

Karl Schwister (Hrsg.)

Umwelttechnik

Ein Lehr- und Übungsbuch



HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Herausgeber:

Prof. Dr. rer. nat. Karl Schwister

Hochschule Düsseldorf, Professor für Chemie und Bioverfahrenstechnik

Die Autor:innen:

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam (Kapitel 25, 26)

Hochschule Düsseldorf, Professor für nachhaltige Energiesysteme und Energieeffizienz

Prof. i. R. Dr.-Ing. Barbara Dietzsch (Kapitel 17, 18)

Beuth Hochschule für Technik Berlin

Dr. jur. Gernot-Rüdiger Engel (Kapitel 8)

Luther Rechtsanwaltsgesellschaft, Partner Practice Group Environment, Planning and Regulatory

Prof. i. R. Dr.-Ing. Wiljo Fleischhauer (Kapitel 18)

Hochschule Düsseldorf

Prof. Dr. rer. nat. Johanna Hopp (Kapitel 10, 23, 24)

Ernst-Abbe Hochschule Jena, Professorin für Umwelttechnik

Dipl.-Ing. Volker Leven (Kapitel 14, 19)

Hochschule Düsseldorf, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Prof. Dr.-Ing. Frank-Joachim Möller (Kapitel 7)

Ernst-Abbe Hochschule Jena, Professor für Wirtschaftsingenieurwesen und betrieblicher Umweltschutz

Prof. Dr. med. Elke Ochsmann (Kapitel 6, 12)

Universität des Saarlandes, Direktorin Institut für Arbeitsmedizin und Public Health

Dr.-Ing. Peter Reiser (Kapitel 20)

Prof. Dr. rer. nat. Karl Schwister (Kapitel 1, 2, 3, 4, 5, 9, 11, 13, 14, 15, 16)

Hochschule Düsseldorf, Professor für Chemie und Bioverfahrenstechnik

Prof. Dr. rer. nat. Nadine Warkotsch (Kapitel 17, 18, 21, 22)

Technische Hochschule Augsburg, Professorin für Chemie

Karl Schwister (Hrsg.)

Umwelttechnik

Ein Lehr- und Übungsbuch

HANSER



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: le-tex publishing services, Leipzig

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-45854-3

E-Book-ISBN 978-3-446-47003-3

Vorwort

Die Erde gleicht – in vielen, aber nicht allen Aspekten – einem geschlossenen System, dessen Kreisläufe in unterschiedlichen Wechselbeziehungen zueinander stehen. Diese Beziehungen und deren Wirkungen sind komplex und wurden in der Vergangenheit in vielen Fällen nicht oder zu wenig bei industriellen, gesellschaftlichen und politischen Maßnahmen berücksichtigt. Mit zunehmendem Wissen zu umweltrelevanten Interaktion und einem steigenden politischen und gesellschaftlichem Bewusstsein für den Erhalt einer für alle angemessenen Lebensumwelt, hat sich auch das Bewusstsein zu bestimmten Problemlagen verändert. Die Auseinandersetzung mit verschiedenen Themen hat sich von einem „Randphänomen“ zu einem zentralen Aspekt des gesellschaftlichen Diskurses entwickelt. Zu den zentralen Punkten, die im Kontext mit Umwelt diskutiert werden, gehören u. a. eine steigende Zahl an Erdbewohnern, zunehmende Industrialisierung, gestiegene Mobilitätsansprüche, steigender Energiebedarf, zunehmender Bedarf an Bodenschätzen, Veränderungen des Klimas und Zunahme von in der jüngeren Vergangenheit außergewöhnlichen Wetter-, Klima und Umweltphänomenen. All diese Punkte stellen aktuelle und zukünftige umweltassoziierte Herausforderungen für die Menschheit dar. Der ehemalige UN-Generalsekretär Ban Ki-Moon bezeichnete diese Gemengelage einmal als das „alles bestimmende Problem unserer Zeit“.

Das vorliegende Lehr- und Übungsbuch Umwelttechnik kann diese umfassende Gemengelage natürlich nur in Ansätzen beleuchten, bietet dabei aber eine kompakte, verständliche und praxisorientierte Gesamtdarstellung über die verschiedenen Umweltmedien Boden, Wasser und Luft und deren Wechselwirkung. Darüber hinaus wurde viel Wert auf eine möglichst interdisziplinäre Betrachtung von Umwelt und Technik gelegt, so dass deren Zusammenhänge von verschiedensten naturwissenschaftlichen Standpunkten aus beleuchtet werden. Denn wir sind der Überzeugung, dass nur ein gemeinsames Herangehen an vorhergesagte Umweltprobleme zu umsetzbaren und gesellschaftlich akzeptierten Lösungsmöglichkeiten führen wird.

Neben der Konzeption und Beurteilung umwelttechnischer Maßnahmen nehmen das Umweltmanagement und die Entwicklung von umweltverträglichen industriellen

Produktionsverfahren eine immer wichtigere Rolle ein. Angesichts eines erheblichen Entwicklungs- und Forschungsaufkommens in diesem Themenfeld, kann das vorliegende Buch aber nicht den Anspruch auf Vollständigkeit der Darstellung von Technologien zur Umwelttechnik erheben. Vielmehr wurde versucht, die grundlegende Notwendigkeit interdisziplinärer Verknüpfungen zwischen technologischen Maßnahmen, rechtlichen Rahmenbedingungen und ökologischen Aspekten in den Vordergrund zu stellen.

Dem Einsteiger, dem grundlegende Begriffe aus Chemie, Physik, Biologie und Statistik vielleicht noch nicht ausreichend geläufig sind, wird im Abschnitt „*Interdisziplinäre Grundlagen*“ ein Basiskapitel zur Hand gereicht, um sich schnell mit häufig verwendeten Termini und allgemeinen Gesetzmäßigkeiten vertraut zu machen. Eine Einführung in das Umweltrecht und fachübergreifende Aspekte wie Gesundheit, Risikoabschätzung und Umweltmanagement ergänzen diesen Bereich.

Im Abschnitt „*Umweltschadstoffe*“ geht es um die Entstehung von Schadstoffen und ihre Wirkung auf den Menschen und die Umweltmedien. Die einzelnen Kapitel bieten Basisinformationen zur Wasser- und Luftverschmutzung, zur Bodenbelastung, zu Altlasten, Lärm und Strahlenbelastung. Es werden aber auch aktuelle Probleme angesprochen, wie z. B. Ozonloch, Waldsterben oder Klimawandel, die aktuell intensiv beforscht werden.

Im Abschnitt „*Umwelttechnologien*“ werden moderne Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung, Abwasserbehandlung im kommunalen und industriellen Bereich, Abgasreinigung, Abfallbehandlung, Altlastenbeseitigung und Bodensanierung, zum Lärmschutz und zur Lärmvermeidung beleuchtet.

Der Abschnitt „*Technologien zur effektiven Nutzung von erneuerbaren Energien*“ behandelt neben Energieeinsparungsmaßnahmen die unterschiedlichen Formen und Aspekte der regenerativen Energien wie Solarenergie, Wasserkraft, Windenergie, Biomasse und Geothermie.

Das vorliegende Lehr- und Übungsbuch richtet sich vor allem an Studierende der Fach- und Vertiefungsrichtung Umwelttechnik, Verfahrenstechnik, Biotechnologie, Lebensmitteltechnologie, Pharma- und Kosmetikindustrie und andere Industrie- und Umweltbereiche sowie an andere Interessierte, die sich einen Überblick über das Themenfeld verschaffen möchten. Das Buch fasst einerseits Grundwissen zusammen und bietet andererseits durch Zusammenstellung von Aufgaben und Berechnungsbeispielen eine direkte Anwendungsmöglichkeit zur effizienten Einarbeitung.

Wie immer sind allein wir, die Autoren, für die in diesem Buch enthaltenen Fehler verantwortlich und bitten ggf. um geeignete Hinweise.

Inhalt

Vorwort	V
1 Ursachen der Umweltprobleme	1
1.1 Vorbemerkungen	1
1.2 Umweltprobleme unserer Zeit	2
1.2.1 Klimawandel	2
1.2.2 Wasserknappheit	4
1.2.3 Luftverschmutzung	4
1.2.4 Bodenerosion	5
1.2.5 Plastikmüll im Meer	6
1.2.6 Abholzung der Wälder	6
1.2.7 Welthunger	7
2 Physikalische Größen und Einheitensysteme	9
2.1 Größen und Größenarten	9
2.2 Größen- und Zahlenwertgleichungen	13
2.3 Zustandsgrößen und Prozessgrößen	14
2.4 Zustandsfunktionen	16
2.5 Gehalts- und Konzentrationsangaben	18
2.5.1 Massenanteil	19
2.5.2 Stoffmengenanteil	20
2.5.3 Volumenanteil	21
2.5.4 Massenkonzentration	21
2.5.5 Stoffmengenkonzentration	21
2.5.6 Volumenkonzentration	22

2.5.7	Molalität	22
2.5.8	Aktivität	22
2.6	Umrechnungen und Mischungsrechnung	23
2.7	Übungen	25
3	Statistische Grundbegriffe	27
3.1	Fehlerarten	27
3.1.1	Grobe Abweichung von Messwerten	28
3.1.2	Systematische Abweichung von Messwerten	28
3.1.3	Zufällige Abweichung von Messwerten	28
3.2	Darstellung von Messreihen	29
3.3	Erfassung der Messwertabweichung	34
3.3.1	Normalverteilung nach GAUSS	35
3.3.2	Standardabweichung	36
3.3.3	Vertrauensbereich	38
3.4	Fehlerfortpflanzung	39
3.4.1	Methode der oberen und unteren Grenze	40
3.4.2	GAUSSsche Fehlerfortpflanzung	41
3.4.3	Lineare Fehlerfortpflanzung	42
3.5	Grafische Auswertung von Messdaten	42
3.5.1	Lineare und nichtlineare Skalen	43
3.5.2	Anfertigung einer grafischen Darstellung	45
3.5.3	Grafische Auswertung linearer Zusammenhänge	45
3.6	Übung	49
4	Chemische Grundbegriffe	50
4.1	Stöchiometrie	50
4.1.1	Stöchiometrische Größen und Formeln	50
4.1.2	Umrechnung von Stoff- und Gehaltsgrößen	53
4.1.3	Allgemeine Reaktionsbegriffe	55
4.2	Einführung in die Thermodynamik	57
4.2.1	Systeme und Zustandsgrößen	57
4.2.2	Erster Hauptsatz	58

4.2.3	Standard-Enthalpien	60
4.2.4	Zweiter Hauptsatz	61
4.3	Chemie und Physik des Wassers	63
4.3.1	Physikalische Eigenschaften	64
4.3.2	Chemische Eigenschaften	66
4.3.3	Autoprotolyse und pH-Wert	69
4.3.4	Härte und Leitfähigkeit	71
4.3.5	Löslichkeit	72
4.4	Übungen	76
5	Mikrobiologische und biochemische Grundbegriffe	79
5.1	Einteilung der Mikroorganismen	79
5.1.1	Bakterien	82
5.1.2	Pilze	85
5.1.3	Protozoen	85
5.1.4	Algen	87
5.1.5	Mehrzellige tierische und pflanzliche Formen	88
5.2	Kinetik biochemischer Reaktionen	89
5.2.1	Reaktionen 0. Ordnung	90
5.2.2	Reaktionen 1. Ordnung	91
5.2.3	Reaktionen 2. Ordnung	92
5.2.4	Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit	93
5.3	Wachstum und Vermehrung von Mikroorganismen	93
5.4	Wachstumsphasen	95
6	Umwelt und Gesundheit	98
6.1	Risikoabschätzung	99
6.1.1	Qualitative Risikoabschätzung	100
6.1.2	Quantitative Risikoabschätzung	102
6.2	Risikobewertung – Risk Assessment	105
6.3	Beurteilungshilfen für das gesundheitliche Risiko von Umwelt- und Arbeitsplatznoxen	107
6.4	Übung	111

7	Umweltmanagement	114
7.1	Umweltbeziehungen von Unternehmen	114
7.2	Erfassen und Bewerten von Umweltbeeinflussungen in Ökobilanzen	116
7.2.1	Grundlagen der Stoff- und Energie-Bilanzierung	116
7.2.2	Komponenten der Ökobilanzierung	120
7.2.3	Prozess-Ökobilanzen und Module	121
7.2.4	Prozessverknüpfungen	122
7.2.5	Standort-, Unternehmens- und Organisations-Ökobilanzen	124
7.2.6	Produkt-Ökobilanzen	124
7.2.7	Bewertungsverfahren	126
7.3	Elemente und -Systeme des Umweltmanagements	128
7.3.1	Management	128
7.3.2	Betriebliche Umweltpolitik und Ist-Analyse	129
7.3.3	Umweltziele und Umweltprogramme	130
7.3.4	Organisation	131
7.3.5	Dokumentation	132
7.3.6	Audit (Umweltbetriebsprüfung)	132
7.3.7	Zertifizierung/Validierung in Umweltmanagementsystemen	133
8	Einführung in das Umweltrecht	136
8.1	Allgemeines Umweltrecht	136
8.1.1	Rechtsquellen des Umweltrechts	136
8.1.2	Ziele und Grundprinzipien des Umweltrechts	137
8.1.3	Medialer und integrativer Umweltschutz	138
8.1.4	Allgemeine Umweltgesetze	139
8.2	Immissionsschutzrecht	141
8.2.1	Ziele und Grundbegriffe des BImSchG	141
8.2.2	Recht der genehmigungsbedürftigen Anlagen	142
8.2.3	Recht der nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen	144
8.2.4	Sonstige Instrumente des BImSchG	145
8.3	Gewässerschutzrecht	146
8.3.1	Ziele, Grundsätze und allgemeine Pflichten des WHG	146
8.3.2	Erlaubnis und Bewilligung der Gewässerbenutzung	148
8.3.3	Abwasserrecht	150

8.3.4	Sonstige Instrumente des WHG	151
8.4	Bodenschutz- und Altlastenrecht	152
8.4.1	Zweck und Grundsätze des BBodSchG	153
8.4.2	Gefahrenabwehr- und Sanierungspflichten	154
8.4.3	Vorsorgepflicht	156
8.4.4	Sonstige Instrumente des Bodenschutzrechts	157
8.5	Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht	158
8.5.1	Ziele und Grundbegriffe des KrWG	158
8.5.2	Grundsätze und Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft	160
8.5.3	Grundsätze und Grundpflichten der Abfallbeseitigung	163
8.5.4	Das Recht der Abfallbeseitigungsanlagen	164
8.6	Klimaschutzrecht	165
8.6.1	Völkerrechtliche Grundlagen	166
8.6.2	Europarechtliche Regelungen	167
8.6.3	Nationales Recht	168
8.7	Emissionshandelsrecht	169
8.7.1	Europäischer Emissionshandel	170
8.7.2	Nationaler Brennstoffemissionshandel	172
8.8	Übungen	174
9	Wasserverschmutzung	176
9.1	Wasservorkommen und Wasserverbrauch	176
9.2	Wasserkreislauf	178
9.3	Limnologische Grundlagen	180
9.3.1	Grundwasser	180
9.3.2	Fließgewässer	182
9.3.3	Stehende Gewässer	183
9.4	Gewässereutrophierung	185
9.5	Gewässerversauerung	187
9.6	Gewässergüte	188
9.6.1	Kennwerte zur Einstufung der Gewässergüte	188
9.6.2	Gewässergütestufen	189
9.7	Übungen	191

10	Boden und anthropogene Einwirkungen	193
10.1	Bodenbestandteile und Bodenstruktur	193
10.2	Bodenfunktion/Bodenfruchtbarkeit	200
10.3	Art und Menge von Stoffeinträgen	202
10.4	Verhalten und Wirkung der Bodenbelastung	210
11	Luftverschmutzung	215
11.1	Einteilung der Atmosphäre	215
11.2	Grundbegriffe	216
11.2.1	Luftdruck	216
11.2.2	Luftfeuchtigkeit	217
11.2.3	Luftkeime	218
11.2.4	Emission, Transmission und Immission	218
11.3	Beschreibung der Luftschadstoffe	219
11.3.1	Kohlenstoffdioxid	219
11.3.2	Kohlenstoffmonoxid	220
11.3.3	Methan	221
11.3.4	Schwefeldioxid	221
11.3.5	Stickstoffoxid	222
11.3.6	Formaldehyd	223
11.3.7	Kohlenwasserstoff	223
11.3.8	Halogener Kohlenwasserstoff	224
11.3.9	Asbest	224
11.4	Treibhauseffekt	225
11.4.1	Natürlicher Treibhauseffekt	225
11.4.2	Anthropogener Treibhauseffekt	226
11.5	Ozonloch	227
12	Lärm- und Strahlenbelastung	230
12.1	Lärm	230
12.2	Schall	230
12.2.1	Physikalische Grundlagen	230
12.2.2	Biologische und medizinische Grundlagen	238
12.2.3	Gesundheitliche Auswirkungen	239

12.3	Umwelt- oder Umgebungslärm	242
12.4	Strahlenbelastung	245
12.4.1	Elektromagnetische Felder	245
12.4.2	Nicht-ionisierende Strahlung	247
12.4.3	Ionisierende Strahlung	252
12.4.3.1	Natürliche (ionisierende) Strahlenquellen	254
12.4.3.2	Zivile Strahlenquellen	255
12.4.4	Strahlenschutz	257
12.5	Übungen	259
13	Trinkwasseraufbereitung	264
13.1	Anforderungen an die Trinkwasserqualität	264
13.2	Aufbereitung von Trinkwasser	267
13.2.1	Gasaustausch	268
13.2.2	Enteisenung und Entmanganung	269
13.2.3	Filtration	271
13.2.4	Nitratreduktion	273
13.3	Desinfektion von Trinkwasser	275
13.3.1	Biologische Verfahren	275
13.3.2	Chemische Verfahren	275
13.3.3	Physikalische Verfahren	277
13.4	Korrosion in Trinkwassersystemen	278
14	Kommunale Abwasserreinigung	280
14.1	Einführung	280
14.2	Abwasserinhaltsstoffe	281
14.2.1	Messgrößen zur Abwasserbeurteilung	282
14.2.2	Typische Abwasserparameter	284
14.3	Aufbau und Funktion einer Kläranlage	285
14.3.1	Mechanischer Anlagenteil	286
14.3.2	Biologischer Anlagenteil	287
14.3.3	Klärschlammbehandlung	289
14.3.4	Nachklärung	290
14.4	Phosphat- und Stickstoffeliminierung	290

14.4.1	Chemische Fällung	292
14.4.2	Biologische P-Eliminierung	293
14.4.3	Eliminierung von Stickstoffverbindungen	293
14.4.4	Biologische Nitrifikation	294
14.4.5	Biologische Denitrifikation	296
14.4.6	Verfahrenskonzepte	296
14.5	Alternative Verfahren	298
15	Industrielle Abwasserreinigung	301
15.1	Aerobe Verfahren	301
15.1.1	Blasensäulenreaktor	301
15.1.2	Schlaufenreaktor	303
15.1.3	Festbettreaktoren	305
15.2	Anaerobe Verfahren	306
15.2.1	Mikrobiologische Besonderheiten	306
15.2.2	Verfahrenstechnische Aspekte	308
16	Schlammbehandlung	310
16.1	Überblick und Kenngrößen von Klärschlämmen	310
16.2	Schlammmenge und Schlammbeschaffenheit	313
16.3	Verfahren zur Schlammstabilisierung	315
16.3.1	Anaerobe Schlammstabilisierung	315
16.3.2	Aerobe Schlammstabilisierung	317
16.4	Schlammmentwässerung	319
16.5	Schlammverwertung und -entsorgung	321
17	Sanierung von Altlasten	322
17.1	Einführung	322
17.2	Sicherungsmaßnahmen	324
17.3	Dekontaminationsmaßnahmen	326
17.3.1	Biologische Verfahren	326
17.3.2	Chemisch-physikalische Verfahren	329
17.3.3	Thermische Verfahren	332
17.3.4	Aktive und passive hydraulische Verfahren	336

17.3.5	Aktive pneumatische Verfahren	337
17.4	Fragen	339
18	Thermische und mechanische Abgasreinigung	342
18.1	Staubabscheidung	343
18.1.1	Filternde Abscheider	345
18.1.2	Massenkraftabscheider	348
18.1.3	Elektroabscheider	351
18.1.4	Mechanische Nassabscheider	353
18.2	Absorption	355
18.2.1	Physikalische Absorption	356
18.2.2	Chemische Absorption	357
18.2.3	Rauchgasentschwefelung	358
18.2.4	Apparaturen	362
18.3	Adsorption	363
18.3.1	Apparaturen	365
18.4	Kondensation	366
18.5	Thermische Abgasreinigung	367
18.5.1	Oxidative thermische Abgasreinigung	368
18.5.2	Reduktive thermische Abgasreinigung	372
18.5.3	Das SCR-Verfahren zur NO_x -Reduktion	373
18.6	Flammen-, thermische und katalytische Verbrennung	374
18.7	Fragen	380
19	Biologische Abgasreinigung	383
19.1	Grundlagen	383
19.2	Einteilung der Verfahren	385
19.3	Biofilter	385
19.3.1	Funktionsprinzip	386
19.3.2	Verfahrensparameter	387
19.3.3	Bauformen	389
19.3.4	Einsatzgebiete	390
19.4	Biowäscher	391
19.4.1	Funktionsprinzip	391

19.4.2	Verfahrensparameter	392
19.4.3	Bauformen	393
19.4.4	Einsatzgebiete	395
19.5	Membranbioreaktor	395
19.5.1	Funktionsprinzip	396
19.5.2	Bauform	397
19.5.3	Einsatzgebiete	398
20	Lärmschutz und Lärmvermeidung	399
20.1	Luftschallentstehung und primärer Schallschutz	399
20.2	Schallausbreitung im Freien	402
20.3	Schallausbreitung in Räumen	403
20.4	Sekundärer Schallschutz	405
20.4.1	Schallschirme	405
20.4.2	Schalldämpfer	406
20.4.3	Kapsel	408
20.5	Messung der Geräuschemission	408
20.6	Prognose der Lärmbelastung und Immissionsschutz	409
20.7	Übungen	411
21	Konzept zur Abfallvermeidung	414
21.1	Einführung	414
21.2	Siedlungsabfälle	416
21.2.1	Kunststoffe, Verpackungen	418
21.2.2	Textilabfälle	421
21.2.3	Wiederverwendung	423
21.3	Industrieabfälle	424
21.4	Metallabfälle	426
21.4.1	Eisen und Stahl	427
21.4.2	Nichteisenmetall am Beispiel Aluminium	428
21.5	Elektronikschrott	429
21.6	Bau- und Abbruchabfälle	432
21.7	Fragen	433

22	Abfallrecycling	437
22.1	Einführung	437
22.2	Glasrecycling	440
22.3	Papierrecycling	441
22.4	Metallrecycling	443
22.4.1	Eisen und Stahl	444
22.4.2	Nichteisenmetalle am Beispiel Aluminium	445
22.4.3	Elektroschrott	445
22.5	Batterierecycling	446
22.6	Textilrecycling	447
22.7	Bau- und Abbruchabfallrecycling	450
22.8	Kunststoffrecycling	452
22.9	Recycling von biogenem Abfall	456
22.10	Fragen	457
23	Deponieren von Abfällen	460
23.1	Grundlagen der Deponietechnik/Deponien für Siedlungsabfall	460
23.2	Deponiegas und Sickerwasser	466
24	Müllverbrennung	471
24.1	Anlagentechnik und Verfahrensvarianten	471
24.2	Rauchgasreinigung	476
24.2.1	Entstaubung	477
24.2.2	Abtrennung der sauren Schadgase	479
24.2.3	Entstickung	480
24.2.4	Entfernung von Dioxinen und Furanen	481
24.3	Rückstandseseitigung/Rückstandsbehandlung	482
25	Energieeinsparung	484
25.1	Überblick	484
25.2	Wirtschaftlichkeit und Finanzierung	490
25.3	Wärmepumpen	494
25.4	Kraft-Wärme-Kopplung	497

26	Regenerative Energien	501
26.1	Überblick	501
26.2	Angebot an Solarenergie	504
26.3	Solarthermie	507
26.3.1	Energieumwandlung im Solarkollektor	507
26.3.2	Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung ..	509
26.3.3	Dimensionierung, Energieertrag und Wirtschaftlichkeit	511
26.4	Photovoltaik	512
26.4.1	Energieumwandlung in der Solarzelle und Anlagentechnik	513
26.4.2	Dimensionierung, Energieertrag und Wirtschaftlichkeit	515
26.5	Wasserkraft	516
26.5.1	Energieumwandlung mit Turbinen und Wasserrädern	517
26.5.2	Dimensionierung, Energieertrag und Wirtschaftlichkeit	518
26.6	Windkraft	519
26.6.1	Energieumwandlung an Rotorblättern	521
26.6.2	Dimensionierung, Energieertrag und Wirtschaftlichkeit	521
26.7	Biomasse	522
26.8	Geothermie	524
26.9	Beiträge zu einer künftigen Energieversorgung	525
	Stichwortverzeichnis	529

1

Ursachen der Umweltprobleme

■ 1.1 Vorbemerkungen

Das Wort **Umwelt** ist eine seit 1800 belegte Übersetzung von *omverden* aus dem Dänischen mit der Bedeutung „umgebenes Land“ oder „umgebene Welt“. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts etablierte sich das aus dem Französischen entlehnte Wort *Milieu* als Ersatzwort für den Begriff Umwelt.

Unter dem **Milieu** verstand man ursprünglich ein Substrat oder Medium, innerhalb dessen Leben entsteht und auch stattfindet. Die inhaltliche Qualität dieses Milieus zu erforschen, galt als die zentrale Herausforderung, um Theorien wie z. B. die Urzeugung zu widerlegen. Die Frage: „Wie die Umgebung eines Lebewesens, die auf dieses einwirkt und seine Lebensumstände beeinflusst“ war in den letzten Jahrzehnten von dominierender Bedeutung in der Forschung. In den naturwissenschaftlichen Disziplinen wurde der Begriff „Umwelt“ bereits 1909 von dem deutschen Biologen JAKOB VON UEXKÜLL eingeführt. Für ihn war „Umwelt“ die Summe aller Aspekte die ein Lebewesen umgeben und auf die es reagiert.

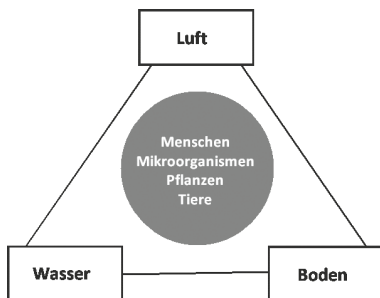


Bild 1.1
Hauptkomponenten der Umwelt

Der Begriff Umwelt ist in der heutigen Zeit ein häufig verwendeter Modebegriff und daher unscharf. So wird die „Umwelt“ auf Lebewesen bezogen, also auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen wie z. B. Bakterien, Algen oder Pilze. Die Lebewesen stehen in vielfältiger Beziehung untereinander und zu ihrer Umgebung. Diese Umweltfaktoren stellen alle möglichen äußeren Beeinflussungen dar, denen die Lebewesen ausgesetzt sein können. Die Summe aller Umwelteinflüsse bilden die Umwelt und damit die Natur.

Häufig spricht man statt der Umwelt auch von der **Biosphäre** (*griech.* Bios, leben, *lat.* Spaira. Kugel, Erdkugel) und meint damit die Gesamtheit aller lebenden Organismen wie Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen der besiedelten Schichten der Erde. Hierzu rechnet man die Erdatmosphäre bis zu einer Höhe von 25 km, die Ozeane bis zu einer Tiefe von 10 km und die Erdkruste bis zu einer Tiefe von 3 km.

Der Mensch als Teil des Ökosystems Erde beeinflusst seine Umwelt, wird aber auch umgekehrt von „seiner“ Umwelt geprägt. Der Mensch verändert die Umwelt durch Technik und Wirtschaft, um seinen Lebensraum und seine Versorgung zu sichern. In der Zwischenzeit ist der Mensch zur dominierenden Größe im Ökosystem geworden. Er hat durch die Industrialisierung extrem in den Naturhaushalt eingegriffen und „seine“ Umwelt dadurch stark verändert. In der heutigen Zeit herrscht die Vorstellung, dass unbegrenztes Wachstum und unbegrenzte Gewinnmaximierung auf Dauer in einer intakten Wirtschaft und einer intakten Umwelt realisierbar sein können. Die wirtschaftlich postulierten **Selbstregulierungsmechanismen** des Marktes waren aber niemals darauf ausgerichtet, entstehende Umweltprobleme als Regulativ zu berücksichtigen und können damit der jetzigen Situation nicht entgegenwirken.

■ 1.2 Umweltprobleme unserer Zeit

1.2.1 Klimawandel

Grundsätzlich ist der Begriff des Klimawandels als neutral zu bewerten, denn er beschreibt in erster Linie die Veränderung des seit Aufzeichnungsbeginn bekannten Klimas der Erde. Der beschriebene Wandel könnte sich demnach sowohl in einer Erwärmung als auch Abkühlung der Erde äußern. Klar ist aber, dass sich heutzutage alleine die Erderwärmung hinter dem Begriff des Klimawandels verbirgt.

Mit der der Industrialisierung ist die **globale Durchschnittstemperatur** um etwa ein Grad Celsius gestiegen. Hauptursache der menschengemachten Erderwärmung sind die Treibhausgase, die beim Verbrennen fossiler Energieträger, wie Öl, Gas

oder Holz in die Atmosphäre gelangen. Auch durch die Abholzung von Wäldern kann weniger CO_2 aufgenommen werden und das zuvor von den Bäumen aufgenommene CO_2 gelangt wieder in die Atmosphäre. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Stromerzeugung oder die Abgabe von Fahrzeugen und besonders Flugzeugen haben ebenfalls einen hohen Anteil am Klimawandel. Eine weitere Ursache für den Klimawandel ist unser Fleischverzehr. Für die Herstellung von Tierfutter werden Wälder gerodet, um Platz für Felder und Weiden zu machen. Rinder, Schweine und Schafe, sondern zudem große Mengen an Methan ab. Das Gas CH_4 ist rund 25-mal klimaschädlicher als CO_2 .

Übermäßige Hitzewellen, Dürreperioden, Stürme und Überschwemmungen sind die Folgen. Wenn dieser Klimawandel, bzw. diese Erderwärmung, nicht nachhaltig bekämpft wird, gilt ein weltweiter Temperaturanstieg um mehr als drei Grad Celsius bis Ende 2100 als wahrscheinlich. Ein Temperaturanstieg bedeutet aber nicht nur, dass es etwas wärmer wird, sondern dass die Wahrscheinlichkeit für extreme Hitzeereignisse wie Trockenperioden, Starkregen oder Überschwemmungen zunehmen. Die Hitzewellen im Sommer werden immer häufiger, während die für die Vegetation notwendigen Kälteperioden immer kürzer werden.

Diese **extremen Wetterverhältnisse** beinhalten nicht nur für ältere und kranke Menschen, sondern auch für Kinder ein erhöhtes Gesundheitsrisiko. Auch sind die Lebensräume von kaltwasserliebenden Krebs- und Fischarten sowie bestimmter Zwerglibellen bedroht. Außerdem können sich in einem veränderten Klima Tier- und Pflanzenarten ansiedeln, die ebenfalls ein potenzielles Gesundheitsrisiko für den Menschen darstellen können (z. B. Tigermücke, Tsetse-Fliege).

Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem:

- steigender Meeresspiegel, Gletscherschmelze, Zunahme von Dürre- und Hitzeperioden, Hochwasser, Stürme und Überschwemmungen,
- Wasserknappheit von Trinkwasser,
- Abnahme der biologischen Vielfalt,
- Temperaturanstieg führt zu einem geringeren Sauerstoffgehalt in den Gewässern,
- Verlust von Meeres- und Küstenökosystem (z. B. Korallenriffe),
- extreme Wetterverhältnisse beeinträchtigen die Gesundheit des Menschen (z. B. Herz-Kreislauf-Probleme),
- Ausbreitung von Infektionskrankheiten (z. B. Malaria) auf andere Gebiete.

1.2.2 Wasserknappheit

Das Leben auf der Erde hängt von ausreichenden Mengen und ausreichender **Verfügbarkeit von Trinkwasser** ab. Wasserknappheit ist ein massives Umweltproblem unserer Zeit.

- Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen bestehen zu großem Teil aus Wasser – der erwachsene menschliche Körper besteht im Durchschnitt aus 60 % Wasser.
- Pflanzen bauen im Rahmen der Photosynthese aus Kohlenstoffdioxid und Wasser organische Stoffe auf, die für die Ernährung von Mensch und Tier unentbehrlich sind.
- Der Mensch nimmt täglich ca. 3 Liter Wasser in Form von Nahrungsmitteln und Getränken auf.

Jeder Deutsche verbraucht pro Tag ca. 120 Liter Wasser für Nahrung, Körperpflege oder Reinigungsarbeiten. Zusammen mit dem indirekten Wasserverbrauch für die verzehrten Lebensmittel steigt diese Menge sogar 5300 Liter pro Tag. Die benötigten Wassermengen werden durch den **Wasserkreislauf der Natur** zur Verfügung gestellt:

- Verdunstung von Meer- Seen- und Flusswasser, aber auch Verdunstung auf dem Festland (Boden und Pflanzen),
- Wolkenbildung,
- Niederschläge.

In Mitteleuropa – und somit auch in Deutschland – fallen ausreichende Niederschläge, günstig über die Jahreszeiten verteilt, dass sie – von extremen Trockenperioden abgesehen – oberirdische Gewässer und Grundwasser (vgl. Abschnitt 9.1) anreichern. Die Voraussetzung ist jedoch, dass durch menschliche Eingriffe in den Natur- und Wasserhaushalt keine Störungen verursacht werden.

Die mitteleuropäische Art zu leben, ist von Wasserverschwendung geprägt und damit mitverantwortlich für die weltweite Wasserknappheit. Aber auch die zunehmende Vergiftung der Flüsse und das Abpumpen des Grundwassers für industrielle Zwecke sorgen dafür, dass vielerorts bereits akute Wasserknappheit herrscht.

1.2.3 Luftverschmutzung

Die **Freisetzung umwelt- und gesundheitsschädlicher Schadstoffe** in die Luft wird als Luftverschmutzung bezeichnet. Rauch, Ruß, Staub, Aerosole oder Dämpfe sind nur einige Beispiele. Mit beginnender Industrialisierung hat auch das „Problem“ Luftverschmutzung begonnen. Hierzu gehören insbesondere Abgase aus der

Industrie, von Autos oder Flugzeugen, aber auch private Haushalte. Der Mensch ist die alleinige Ursache für diese Umweltverschmutzung. Sie ist die größte Ursache für Krankheit und vorzeitigen Tod und betrifft alle Menschen, beginnend vom ungeborenen Baby bis hin zu alten Menschen über alle Ländergrenzen hinweg. Durch Luftverschmutzung können nahezu alle Organe des Menschen betroffen sein. Lungenentzündung, Bronchitis und Asthma insbesondere bei Kindern haben ihre Ursache in dieser Umweltverschmutzung.

In Ländern der Dritten Welt, China, Russland und anderen Schwellenländern ist die Luftverschmutzung besonders hoch. In den Industrieländern ist die Luftverschmutzung durch wirksame Maßnahmen der Luftreinhaltung in den letzten Jahrzehnten zurückgegangen. Ungeachtet dieser Maßnahmen ist in Europa die Luftverschmutzung immer noch das größte verschmutzungsbedingte Gesundheitsrisiko [1.1]. Nach einer Studie starben 2018 etwa 8,7 Mio. Menschen – das entspricht ca. 20% aller Todesfälle – durch Luftverschmutzung infolge Verbrennung fossiler Energieträger [1.2].

1.2.4 Bodenerosion

Unter Bodenerosion versteht man den Abtrag von Bodenbestandteilen durch abfließendes Wasser, Wind, Schneeschmelze und Bodenverlagerungen. Damit verlieren die Böden ihren fruchtbarsten und den landwirtschaftlich interessantesten Teil als wichtigste Produktionsgrundlage für Pflanzen.

Bodenerosion: Der Abtrag von Bodenpartikel durch Wind oder Wasser ist eigentlich ein natürlicher Prozess, der jedoch durch die Bodenbearbeitung des Menschen um ein Vielfaches erhöht wird.

Seit Beginn der Landwirtschaft durch den Menschen wurde etwa die Hälfte der Oberfläche des Planeten Erde in landwirtschaftlich nutzbare Fläche umgewandelt. Die ursprünglichen Bodenflächen regulierten sich mittels natürlicher Prozesse von selbst. Nicht jedoch bei intensiver, monokultureller Landwirtschaft, Überbeanspruchung und übermäßiger Einsatz von Düngemittel, die zu einer irreversiblen Veränderung der Strukturen und Funktionen (**Bodendegradation**) des Bodens führen.

Landwirte sollten Fruchtfolgen und sinnvolle Brachzeiten einhalten, aber auch für geeignete windschützende natürliche Hecken sorgen. Dichte Wälder und Wiesen sind der ideale Schutz gegen das Umweltproblem der Bodenerosion. Außerdem müssen Flüsse und Seen sowie das Grundwasser vor Gift- und Schadstoffen geschützt werden.

Überweidung: Auch das zu häufige Abgrasen von Pflanzen durch Nutztiere führt zur Degradation der Pflanzendecke. Bei zu wenigen Pflanzen ist die Bodenabdeckung nicht mehr sichergestellt und damit der Schutz vor Witterungseinflüssen gefährdet.

Übernutzung: Die konventionelle Landwirtschaft strebt möglichst hohe Erträge in möglichst kurzer Zeit an. Das Ackerland muss zu diesem Zweck immer wieder gepflügt und bepflanzt werden. Die Reste der vorherigen Ernte bleiben nicht auf der Bodenoberfläche, wo sie eine Schutzschicht vor aufprallendem Regen bilden würden. Außerdem verliert der Boden durch zu häufiges Pflügen an strukturelle Stabilität.

1.2.5 Plastikmüll im Meer

Schätzungen zufolge werden weltweit 4,8 bis 12,7 Mio. Tonnen Plastikmüll in die Meere eingetragen. Das entspricht etwa einer Lkw-Ladung pro Minute. Aktuelle Berechnungen, die Seen, Flüsse und Meere umfassen gehen sogar von einem Eintrag von 19 bis 23 Mio. Tonnen in diese Ökosysteme aus [1.3, 1.4]. Jedes Jahr werden in der Folge 100 000 Meeressäuger und ca. 1 000 000 Seevögel.

Ein zusätzliches Problem ist die **schlechte biologische Abbaubarkeit** von Plastik. Eine Plastikflasche benötigt ca. 500 Jahre, bis sie sich zu Mikroplastik (< 5 mm) umgesetzt hat. Und damit ist Plastik immer noch nicht vollständig biologisch abgebaut, sondern treibt in riesigen Müllstrudel, angetrieben von Meeresströmungen in unseren Ozeanen [1.5]. In 30 Jahren werden bei nahezu allen Meeressäugern Plastikteile im Verdauungstrakt zu finden sein, wenn der Müll weiterhin ins Meer gespült wird. Die Tiere verhungern qualvoll, weil sich ein Sättigungsgefühl einstellt. Auch andere Lebensräume wie Korallenriffe werden durch herumtreibenden Plastikmüll beschädigt. Viele Kunststoffe enthalten umwelt- und gesundheitsschädliche Stoffe (z.B. Flammschutzmittel oder Weichmacher) und werden teilweise im Meer freigesetzt.

Schlechte Entsorgungssysteme, nicht ausreichender Bildungsstand, Bequemlichkeit und natürlich die mangelhafte Verantwortung der Unternehmen für den in Umlauf gebrachten Verpackungsmüll sind wichtige Ursachen. Ein Pfandsystem wie in Deutschland gibt es leider nur in wenigen Ländern. Ein plastikfreier Lebensstil ist jedoch der beste Ansatz um dieses Umweltproblem in den Griff zu bekommen.

1.2.6 Abholzung der Wälder

Die weltweite Abholzung der Wälder wird mit großen Schritten vorangetrieben. Sie hat vielschichtige, aber dennoch klare Ursachen [1.6]:

- Schaffung von landwirtschaftlichen Flächen und Rinderweiden,
- neue Nutzungsflächen für Plantagen,

- Ausbeutung von Bodenschätzen aus den Waldböden,
- Herstellung von Konsumgütern.

Eine weitere Ursache für den Waldverlust sind Waldbrände, zu denen es aufgrund vermehrter Dürrephasen häufiger kam.

Wälder müssen für die Schaffung von Ackerflächen weichen, um Platz zum Anbau von **Zuckerrohr, Bananen, Kaffee, Ölpalmen** und vor allem **Soja** zu machen. Der Grund für die extreme Sojaproduktion ist nicht, weil die Menschen so viel Soja verzehren, sondern weil aus dem Sojaschrot überwiegend Tierfutter hergestellt wird, um Rinder, Schweine und Hühner zu mästen. Der globale Soja-Handel hat sich in den letzten 10 Jahren fast verdreifacht auf 180 Mio. Tonnen [1.7]. Um die weltweite Nachfrage nach dem Lebensmittel Fleisch und auch Leder-Produkten aus Kuhhäuten zu befriedigen, nimmt die Abholzung weiter zu.

Die **ökologische Vielfalt in Regenwäldern** muss den Plantagen mit **industrieller Monokultur** weichen. Auf diesen Plantagen wird natürlich mit Pestiziden gearbeitet, was absolut keinen Nutzen für die Natur darstellt. Eine Plantage hat nichts mit einem intakten Regenwald zu tun.

Auch zur Ausbeutung der unter den Wäldern vorkommenden „wertvollen“ **Bodenschätze**, die zur Herstellung von Smartphones, Elektroautos oder Schmuck benötigt werden, werden die Bäume abgeholzt. Bestimmte Erze, wie z. B. Bauxit werden im Tagebau gewonnen. Dabei wird die Oberfläche des Waldbodens großflächig abgetragen. Andere Erze werden hingegen im Untertagebau abgebaut. Hier muss in vielen Fällen der Grundwasserspiegel abgesenkt werden, wodurch die Wasserversorgung der Wälder nicht ausreichend gewährleistet ist.

Viele **Konsumgüter** aus unserem Alltag, wie z. B. Gartenmöbel werden nach wie vor aus Tropenhölzern hergestellt. Eine der größten Gefahren für den Regenwald aber auch der „normalen“ Wälder, ist der weltweite Papierverbrauch.

1.2.7 Welthunger

Der Welthunger ist kein direktes Umweltproblem, sondern ein Problem durch die Umwelt. In Afrika, Südamerika und Südost-Asien leiden besonders viele Menschen an Unter- und Mangelernährung. Gemäß dem Welthunger-Index (WHI) 2022 ist die Hungerlage in fünf Ländern besonders ernst: Zentralafrikanische Republik, Tschad, Demokratische Republik Kongo, Madagaskar und Jemen.

Die Ursachen von Hunger und Mangelernährung sind vielfältig:

- **Naturkatastrophen:** Extreme Wetterereignisse haben immer schon zu Hungerkrisen geführt. Dürren und Überschwemmungen führen zu Ernteaussfällen. Mit dem Klimawandel nehmen extreme Wetterereignisse zu.

- **Armut:** Hunger ist in erster Linie eine Folge von Armut. Frauen und Kinder sind besonders benachteiligt. Sind bereits die schwangeren Frauen unterernährt, können sich die ungeborenen Babys nicht richtig entwickeln und kommen häufig zu früh und/oder untergewichtig zur Welt. Hunger und Armut bilden einen Teufelskreis.
- **Kriege und Konflikte:** Aufgrund bewaffneter Auseinandersetzungen sind die Menschen nicht mehr in der Lage ihre Felder zu bestellen. Landwirtschaftliche Infrastruktur wie Bewässerungsanlagen werden zerstört. Durch die eingeschränkte Sicherheit leidet der Handel – Nahrungsmittel sind kaum verfügbar, werden teuer.
- **Ungleichheit:** Die Agenda 2030 ruft uns dazu auf, keinen zurückzulassen. Ungeachtet dieser Absichtserklärung verschärft sich die Ungleichheit zwischen Arm und Reich.

Es entsteht der Eindruck, dass die Menge an produzierter Nahrung auf unserer Erde nicht ausreicht, um dem steigenden Wachstum der Weltbevölkerung standzuhalten. Der Grund für den Welthunger ist aber kein Produktionsproblem, sondern ein Verteilungsproblem. Der überwiegende Teil des Getreides wird z. B. zu Viehfutter für die Produktion von Fleischerzeugnissen verwendet. Mit jedem zusätzlichen Menschen auf unserem Planeten steigt auch der Bedarf an Lebensmitteln. Die Überbevölkerung ist somit auch eine Ursache dieses Problems [1.8].

Literatur

- [1.1] World Health Organization (WHO) (2014): 7 million premature deaths annually linked to air pollution. 25.03.2014, Zugriff am 18.01.2023, verfügbar unter: <https://www.who.int/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>
- [1.2] VORA, K. et al. (2021): Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem. In: Environmental Research. 195. Jahrgang
- [1.3] SCHULZ, C. (2019): Wie der Plastikmüll Umwelt & Natur zerstört. 20.03.2019, Zugriff am 17.01.2023, verfügbar unter: <http://www.careelite.de/plastikmuell-umwelt-meer/>
- [1.4] WWF (2022): Das kann kein Meer mehr schlucken: Unsere Ozeane versinken im Plastikmüll. Zugriff am 17.01.2023, verfügbar unter: <http://www.wwf.de/themen-projekte/plastik/unsere-ozeane-versinken-im-plastikmuell/>
- [1.5] SCHULZ, C. (2018): Die 5 großen Müllstrudel im Meer. 25.08.2018, Zugriff am 17.01.2023, verfügbar unter: <http://www.careelite.de/muellstrudel-im-meer>
- [1.6] WWF (2018): Der Waldbericht 2018: Die schwindenden Wälder der Welt. Zugriff am 17.01.2023, verfügbar unter: <https://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/waldbericht-2018>
- [1.7] OroVerde – Die Tropenwaldstiftung (2023): Wie hängen Fleischkonsum, Soja und Regenwald zusammen? Zugriff am 17.01.2023, verfügbar unter: <https://www.regenwald-schuetzen.org/verbrauchertipps/soja-und-fleischkonsum/fleischkonsum-und-regenwald>
- [1.8] Deutsche Welthungerhilfe (2023): Hunger: Verbreitung, Ursachen & Folgen. Zugriff am 17.01.2023, verfügbar unter: <https://www.welthungerhilfe.de/hunger/>
- [1.9] Umweltbundesamt (2023): Webseite. Zugriff am 17.01.2023, verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klimaenergie/klimawandel/beobachter-klimawandel>
- [1.10] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022): Klimaschutz in Zahlen – Aktuelle Emissionstrends und Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland. Berlin

2

Physikalische Größen und Einheitensysteme

■ 2.1 Größen und Größenarten

Ein wesentliches Ziel der naturwissenschaftlichen und technischen Forschung ist die Beschreibung der in der Natur ablaufenden Vorgänge bzw. der technischen Prozesse durch mathematische Gleichungen. Diese werden entweder durch Experimente oder durch theoretische Überlegungen erhalten. Diese Gleichungen stellen einen funktionalen Zusammenhang zwischen den für den betrachteten Prozess maßgeblichen erfassbaren Eigenschaften oder Erscheinungen des Systems her, die auch allgemein Einflussgrößen genannt werden. Solche Größen sind z.B. Länge, Masse, Zeit, Stromstärke, Konzentration, Arbeit oder Energie. Jede dieser **Größe** G lässt sich aufspalten in ein Produkt aus dem **Zahlenwert** $\{G\}$ und der dazugehörigen **Einheit** $[G]$:

$$G = \{G\} \cdot [G] \quad (2.1)$$

Die Einheit ist eine willkürlich wählbare, aber vereinbarte Größe der gleichen Art wie die betrachtete Größe. Die physikalische Größe der Zeit $t=60\text{ s}$ besteht beispielsweise aus dem Zahlenwert $\{t\}=60$ und der Einheit $[t]=\text{s}$. Statt der Einheit „Sekunde“ kann auch eine andere Zeiteinheit verwendet werden, z.B. „Minute“ oder „Stunde“.

Eine Gleichung zwischen verschiedenen Einflussgrößen (Größengleichung) beinhaltet immer die Arten (Einheiten) dieser Größe und deren Zahlenwerte. Größengleichungen sind daher im Unterschied zu den reinen Zahlenwertgleichungen (z.B. $4 \cdot 2 = 8$) auch Einheitsgleichungen. Eine Größengleichung ist demzufolge auch nur dann erfüllt, wenn Zahlenwert und Einheit auf beiden Seiten übereinstimmen.

Gleichartige Größen werden unter dem Begriff **Größenarten** zusammengefasst. So stellen die Größen Arbeit und Wärme etwas grundsätzlich Anderes dar, gehören jedoch beide der gemeinsamen Größenart Energie an. Der überwiegende Teil der physikalischen und chemischen Größenarten sind durch Naturgesetze miteinander

der verknüpft. Einige müssen jedoch unabhängig voneinander festgelegt werden. Sie werden als Grundgrößenarten oder **Basisgrößen** bezeichnet. Aus diesen Basisgrößen werden die abgeleiteten Größen definiert.

Bisher existierte eine Vielzahl von Einheitensystemen, z. B. das physikalische und das technische Einheitensystem u. v. a.; daneben kommen noch die britischen und US-Einheitensysteme. Die 26. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) hat am 16. November 2018 eine Neudefinition der SI-Basiseinheiten beschlossen. Für die Definition der sieben Basisgrößen Länge, Masse, Zeit, Temperatur, Stromstärke, Stoffmenge und Lichtstärke werden nach dem **Internationalen Einheitensystem SI** (Système International d'unités) nur noch Konstanten verwendet. Die Festlegung für die Einheiten Sekunde (s), Meter (m) und Candela (cd) sind nicht geändert worden. Ihre Definition ist jedoch konsistent zu den neuen Definitionen von Kilogramm (kg), Ampere (A), Kelvin (K) und Mol (mol). Die Basisgrößen, Basiseinheiten und Einheitenzeichen sind in Tabelle 2.1 gezeigt.

Tabelle 2.1 SI-Basisgrößen und Basiseinheiten

Basisgröße	Name der Basiseinheit	Einheitenzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Die Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems sind gegenwärtig wie folgt definiert:

Der **Meter** (m) ist die Einheit der Länge und ist definiert als die Strecke, die Licht im Vakuum während $1/299\,792\,458$ Sekunden durchläuft. $1\text{ m} = (c/299\,792\,458)\text{ s}$

Das **Kilogramm** (kg) ist die Einheit der Masse und wird über die Planck-Konstante $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\text{ J s}$ definiert. Dabei gilt $\text{J} \cdot \text{s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ und die Sekunde s sowie das Meter m werden durch $\Delta\nu$ (Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands von Atomen des Nuklids $^{133}\text{Cs} = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$) und c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$) definiert.

Eine **Sekunde** (s) ist die Einheit der Zeit und definiert als Zeitdauer von $9\,192\,631\,770$ Schwingungsperioden der Strahlung des $^{133}\text{Cäsiumisotops}$. $1\text{ s} = 9\,192\,631\,770/\Delta\nu$.

Das **Ampere** (A) ist die Einheit der Stromstärke und wird durch die Elementarladung $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ definiert. Es gilt für das Coulomb $\text{C} = \text{A s}$, wobei die Sekunde s durch $\Delta\nu$ definiert wird.

Das **Kelvin** (K) ist die Einheit der thermodynamischen Temperatur. Das Kelvin wird durch die BOLTZMANN-Konstante $k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ definiert. Unter Verwendung der Beziehung $\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ werden die Einheiten kg, m und s durch die Konstanten h , $\Delta\nu$ und c definiert.

Die **Candela** (cd) ist die Einheit der Lichtstärke. Sie ist definiert als monochromatische Strahlungsquelle mit einer Frequenz von $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$. $1 \text{ cd} = (K_{\text{cd}}/683) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$ mit K_{cd} dem photometrischen Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz} = 683 \text{ lm W}^{-1}$.

Das **Mol** (mol) ist die Einheit der Stoffmenge und wird durch die AVOGADRO-Konstante $N_A = 6,022\,140\,7 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ definiert. Die Stoffmenge eines Systems kann aus verschiedenen gleichartigen Teilchen, wie z. B. Atomen, Molekülen, Ionen, bestehen.

Dezimale Vielfache und Teile der Einheiten werden durch Voransetzen von Präfixen ausgedrückt (vgl. Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2 Präfixe für dezimale Vielfache und Teile von Einheiten (DIN 1301, Auszug)

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

Die Vielzahl möglicher Größen lassen sich alle auf die sieben Grundgrößen zurückführen. Eine Grundgröße kann nicht weiter auf andere Größen reduziert werden. Daher gibt es für eine **Grundgröße** keine Definition, sondern nur eine Messvorschrift, mit der ihre Einheit festgelegt wird.

Alle anderen Größen sind abgeleitete Größen und können entsprechend ihrer Definition als solche dargestellt werden. Als Beispiel einer abgeleiteten Größe soll die Kraft betrachtet werden. Für sie gilt das physikalische Gesetz:

$$\begin{aligned} \text{Kraft} &= \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung} \\ F &= m \cdot g \end{aligned}$$

Mit der Masse $m = 1 \text{ kg}$ als Basisgröße und der Beschleunigung $a = 1 \text{ m/s}^2$ als bereits abgeleitete Größenart ergibt sich:

$$F = m \cdot a = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1 \text{ N}$$

Die abgeleitete Einheit kg m/s^2 hat die neue Bezeichnung Newton erhalten. 1 N ist daher die Kraft F , die der Masse $m = 1 \text{ kg}$ die Beschleunigung $a = 1 \text{ m/s}^2$ erteilt.

Tabelle 2.3 Abgeleitete Größenarten und Einheiten des Internationalen Einheitensystems

Größenart	Einheit	physikal. Gleichung	Einheitengleichung
Kraft	N (Newton)	$F = m \cdot a$	$\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
Druck	Pa (Pascal)	$p = F / A$	$\text{Pa} = \text{kg} / (\text{m/s}^2)$
Energie	J (Joule)	$W = F \cdot s$	$\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
Leistung	W (Watt)	$P = W / t$	$\text{W} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
Frequenz	Hz (Herz)	$f = 1 / t$	$\text{Hz} = 1 / \text{s}$

Viele der häufig verwendeten Einheiten sind keine SI-Einheiten. Sie sind jedoch Vielfache von SI-Einheiten, wie z.B. die Einheit Liter ($1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$). In Tabelle 2.4 sind einige gebräuchliche Umrechnungsfaktoren für übliche Einheiten zusammengestellt.

Tabelle 2.4 Umrechnungsfaktoren häufig verwendeter Einheiten

Basisgröße	Name der Basiseinheit	Einheitenzeichen
Zeit (t)	Minute (min)	1 min = 60 s
	Stunde (h)	1 h = 3600 s
	Tag (d)	1 d = 86 400 s
	Jahr (a)	1 a = 31 536 000 s
Länge (l)	Ångström (Å)	1 Å = 10^{-10} m
Volumen (V)	Liter (l)	1 l = 10^{-3} m^3
Druck (p)	Bar (bar)	1 bar = 100 000 Pa
Energie (E)	Elektronenvolt (eV)	1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

■ 2.2 Größen- und Zahlenwertgleichungen

Größengleichungen sind im Unterschied zu den früher häufig verwendeten Zahlenwertgleichungen unabhängig von den verwendeten Einheiten und enthalten daher auch keine Umrechnungsfaktoren. Es ist daher zweckmäßig, Definitionen und Gesetze stets als Größengleichungen anzugeben.

Größengleichungen sind Gleichungen zwischen physikalischen Größen. Sie enthalten nur die Symbole der physikalischen Größen und Zahlenwerte, die aus mathematischen Operationen entstanden sind. Andere Zahlenwerte oder Zeichen, die aus der Umrechnung unterschiedlicher Einheiten stammen, enthalten sie nicht.

In **Größengleichungen** ist die physikalische Größe vollständig angegeben, also als Produkt aus Zahlenwert und Einheit. Folgendes Beispiel soll diesen Sachverhalt verdeutlichen:

$$\begin{aligned} \text{Kraft} &= \text{Masse} \cdot \text{Beschleunigung} \\ F &= m \cdot g \end{aligned}$$

Bei einer Masse von $m = 90 \text{ kg}$ sind der Zahlenwert $\{m\} = 90$ und die Einheit $[m] = \text{kg}$ in die Größengleichung einzusetzen. Mit der Fallbeschleunigung von $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ist ebenso zu verfahren. Im Internationalen Einheitensystem ergibt sich:

$$F = m \cdot g = 90 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 882,9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Mit $1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1 \text{ N}$ ist die Kraft $F = 882,9 \text{ N}$.

Im technischen Einheitensystem wäre:

$$m = \frac{F}{g} = \frac{90 \text{ kp}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 9,17 \frac{\text{kp} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Wird die Kraft $F = 882,9 \text{ N}$ in die Kräfteinheit des Technischen Einheitensystems umgerechnet, so ergibt sich mit $1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N}$:

$$F = 882,9 \text{ N} = 882,9 \text{ N} \cdot (1/9,81) \cdot \text{kp/N} = 90 \text{ kp}$$

Mathematische Beziehungen zwischen reinen Zahlen werden **Zahlenwertgleichungen** genannt. Sie werden nur in Sonderfällen verwendet, z. B. bei der Umrechnung verschiedener Temperatureinheiten. Die gebräuchlichste Einheit ist Grad Celsius. In den USA ist auch die Einheit Grad Fahrenheit in Gebrauch. Die meistverwendete Einheit für wissenschaftliche Zwecke ist das Kelvin.

Die Zahlenwerte der unterschiedlichen Einheiten sind durch Zahlenwertgleichungen verknüpft. Die Umrechnung einer Temperaturangabe von Fahrenheit in Celsius ist in dem folgenden Beispiel gezeigt:

$$\{\vartheta_C\} = 0,5556 \cdot (\{\vartheta_F\} - 32) \quad (2.2)$$

Nach Formel 2.2 lässt sich der Zahlenwert der Celsius-Temperatur errechnen. Für die Temperatur nach der Fahrenheit-Skala ist der reine Zahlenwert einzusetzen. Für 140 °F ergibt sich beispielsweise:

$$\{\vartheta_C\} = 0,5556 \cdot (140 - 32) = 60$$

Weitere Temperaturumrechnungsformeln sind in Tabelle 2.5 zusammengestellt.

Tabelle 2.5 Temperaturumrechnungsformeln häufig verwendeter Einheiten wie Grad Celsius (°C), Grad Fahrenheit (°F), Kelvin (K), Grad Rankine (°Ra) und Grad Réaumur (°Re)

$\{\vartheta_C\} = 0,5556 \cdot (\{\vartheta_F\} - 32)$	Grad Celsius ↔ Grad Fahrenheit
$\{\vartheta_C\} = (1,80 \cdot \{\vartheta_F\}) + 32$	
$\{\vartheta_C\} = \{T\} - 273,15$	Grad Celsius ↔ Kelvin
$\{T\} = \{\vartheta_C\} + 273,15$	
$\{\vartheta_C\} = 0,5556 \cdot (\{\vartheta_{Ra}\} - 491,67)$	Grad Celsius ↔ Grad Rankine
$\{\vartheta_{Ra}\} = (1,80 \cdot \{\vartheta_C\}) + 491,67$	
$\{\vartheta_C\} = 1,25 \cdot \{\vartheta_{Re}\}$	Grad Celsius ↔ Grad Réaumur
$\{\vartheta_{Re}\} = 0,80 \cdot \{\vartheta_C\}$	

Neben diesen wichtigsten Temperaturskalen gibt es noch eine Reihe veralteter Skalen, wie nach DELISLE, NEWTON oder RÖMER.

■ 2.3 Zustandsgrößen und Prozessgrößen

Eine **Zustandsgröße (Zustandsvariable)** ist eine physikalische Größe oder ein Parameter in einer Zustandsgleichung, die nur vom aktuellen Zustand eines betrachteten Systems abhängt. Der Weg, auf dem dieser Zustand erreicht wurde, ist daher nicht von Interesse. Eine Zustandsgröße beschreibt nur eine Eigenschaft des Systems in diesem Zustand. Temperatur, Druck, Masse, Dichte, Energie und Entropie sind Beispiele von Zustandsgrößen.

In der Thermodynamik wird ein System eindeutig beschrieben, beispielsweise durch Angabe der Zustandsgrößen Druck p , Temperatur T , Volumen V , Stoffmenge n bzw. Masse m , Enthalpie H und Entropie S . Diese Zustandsgrößen bleiben konstant, wenn sich das System im thermodynamischen Gleichgewicht befindet.

Physikalische Größen, die den Zustand eines thermodynamischen Systems beschreiben, werden thermodynamische Zustandsgrößen genannt. Es wird unterschieden:

- **Thermische Zustandsgrößen:** Temperatur T , Volumen V und Druck p .
- **Kalorische Zustandsgrößen:** innere Energie U , Enthalpie H , Entropie S und weitere.
- **Spezifische Zustandsgrößen:** physikalische Größen, die in der Regel auf die Masse eines Stoffes oder Körpers oder auf Raumdimensionen eines Systems (Volumen, Flächeninhalt, Länge) bezogen sind. Nach DIN-Norm ist der Begriff spezifisch jedoch nur für den Massenbezug reserviert. Spezifische Größen werden mit Kleinbuchstaben bezeichnet (Ausnahmen: Masse m und Stoffmenge n). Beispiel: spezifisches Volumen $v = V/m$.



Beispiele von wegunabhängigen Zustandsgrößen

Das Volumen einer definierten Gasmenge Luft wird durch Änderung des Druckes und der Temperatur von einem bestimmten Anfangswert V_A zu einem bestimmten Endwert V_E gebracht. Experimentell lässt sich feststellen, dass die Reihenfolge, in der die Druck- und Temperaturänderung vorgenommen wurde, keinen Einfluss auf die Volumenänderung ΔV hat. Die Änderung des Volumens ist immer gleich groß und unabhängig vom Weg.

Ein Bergsteiger hat auf einem Berggipfel eine bestimmte, von der Höhe des Berges abhängige, potenzielle Energie. Es ist gleichgültig, auf welchem Weg der Bergsteiger den Gipfel erreicht hat. Die Arbeit hingegen, die der Bergsteiger aufzuwenden hat, um auf den Gipfel zu gelangen (Energie), hängt natürlich vom zurückgelegten Weg ab.

- **Molare Zustandsgrößen:** auf die Stoffmenge n (Substanzmenge, Molmenge) bezogene Zustandsgrößen, auch stoffmengenbezogene Zustandsgrößen genannt. Sie werden durch den Index m gekennzeichnet. Beispiel: molares Volumen $V_m = V/n$.
- **Extensive Zustandsgrößen:** physikalische Größen, die zur Teilchenzahl proportional sind. Der Wert einer solchen Zustandsgröße ändert sich mit der Größe des betrachteten Systems. Beispiele sind Masse m , Stoffmenge n , Volumen V , Enthalpie H und Entropie S . Das Pendant der extensiven Größe ist die intensive Größe.
- **Intensive Zustandsgrößen:** physikalische Größen, die sich bei unterschiedlicher Größe des betrachteten Systems nicht ändern. Es werden systemeigene intensive Größen wie beispielsweise Temperatur T und Druck p und stoffeigene intensive Größen wie alle spezifischen und molaren Größen unterschieden.

Es ist natürlich auch möglich, extensive in intensive Größen umzuwandeln, indem diese auf eine bestimmte Masse (spezifische Größe) oder auf eine bestimmte Stoffmenge (molare Größe) bezogen werden. Das Volumen ist daher eine extensive Größe, während das molare Volumen im Unterschied hierzu eine intensive Größe darstellt.

Im Unterschied zu Zustandsgrößen beschreiben **Prozessgrößen** einen Prozessschritt zwischen zwei Zuständen. Sie stellen keine Eigenschaften des Systems dar, sondern beschreiben einen Austauschprozess zwischen zwei Systemen oder zwischen einem System mit seiner Umgebung. Prozessgrößen sind wegabhängig, also abhängig davon, wie der Prozess geführt wird.

■ 2.4 Zustandsfunktionen

Zustandsgleichungen stellen einen funktionalen Zusammenhang zwischen verschiedenen thermodynamischen Zustandsgrößen her, mit deren Hilfe sich der Zustand eines thermodynamischen Systems beschreiben lässt. Eine der Zustandsgrößen wird als **Zustandsfunktion** gewählt und die anderen von ihr abhängigen Zustandsgrößen als **Zustandsvariablen**. Mit Zustandsgleichungen lassen sich Eigenschaften von Gasen, Flüssigkeiten, Fluidgemischen und Feststoffen beschreiben.

Die bekanntesten Zustandsgleichungen dienen der Beschreibung von Gasen und Flüssigkeiten. Die wichtigste und zugleich auch einfachste Zustandsgleichung dieser Art ist die **allgemeine Gasgleichung**:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.3)$$

p Druck, V Volumen, n Stoffmenge, R allgemeine Gaskonstante, T Temperatur

Es konnte experimentell gezeigt werden, dass Formel 2.3 auf viele Gase näherungsweise bei geringen Drücken und hohen Temperaturen anwendbar ist. Bei kleinen spezifischen Volumina und hohen Drücken treten zu große Abweichungen von der durch die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases gegebene Gesetzmäßigkeit auf. Diese können dann nicht mehr vernachlässigt werden.

Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Abweichungen besteht darin, die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases durch einen Realgasfaktor Z zu korrigieren:

$$p \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T \quad (2.4)$$

p Druck, V Volumen, Z Realgasfaktor, n Stoffmenge, R allgemeine Gaskonstante, T Temperatur

Für ideale Gase ist $Z=1$, für reale Gase werden **Virialkoeffizienten** (Kräfte zwischen den Molekülen) angehängt, die experimentell, in manchen Fällen auch rechnerisch zu ermitteln sind:

$$Z = \frac{p \cdot V}{n \cdot R \cdot T} = 1 + \frac{B(T)}{V_m} + \frac{C(T)}{V_m^2} + \frac{D(T)}{V_m^3} \quad (2.5)$$

Der Realgasfaktor ist vom physikalischen Zustand abhängig. $B(T)$, $C(T)$, $D(T)$ usw. sind die Virialkoeffizienten. In Bild 2.1 ist die Abhängigkeit des Realgasfaktors Z für trockene Luft vom Druck p und der Temperatur T gezeigt.

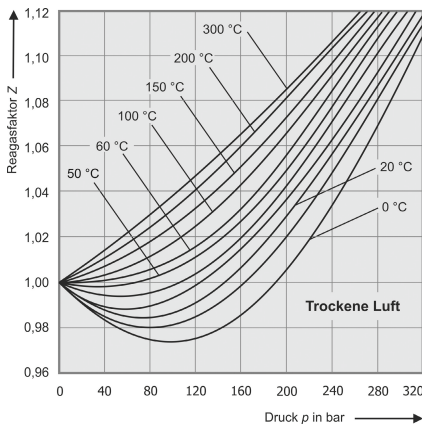


Bild 2.1
Realgasfaktor Z für trockene Luft

Der holländische Physiker JOHANNES DIDERIK VAN DER WAALS entwickelte eine historisch interessante Gleichung, welche die Kräfte zwischen den Molekülen als Ursache für die Abweichung berücksichtigte. Die Zustandsgleichung enthält außer den bekannten Größen zwei Parameter a und b , die man experimentell für ein gegebenes Gas bestimmen muss. Parameter a ist ein Maß für die Stärke des anziehenden Teils des intermolekularen Potenzials und b ist ein Maß für das Mindestvolumen, das die Moleküle in Anspruch nehmen können.

Zustandsgleichungen realer Gase werden am besten als empirische Gleichungen angesehen, deren Funktionsform gewählt wurde, um experimentell gefundene p - V - T -Daten wiederzugeben:

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V - n \cdot b} - \frac{n^2 \cdot a}{V^2} \quad (2.6)$$

p Druck, n Stoffmenge, R allgemeine Gaskonstante, T Temperatur, V Volumen, a Stoffkonstante, b Stoffkonstante

Die VAN-DER-WAALS-Zustandsgleichung basiert zwar auf nicht sehr genauen Korrekturkonstanten, ist aber die am häufigsten verwendete Gleichung. Eine weitere nützliche Zustandsgleichung ist die REDLICH-KWONG-Zustandsgleichung:

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V - n \cdot b} - \frac{n^2 \cdot a}{\sqrt{T}} \cdot \frac{1}{V \cdot (V + n \cdot b)} \quad (2.7)$$

p Druck, n Stoffmenge, R allgemeine Gaskonstante, T Temperatur, V Volumen, a Stoffkonstante, b Stoffkonstante

Obwohl in beiden Gleichungen dieselben Symbole für die Korrekturkonstanten a und b verwendet werden, haben sie für ein gegebenes Gas unterschiedliche Werte.

■ 2.5 Gehalts- und Konzentrationsangaben

Eine **Mischphase** ist eine Phase, die aus mehreren Stoffen, den Komponenten, besteht. Sie kann gasförmig, flüssig oder fest sein. Gasförmige Mischphasen werden auch Gasgemische genannt, flüssige Mischungen auch Lösungen und feste Mischphasen auch Mischkristalle oder feste Lösungen. Gemenge sind im Unterschied zu Gemischen keine Mischphasen, sondern heterogene Mehrphasensysteme.

Ein **ideales Gemisch** liegt vor, wenn sich bei isothermer ($T = \text{konst.}$) und isobarer ($p = \text{konst.}$) Reaktionsführung bei der Gemischbildung das Volumen, die innere Energie, die Enthalpie und die Wärmekapazität als Summe der jeweiligen Einzelstoffe ergeben. Viele Fluide (Gase und Flüssigkeiten) lassen sich so betrachten. Bei **realen Gemischen** stellen sich dagegen **Mischungseffekte** ein, d. h., das Volumen der Mischung ist nicht unbedingt gleich der Summe der Volumina der beiden Reinstoffe vor der Mischung. Mischt man beispielsweise 1,0 Liter Wasser mit 1,0 Liter Ethanol, so ist das Volumen des Gemisches mit ca. 1,9 Liter kleiner als die Summe der Einzelvolumina (negatives Exzessvolumen, **Volumenkontraktion**). Auch der umgekehrte Effekt ist bekannt und wird als positives Exzessvolumen (**Volumendilatation**) bezeichnet.

Hat ein Gemisch an allen Stellen die gleichen Eigenschaften, so wird es homogen genannt, es bildet eine Phase. Ist die Mischbarkeit jedoch begrenzt, so bilden sich mehrere Phasen wie z. B. Öl/Wasser- oder Wasser/Luft-Systeme (heterogene Gemische). Bei Flüssigkeiten ist von einer Lösung die Rede, wenn druck- und temperaturabhängig in Wasser nur wenig Öl oder in Öl nur wenig Wasser löslich ist.

Zur Beschreibung einer homogenen Mischphase lässt sich für jeden einzelnen Stoff i eine der folgenden Größen verwenden: die Masse m_i , das Volumen V_i oder die Stoffmenge n_i . V_i ist das Volumen, das der Stoff i allein bei gegebener Temperatur und Druck und vorliegendem Aggregatzustand einnehmen würde.

Im Internationalen Einheitensystem ist die Stoffmenge eine Basisgröße, deren Baseinheit das Mol ist (vgl. Abschnitt 2.1). Die **Stoffmenge** von 1 mol eines Stoffes besteht aus ebenso vielen Einzelteilchen (Atome, Moleküle oder Ionen), wie Atome in $12 \cdot 10^{-3}$ kg des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind. Bei der Verwendung der Basisgröße Stoffmenge müssen daher die einzelnen Teilchen des Systems genau spezifiziert sein. Es darf nicht heißen 1 mol Sauerstoff, sondern es muss zum Ausdruck gebracht werden, ob es sich um Sauerstoffatome (O), Sauerstoffmoleküle (O_2) oder Ozon (O_3) handelt. Es muss daher geschrieben werden: $1 \text{ mol O} \triangleq 16 \text{ g}$, $1 \text{ mol O}_2 \triangleq 32 \text{ g}$ bzw. $1 \text{ mol O}_3 \triangleq 48 \text{ g}$.

Eine Mischphase wird durch die Materiemenge (Masse, Stoffmenge oder Molvolumen) jeder Komponente beschrieben. Von Interesse ist im Allgemeinen nur der intensive, d. h. von der Größe des Systems unabhängige Zustand. Bei den Einzelmengen wird auf eine extensive Zustandsgröße bezogen, d. h. eine zur Materiemenge proportionale Größe, wie Masse, Stoffmenge oder Molvolumen (vgl. Abschnitt 2.3). Die Einzelmengen bestimmen die Zusammensetzung der Mischphase. Zusätzlich werden zwei voneinander unabhängige intensive Zustandsgrößen benötigt, z. B. Druck und Temperatur.

Um die Menge des gelösten Stoffes im Lösungsmittel zu charakterisieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Angabe des Massenanteils w ,
- Angabe des Stoffmengenanteils x ,
- Angabe des Volumenanteils φ ,
- Angabe der Massenkonzentration β ,
- Angabe der Stoffmengenkonzentration c ,
- Angabe der Volumenkonzentration σ .

Soll die Anteilsgröße angegeben werden, so werden stets Quotienten gleicher Größen wie Masse, Volumen oder Stoffmenge verwendet. Bei der Angabe einer Konzentration wird die Menge des gelösten Stoffes auf das Volumen der Flüssigkeit bezogen.

2.5.1 Massenanteil

Der Massenanteil (Formelzeichen w) einer Komponente an einem Stoffgemisch ist die anteilige Masse dieser Komponente an der Gesamtmasse des Stoffgemisches. Berechnet wird der Massenanteil der Komponente i als Quotient aus der Masse der Komponente m_i und der Summe aller Massen des Stoffgemisches aus k Komponenten:

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^k m_j} \quad (2.8)$$

Der Massenanteil einer Komponente des Gemisches liegt zwischen 0 und 1:

$$0 \leq w_i \leq 1 \quad (2.9)$$

Die Massenanteile aller k Bestandteile eines Stoffgemisches addieren sich zu 1:

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (2.10)$$

Multipliziert man den Massenanteil mit 100 %, so kann man ihn auch als prozentuale Größe angeben, also Gewichtsprozent (Gew.-%) bzw. Massenprozent. Dies sollte nach DIN 1310 jedoch vermieden werden.

2.5.2 Stoffmengenanteil

Der Stoffmengenanteil (Formelzeichen x) einer Komponente an einem Stoffgemisch ist die relative Anzahl der Teilchen (Atome, Moleküle, Ionen) dieser Komponente an der Gesamtteilchenzahl des Stoffgemisches. Im Unterschied dazu beschreibt das Stoffmengenverhältnis die relative Anzahl an Teilchen der Komponenten zueinander.

Berechnet wird der Stoffmengenanteil der Komponente i als Quotient aus der Stoffmenge der Komponente n_i und der Summe aller Stoffmengen des Stoffgemisches aus k Komponenten:

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^k n_j} \quad (2.11)$$

Der Stoffmengenanteil einer Komponente des Gemisches liegt zwischen 0 und 1:

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad (2.12)$$

Die Stoffmengenanteile aller k Bestandteile eines Stoffgemisches addieren sich zu 1:

$$\sum_{i=1}^k x_i = 1 \quad (2.13)$$

Multipliziert man den Stoffmengenanteil mit 100 %, so kann man ihn als prozentuale Größe angeben, also Stoffmengenprozent oder Molprozent (Mol-%).

2.5.3 Volumenanteil

Der Volumenanteil (Formelzeichen φ) einer Komponente an einem Stoffgemisch ist das anteilige Volumen dieser Komponente an der Summe der Volumina aller Komponenten des Stoffgemisches. Berechnet wird der Volumenanteil der Komponente i als Quotient aus dem Volumen der Komponente V_i und der Summe aller Volumina des Stoffgemisches aus k Komponenten:

$$\varphi_i = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^k V_j} \quad (2.14)$$

Der Volumenanteil einer Komponente des Gemisches liegt zwischen 0 und 1:

$$0 \leq \varphi_i \leq 1 \quad (2.15)$$

Die Volumenanteile aller k Bestandteile eines Stoffgemisches addieren sich zu 1:

$$\sum_{i=1}^k \varphi_i = 1 \quad (2.16)$$

Multipliziert man den Volumenanteil mit 100 %, so kann man ihn auch als prozentuale Größe angeben, also Volumenprozent (Vol.-%). Bei der Zusammensetzung von Gasen oder bei der Festlegung von Explosionsgrenzen ist diese Angabe üblich.

2.5.4 Massenkonzentration

Die Massenkonzentration (Formelzeichen β) ist eine Gehaltsangabe, bei der die Masse m_i eines Stoffes i auf das Volumen V eines Stoffgemisches oder einer Lösung angegeben wird:

$$\beta_i = \frac{m_i}{V} \quad (2.17)$$

Die SI-Einheit lautet $[\beta] = \text{kg/m}^3$. Bei Arbeiten im Labor wird meistens die Einheit g/l verwendet.

2.5.5 Stoffmengenkonzentration

Die Stoffmengenkonzentration (Formelzeichen c) ist eine Gehaltsangabe, bei der die Stoffmenge n_i eines Stoffes i auf das Volumen V eines Stoffgemisches oder einer Lösung angegeben wird:

$$c_i = \frac{n_i}{V} \quad (2.18)$$

Die SI-Einheit lautet $[c] = \text{mol}/\text{m}^3$. Bei Arbeiten im Laboratorium wird meistens die Einheit mol/l verwendet.

2.5.6 Volumenkonzentration

Die Volumenkonzentration (Formelzeichen σ) ist eine Gehaltsangabe für Mischphasen, insbesondere von Lösungen, bei der das Volumen V_i eines Stoffes i auf das Gesamtvolumen V eines Stoffgemisches oder einer Lösung angegeben wird:

$$\sigma_i = \frac{V_i}{V} \quad (2.19)$$

Die SI-Einheit lautet $[\sigma] = \text{m}^3/\text{m}^3$. Bei Arbeiten im Laboratorium wird meistens die Einheit l/l verwendet.

Die Volumenkonzentration unterscheidet sich von der Gehaltsangabe Volumenanteil, da bei der Volumenkonzentration eine mögliche Volumenkontraktion mitberücksichtigt ist.

2.5.7 Molalität

Die Molalität (Formelzeichen b) ist der Quotient aus der Stoffmenge n_i des gelösten Stoffes i und der Masse m_{Lsgm} des Lösungsmittels:

$$b = \frac{n_i}{m_{\text{Lsgm}}} \quad (2.20)$$

Die SI-Einheit lautet $[b] = \text{mol}/\text{kg}$.

2.5.8 Aktivität

Aufgrund interionischer Wechselwirkungen in konzentrierten Lösungen ist die **wirksame Konzentration** oder Aktivität der Lösung kleiner als die tatsächliche Konzentration. Die Abweichungen sind umso größer, je höher die Konzentrationen der Stoffe sind:

$$a = f \cdot \frac{c}{c^\circ} \quad (2.21)$$

a Aktivität, f Aktivitätskoeffizient, c Stoffmengenkonzentration, c° Standard-Stoffmengenkonzentration ($1 \text{ mol}/\text{l}$)

■ 2.6 Umrechnungen und Mischungsrechnung

Im Laboratorium werden mitunter Lösungen hergestellt, indem zwei Lösungen unterschiedlichen Massenanteils zu einer neuen Lösung vermischt werden. Manchmal wird auch eine Lösung hergestellt, indem eine höherkonzentrierte Lösung mit Lösungsmittel (z.B. Wasser) verdünnt wird. Die Mengen bzw. die Massenanteile werden mit der *Mischungsgleichung* berechnet:

$$m_1 w_1 + m_2 w_2 + \dots = (m_1 + m_2 + \dots) w_{\text{Mischung}} \quad (2.22)$$

m_1 Masse der Lösung 1, m_2 Masse der Lösung 2, w_1 Massenanteil der Lösung 1, w_2 Massenanteil der Lösung 2, w_{Mischung} Massenanteil der entstandenen Mischung

Benutzt man zum Verdünnen einer Lösung reines Lösungsmittel, so beträgt der Massenanteil des reinen Lösungsmittels $w_2 = 0$:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{w_{\text{Mischung}} - w_2}{w_1 - w_{\text{Mischung}}} \quad (2.23)$$

Die Differenz ($w_{\text{Mischung}} - w_2$) zu ($w_1 - w_{\text{Mischung}}$) verhalten sich wie die Massen der beiden Komponenten. Dieses Verhältnis lässt sich in Form eines Kreuzes, dem Mischungskreuz (Andreaskreuz), darstellen und damit das Massenverhältnis berechnen.



Zur schnellen **Umrechnung von Stoff- und Gehaltsgrößen** können die Gleichungen in Bild 2.2 genutzt werden.

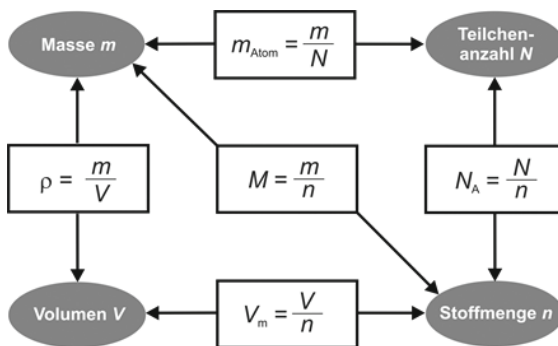


Bild 2.2

Umrechnungsformeln von Masse m in Teilchenanzahl N , Volumen V und Stoffmenge n mit der Dichte ρ und der molaren Masse M

Massenanteil in Stoffmengenanteil

$$w_i = \frac{x_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^k x_i \cdot M_i} \quad (2.24)$$

$$x_i = \frac{w_i}{M_i \cdot \sum_{i=1}^k \frac{w_i}{M_i}} \quad (2.25)$$

w_i Massenanteil der Komponente i in %, x_i Stoffmengenanteil der Komponente i in %, M_i molare Masse der Komponente i in g/mol

Massenanteil in Stoffmengenkonzentration

$$w_i = \frac{c_i \cdot M_i}{\rho \cdot 10} \quad (2.26)$$

$$c_i = \frac{\rho \cdot w_i \cdot 10}{M_i} \quad (2.27)$$

w_i Massenanteil der Komponente i in %, c_i Stoffmengenkonzentration der Komponente i in mol/l, ρ Dichte der Lösung in g/ml, M_i molare Masse der Komponente i in g/mol

Massenanteil in Volumenanteil

$$w_i = \frac{\sigma_i \cdot \rho_i}{\rho} \quad (2.28)$$

$$\sigma_i = \frac{w_i \cdot \rho}{\rho_i} \quad (2.29)$$

w_i Massenanteil der Komponente i in %, σ_i Volumenanteil der Komponente i in %, ρ_i Dichte des reinen Stoffes in g/ml, ρ Dichte der Lösung in g/ml

Massenanteil in Massenkonzentration

$$w_i = \frac{\beta_i}{\rho \cdot 10} \quad (2.30)$$

$$\beta_i = 10 \cdot \rho \cdot w_i \quad (2.31)$$

w_i Massenanteil der Komponente i in %, β_i Massenkonzentration in g/l, ρ Dichte der Lösung in g/ml

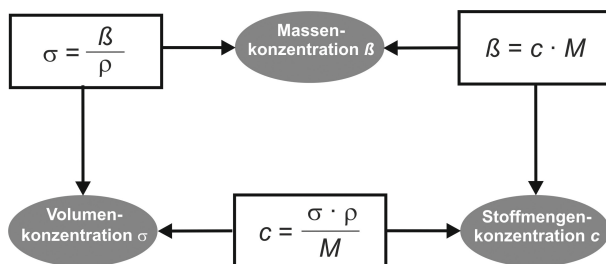


Bild 2.3 Umrechnungsformeln von der Massenkonzentration β in die Stoffmengenkonzentration c und in die Volumenkonzentration σ mit der Dichte ρ und der molaren Masse M

■ 2.7 Übungen

Übung 2.7.1: Es sollen 2,5 kg Schwefelsäure mit $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 15\%$ aus einer konzentrierten Schwefelsäure ($w = 95\%$) mit Wasser hergestellt werden. Welche Masse an konzentrierter Schwefelsäure und welche Masse an Wasser sind abzuwiegen?

1. Zunächst wird die Mischungsgleichung aufgestellt und die Daten der Aufgabe definiert:

$$m_1 \cdot w_1 + m_2 \cdot w_2 = (m_1 + m_2) \cdot w_{\text{Mischung}}$$

$$m_1 = \text{Schwefelsäure}, w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 95\%$$

$$m_2 = \text{Wasser}$$

Beide Massen ergeben zusammen nach dem Mischen 2500 g Lösung

$$(m_1 + m_2 = 2500)$$

$$m_2 = 2500 \text{ g} - m_1$$

$$w_1 = 95\%$$

$$w_2 = 0\%$$

$$w_{\text{Mischung}} = 15\%$$

2. Die Daten werden in die Mischungsgleichung eingesetzt:

$$m_1 \cdot 95\% + (2500 - m_1) \cdot 0\% = 2500 \text{ g} \cdot 15\%$$

Für m_1 ergibt sich nach Umstellung der Gleichung:

$$m_1 = 395 \text{ g Schwefelsäure mit } w = 95\%.$$

3. Die Menge an Wasser kann aus der Gesamtmenge herzustellender Schwefelsäure berechnet werden. Masse der 95%-Schwefelsäure und Masse Wasser ergeben zusammen 2500 g.

$$m_2 = 2500 \text{ g} - m_1 = 2500 \text{ g} - 395 \text{ g} = 2105 \text{ g Wasser}$$

4. Es werden 2105 g Wasser vorgelegt und langsam darin 395 g Schwefelsäure mit $w = 95\%$ eingerührt. Man erhält 2,5 kg Schwefelsäure mit einer Konzentration von 15%.

In der Praxis muss schnell gerechnet werden. Formt man die Mischungsgleichung (Formel 2.22) für zwei Komponenten um, dann erhält man:

$$m_1 w_1 + m_2 w_2 = (m_1 + m_2) w_{\text{Mischung}}$$

$$m_1 w_1 - m_1 w_{\text{Mischung}} = m_2 w_{\text{Mischung}} - m_2 w_2$$

$$m_1 (w_1 - w_{\text{Mischung}}) = m_2 (w_{\text{Mischung}} - w_2)$$

Übung 2.7.2: Welche Masse an Kochsalzlösung mit einem Massenanteil von $w(\text{NaCl}) = 18\%$ muss zu 500 g einer Lösung mit einem Massenanteil von $w(\text{NaCl}) = 8\%$ gegeben werden, damit eine Mischung mit $w(\text{NaCl}) = 10\%$ entsteht?

1. Zunächst werden die Daten der Aufgabe definiert:

$$w_1 = 18\%, w_2 = 8\% \text{ und } w_{\text{Mischung}} = 10\%$$

und entsprechend dem Mischungskreuz eingesetzt.

2. Aus der Differenzbildung ergibt sich:

$$w_{\text{Mischung}} - w_2 = 10\% - 8\% = 2\% \Rightarrow m_1 = 2$$

$$w_1 - w_{\text{Mischung}} = 18\% - 10\% = 8\% \Rightarrow m_2 = 8$$

Die beiden Kochsalzlösungen sind daher im Verhältnis 2 zu 8 bzw. 1 zu 4 miteinander zu mischen.

3. Da 500 g einer 8%-NaCl-Lösung mit einer 18%-NaCl-Lösung gemischt werden sollen, erfolgt der nächste Rechenschritt als Dreisatz:

$$4 \text{ Teile entsprechen } 500 \text{ g NaCl } (w = 8\%)$$

$$1 \text{ Teil entspricht } x \text{ g NaCl } (w = 18\%)$$

$$x = \frac{1}{4} \cdot 500 \text{ g} = 125 \text{ g NaCl } (w = 18\%)$$

4. Es werden 125 g der 18%-Kochsalzlösung benötigt um mit 500 g der 8%-Kochsalzlösung eine Mischkonzentration von 10%-NaCl zu erhalten.

Literatur

- [2.1] HILLEBRAND, U. (2009): Stöchiometrie – Eine Einführung in die Grundlagen mit Beispielen und Übungsaufgaben. Springer Verlag
- [2.2] LAMERS, C.; MERK, D.; WURGLICS, M. (2019): Arbeitsbuch Stöchiometrie. Avoxa – Mediengruppe Deutscher Apotheker GmbH
- [2.3] SCHWISTER, K. (2014): Kleine Formelsammlung Chemie. Carl Hanser Verlag
- [2.4] WAWRA, E.; PISCHEK, G.; MÜLLNER, E. (2009): Chemie berechnen. UTB Verlag
- [2.5] BENDER, H.F. (2018): Das Gefahrstoffbuch – Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen nach REACH und GHS. Wiley-VCH Verlag

3

Statistische Grundbegriffe

■ 3.1 Fehlerarten

Unter einem Fehler verstand man lange Zeit die Abweichung von einem festgelegten Zustand oder Verfahren in einem bezüglich seiner Funktionen determinierten System. Mittlerweile wurde jedoch diese Definition verändert. Das Deutsche Institut für Normung (DIN) definiert Fehler mittlerweile als einen „**Merkmalswert, der die vorgegebenen Forderungen nicht erfüllt**“ und als „Nichterfüllung einer Anforderung“. Die Anforderung wird dabei definiert als „Erfordernis oder Erwartung, die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist“.

Grundsätzlich ist jede Messung einer physikalischen Größe mit Fehlern behaftet, wobei man nach DIN 1319 nicht mehr von Fehlern, sondern von **Abweichungen der Messwerte** und von **Unsicherheiten bei den Messergebnissen** sprechen sollte. Die Empfehlung unterstreicht, dass mit dem Wort Fehler im Zusammenhang mit Messergebnissen nicht ein falsches Ergebnis gemeint ist, sondern die Streuung der Messwerte um den „wahren“ Wert der Messgröße, der in der Regel unbekannt ist.

In den üblichen Konventionen wird ein Messergebnis für eine Größe x wie folgt angegeben:

$$x = x_w \pm \Delta x \quad (3.1)$$

Dabei ist x_w der „wahrscheinlichste“ oder „beste“ Schätzwert für das Messergebnis und Δx ist die Messunsicherheit. Die Angabe bedeutet, dass das Messergebnis mit einer gewissen Sicherheit im Intervall $x_w - \Delta x \leq x \leq x_w + \Delta x$ liegt. Δx wird bei dieser Schreibweise auch als **absolute Messunsicherheit** bezeichnet.

Es sind drei Arten verschiedener Abweichungen von Messwerten (Fehlern) zu unterscheiden, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden:

- grobe Abweichung von Messwerten,
- systematische Abweichung von Messwerten,
- zufällige Abweichung von Messwerten.

3.1.1 Grobe Abweichung von Messwerten

Grobe Abweichungen sind vermeidbare Abweichungen und sollten durch sorgfältiges Arbeiten, kritisches Überprüfen und Kontrollieren der Ergebnisse vermieden werden. Mögliche Ursachen sind:

- Unachtsamkeit,
- ungeeignetes Messverfahren,
- falsche Bedienung der Messgeräte,
- Messbedingungen sind ungeeignet,
- Fehler bei der Protokollierung und Auswertung der Messwerte.

Treffen eine oder mehrere Ursachen zu, sind die Messungen oder Auswertungen falsch und müssen wiederholt werden. Grobe Abweichungen von Messwerten werden durch keine Fehlertheorie erfasst.

3.1.2 Systematische Abweichung von Messwerten

Bei einer systematischen Abweichung von Messwerten wird das Messergebnis unter gleichen Messbedingungen stets in gleichem Sinne beeinflusst. Bei der Wiederholung der Messung unter gleichen Bedingungen sind die Abweichungen gleich und können somit weder erkannt noch verhindert werden. Beispiele für systematische Abweichungsquellen sind:

- Verwendung falscher Messgeräte,
- Alterung der Messgeräte,
- ungültige physikalische Gesetze,
- Einfluss äußerer Parameter (z. B. Druck, Temperatur, Störfelder).

Systematische Abweichungen lassen sich ganz oder teilweise ausschalten durch Veränderung der Messbedingungen oder Kalibrierung der Messgeräte. Eine Berücksichtigung der systematischen Fehler in der Fehlerrechnung oder der zahlenmäßigen Angabe im Ergebnis (vgl. Formel 3.1) findet jedoch nicht statt.

3.1.3 Zufällige Abweichung von Messwerten

Selbst bei vollständiger Eliminierung aller systematischen Abweichungen erhält man bei wiederholter Messung der gleichen physikalischen Größe selten übereinstimmende Messergebnisse. Die Messwerte werden immer um den „wahren“ Wert streuen. Diese Abweichung wird als zufällig bezeichnet und lässt sich mit den Ge-

setzen der Statistik beschreiben. Einige Beispiele für mögliche Ursachen sind im Folgenden gezeigt.

- Messgröße hat einen Zufallscharakter (z. B. radioaktiver Zerfall),
- zufällige und nicht vorhersehbare Einflüsse,
- Ableseabweichungen (Parallaxenfehler),
- Schätzungen und Interpolation auf Messskalen,
- unterschiedliche Reaktionszeiten des Experimentators (Stoppuhr).

Zufällige Abweichungen von Messwerten sind nicht vermeidbar. Sie lassen sich jedoch durch Wiederholungsmessungen verringern.

■ 3.2 Darstellung von Messreihen

Bei einer Befragung von 150 Studierenden einer Umwelttechnik-Vorlesung wurden folgende Daten ermittelt:

1. Familienstand
2. Studienrichtung
3. Interesse an der Vorlesung
4. Anzahl der Geschwister
5. Anzahl der Hochschulsemester
6. Körpergröße
7. Entfernung von der Uni zur Wohnung

Die Gesamtheit aller Hörer der Vorlesung nennt man **Beobachtungsmenge**, den einzelnen Hörer **Beobachtungseinheit**. Die in dem Beispiel erfragten Eigenschaften oder Sachverhalte heißen **Beobachtungsmerkmale**. Bei der Beobachtung werden folgende Merkmalstypen unterschieden:

- qualitative Merkmale (vgl. 1 und 2),
- Rangmerkmale (vgl. 3),
- quantitativ diskrete Merkmale (vgl. 4 und 5),
- quantitativ stetige Merkmale (vgl. 6 und 7).

Im Folgenden werden wir uns hauptsächlich mit quantitativen Merkmalen befassen, da in den Naturwissenschaften und der Technik Daten in erster Linie durch Messen oder Zählen gewonnen werden. Es ist daher zunächst davon auszugehen, dass zu jeder Beobachtungseinheit ein quantitatives Merkmal gehört oder dass die verschiedenen Merkmale getrennt voneinander untersucht werden sollen.

Beispiel 3.1: Häufigkeitsverteilungen einer Stichprobe

30 Studenten in einem Vorkurs Mathematik erhielten in der Reihenfolge ihrer Matrikelnummer folgende Noten für die Abschlussklausur: 3, 2, 5, 3, 4, 3, 5, 4, 3, 2, 3, 4, 2, 3, 3, 2, 3, 4, 5, 1, 3, 2, 1, 4, 4, 3, 2, 1, 4, 3.

Tabelle 3.1 Strichliste einer Häufigkeitstabelle

Note	Strichliste	absolute Häufigkeit	relative Häufigkeit	Anteil in %
1	III	3	0,100	10,0
2	IIII I	6	0,200	20,0
3	IIII IIII I	11	0,367	36,7
4	IIII II	7	0,233	23,3
5	III	3	0,100	10,0
6		-	-	-
		$n = 30$	$\Sigma = 1,000$	$\Sigma = 100$

In Tabelle 3.1 sind die Zahlenwerte dieser zunächst völlig ungeordneten Liste als Strichliste oder Häufigkeitstabelle dargestellt. Die Anzahl der einzelnen Striche ergibt die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Noten.

Eine grafische Darstellung kann die Übersichtlichkeit noch weiter erhöhen. Es kommen Stabdiagramme, Häufigkeitspolygone oder Histogramme infrage. Ein **Histogramm** besteht aus Rechtecken, deren Grundseiten die verschiedenen Noten als Mittelpunkt besitzen. Die Größen der Balken bilden die absoluten Häufigkeiten der entsprechenden Noten ab, da bei der Bewertung einer Arbeit die Gesamtnote im Allgemeinen aus mehreren Einzelbewertungen ermittelt wird. Liegt dieser Durchschnitt zum Beispiel zwischen 1,5 und 2,5, so erhält der Student die Note 2. Es findet somit bereits hier eine **Klasseneinteilung** statt, d. h., mehrere Werte werden zu einer Klasse zusammengefasst.

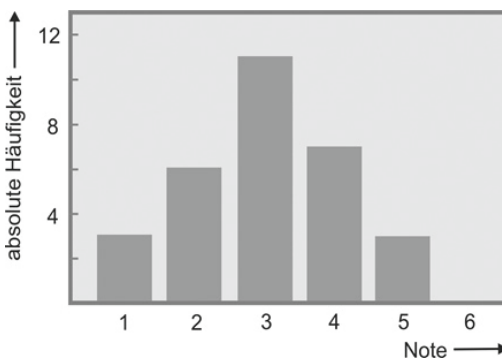


Bild 3.1
Histogramm-Darstellung

Dividiert man die absoluten Häufigkeiten durch die Anzahl der Studenten (Messwerte), so erhält man die relativen Häufigkeiten (vgl. 4. Spalte in Tabelle 3.1), deren Gesamtsumme den Wert 1,000 ergibt. Die Multiplikation der relativen Häufigkeit mit 100 ergibt die prozentualen Anteile (vgl. 5. Spalte in Tabelle 3.1). Die grafischen Darstellungen der absoluten Häufigkeiten haben den Nachteil, dass die entsprechenden Höhen der Balken mit der Anzahl der Beobachtungswerte steigen. Im Unterschied zu den absoluten Häufigkeiten können die relativen Häufigkeiten nie größer als eins werden und bieten sich somit bei immer demselben Maßstab zur grafischen Auswertung an.

Gegeben seien n Beobachtungswerte (Zahlen) x_1, x_2, \dots, x_n , dann wird das n -Tupel $x = x_1, x_2, \dots, x_n$ eine Stichprobe vom Umfang n genannt. Die einzelnen Zahlen x_i nennt man Stichprobenwerte. Die in der Stichprobe vorkommenden verschiedenen Werte heißen Merkmalwerte; sie werden mit $x^*_1, x^*_2, \dots, x^*_N$ bezeichnet. Die Anzahl des Auftretens von x^*_k in einer Stichprobe wird **absolute Häufigkeit** von x^*_k genannt und wird mit $h_k = h(x^*_k)$ bezeichnet. Den Quotienten $r_k = h_k/n$ nennt man **relative Häufigkeit** von x^*_k in der Stichprobe für $k = 1, 2, \dots, N$.

Für die absoluten und relativen Häufigkeiten gelten folgende Eigenschaften:

$$\sum_{k=1}^N h_k = n$$

$$0 \leq r_k \leq 1 \quad \text{für alle } k; \quad \sum_{k=1}^N r_k = 1$$

Die Summe der absoluten Häufigkeiten der Merkmalwerte, die nicht größer als x^*_i sind, werden **absolute Summenhäufigkeit des Merkmalwertes x^*_i** genannt und mit H_i bezeichnet. Es gilt daher:

$$H_i = \sum_{k=1}^i h_k \tag{3.2}$$

Die absoluten Summenhäufigkeiten aus Beispiel 3.2 sind in der 3. Spalte der Tabelle 3.2 dargestellt. Mit den relativen Häufigkeiten r_i erhält man als **relative Summenhäufigkeit**:

$$R_i = \sum_{k=1}^i r_k \tag{3.3}$$

den relativen Anteil der Merkmalwerte, die nicht größer als x^*_i sind. In Tabelle 3.2 sind die relativen Summenhäufigkeiten für das nachstehende Beispiel in der letzten Spalte berechnet. In Bild 3.2 sind über den Merkmalwerten die relativen Summenhäufigkeiten (Punkte) eingezeichnet. Daraus ergibt sich die sog. **empirische Verteilungsfunktion F** als eine Treppenfunktion, deren Treppenstufen in den eingezeichneten Punkten enden. An der Stelle x^*_i ist der Funktionswert $F(x^*_i)$ gleich

der relativen Summenhäufigkeit R_i . Die Verteilungsfunktion besitzt nur an den Stellen x_i^* Sprünge der jeweiligen Höhen r_i . Die Sprunghöhen der Treppenfunktion entsprechen den Längen der Stäbe in Bild 3.2 des Stabdiagramms für die relativen Häufigkeiten.

Beispiel 3.2: Quantitativ-diskretes Merkmal

Ein Mikadospiel besteht aus 41 Stäben mit einer Länge von ca. 180 mm und einer Dicke von ca. 3 mm. Die Enden der Stäbe sind zugespitzt. Die Stäbe sollten absolut gerade und gleich dick sein. Genauere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass dies nur bedingt der Fall ist. Es hat sich folgende Messreihe zur Länge der Mikadostäbchen ergeben (Angaben in mm):

182, 178, 180, 180, 181, 181, 180, 182, 182, 183, 181, 181, 180, 183, 181, 182, 181, 180, 182, 183, 179, 182, 180, 182, 180, 181, 180, 183, 181, 180, 182, 180, 179, 180, 179, 184, 181, 180, 182, 181, 181.

Tabelle 3.2 Absolute und relative Häufigkeit unterschiedlicher Mikadostäbchen in Bezug auf ihre Länge

Länge der Stäbe x_i^*	absolute Häufigkeit h_i	absolute Summenhäufigkeit H_i	relative Häufigkeit r_i	relative Summenhäufigkeit R_i
178 mm	1	1	0,024	0,024
179 mm	3	4	0,073	0,098
180 mm	12	16	0,293	0,390
181 mm	1	27	0,268	0,659
182 mm	9	36	0,220	0,878
183 mm	4	40	0,098	0,976
184 mm	1	41	0,024	1,000

In Bild 3.2 ist die empirische Verteilungsfunktion gezeigt, deren Sprungstellen die Werte der Messreihe sind. Die jeweiligen Sprunghöhen stellen die relativen Häufigkeiten der Messwerte aus der obigen Messreihe dar.

Beispiel 3.3: Quantitativ-stetiges Merkmal

Es wurde von 150 RASCHIG-Ringen der Durchmesser bestimmt. Alle Zahlenwerte der Messreihe x_1, \dots, x_n lagen in dem vorgegebenen Intervall (15,10...15,60 mm). Die Werte wurden in Klassen mit einer Klassenbreite von 0,05 mm eingeteilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

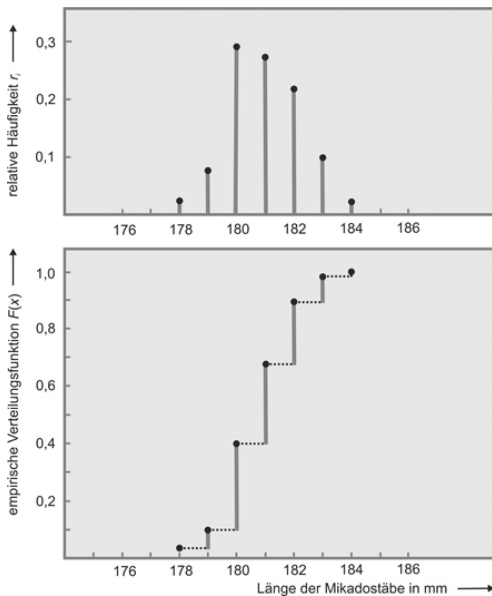


Bild 3.2
Stabdiagramm der relativen Häufigkeit und empirischen Verteilungsfunktion

Tabelle 3.3 Absolute und relative Klassenhäufigkeit der Messreihe, bestehend aus 150 RASCHIG-Ringen

Größe des Intervalls in mm	absolute Klassenhäufigkeit	relative Klassenhäufigkeit
15,11...15,15	1	0,007
15,16...15,20	3	0,020
15,21...15,24	9	0,060
15,26...15,30	17	0,113
15,31...15,34	30	0,200
15,36...15,40	32	0,213
15,41...15,44	27	0,180
15,46...15,50	18	0,120
15,51...15,54	9	0,060
15,56...15,60	4	0,027

In Bild 3.3 ist das dazugehörige Histogramm in der oberen Hälfte gezeigt. Bei der Darstellung der doppelten Klassenbreite (vgl. Bild 3.3, untere Hälfte) ist darauf zu achten, dass der Maßstab (Ordinate) entsprechend geändert wurde. Die relativen Klassenhäufigkeiten sind dann: 0,027, 0,173, 0,413, 0,300 und 0,087.

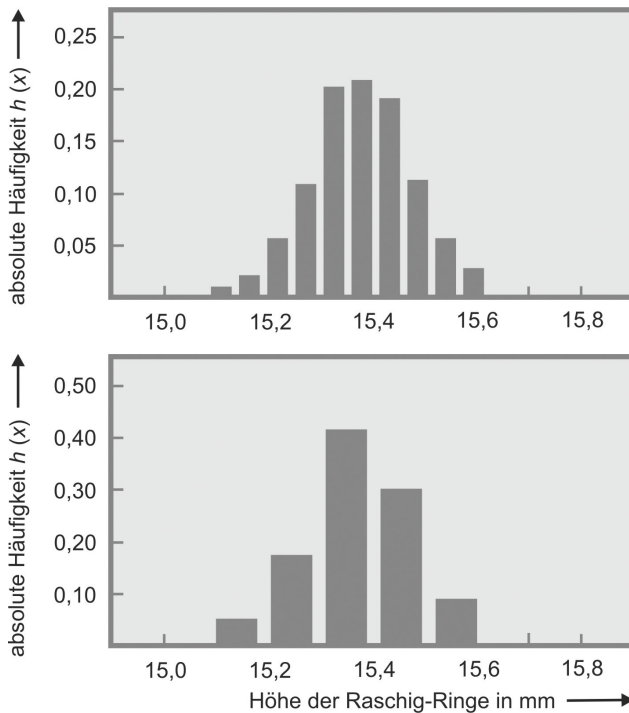


Bild 3.3 Histogramme der Durchmesserverteilung von RASCHIG-Ringen bei unterschiedlicher Klassenbreite

■ 3.3 Erfassung der Messwertabweichung

Wird eine **Messgröße x** nur einmal gemessen, so lässt sich aufgrund statistischer Überlegungen keine Aussage über die Abweichung von Messwerten machen. In einem solchen Fall ist man auf die Angabe der geschätzten größtmöglichen Ungenauigkeit angewiesen. Sie ergibt sich aus der Ablesegenauigkeit auf der verwendeten Skala, aus der Genauigkeitsklasse oder aus anderen Informationen.

Beim Ablesen einer Skala vergleicht man die Lage eines Messpunktes oder eines Zeigers mit den Teilstrichen der Skala. Handelt es sich um eine fein unterteilte Skala (Millimeterunterteilung eines Lineals), so nimmt man den nächstgelegenen Teilstrich als **Bestwert** und schätzt die **Unsicherheit** mit \pm (halbe Intervallbreite) ab. Bei gröber geteilten Skalen kann man die Lage des Zeigers zwischen zwei Teilstrichen interpolieren und als Dezimalstelle angeben. Die Unsicherheit wird dann zu $\pm(1 \text{ Zentelbruchteil})$ angenommen. Bei Digitalanzeigen beträgt die Unsicherheit ± 1 in der letzten Stelle der Anzeige. Bei Messungen, bei denen Unsicherheiten

schwieriger zu schätzen sind, lässt sich durch Wiederholung der Messungen die Messunsicherheit bestimmen.

Häufig ist man an einer knappen Beschreibung einer Messreihe interessiert, beispielsweise durch Angabe einer typischen Eigenschaft der Häufigkeitsverteilung. Diese soll Auskunft darüber geben, wo sich die **Mitte der beobachteten Messwerte** befindet und wie groß der **Bereich** ist, über den sich die Werte erstrecken. Die Statistik unterscheidet daher zwischen der Lage und den Streuungsmaßzahlen.

Betrachtet man eine Messreihe x_1, \dots, x_n , so wird

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.4)$$

arithmetisches Mittel (oder empirischer Mittelwert) der Messreihe genannt.

Werden die Zahlen der Messreihe x_1, \dots, x_n jedoch der Größe nach geordnet, so lautet die entstandene Messreihe:

$$x_1, \dots, x_n \quad (3.5)$$

mit $x_1 \leq x_i \leq x_n$.

Die Zahl

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x_{(n+1)/2} && \text{falls } n \text{ ungerade} \\ \tilde{x} &= x_{(n/2)} && \text{falls } n \text{ gerade} \end{aligned} \quad (3.6)$$

wird (empirischer) Median der Messreihe x_1, \dots, x_n genannt. Der Median stellt eine Grenze zwischen zwei Hälften von Beobachtungen dar. Er hat gegenüber dem arithmetischen Mittelwert den Vorteil, unempfindlicher gegenüber Ausreißern zu sein (vgl. Beispiel: Schätzung von Unsicherheiten).

3.3.1 Normalverteilung nach GAUSS

Führt man bei einer bestehenden Messanordnung unter konstanten Messbedingungen sehr viele (im Idealfall unendlich viele) Messungen n der gleichen Größe x durch, dann liegen die Messwerte in einem bestimmten Bereich. Der am häufigsten vorkommende Messwert liegt ungefähr in der Mitte dieses Bereiches, vorausgesetzt, es treten nur zufällige Fehler auf. Dabei sind große Abweichungen von der Mitte des Bereiches relativ selten. Trägt man die Häufigkeit $h(x)$, mit der ein Messwert auftritt, über den Messwerten auf, so ergibt sich im Idealfall ($n \rightarrow \infty$) eine Verteilung, die GAUSSsche Normalverteilung genannt wird (vgl. Bild 3.4).

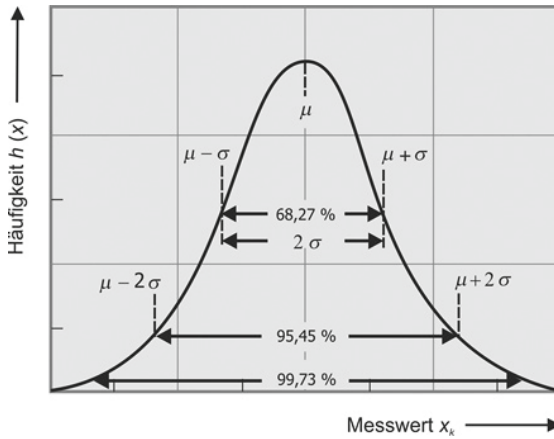


Bild 3.4
GAUSSSCHE NORMALVERTEILUNG

Die GAUSSSCHE Normalverteilung wird durch folgende Funktion $h(x)$ dargestellt:

$$h(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right\} \quad (3.7)$$

Die Normalverteilung in Bild 3.4 nimmt für $x = \mu$ ihren maximalen Wert an, d. h., μ stellt den wahrscheinlichsten Wert der Messreihe dar und wird daher **Erwartungswert** genannt. Die Wendepunkte der Verteilungsfunktion $h(x)$ sind bei den Werten $x = \mu \pm \sigma$ zu finden. Charakteristisch für den Verlauf dieser Kurve ist die Breite 2σ zwischen beiden Wendepunkten der Kurve.

Die halbe Breite von 2σ wird **Standardabweichung** σ genannt. Die Größe σ^2 ist die **Varianz**. Die Standardabweichung ist ein statistisches Maß für die Breite der Verteilung. Sie gibt die mittlere zufällige Abweichung der einzelnen Messwerte vom wahrscheinlichsten Wert μ der Messreihe an.

Für die GAUSSSCHE Normalverteilung ergibt sich, dass 68,27% der Messwerte im Intervall $\mu \pm \sigma$ liegen. Messwerte sind daher mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,27% in diesem Intervall anzutreffen. Bei vielen physikalischen Messungen ist dies völlig ausreichend. Wenn man Aussagen mit einer höheren statistischen Sicherheit machen möchte, muss man die doppelte (2σ) oder dreifache Standardabweichung (3σ) zulassen. Die **statistische Sicherheit** beträgt dann ca. 95,45% bzw. 99,73%.

3.3.2 Standardabweichung

Bei einer endlichen Anzahl von n Messungen lässt sich aus den zufälligen Schwankungen der Messwerte x_i ein bestmöglicher Schätzwert s (Streuung) für die Standardabweichung σ ermitteln: