elektrisches Dipolmoment	Coulombmeter	C · m	m · s · A
elektrische Leitfähigkeit	Siemens je Meter	S/m	s ³ · A ² /(m ³ · kg)
Permittivität, Dielektrizitätskonstante	Farad je Meter	F/m	s ⁴ · A ² /(m ³ · kg)
Permeabilität, Induktionskonstante	Henry je Meter	H/m	m · kg/(s ² · A ²)
molare innere Energie, molare Enthalpie	Joule je Mol	J/mol	m ² · kg/(s ² · mol)
molare Entropie, molare Wärmekapazität	Joule je Kelvin und Mol	J/(K · mol)	m ² · kg/(s ² · K · mol)
Exposition	Coulomb je Kilogramm	C/kg	s · A/kg
Energiedosisleistung	Gray je Sekunde	Gy/s	m ² /s ³

1.2.4. SI-Vorsätze

Zur Bildung von dezimalen Vielfachen und Teilen der SI-Einheiten sind die nachstehenden Vorsätze zu verwenden. Es darf jeweils nur ein Vorsatz benutzt werden. Es sind möglichst solche Vorsätze anzuwenden, daß die Zahlenwerte der anzugebenden Größen zwischen 0,1 und 1000 liegen. Vorsätze, die einer ganzzahligen Potenz von Tausend (10^{3n}) entsprechen, sind zu bevorzugen. Die Vorsätze Hekto, Deka, Dezi und Zenti dürfen nur zur Bezeichnung von solchen Vielfachen und Teilen von Einheiten verwendet werden, die bereits üblich sind, z. B. cm, hl, dt. Die dezimalen Vielfachen und Teile der Einheit der Masse werden durch Anfügen der Vorsätze vor das Wort »Gramm« gebildet. Für SI-fremde Einheiten ist die Anwendung von Vorsätzen zulässig, soweit dies nicht ausdrücklich ausgeschlossen ist. Dezimale Vielfache und Teile von SI-Einheiten sind inkohärent.

Vorsatz	Vorsatz- zeichen	Faktor	Vorsatz	Vorsatz- zeichen	Faktor
Exa	E	10^{18}	Dezi	d	10^{-1}
Peta	P	10^{15}	Zenti	c	10^{-2}
Tera	T	10^{12}	Milli	m	10^{-3}
Giga	G	10^9	Mikro	μ	10^{-6}
Mega	M	10^6	Nano	n	10^{-9}
Kilo	k	10^3	Pico	p	10^{-12}
Hekto	h	10^2	Femto	f	10^{-15}
Deka	da	10^1	Atto	a	10^{-18}

1.2.5. SI-fremde Einheiten

SI-fremde Einheiten sind zulässige Einheiten, die nicht zum SI gehören und deren Beziehung zu den SI-Einheiten einen von 1 verschiedenen Faktor enthält. Es sind drei Arten von SI-fremden Einheiten zu unterscheiden:

- **Allgemein gültige SI-fremde Einheiten sind Einheiten mit selbständigen Namen, die neben den SI-Einheiten unbefristet und unbeschränkt angewendet werden dürfen.**
- **Auf Spezialgebieten gültige SI-fremde Einheiten sind Einheiten, deren Anwendung unbefristet, jedoch nur in bestimmten Zweigen der Wissenschaft und Technik zulässig ist.**
- **Verhältniseinheiten sind die gesetzlich gültigen Einheiten für Verhältnisgrößen.**

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Auswahl gültiger SI-fremder Einheiten.

Größe	Benennung der Einheit	Einheitenzeichen	Definition der Einheit	Hinweis
Zeit	Minute	min	1 min = 60 s	
Zeit	Stunde	h	1 h = 60 min	
Zeit	Tag	d	1 d = 24 h	allgemein
Masse	Tonne	t	1 t = 10 ³ kg	gültige
Volumen	Liter	l	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³	SI-fremde
ebener Winkel	Grad	°	1° = (π/180) rad	Einheiten
ebener Winkel	Minute	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad	
ebener Winkel	Sekunde	"	1'' = (1/60)' = (π/648000) rad	
Masse	atomare Masseinheit	u	1 u = 1,66057 · 10 ⁻²⁷ kg	nur für Atom- und Kernphysik
Energie	Elektronenvolt	eV	1 eV = 1,60219 · 10 ⁻¹⁹ J	
Verhältnisgrößen	Eins	1	—	nur für
	Prozent	%	1% = 10 ⁻²	Quotienten
	Promille	‰	1‰ = 10 ⁻³	aus zwei
	pro Million	ppm	1 ppm = 10 ⁻⁶	gleichartigen
	pro Milliarde	ppb	1 ppb = 10 ⁻⁹	Größen
	pro Billion	ppt	1 ppt = 10 ⁻¹²	

1.2.6. Hinweise für den Gebrauch der Einheiten mol, l, °C, Pa

1. **Mol.** Die Basiseinheit Mol ist keine Masseinheit, sondern eine »Objektmengeneinheit«. Bei ihrer Verwendung muß die Art der elementaren Teilchen (Objekte) angegeben werden. Es können Atome, Ionen, Moleküle, Radikale, Elektronen, Photonen, Äquivalente oder spezielle Gruppierungen solcher Teilchen, z. B. Formeleinheiten oder auch Formelumsätze sein. Die individuellen Masseneinheiten Grammatom, Grammolekül und Grammäquivalent werden nicht mehr benötigt. Die Beziehung zwischen der Masse m und der Stoffmenge n regelt die molare Masse M

$$m \text{ (g)} = M \text{ (g/mol)} \cdot n \text{ (mol)}.$$

Bei Verwendung der Masseinheit Gramm (g) sind die Zahlenwerte der molaren Masse identisch mit den tabellierten relativen Molekülmassen M_r der betreffenden Teilchenart. Im speziellen Fall der Äquivalente ist wegen $n_{\bar{A}} = z \cdot n$ für die molare Masse M die Äquivalentmasse

$$M_{\bar{A}} \text{ (g/mol)} = 1/z \cdot M \text{ (g/mol)}$$

einzusetzen, wobei z die stöchiometrische Wertigkeit für die betrachtete Reaktion ist.

2. **Liter.** Das Liter sollte ursprünglich gleich 1 dm^3 sein (3. CGPM, 1901). Nachträglich stellte sich heraus, daß 1 kg reines, luftfreies Wasser im Zustand größter Dichte ($3,98 \text{ }^\circ\text{C}$) unter dem Druck von 760 Torr ein etwas größeres Volumen einnimmt:

$$1 \text{ l} = (1,000028 \pm 0,000003) \text{ dm}^3.$$

Wegen des praktisch bedeutungslosen Unterschiedes zwischen beiden Einheiten wurde definiert (12. CGPM, 1964):

$$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3 \text{ (exakt)}$$

und festgelegt, die Einheit Liter bei Angaben mit einer relativen Unsicherheit $< 5 \cdot 10^{-5}$ nicht anzuwenden, um Verwechslungen von alter und neuer Literdefinition auszuschließen. Diese Einschränkung gilt auch für alle abgeleiteten Einheiten, die die Volumeneinheit Liter enthalten, wie Dichte, Massenkonzentration, Stoffmengenkonzentration.

$$1 \text{ l (alt)} = 1,000028 \text{ l (neu)}; \quad 1 \text{ l (neu)} = 0,999972 \text{ l (alt)}.$$

3. **Grad Celsius.** Die Differenz aus einer Temperatur T und der Temperatur $T_0 = 273,15 \text{ K}$ wird als Celsius-Temperatur t bezeichnet:

$$t = T - T_0.$$

Die Celsius-Temperatur ist in Grad Celsius ($^\circ\text{C}$) anzugeben.

$$t = 0 \text{ }^\circ\text{C} \cong T = 273,15 \text{ K} \quad (\text{Eispunkt des Wassers}),$$

$$t = 100 \text{ }^\circ\text{C} \cong T = 373,15 \text{ K} \quad (\text{Siedepunkt des Wassers}).$$

Die Celsius-Temperatur darf keine Vorsätze erhalten. Bei Angaben von Temperaturdifferenzen ist die Einheit Kelvin zu verwenden.

4. **Pascal.** Bei der Bildung von dezimalen Teilen oder Vielfachen der Druckeinheit Pascal sind grundsätzlich solche Vorsätze zu verwenden, die einer ganzzahligen Potenz von Tausend entsprechen (mPa, kPa, MPa). Die Benutzung der inkohärenten Einheit Hektopascal (hPa) ist ausschließlich auf dem Gebiet der Meteorologie, z. B. bei Angaben des atmosphärischen Luftdrucks in Wetterberichten zulässig. Der Zahlenwert in hPa stimmt mit dem Zahlenwert in der früher üblichen Einheit mbar überein.

1.3. Umrechnung von Einheiten

1.3.1. Umrechnung von ungültigen Einheiten in SI-Einheiten

Einheit	Einheitenzeichen	Größe	SI-Einheit
Angström	Å	Länge	10^{-10} m
Atmosphäre (physikalisch)	atm	Druck	$1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Atmosphäre (technische)	at	Druck	$9,80665 \cdot 10^4 \text{ Pa}$
Bar	bar	Druck	10^5 Pa
Clausius	Cl	Entropie	$4,1868 \text{ J/K}$

Einheit	Einheiten zeichen	Größe	SI-Einheiten
Curie	Ci	Aktivität	$3,7 \cdot 10^{10}$ Bq
Debye	D	Dipolmoment	$3,3356 \cdot 10^{-30}$ C · m
Dyn	dyn	Kraft	10^{-5} N
Enzymeinheit	E, U	Enzymaktivität	$1,66 \cdot 10^{-4}$ mol/s
Erg	erg	Energie	10^{-7} J
Faraday	F	Elektrizitätsmenge	$9,6487 \cdot 10^4$ C
Fermi	f, fm	Länge	10^{-15} m
Gamma	γ	Masse	10^{-9} kg
Gauß	G	magnetische Flußdichte	10^{-4} T
Gilbert	Gi	magnetische Spannung	0,796 A
Grad	grad	Temperaturdifferenz	K
Grad Kelvin	°K	absolute Temperatur	K
Kalorie	cal	Wärmemenge	4,1868 J
Karat	k	Masse	$2 \cdot 10^{-4}$ kg
Katal	kat	Enzymaktivität	1 mol/s
Kayser	K	Wellenzahl	10 ² /m
Literatmosphäre	1 atm.	Energie, Arbeit	$1,01325 \cdot 10^2$ J
Maxwell	Mx, M	magnetischer Fluß	10^{-8} Wb
Micron	μ	Länge	10^{-6} m
Milligrammprozent	mg-%	Konzentration	10^{-2} kg · m ³
Millimeter Hg-Säule	mm-Hg	Druck	$1,333 \cdot 10^2$ Pa
Millimeter Wassersäule	mm-H ₂ O	Druck	9,80665 Pa
Millimicron	mμ	Länge	10^{-9} m
Oerstedt	Oe	magnetische Feldstärke	$7,957747 \cdot 10^1$ A/m
Ohm (int.)	Ω _{int}	Widerstand	1,00049 Ω
Pferdestärke	PS	Leistung	$7,354988 \cdot 10^2$ W
Poise	P	dynamische Viskosität	10^{-1} Pa · s
Pond	p	Kraft	$9,80665 \cdot 10^{-3}$ N
Rad	rd	Energiedosis	10^{-2} J/kg
Rem	rem	Röntgenäquivalent	10^{-2} J/kg
Rep	rep	Röntgenäquivalent	$8,38 \cdot 10^{-3}$ J/kg
Röntgen	R	Exposition	$2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg
Rutherford	Rd	Aktivität	10^6 Bq
Rydberg	Ry	Energie	$2,1799 \cdot 10^{-18}$ J
Stilb	sb	Leuchtdichte	10^4 cd/m ²
Stokes	St	kinematische Viskosität	10^{-4} m ² /s
Torr	Torr	Druck	$1,333224 \cdot 10^2$ Pa
Val	val	Äquivalentstoffmenge	1 mol/z
Volt (int.)	V _{int}	Spannung	1,00034 V
X-Einheit	X.E.	Länge	$1,00202 \cdot 10^{-13}$ m