

Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik

2. bearbeitete und ergänzte Auflage

Daniel S. Christen

Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik

Handbuch für Chemiker
und Verfahreningenieure

2. bearbeitete und ergänzte Auflage

 Springer

Prof. Dr. Daniel S. Christen
ECO SWISS
Spanweidstrasse 3
CH-8006 Zürich
Switzerland
daniel.christen@eco-swiss.ch

ISBN 978-3-540-88974-8 e-ISBN 978-3-540-88975-5
DOI 10.1007/978-3-540-88975-5
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungs-pflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk be- rechtigt 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.

Einbandgestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort zur 2. Auflage

Der Bedarf an gut ausgebildeten Verfahrenstechnikern und Chemieingenieuren ist im deutschen Sprachraum so groß wie noch nie. Studienabgänger und erfahrene Fachpersonen können unter mehreren Angeboten auswählen und ein ansehnliches Einkommen erzielen. Andererseits steigt der Zeitdruck, unter dem die Chemiker und Ingenieure qualitativ hochwertige Lösungen präsentieren müssen. Dabei leistet Ihnen das vorliegende Buch entscheidende Hilfe. Es liefert einen ausgezeichneten Überblick über die wichtigsten Verfahren und ermöglicht Ihnen, die wesentlichen Auslegedaten von Apparaten und Prozessen mit genügender Genauigkeit und ohne großen Aufwand zu berechnen. Die genauen Auslegedaten der Hersteller und Lieferanten können mit dem Buch schnell auf ihre Plausibilität überprüft werden.

Gegenüber der ersten Auflage wurden einige Veränderungen vorgenommen. Neu ist das Kapitel Filtration. Gerade bei der Filtration existieren einige Fachbücher, die von falschen Berechnungsformeln ausgehen. Die hier aufgeführten Gleichungen sind mit den neuesten Normen und Erkenntnissen konsistent und werden durch wertvolle Praxisbeispiele aus Labor und Produktion ergänzt.

Über 20 Abbildungen und Tabellen wurden neu gezeichnet, Adressen aktualisiert und Textbausteine im Umfang von rund 50 Seiten eingefügt. Neu sind z. B. die Übersichten über die chemische Beständigkeit von Metallen und Legierungen, die Listen für die Viskositäten von Flüssigkeiten und Gasen oder die Tabellen zu Wärme- und Kältemitteln.

Die Tatsache, dass dieses Handbuch an verschiedenen Fachhochschulen und Universitäten als Lehrmittel eingesetzt wird, sowie meine Erfahrungen als Industrieberater und Dozent führten zu Anpassungen, die das Verständnis erleichtern. Rückmeldungen aus der Industrie ließen mich wichtige Ergänzungen anbringen. So werden z. B. Normen und Regelwerke wie GLP und cGMP bei den Prozessen vermehrt berücksichtigt.

Für Ihre hilfreichen Anregungen und Bemerkungen bin ich dankbar. Auf Ihrem beruflichen Karriereweg wünsche ich Ihnen viel Spaß und Befriedigung. Möge dieses Buch dazu beitragen.

Zürich, im September 2009

Daniel Siegfried Christen

Vorwort zur 1. Auflage

Es existieren ja schon einige Bücher auf dem Gebiet der chemischen Verfahrenstechnik. Warum soll noch ein neues dazukommen? Die bisher veröffentlichten Bücher bieten zum Teil gute Kurzübersichten zum Thema oder bestechen durch tolle Abbildungen, dafür verzichten sie auf einfachste Erklärungen und Berechnungen. Andere Bücher wiederum sind äußerst umfangreich und verwirren mit komplexen mathematischen Herleitungen oder für den Praktiker unnötigen historischen Ausflügen. Im Gespräch mit Studenten, Technikern, Ingenieuren und Chemikern manifestierte sich immer wieder das Verlangen nach einem Buch, welches das Thema knapp aber doch erschöpfend darzustellen vermag, welches Verständnis weckt, welches zielgerichtete Ratschläge gibt und die Plausibilität von Annahmen und Resultaten durch unkomplizierte Berechnungen zu überprüfen erlaubt.

Viel Wissen steht heute im Internet und kann zügig heruntergeladen werden. Informationen lassen sich auch von Apparateherstellern, Anlagebauern, Ingenieurbüros oder anderen Anwendern beziehen. Doch wer täglich in Forschung, Entwicklung oder Produktion tätig ist, weiß wie viel Zeit ein solches Vorgehen erfordert und dass die erhaltenen Auskünfte nicht immer als zuverlässig zu erachten sind. Wie wertvoll ist da ein eigenes Nachschlagewerk, in dem man in Minutenschnelle zu den relevanten Informationen vorstößt und bei Bedarf auch gleich die physikalisch-chemischen Grundlagen nachschlagen kann?

Das vorliegende Buch stellt das Wissen der chemischen Verfahrenstechnik in umfassender und zusammenhängender Form dar. Formeln und Symbole werden einheitlich und gemäß den neusten Normen verwendet. Die Herleitungen erfolgen didaktisch aufbauend von den Grundlagen bis zu den Anwendungen, von der Forschung im Labor bis zur Herstellung im großtechnischen Maßstab. Das Buch richtet sich an den versierten und an Zusammenhängen interessierten Leser, der die Prozesse der chemischen Verfahrenstechnik ursächlich verstehen möchte. Es richtet sich genauso gut auch an den Praktiker, der in Kenntnis der Hintergründe ein Verfahren zu optimieren versucht. Es richtet sich an all diejenigen, die sich mit Freude und Begeisterung mit der faszinierenden Welt der Chemie, der chemischen Produktion und des chemischen Apparatebaus auseinandersetzen gedenken.

„*Errare humanum est*“, Irren ist menschlich! Das Buch erscheint in seiner ersten Auflage. Die Niederschrift erfolgte nach bestem Wissen und Gewissen.

Trotzdem können sich Fehler eingeschlichen haben oder gewisse Sachverhalte missverständlich dargestellt sein. Sollte dies vorkommen, möchte ich mich dafür entschuldigen. Für Verbesserungshinweise bin ich immer dankbar. Für Irrtümer und Schäden, die als Folge des Gebrauchs dieses Buchs entstehen, kann ich aber keine Haftung irgendwelcher Art übernehmen. Die mit diesem Buch erhaltenen Resultate sind stets hinsichtlich ihrer Plausibilität kritisch zu überprüfen, mit Fachleuten zu besprechen und bei Bedarf im Experiment zu bestätigen. Die Versuche sind unter geeigneten Bedingungen durchzuführen, die auch ein extremes, unerwartetes Verhalten aufzuzeigen in der Lage sind. Die zuverlässigsten Grundlagen ergeben sich aus Experimenten in Zusammenarbeit mit fundiertem wissenschaftlichem Verständnis.

Noch sind nicht alle Einheitsoperationen der chemischen Verfahrenstechnik in diesem Buch beschrieben. Das soll in späteren Auflagen nachgeholt werden. Der Schwerpunkt dieser ersten Auflage liegt auf der korrekten und weit reichenden Darstellung der Grundlagen der chemischen Verfahrenstechnik.

An der Illustration des Buchs haben verschiedene Personen mit geholfen, denen ich allen danke. Besonders hervorheben möchte ich die Leistungen von *Herrn Daniel Leuenberger*, Chemiker FH, für das Zeichnen der meisten der z. T. komplexen Abbildungen, was er mit viel technischem Sachverstand ausführte. Meinen Familienangehörigen und Freunden danke ich für ihr Verständnis, dass ich einen großen Teil meiner Freizeit dem Verfassen dieses Buchs gewidmet habe.

Viel Vergnügen beim Lesen und erfolgreiches Gelingen bei der Anwendung des erworbenen Wissens wünscht Ihnen

Bern, im Juni 2004

Daniel Siegfried Christen

Inhalt

Teil I Grundlagen

1 Einführung	3
1.1 Definitionen	3
1.2 Fachorganisationen	7
Europa	7
Deutschland	8
Schweiz	9
Österreich	9
1.3 Maßeinheiten	10
1.4 Periodensystem der Elemente	17
1.5 Fragen aus der Praxis	19
1.6 Literatur	19
2 Projektierung	21
2.1 Maßstabsvergrößerung	21
Ähnlichkeiten	21
Scale-Up Methoden	23
Dimensionslose Kenngrößen	25
Buckingham Π -Theorem	27
2.2 Planung von Chemieanlagen	31
Blockschema	31
Verfahrensfließbild	32
RI-Schema	34
Anlagenmodell	35
Rohrleitungsmodell	35
CAD-3D-Grafik	36
Isometrische Zeichnung	37
2.3 Projektmanagement	38
Projektphasen	39
Projektorganisation	42
2.4 Zeit- und Ressourcenplanung	46
Balkendiagramme	47

	Netzplandiagramme	47
	Zuordnung von Ressourcen	51
2.5	Fragen aus der Praxis	52
2.6	Literatur	53
3	Werkstoffe	55
3.1	Mechanische Eigenschaften	55
	Festigkeit	55
	Kerbschlagzähigkeit	60
	Härte	61
3.2	Korrosion	65
	Definitionen	65
	Voraussetzungen	66
	Korrosionsarten	69
3.3	Korrosionsschutz	71
	Werkstoff	71
	Beschichtung	72
	Konstruktion	76
	Elektrischer Strom	77
	Medium	77
	Werkstoffwahl	78
3.4	Eisen & Stahl	79
	Herstellung	80
	Unlegierter Stahl	81
	Legierter Stahl	83
	Gusseisen	85
3.5	Nicht-Eisenmetalle	86
	Leichtmetalle	87
	Schwermetalle	90
	Sondermetalle	94
	Edelmetalle	97
3.6	Keramiken	99
	Tonkeramik	99
	Glas	103
	Kunstkohle & Elektrographit	107
3.7	Kunststoffe	109
	Thermoplaste	113
	Duroplaste	119
	Elastomere	121
3.8	Naturstoffe	126
	Holz	126
	Steine	127
3.9	Fragen aus der Praxis	128
3.10	Literatur	128

4	Reaktionstechnik	131
4.1	Begriffe	131
	Homogene und heterogene Reaktionen	131
	Strömungsführung	131
	Umsatz, Ausbeute, Selektivität, Leistung, Kapazität	134
4.2	Reaktoren	135
	Rührkessel	136
	Rohrreaktor	137
	Kolonne, Säule, Turm	138
	Wirbelschichtreaktor	140
4.3	Stoffbilanzen	142
	Idealer diskontinuierlich betriebener Rührkessel	147
	Idealer kontinuierlich betriebener Rohrreaktor	148
	Idealer kontinuierlich betriebener Rührkessel	148
	Vergleich der idealisierten Reaktortypen	149
4.4	Verweilzeitverteilung	150
	Rohrreaktor	150
	Kontinuierlich betriebener Rührkessel	150
	Rührkesselkaskade	152
4.5	Fragen aus der Praxis	153
4.6	Literatur	154
5	Berechnungen und Antworten zu Teil I	155
5.1	Einführung	155
5.2	Projektierung	156
5.3	Werkstoffe	158
5.4	Reaktionstechnik	159
Teil II Ausgleichsvorgänge		
6	Strömungslehre	163
6.1	Einleitung	163
	Flüssigkeiten und Gase	163
	Kontinuitätsgleichung	163
	Ideale und reale Fluide	164
6.2	Strömung ohne Reibung	165
	Bernoulli	165
	Torricelli	166
6.3	Strömung mit Reibung	167
	Viskosität, Reibungswiderstand	167
	C_W -Wert, Wirbelwiderstand	169
	Laminare und turbulente Strömung	171
6.4	Rohrströmung	172
	Laminare Rohrströmung	172
	Turbulente Rohrströmung	175

	Druckabfall im Rohr	176
	Hydraulischer Durchmesser	178
	Rohrleitungseinbauten	179
	Betriebskennlinie, Pumpenkennlinie	182
6.5	Filmströmung	185
	Strömungsformen	185
	Geschwindigkeitsprofil	185
	Volumenstrom	187
6.6	Impulskraft	188
6.7	Rheologie	189
	Mechanisches Verhalten von Körpern	190
	Scherratenabhängige Viskosität	192
	Zeitabhängige Viskosität	194
	Viskoelastizität	195
	Messpraxis	196
6.8	Fragen aus der Praxis	198
6.9	Literatur	200
7	Wärmeübertragung	201
7.1	Einleitung	201
	Strahlung	201
	Wärmeleitung	202
	Konvektion	202
	Kombination der Wärmetransportmechanismen	203
7.2	Strahlung	203
	Strahlungsgesetze	203
	Wärmestrahlung zwischen Körpern	207
7.3	Wärmeleitung	212
	Eindimensionaler Stab	212
	Zusammengesetzte Wand	220
	Rohrwand	221
	Dreidimensionaler Körper	224
7.4	Konvektion	226
	Dimensionslose Kenngrößen	229
	Ebene Flächen	232
	Rohre/ Rohrbündel	234
	Rührkessel	238
	Kugeln/Schütttschichten	239
7.5	Wärmedurchgang	241
	Ebene Wände	241
	Rohre	244
	Einfluss der Strömungsführung	246

	Mittlere treibende Temperaturdifferenz	249
	Aufheizen/Abkühlen eines Rührkessels	250
7.6	Wärmeübertrager	252
	Bauarten	252
	Heiz- und Kühlmedien	258
	Auslegung	260
7.7	Fragen aus der Praxis	262
7.8	Literatur	263
8	Stofftransport	265
8.1	Einleitung	265
	Diffusion	265
	Konvektion	266
	Kombination der Stofftransportmechanismen	266
8.2	Diffusion	267
	Eindimensionale Diffusion	267
	Dreidimensionale Diffusion	274
8.3	Konvektion	275
	Dimensionslose Kenngrößen	278
	Dimensionslose Gleichungen für den Stoffübergang	279
8.4	Stoffdurchgang	282
	Zweifilmtheorie	282
	Penetrationstheorie	287
	Oberflächenerneuerungstheorie	288
	Mittlere treibende Konzentrationsdifferenz	290
8.5	Stofftransport und chemische Reaktion	290
	Chemische Reaktion an der Phasengrenzfläche	291
	Chemische Reaktion in der zweiten Phase	293
8.6	Stofftransport und Wärmeübertragung	296
	Dimensionslose Lewis-Beziehung	296
	Wärme- und Stofftransport beim Trocknen	297
8.7	Analogien des Impuls-, Wärme- und Stofftransports	299
	Transportgleichungen	299
	Dimensionslose Beziehungen	301
	Grenzschichten	302
8.8	Fragen aus der Praxis	304
8.9	Literatur	304
9	Berechnungen und Antworten zu Teil II	307
9.1	Strömungslehre	307
9.2	Wärmeübertragung	315
9.3	Stofftransport	318

Teil III Grundoperationen

10 Mischen, Rühren	325
10.1 Einleitung	325
Diffusion	325
Konvektion	325
Dispergierung	325
10.2 Rührertypen	326
10.3 Strömungsbild	326
10.4 Wahl des Rührertyps	328
10.5 Leistungsbedarf eines Rührwerks	328
10.6 Statische Mischer	330
10.7 Fragen aus der Praxis	331
10.8 Literatur	332
11 Sedimentieren	333
11.1 Definition	333
11.2 Maßgebende Kräfte	333
11.3 Strömung um ein kugelförmiges Teilchen	335
11.4 Sinkgeschwindigkeit beliebig geformter Teilchen	337
11.5 Sinkgeschwindigkeit eines Teilchenschwarms	338
11.6 Auslegung von Sedimentationsapparaten	339
11.7 Fragen aus der Praxis	340
11.8 Literatur	341
12 Filtrieren	343
12.1 Begriffe und Definitionen	343
12.2 Mechanismen der Abscheidung	345
12.3 Filtermittel	345
12.4 Sieb-, Kuchen- und Tiefenfiltration	346
12.5 Filterhilfsmittel	347
12.6 Vor- und nachgeschaltete Prozesse	347
12.7 Filtratfluss als Funktion der Porengröße	348
12.8 Kuchenhöhe als Funktion der Filtratmenge	350
12.9 Filtergleichungen der Kuchenfiltration	350
12.10 Druckabhängigkeit der Filtergleichungen	352
12.11 Filterapparate	353
Sandfilter	354
Papierfilter	355
Beutelfilter	355
Kerzenfilter	355
Filternutschen	356
Tellerfilter	356
Filterpressen	357
Filterzentrifugen	359

	Trommelfilter	361
	Bandfilter	362
	Scheibenfilter	363
12.12	Wahl des Filterapparats	364
12.13	Fragen aus der Praxis	364
12.14	Literatur	366
13	Verdampfen	367
13.1	Begriffe und Definitionen	367
	Arbeitsweise einer Verdampfungsstufe	367
	Dampfarten	369
	Dampfdruckkurve	370
	Siedepunkterhöhung durch gelösten Stoff	372
13.2	Verdampfungsarten	374
	Oberflächenverdampfung	374
	Blasensieden	375
	Übergangssieden	375
	Filmsieden	376
	Verdampfung in einem senkrechten Rohr	377
13.3	Verdampferbauarten	382
	Rührkessel	382
	Plattenverdampfer	382
	Dünnschichtverdampfer	382
	Kurzwegverdampfer	383
	Rohrbündelverdampfer	383
	Brüdenverdichtung	384
	Mehrstufenverdampfung	386
13.4	Fragen aus der Praxis	389
13.5	Literatur	389
14	Kondensieren	391
14.1	Begriffe und Definitionen	391
	Tropfen- und Filmkondensation	391
	Wirkung von Inertgasen	392
14.2	Wärmeübergang bei Filmkondensation	392
	Laminare Strömung	393
	Turbulente Strömung	395
	Horizontale Rohre	396
14.3	Kondensatorbauarten	397
	Oberflächenkondensatoren	397
	Mischkondensatoren	398
14.4	Fragen aus der Praxis	398
14.5	Literatur	400

15 Destillation	401
15.1 Einleitung	401
Prinzip der Destillation	401
15.2 Physikalische Grundlagen	401
Gesetze von Dalton und Raoult	401
Relative Flüchtigkeit	404
Dampfdruckdiagramm	405
Temperaturdiagramm	407
Zusammensetzungsdiagramm	409
Reale Mischungen	410
Azeotropie	413
15.3 Destillationsverfahren	415
Absatzweise offene Destillation	415
Trägerdampfdestillation	418
15.4 Fragen aus der Praxis	421
15.5 Literatur	422
16 Rektifikation	423
16.1 Einleitung	423
Prinzip der Rektifikation	423
Aufbau einer Rektifikationskolonne	424
16.2 Berechnung der theoretischen Stufenzahl	426
Gleichgewichtslinie	426
Verstärkungsgerade	426
Abtriebsgerade	429
Schnittpunktgerade	430
Rücklaufverhältnis	432
Trennstufenzahl	434
16.3 Einbauten von Rektifikationskolonnen	437
Böden	437
Füllkörper	440
Geordnete Packungen	443
16.4 Dimensionierung einer Rektifikationskolonne	444
Dampfgeschwindigkeit	444
Druckabfall	445
Kolonnendurchmesser	447
Heizung/Kühlung	448
Kurzanleitung des methodischen Vorgehens	450
16.5 Sonderfälle der Rektifikation	451
Zweidruckrektifikation	451
Extraktive Rektifikation	451
Azeotrope Rektifikation	453
Diskontinuierliche Rektifikation	455
Reaktivdestillation	456

16.6	Fragen aus der Praxis	457
16.7	Literatur	458
17	Trocknung	459
17.1	Einleitung	459
	Prinzip der Trocknung	459
	Art der Wärmeübertragung	461
17.2	Zustandsänderung des feuchten Guts	463
	Feuchtigkeitsbindung	463
	Trocknungsverlauf	465
17.3	Zustandsänderung der feuchten Luft	468
	Eigenschaften der feuchten Luft	468
	Heizen/Kühlen	471
	Mischen von zwei Luftmassen	472
	Mischen von Luft mit Wasser	473
	Trocknungsprozesse mit warmer Luft	476
17.4	Trocknungsapparate	478
	Konvektionstrockner	478
	Kontaktstrockner	483
	Gefriertrockner	486
	Auswahl und Auslegung eines Trockners	487
	Sicherheit beim Trocknen	489
17.5	Fragen aus der Praxis	491
17.6	Literatur	492
18	Berechnungen und Antworten zu Teil III	495
18.1	Mischen, Rühren	495
18.2	Sedimentieren	496
18.3	Filtrieren	497
18.4	Verdampfen	501
18.5	Kondensieren	503
18.6	Destillation	505
18.7	Rektifikation	508
18.8	Trocknung	511
Teil IV Regelungstechnik		
19	Einleitung in die Regelungstechnik	517
19.1	Aufgabe einer Regelung	517
19.2	Begriffe und Bezeichnungen	517
19.3	Beispiele von Regelungen	518
	Watt'scher Fliehkraftregler	518
	Abgaskatalysator	519
	Temperaturregelung beim Duschen	520
19.4	Fragen aus der Praxis	521

20	Steuerung und Regelung	523
20.1	Wirkungsplan	523
	Elemente des Wirkungsplans	523
	Grundstrukturen des Wirkungsplans	524
	Wirkungswege und Wirkungsabläufe	525
20.2	Steuerung	526
	Stetige und unstetige Steuerung	527
	Ablaufsteuerung	527
	Störgrößenaufschaltung	527
20.3	Regelung	527
	Zeitkontinuierliche Regelung und Abtastregelung	528
	Adaptive Regelung	528
	Mehrpunktregelung	528
	Festwertregelung und Folgeregelung	529
	Selbsttätige Regelung und Handregelung	529
	Führungsverhalten und Störverhalten	529
	Detaillierter Regelkreis	529
	Stelleinrichtung	530
	Wertebereiche	530
20.4	Fragen aus der Praxis	531
21	Übertragungsverhalten	533
21.1	Beharrungskennlinie	533
21.2	Dynamische Eingangsfunktionen	534
21.3	Sprungantworten	536
	Proportionalverhalten	536
	Verzögerungsverhalten	537
	Integralverhalten	538
	Differentialverhalten	540
	Totzeitverhalten	540
	Verhaltenskombinationen	541
21.4	Frequenzgänge	542
	Bode-Diagramm	544
	Nyquist-Ortskurve	545
21.5	Fragen aus der Praxis	546
22	Reglertypen	549
22.1	Stetige Regler	550
	P-Regler	550
	I-Regler	551
	PI-Regler	552
	D-Regler	552
	PD-Regler	553
	PID-Regler	554

22.2	Unstetige Regler	554
	Zweipunktregler	554
	Dreipunktregler	556
22.3	Fragen aus der Praxis	557
23	Regelgüte	559
23.1	Führungsverhalten	559
23.2	Störverhalten	560
23.3	Bewertung der Regelgüte	561
23.4	Bewertung der Regelbarkeit	564
23.5	Fragen aus der Praxis	566
24	Einstellregeln für industrielle Regler	569
24.1	Ziegler-Nichols	570
24.2	Chien-Hrones-Reswick	570
24.3	T-Summen-Regel	571
24.4	Fragen aus der Praxis	573
25	Komplexe Regelsysteme	575
25.1	Split-Range-Regelung	575
25.2	Kaskadenregelung	576
25.3	Verhältnisregelung	578
25.4	Fragen aus der Praxis	580
26	Prozessleittechnik	581
26.1	Entwicklung der Prozessleittechnik	581
26.2	Aufbau eines Prozessleitsystems	582
26.3	Funktionen eines Prozessleitsystems	584
26.4	Darstellungen im Prozessleitsystem	586
26.5	Sicherheit computergesteuerter Anlagen	587
	Erläuterung von Sicherheitsbegriffen	588
26.6	Fragen aus der Praxis	589
27	Berechnungen und Antworten zu Teil IV	591
27.1	Einleitung	591
27.2	Steuerung und Regelung	592
27.3	Übertragungsverhalten	594
27.4	Reglertypen	597
27.5	Regelgüte	600
27.6	Einstellmethoden für industrielle Regler	602
27.7	Komplexe Regelsysteme	605
27.8	Prozessleittechnik	607
	Literatur zur Regelungstechnik	609
	Sachverzeichnis	611

Teil I

Grundlagen

Hier folgt ein kurzer Überblick über die Kapitel des ersten Buchteils:

1. Einführung: Definitionen, Fachorganisationen, Maßeinheiten
2. Projektierung: Maßstabvergrößerung, Planung von Chemieanlagen, Zeit- und Ressourcenplanung, Projektorganisation
3. Werkstoffe: Eigenschaften, Konstruktionsmaterialien, Korrosionsschutz
4. Reaktionstechnik: Bauarten, Reaktionsführung, chemischer Umsatz

Im Teil I des Buches werden die Grundlagen der chemischen Verfahrenstechnik erarbeitet. Es soll das Verständnis für die Abläufe in einem chemischen Betrieb geweckt werden. Es geht um die Definition von Begriffen, um das Vergrößern von Prozessen aus dem Labor in den Produktionsmaßstab (Scale-up), um das Management von Projekten, um das Verhalten und die Auswahl von Werkstoffen unter chemischen und mechanischen Beanspruchungen und schließlich um chemische Stoffumwandlungsvorgänge in verschiedenen Reaktionsapparaten.

Kapitel 1

Einführung

1.1 Definitionen

Die chemische Verfahrenstechnik befasst sich mit technischen Prozessen im Hinblick auf die Produktion von chemischen Erzeugnissen. Im Zentrum steht die Umsetzung der im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf eine Produktion im Kilogramm- oder Tonnen-Maßstab. Die wichtigsten Aufgaben der chemischen Verfahrenstechnik liegen in Teilbereichen wie

- Berechnung und Konstruktion von Apparaten,
- Beurteilung der Beständigkeit und Festigkeit von Werkstoffen,
- Kenntnisse der Maßstabsvergrößerung,
- Strömungslehre, Wärme- und Stofftransport,
- Mess- und Regelungstechnik,
- Projektplanung und Realisierung,
- Wirtschaftlichkeit und Unternehmensführung,
- Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz.

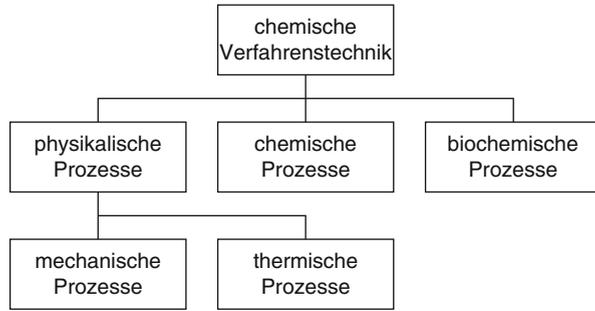
Die chemische Verfahrenstechnik ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die auf den Fachgebieten Mathematik, Physik, Chemie, Materialwissenschaften, Sicherheit, Ökologie und Betriebswirtschaft aufbaut. Das eigentliche Ziel der chemischen Verfahrenstechnik ist die *Stoffumwandlung*. Die Stoffumwandlung kann erfolgen durch

- *Änderung der Zusammensetzung*, z. B. durch *Filtration* einer Suspension, durch *Destillation* einer Lösung oder durch *Trocknung* eines Pulvers,
- *Änderung der Form und Größe*, z. B. durch *Zerkleinerung* von Erzgestein oder durch *Kristallisation* eines Salzes,
- *Änderung der Stoffart*, z. B. durch *chemische* oder *biochemische Reaktionen*.

Zusammensetzung, *Form* und *Größe* von Stoffen können durch physikalische Vorgänge beeinflusst werden. Die *Stoffart* kann durch chemische oder biochemische Vorgänge verändert werden.

Die *physikalischen Vorgänge* können in *mechanische* und *thermische Prozesse* unterteilt werden. Bei *mechanischen Prozessen* erfolgt die Stoffumwandlung meist durch Eintrag von mechanischer Energie (Schlag, Druck, Reibung). Bei

Abb. 1.1 Einteilung der chemischen Verfahrenstechnik in technische Prozesse



thermischen Prozessen erfolgt die Stoffumwandlung meist durch Übertragung von thermischer Energie (Hitze, Kälte). Ein thermischer Prozess ist in der Regel mit einem Phasenwechsel mindestens einer chemischer Komponente verbunden (s. Abb. 1.1).

Statt „*Chemische Verfahrenstechnik*“ wird manchmal auch der Begriff „*Chemie-Ingenieur-Technik*“ verwendet. Im Englischen heißen die entsprechenden Begriffe „*Process Engineering*“ bzw. „*Chemical Engineering*“. Mit *Verfahrenstechnik* werden allgemein Prozesse beschrieben, bei denen Stoffe und Materialien verarbeitet werden, z. B. auch zur Herstellung von Fahrzeugen, Haushaltgeräten oder Verpackungen. Um sich auf die Herstellung chemischer Erzeugnisse zu konzentrieren, ist es wichtig, von *chemischer Verfahrenstechnik* oder *Chemie-Ingenieur-Technik* zu sprechen. Damit wird die mechanische Materialverarbeitung im weiteren Sinn ausgeschlossen.

Bei der chemischen Verfahrenstechnik handelt es sich um eine relativ neue, mittlerweile eigenständige Wissenschaftsdisziplin. Bis in die dreißiger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts hat man chemische Prozesse entsprechend den verwendeten oder erzeugten Stoffe zusammengefasst. Man unterteilte die Prozesse z. B. in solche der Erdölchemie, der Hüttenchemie, der Metallurgie, der Farbstoffchemie, der Agrochemie und der Nahrungsmittelindustrie. Man erkannte aber bald, dass in all diesen Produktionsvorgängen ähnliche Verfahrensschritte ablaufen, die ähnliche Apparaturen benötigen. So konnten Verfahrensschritte definiert werden, die in verschiedenen Produktionsprozessen verwendet werden, aber demselben Zweck dienen, z. B. der Zerkleinerung der Rohstoffe, der Abtrennung von Feststoffen aus Flüssigkeiten oder der Wärmeübertragung. Diese universell einsetzbaren Verfahrensbausteine werden heute *Grundoperationen* genannt (engl. Unit Operations). Aus den Grundoperationen lassen sich auf vielfältige Weise ganze Produktionsprozesse aufbauen. Statt der rund 2'000 Herstellungsverfahren, die *Ullmann* in den Bänden A1-28 beschreibt, kann man mit rund 50 Grundoperationen (*Einheitsoperationen*), die in den Bänden B2 und B3 Platz finden, alle möglichen Prozesse nachbilden [6]. Die Aufgaben der chemischen Verfahrenstechnik liegen heute bei der technischen Vorbereitung (Planung) und der Durchführung der Stoffumwandlungsprozesse. Dazu gehören die Schritte

1. Theoretische Klärung der Stoffumwandlungsvorgänge hinsichtlich Chemie, ausgetauschten Energien und Beständigkeit der Werkstoffe,

2. Entwicklung der Produktionsverfahren durch optimale Kombination von Verfahrensbausteinen (Grundoperationen),
3. Maßstabsvergrößerung, Planung und Realisierung der Produktionsanlage,
4. Inbetriebnahme, Betrieb, Instandhaltung und Überwachung der Produktionsanlage.

Oberstes Ziel aller Bestrebungen ist stets die großtechnische Produktion von chemischen Erzeugnissen, wobei *Wirtschaftlichkeit*, *Sicherheit*, *Sozialverträglichkeit* und *Umweltschutz* im Vordergrund stehen. Dabei muss man sich im Klaren sein, dass sich die Zielgrößen oft Konkurrenzieren oder gar diametral gegenüberstehen. Zielgrößen sind z. B.

- minimaler Rohstoffverbrauch,
- minimaler Energieverbrauch,
- maximale Ausbeute,
- maximaler Produktionsausstoß,
- Produktion “Just in Time”,
- hervorragende Qualität,
- bestmögliche Apparateausnutzung,
- minimaler Aufwand für Anlagen (z. B. für Reinigung/Unterhalt),
- Modifizierbarkeit der Anlage,
- optimaler Personaleinsatz,
- minimale Belastung für die Umwelt,
- hohe Sicherheit für Personal und Anwohner,
- gutes Betriebsklima und daher gute Arbeitsleistungen,
- hohe Akzeptanz in der Bevölkerung.

Beim Auftreten von Zielkonflikten müssen Prioritäten festgelegt und Kompromisse geschlossen werden, die je nach sozialem und wirtschaftlichem Umfeld, Ort und herrschendem Zeitgeist unterschiedlich ausfallen können. Die Verantwortung des Chemikers bezüglich Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt haben z. B. verschiedene Fachverbände in Ehrenkodices geregelt.

Um die Rolle der chemischen Verfahrenstechnik in einem konventionell organisierten Chemiebetrieb kennen zu lernen, sind in Abb. 1.2 die wichtigsten Funktionen eines Chemiebetriebs dargestellt. Diese Funktionen entsprechen häufig gerade den Abteilungen in einem chemischen Betrieb, d. h. die Abteilungen sind entsprechend den geforderten Funktionen gegliedert.

Den einzelnen Funktionen kommen folgende Aufgaben zu:

Planung und Marktforschung:

- Konkurrenzbeobachtung, Vergleich des eigenen Produkts mit denjenigen von Branchenleadern (*Benchmarking*), Ableiten von Korrekturmaßnahmen und Verbesserungsmöglichkeiten,
- Stärken-Schwächen-Chancen-Gefahren-Analyse (engl. *Strength-Weakness-Opportunities-Threads = SWOT-Analysis*),
- Mittel- und langfristige Planung neuer Produkte, Produktionsplanung, Anlagenplanung, Verkaufsplanung.

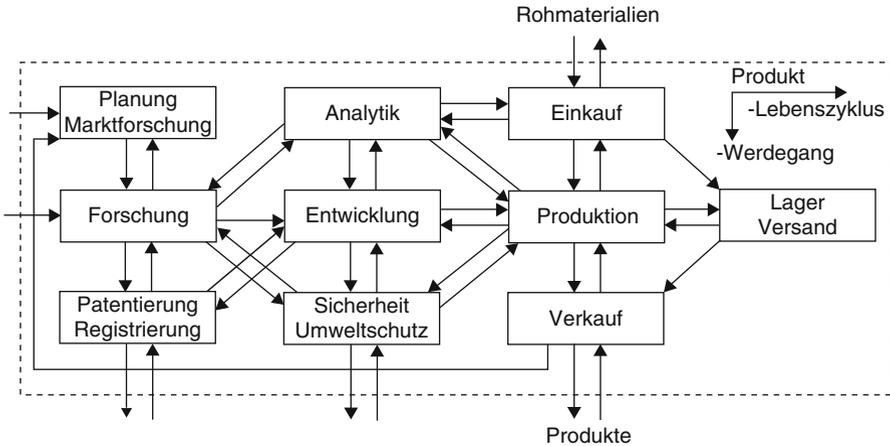


Abb. 1.2 Funktionen und Wechselwirkungen in einem Chemiebetrieb

Forschung:

- Herstellung und Synthese neuer Stoffe (*Komponentenforschung*),
- Herstellung neuer Darreichungsformen (*Anwendungsforschung*),
- Erarbeitung neuer Herstell- und Analyseverfahren (*Verfahrensforschung*).

Patentierung, Registrierung:

- Abklärung der Rechtssituation, Verteidigung eigener Rechtsansprüche,
- Erarbeitung von Registrierunterlagen und Patenten,
- Zusammenarbeit mit Behörden zur Bewilligung neuer Produkte.

Analytik:

- Aufklärung der Struktur und Eigenschaften von Stoffen in F&E,
- Qualitätssicherung in der Produktion,
- Entwicklung neuer analytischer Methoden.

Entwicklung:

- Umsetzung der Forschungsergebnisse auf den technischen Maßstab,
- Verbesserung der Produkteigenschaften (*Produktentwicklung*),
- Optimierung der Produktionsverfahren (*Verfahrensentwicklung*).

Sicherheit, Umweltschutz:

- Einhalten der gesetzlichen Bestimmungen (engl. Legal Compliance),
- Erfassung der Umweltbelastungen und der Sicherheitslücken,
- Realisierung von Maßnahmen zu Gunsten der Gesundheit, der Sicherheit und des Umweltschutzes, Mitarbeiterschulung.

Einkauf:

- Bewertung möglicher Lieferanten und Produkte,
- Sicherstellung der Rohstoffe und Hilfsmittel zur rechten Zeit am richtigen Ort in der korrekten Menge und Qualität zu einem günstigen Preis,

- Beurteilung der eigenen Produktion im Vergleich mit einem möglichen Zukauf von Zwischenprodukten, Schaffen von Alternativen.

Produktion:

- Herstellung der verlangten Menge in der geforderten Qualität zum gewünschten Zeitpunkt,
- Minimaler Aufwand für Rohstoffe, Energien, Apparate und Personal,
- Sicherstellung der gesetzlichen Auflagen in Bezug auf Gesundheit, Sicherheit und Umweltschutz.

Verkauf:

- Marketing (Verkaufsgebiete, Verkaufsstrategie, Preispolitik, Werbestrategie, Messebeteiligung, Kundenbesuche),
- Kundenbetreuung, Lieferung der richtigen Menge und Qualität zur richtigen Zeit, Ausmerzen von Beanstandungen,
- Beratung der Abteilung Planung, Marktforschungen.

Lager, Versand:

- Laufende Kontrolle des Inventars, geringe Kapitalbindung durch kleine Lagermengen, Lieferungen “*Just in Time*” (*JIT*),
- Sicherstellung der Liefermöglichkeiten, Meldung an den Einkauf oder die Produktion, falls eine minimale Lagermenge an Rohstoffen bzw. Endprodukten unterschritten wird,
- Verpackung der Produkte, Bereitstellung der Versandpapiere, Überwachung des Versands.

Die soeben beschriebenen Funktionen in einem Chemiebetrieb stellen insgesamt sicher, dass die chemische Produktion wirtschaftlich, sozial und ökologisch verträglich abläuft.

Einführende Literatur in die chemische Verfahrenstechnik finden Sie im Literaturverzeichnis auf Seite 19 [7–20].

1.2 Fachorganisationen

Im deutschen Sprachraum existieren einige für die Belange der chemischen Verfahrenstechnik bedeutende Fachorganisationen

Europa

- Europäische Föderation für Chemie-Ingenieur-Wesen (EFCE)
Die EFCE koordiniert europaweit die Forschung und Ausbildung auf dem Gebiete der chemischen Verfahrenstechnik. Sie verschafft Kontakte zu den Länderorganisationen und verschiedenen europäischen Forschungsgruppen.

Eines von drei Sekretariaten befindet sich bei der DECHEMA in Deutschland (DECHEMA s. weiter unten).

DECHEMA, Theodor-Heuss-Allee 25, D-60486 Frankfurt am Main, Tel. 0049 69 7564-143/209, Fax 0049 69 7564-299, www.efce.info

– Conseil Européen de l'Industrie Chimique (CEFIC)

Der CEFIC informiert zu aktuellen Themen im Spannungsfeld zwischen chemischer Produktion und Gesellschaft. Er erarbeitet weltweit gültige Richtlinien für die Mitgliedsunternehmungen der chemischen Industrie.

CEFIC, Av. Van Nieuwenhuysse 4, P.O. Box, B-1160 Bruxelles, Tel. 0032 2676 7211, Fax 0032 2676 7300, www.cefic.org

Deutschland

– Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA)

Die DECHEMA verfügt über eine eigene Forschung. Sie publiziert z. B. Tabellenwerke über Stoff- und Materialdaten und führt Ausbildungskurse durch. Die DECHEMA organisiert alle 3 Jahre die *Ausstellungstagung für Chemisches Apparatewesen (ACHEMA)* in den Messehallen Frankfurt. Die ACHEMA ist die weltgrößte Ausstellung für Chemie und Verfahrenstechnik.

DECHEMA, Theodor-Heuss-Allee 25, D-60486 Frankfurt am Main, Tel. 0049 69 7564-0, Fax 0049 69 7564-201, www.dechema.de

– Verein Deutscher Ingenieure (VDI) – Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC)

Die GVC umfasst verschiedene Arbeitsgruppen und Fachausschüsse. Sie publiziert z. B. den VDI Wärmetatlas und die Zeitschrift „Chemie-Ingenieur-Technik“. Sie führt auch Ausbildungskurse durch.

VDI-GVC, Peter-Müller-Straße 1, D-40468 Düsseldorf, Tel. 0049 211 6214-0, Fax 0049 211 6214-175, www.vdi.de

– Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)

Die GDCh repräsentiert die Interessen deutscher Chemiker aller beruflichen Ausrichtungen. Sie organisiert Fachtagungen und führt eine Stellenvermittlungsbörse. GDCh, Varrentrappstr.40–42, Postfach 900440, D-60444 Frankfurt a.M., Tel. 0049 69 7917-0, Fax 0049 69 7917-374, www.gdch.de

– Verband der Chemischen Industrie (VCI)

Der VCI wirkt als Interessenvertreter der deutschen chemischen Industrie inklusive Biochemie und Lebensmitteltechnik. Der VCI koordiniert und unterstützt Ausbildung und Forschung zugunsten der chemischen Produktionsunternehmen und unterhält eine Liste zur Stellenvermittlung.

VCI, Karlstr. 21, D-60329 Frankfurt a.M., Tel. 0049 69 2556-0, Fax 0049 69 2556-1471, www.vci.de

Schweiz

- Schweizerische Chemische Gesellschaft (SCG)
Die SCG publiziert chemisch-technische Arbeiten in der Zeitschrift „Chimia“. Sie organisiert alle 2 Jahre die *ILMAC* in den MUBA Hallen Basel.
SCG, Schwarztorstraße 9, CH-3007 Bern, Tel. 0041 31 310 4090, Fax 0041 31 310 1678, www.swiss-chem-soc.ch
- Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) – Schweizerische Gesellschaft für Verfahrens- und Chemieingenieur-Technik (SGVC)
Die SGVC verfügt über mehrere Arbeitsgruppen im Bereich der Chemie-Ingenieur-Technik. Sie organisiert Fachtagungen, meist in Basel.
SGVC, SATW, Seidengasse 16, Postfach 8023, CH-8001 Zürich, Tel. 0041 44 226 5011, Fax 041 44 226 5020, www.satw.ch
- Schweizerischer Verband diplomierter Chemiker FH (SVC)
Der SVC vereinigt die Interessen der Fachhochschulchemiker in der Schweiz und führt Fachtagungen durch.
SVC, Postfach 46, CH-4007 Basel, Tel. 0041 44 784 2681, Fax 0041 44 728 2992, www.svc.ch
- Schweizerische Gesellschaft für Chemische Industrie (SGCI)
Die SGCI publiziert Richtlinien für die Mitgliedsunternehmungen in der chemischen Industrie. Sie führt Fachtagungen durch.
SGCI, Nordstraße 15, Postfach, CH-8035 Zürich, Tel. 0041 44 368 1711, Fax 0041 44 368 1770, www.sgci.ch

Österreich

- Gesellschaft Österreichischer Chemiker (GÖCH)
Die GÖCH vertritt die Anliegen von österreichischen Chemikern und Chemieingenieuren. Sie fördert die chemische Ausbildung und führt Fachtagungen durch.
GÖCH, Nibelungengasse 11/6, A-1010 Wien, Tel. 0043 1 587 4249, Fax 0043 1 587 8966, www.goech.at
- Fachverband der chemischen Industrie Österreichs (FCIO)
Der FCIO nimmt die Interessen von chemischen Produktionsunternehmen in Österreich gegenüber Behörden, Gewerkschaften und Mitbürgern wahr.
FCIO, Wiedner Hauptstr. 63, A-1045 Wien, Tel. 0043 5 90900-3340, Fax 0043 5 90900-280, www.fcio.at

1.3 Maßeinheiten

Alle derzeit bekannten physikalischen Größen lassen sich auf sieben dimensions-behaftete Basiseinheiten zurückführen. Es sind dies die Basiseinheiten *Kilogramm*, *Sekunde*, *Meter*, *Ampère*, *Kelvin*, *Mol* und *Candela* (s. Tabelle 1.1).

Zu den Basiseinheiten gehören zudem die dimensionslosen Größen für das Bogenmaß bzw. für das Raumaß, der *Radian* und der *Steradian* (Tabelle 1.2).

Die Größen der Basiseinheiten werden durch die Definitionen des *Système International d'Unités (SI-System)* bestimmt. Man bezeichnet sie deshalb auch als *SI-Basiseinheiten*. Alle Basiseinheiten sind mit Ausnahme derjenigen für das Kilo-gramm rein physikalisch definiert, sodass sie überall auf der Welt (sogar im Weltall) reproduziert werden können. Die derzeit gültigen Definitionen sind der Tabelle 1.3 zu entnehmen.

Alle derzeit gebräuchlichen physikalischen Größen lassen sich aus den Basis-einheiten ableiten. Dabei können möglicherweise sehr kleine oder sehr große Zahlenwerte entstehen, die zweckmäßigerweise mit Hilfe von Zehnerpotenzen dar-gestellt werden. Diese Zehnerpotenzen sollten bei Darstellungen von Zahlenwerten z. B. in Tabellen stets gleich groß und wenn möglich ein Vielfaches der Zehnerpotenz hoch drei ($10^3 = 1'000$) sein.

Statt der Angabe als Zehnerpotenz können auch *Präfixe* zum Einheitssymbol verwendet werden. Die Präfixe werden ohne Zwischenraum direkt vor das Einheits-zeichen geschrieben. Die Tabelle 1.4 zeigt die Schreibweise der Präfixe, wie sie vom *Système International d'Unités* definiert sind.

Aus praktischen Gründen besitzen einige physikalische Größen eigene Einheiten. Diese Einheiten sind aus den SI-Basiseinheiten ableitbar. Die *abgeleiteten physi-kalischen Größen* können als einfache Potenzgleichungen der SI-Basiseinheiten dargestellt werden. Die Tabelle 1.5 zeigt die in der chemischen Verfahrenstechnik

Tabelle 1.1 Dimensionsbehaftete Basisgrößen des SI-Systems

Physikalische Größe	Formelzeichen	Basiseinheit	Einheitszeichen
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
Länge	ℓ	Meter	m
el. Stromstärke	I	Ampère	A
Temperatur	T	Kelvin	K
Stoffmenge	n	Mol	mol
Lichtstärke	L	Candela	cd

Tabelle 1.2 Dimensionslose Basisgrößen des SI-Systems

Physikalische Größe	Formelzeichen	Basiseinheit	Einheitszeichen
Bogenwinkel	$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Radian	rad
Raumwinkel	φ	Steradian	sr

Tabelle 1.3 Definition der SI-Basiseinheiten

1 Kilogramm ist gleich der Masse des internationalen Kilogramm-Prototyps.
 (= Masse von $50,183 \cdot 10^{24}$ ^{12}C Isotopen)

1 Sekunde ist das $9'192'631'770$ fache der Periodendauer der Strahlung, die beim Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustands des Isotops ^{133}Cs ausgesandt wird.

1 Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $(1/299\,792\,458)$ Sekunden durchläuft.

1 Ampère ist die Stärke eines elektrischen Stromes, der konstant durch zwei im Abstand von 1 m parallel verlaufende, geradlinige, unendlich lange Leiter mit vernachlässigbar kleinem kreisrunden Querschnitt fließt und dabei eine Kraft pro 1 m Leiterlänge von $2 \cdot 10^{-7}$ Newton ($= 2 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) zwischen den beiden Leitern hervorruft.

1 Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur am Tripelpunkt von Wasser.

1 Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 0,012 Kilogramm des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind.

1 Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz ($= 540 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$) aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $(1/683)$ Watt ($= 1,464 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$) pro Steradian beträgt.

1 Radiant ist gleich dem ebenen Zentrumswinkel eines Kreissektors, sodass der Kreissektor bei einem Kreis von 1 m Radius einen Kreisbogen von 1 m Länge ausschneidet (s. Abb. 1.3 links).

1 Steradian ist gleich dem räumlichen Winkel eines Kreiskegels mit Spitze im Zentrum einer Kugel, sodass der Kreiskegel bei einer Kugel von 1 m Radius eine Oberfläche von 1 m^2 ausschneidet (s. Abb. 1.3 rechts).

am häufigsten verwendeten abgeleiteten physikalischen Größen und ihre Einheiten. Weitere Definitionen von physikalischen Größen finden sich direkt in den entsprechenden Kapiteln.

Einige Einheiten sind gebräuchlich, obwohl sie sich nicht direkt durch Zehnerpotenzen der SI-Basiseinheiten darstellen lassen. Man spricht in diesem Zusammenhang von *nicht-kohärenten* Einheiten. Einige Beispiele von nicht-kohärenten Einheiten sind in der Tabelle 1.6 aufgeführt.

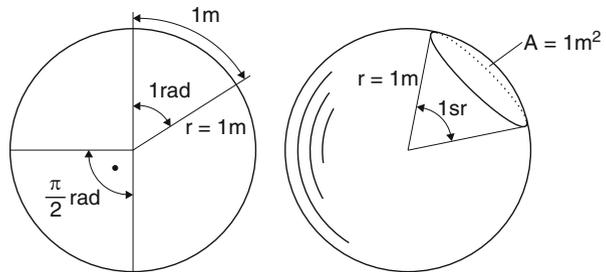


Abb. 1.3 Geometrische Darstellungen von Radiant (links) und Steradian (rechts)

Tabelle 1.4 Präfixe zur Darstellung von Zehnerpotenzen gemäß SI-System

Zehnerpotenz	Name	Präfix
10^{-18}	Atto	a
10^{-15}	Femto	f
10^{-12}	Piko	p
10^{-9}	Nano	n
10^{-6}	Mikro	μ
10^{-3}	Milli	m
10^3	Kilo	k
10^6	Mega	M
10^9	Giga	G
10^{12}	Tera	T
10^{15}	Peta	P
10^{18}	Exa	E

Tabelle 1.5 Abgeleitete SI-Einheiten

Physikalische Größe	Formelzeichen	Einheit	Einheitszeichen	Basiseinheiten
Fläche	A			m^2
Volumen	V			m^3
Dichte	ρ			$kg \cdot m^{-3}$
Geschwindigkeit	v			$m \cdot s^{-1}$
Beschleunigung	a			$m \cdot s^{-2}$
Frequenz	f	Hertz		s^{-1}
Kreisfrequenz	ω			$rad \cdot s^{-1}$
Kraft	F	Newton	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
Druck	p	Pascal	Pa	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
Spannung	σ	Pascal	Pa	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
Arbeit, Energie	E	Joule	J	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
Wärmemenge	Q	Joule	J	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
Enthalpie	H	Joule	J	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
Spezifische Enthalpie	h		$J \cdot kg^{-1}$	$m^2 \cdot s^{-2}$
Molare Enthalpie	h_m		$J \cdot mol^{-1}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
Volumenstrom	\dot{V}			$m^3 \cdot s^{-1}$
Massenstrom	\dot{m}			$kg \cdot s^{-1}$
Wärmestrom	\dot{Q}	Watt	$W = J \cdot s^{-1}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
Leistung	P	Watt	$W = J \cdot s^{-1}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
Viskosität, dynamisch	η		$Pa \cdot s$	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
Viskosität, kinematisch	ν			$m^2 \cdot s^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit	λ		$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$kg \cdot m \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
Temperaturleitfähigkeit	a			$m^2 \cdot s^{-1}$
Wärmekapazität	C		$J \cdot K^{-1}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Spezif. Wärmekapazität bei konstantem Druck	c_p		$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Molare Masse	M			$kg \cdot mol^{-1}$
Molkonzentration	c			$mol \cdot m^{-3}$
Diffusionskoeffizient	D			$m^2 \cdot s^{-1}$

Tabelle 1.6 Nicht-kohärente SI-Einheiten

Physikalische Größe	Formelzeichen	Basiseinheit	Einheitszeichen	Beziehung
Temperatur	ϑ	Grad Celsius	$^{\circ}\text{C}$	siehe Umrechnung
Zeit	t	Minute	min	1 min = 60 s
Zeit	t	Stunde	h	1 h = 60 min
Zeit	t	Tag	d	1 d = 24 h
Zeit	t	Woche	w	1 w = 7 d
Zeit	t	Jahr	a	1 a = 365.2565 d ¹

¹ Siderisches Jahr = Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne auf ihrer scheinbaren Bahn um die Erde durch den selben Punkt des Fixsternhimmels.

Tabelle 1.7 Griechische Buchstaben und ihre deutsche Aussprache

Buchstabe	Name	Buchstabe	Name
A	α alpha	N	ν nü
B	β beta	Ξ	ξ xi
Γ	γ gamma	O	o omikron
Δ	δ delta	Π	π pi
E	ϵ epsilon	P	ρ rho
Z	ζ zeta	Σ	σ sigma
H	η eta	T	τ tau
Θ	θ, ϑ theta	Υ	υ ypsilon
I	ι jota	Φ	ϕ, φ phi
K	κ kappa	X	χ chi
Λ	λ lambda	Ψ	ψ psi
M	μ mü	Ω	ω omega

Häufig werden in der Verfahrenstechnik *griechische Buchstaben* verwendet. Die korrekte Schreibweise und Aussprache der griechischen Symbole ist in der Tabelle 1.7 wiedergegeben.

In gewissen angelsächsischen Ländern sind noch immer Einheiten in Gebrauch, die nicht auf dem SI-System aufbauen (z. B. Unzen, Meilen, Gallonen). Auch bei uns in Europa wurden noch bis vor wenigen Jahrzehnten Einheiten verwendet, die mit dem SI-System nicht im Einklang standen (z. B. Kalorien, Pferdestärken, Torr). Gerade Stoffdaten, die in der chemischen Verfahrenstechnik häufig benötigt werden, sind vielfach nur aus älteren Messungen mit entsprechend veralteten Einheiten erhältlich. Die Tabellen 1.8 und 1.9 sollen die *Umrechnung* von fremden Einheiten in SI-Einheiten ermöglichen. Weitere Umrechnungshilfen finden sich z. B. im *Handbook of Chemistry and Physics* [17].

Tabelle 1.8 Umrechnungen von physikalischen Einheiten ins SI-System

Dimension	Einheit	Zeichen	Britisch	USA			
Länge	1 mil		25.400	mm	25.400	mm	
	1 point		0.353	mm	0.353	mm	
	1 line		0.635	mm	0.635	mm	
	1 inch	in	25.400	mm	25.400	mm	
	1 hand		10.160	cm	10.160	cm	
	1 link	li	20.117	cm	20.117	cm	
	1 span		22.860	cm	22.860	cm	
	1 foot	ft = 12 in	0.305	m	0.305	m	
	1 yard	yd = 3 ft = 36 in	0.914	m	0.914	m	
	1 fathom	fath = 2 yd	1.829	m	1.829	m	
	1 rod	Rd	5.029	m	5.029	m	
	1 chain	Ch	20.117	m	20.117	m	
	1 furlong	Fur	201.168	m	201.168	m	
	1 mile (statute mile)	mi = 1.760 yd	1.609	km	1.609	km	
	1 nautical mile		1.853	km	1.853	km	
	Fläche	1 circular mil		506.709	mm ²	506.709	mm ²
		1 circular inch		5.067	cm ²	5.067	cm ²
		1 square inch	sq in	6.452	cm ²	6.452	cm ²
		1 square link	sq li	404.687	cm ²	404.687	cm ²
1 square foot		sq ft	929.030	cm ²	929.030	cm ²	
1 square yard		sq yd	0.836	m ²	0.836	m ²	
1 square rod		sq rd	25.293	m ²	25.293	m ²	
1 square chain		sq ch	404.686	m ²	404.686	m ²	
1 rood			1011.712	m ²	1011.712	m ²	
1 acre			4046.860	m ²	4046.860	m ²	
1 square mile		sq mi	2.590	km ²	2.590	km ²	
Volumen		1 cubic inch	cu in	16.387	cm ³	16.387	cm ³
		1 board foot	Fbm	2.360	dm ³	2.360	dm ³
	1 cubic foot	cu ft	28.327	dm ³	28.327	dm ³	
	1 cubic yard	cu yd	0.765	m ³	0.765	m ³	
	1 register ton	RT = 100 cu ft	2.833	m ³	2.833	m ³	
	1 British shipping ton	= 42 cu ft	1.190	m ³	-	-	
	1 US shipping ton	= 40 cu ft	-	-	1.133	m ³	
Grundeinheit gallon für Flüssigkeiten	1 minim	min	59.194	mm ³	61.612	mm ³	
	1 fluid scruple		1.184	cm ³	-	-	
	1 fluid drachm	fl.dr.	3.552	cm ³	-	-	
	1 fluid dram	fl.dr.	-	-	3.697	cm ³	
	1 fluid ounce	fl.oz.	28.413	cm ³	29.574	cm ³	
	1 gill	Gi	142.065	cm ³	118.294	cm ³	
	1 pint	liq pt = 4 gi	0.568	dm ³	0.473	dm ³	
	1 quart	liq qt = 2 liq pt	1.137	dm ³	0.946	dm ³	
	1 pottle		2.273	dm ³	-	-	
	1 gallon	gal = 4 liq qt	4.546	dm ³	3.785	dm ³	
	1 peck		9.092	dm ³	-	-	
1 bushel		36.369	dm ³	-	-		