



**Bernd Kögl  
Franz Moser**

# **Grundlagen der Verfahrenstechnik**

**Unter Mitarbeit von Hugo Pointner**

Springer-Verlag Wien GmbH



**Dipl.-Ing. Bernd Kögl**

Assistent am Institut für Grundlagen der Verfahrenstechnik  
Technische Universität Graz

**Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Moser**

Vorstand des Instituts für Grundlagen der Verfahrenstechnik  
Technische Universität Graz

**Dipl.-Ing. Dr. techn. Hugo Pointner**

Lehrbeauftragter für Verfahrenstechnik  
Technische Universität Graz

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte,  
insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes,  
der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung,  
der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege  
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen,  
bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© 1981 by Springer-Verlag Wien  
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag/Wien 1981  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1981

**Mit 99 Abbildungen**

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

**Kögl, Bernd:**

Grundlagen der Verfahrenstechnik / Bernd Kögl; Franz Moser.  
Unter Mitarbeit von Hugo Pointner. – Wien, New York:  
Springer, 1981.

ISBN 978-3-7091-2271-6

NE: Moser, Franz

ISBN 978-3-7091-2271-6      ISBN 978-3-7091-2270-9 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-7091-2270-9

## Vorwort

Das vorliegende Buch, das auf Grund der Vorlesung „Grundlagen der Verfahrenstechnik“, die seit dem Jahre 1966 an der Technischen Universität Graz gehalten wird, entstand, behandelt einige der wichtigsten Grundlagen der Verfahrenstechnik: die aus den Erhaltungssätzen resultierenden Bilanzen (Stoff-, Wärme- und Impulsbilanzen), die für die Übertragung von Versuchsergebnissen so wesentliche Ähnlichkeitsphysik und die Theorie des Stoffaustausches. Damit verfolgt das Werk den Zweck, die für die Arbeit in der Praxis wesentlichen Grundlagen der Berechnung von Stoff- und Energiebilanzen, der Maßstabsvergrößerung aus einem Modell in die Großanlage und der Vorgänge in den Stoffaustauschapparaten zu vermitteln. Den Autoren war es dabei wichtig, diese Grundlagen aus der Sicht der Praxis zu geben, ohne die dabei notwendige Systematik und theoretische Strenge außer acht zu lassen. Jede empirische Wissenschaft, und die Verfahrenstechnik zählt zu diesen, muß das Ziel verfolgen, die theoretischen Grundlagen für die Bedürfnisse der Praxis zu formulieren. Diese Verbindung von theoretischen Grundlagen und praktischen Erfordernissen erscheint uns wesentlich und wurde dadurch berücksichtigt, daß das Augenmerk bei der Abfassung des Buches auf die Anwendungsbezogenheit gelegt wurde.

Dem Konzept des Buches liegt somit das Bedürfnis, das Wissensgebiet in systematischer und übersichtlicher Weise zu gestalten, zugrunde. Dabei ergibt sich jedoch immer das Problem, zwischen den Extremen einer möglichst weitgehenden Systematik einerseits und einer möglichst großen Anschaulichkeit andererseits einen Mittelweg zu finden. Zu einem Zeitpunkt, in dem die Grundlagen der Verfahrenstechnik im großen und ganzen als abgeschlossen gelten können, ist es zu rechtfertigen, die Systematik mehr zu betonen, wie dies in dem vorliegenden Buch geschah.

Der Inhalt ist in drei Teile gegliedert: Die allgemeinen Grundlagen, zu denen die Kapitel 1 – 4 gezählt werden können, die Ähnlichkeitsphysik, die in den Kapiteln 5 und 6 behandelt wird, und den Stoffaustausch in den Kapiteln 7 bis 12. Sicher sind auch andere Wissensgebiete zu den Grundlagen der Verfahrenstechnik zu zählen. Die hier ausgewählten können aber für den Aufbau des Studiums der Verfahrenstechnik als grundlegend angesehen werden. Das Buch ist mit dem Ziel geschrieben, Studenten der Verfahrenstechnik und des Chemie-Ingenieurwesens eine systematische Einführung in ihr Arbeitsgebiet zu vermitteln, aber auch Chemie-Ingenieuren, Prozeß- und System-Ingenieuren, Chemikern, Technologen und Biotechnikern eine Hilfe bei ihrer praktischen Arbeit zu sein.

Das Buch entstand unter Mitwirkung zahlreicher Mitarbeiter des Institutes für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz. Unser Dank gilt vor allem Herrn cand. ing. M. Narodoslavsky, der sich um die Zusammenstellung der Kapitel

und die Korrektur bemühte, sowie Herrn Dr. H. Schnitzer, dessen konstruktive Kritik viel zum Gelingen des Buches beitrug. Weiters möchten die Autoren auch dem Verlag für das verständnisvolle und geduldige Eingehen auf ihre Wünsche danken.

Graz, im Dezember 1980

Bernd Kögl und Franz Moser

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.0 Einleitung</b> . . . . .	1
1.1 Die Grundoperation der Verfahrenstechnik . . . . .	3
1.2 Die Grundvorgänge der Verfahrenstechnik . . . . .	3
1.3 Aufgabenstellungen der Verfahrenstechnik . . . . .	6
Schrifttum zu Kapitel 1.0 . . . . .	11
<b>2.0 Die Verfahrensstufe</b> . . . . .	13
2.1 Arbeitsweise einer Verfahrensstufe . . . . .	14
2.1.1 Diskontinuierliche Arbeitsweise . . . . .	14
2.1.2 Kontinuierliche Arbeitsweise . . . . .	15
2.1.3 Kombinierte Arbeitsweise . . . . .	17
2.2 Systematische Einteilung der Apparate . . . . .	17
2.2.1 Einteilung nach den Arten des Kontaktes der Phasen in einem Apparat . . . . .	18
2.2.2 Einteilung der Apparate nach Art der Phasenführung im Apparat .	19
2.2.3 Einteilung der Apparate nach Art der Verteilungsform der Phasen im Apparat . . . . .	21
2.3 Freiheitsgrade . . . . .	22
2.3.1 Vorgangsweise bei der Analyse einer Anlage . . . . .	23
2.3.2 Analyse der Grundeinheiten . . . . .	23
2.3.2.1 Variablen . . . . .	23
2.3.2.2 Bedingungen . . . . .	24
2.3.3 Bestimmung der Freiheitsgrade von Grundeinheiten . . . . .	27
2.3.4 Analyse komplexer Einheiten . . . . .	31
Schrifttum zu Kapitel 2.0 . . . . .	35
<b>3.0 Grundbeziehungen der Austauscheffekte</b> . . . . .	36
3.1 Grundbegriffe . . . . .	36
3.1.1 Austauschgrößen und Austauscheffekte . . . . .	36
3.1.2 Die Konzentration . . . . .	39
3.1.3 Der Austauschstrom . . . . .	40
3.1.4 Die Austauschstromdichte . . . . .	41
3.1.5 Ergiebigkeit der Austauschströme . . . . .	44
3.2 Transporteffekte . . . . .	46
3.2.1 Der molekulare Transport . . . . .	47
3.2.1.1 Allgemeine Gesetzmäßigkeiten des molekularen Transportes	47
3.2.1.2 Der molekulare Stofftransport . . . . .	50
3.2.1.3 Der molekulare Energietransport . . . . .	54
3.2.1.4 Der molekulare Impulstransport . . . . .	55
3.2.2 Der konvektive Transport . . . . .	59
3.2.2.1 Der konvektive Stofftransport der Teilmengen . . . . .	61

3.2.2.2 Konvektiver Transport der Gesamtmasse bzw. der Gesamtstoffmenge . . . . .	61
3.2.2.3 Der konvektive Energietransport . . . . .	62
3.2.2.4 Der konvektive Impulstransport . . . . .	63
3.2.2.5 Zusammenfassende Darstellung der konvektiven Transportströme . . . . .	63
3.2.3 Der turbulente Transport . . . . .	64
3.3 Speichereffekte . . . . .	67
3.4 Umwandlungseffekte . . . . .	69
3.4.1 Stoffumwandlung . . . . .	69
3.4.1.1 Umwandlung der Molmenge einer Komponente . . . . .	69
3.4.1.2 Umwandlung der Masse einer Komponente . . . . .	72
3.4.1.3 Umwandlung der Gesamt-Molmenge $N$ . . . . .	72
3.4.1.4 Umwandlung der Gesamt-Masse $M$ . . . . .	73
3.4.2 Energieumwandlung . . . . .	73
3.4.3 Impulsumwandlung . . . . .	76
Schrifttum zu Kapitel 3.0 . . . . .	77
<b>4.0 Die Bilanzgleichungen . . . . .</b>	<b>79</b>
4.1 Bilanzgebiet . . . . .	81
4.2 Begriffe zur Bilanzierung der Austauschgrößen . . . . .	81
4.2.1 Charakterisierung ein- und mehrphasiger Systeme . . . . .	81
4.2.2 Zusammensetzung von Mehrstoffsystemen . . . . .	82
4.3 Differentielle Bilanzgleichungen . . . . .	87
4.3.1 Allgemeine Bilanzgleichung . . . . .	87
4.3.2 Differentielle Stoffbilanzen . . . . .	89
4.3.2.1 Bilanz auf Basis der partiellen Molmenge . . . . .	89
4.3.2.2 Bilanz auf Basis der partiellen Masse . . . . .	91
4.3.2.3 Bilanz auf Basis der Gesamtmasse . . . . .	92
4.3.2.4 Bilanz auf Basis der Gesamt-Molmenge . . . . .	93
4.3.3 Differentielle Energiebilanzen . . . . .	93
4.3.4 Differentielle Impulsbilanzen . . . . .	98
4.3.5 Die Bilanzgleichungen in verschiedenen Koordinatensystemen . . . . .	103
4.4 Integrale Bilanzgleichungen . . . . .	103
4.4.1 Integrale Stoffbilanzgleichungen . . . . .	106
4.4.2 Integrale Energiebilanzgleichungen . . . . .	111
Schrifttum zu Kapitel 4.0 . . . . .	119
<b>5.0 Ähnlichkeitstheorie . . . . .</b>	<b>120</b>
5.1 Kenngrößen der physikalischen Ähnlichkeit . . . . .	123
5.2 Van Driestsche Regel und $\Pi$ -Theorem . . . . .	132
5.3 Entwicklung von Kennzahlen . . . . .	136
5.3.1 Entwicklung aus unmittelbaren physikalischen Beziehungen . . . . .	136
5.3.2 Entwicklung aus Differentialgleichungen oder anderen mittelbaren Beziehungen . . . . .	136
5.3.3 Entwicklung aus Einflußgrößen mittels Dimensionsanalyse . . . . .	140
5.3.3.1 Die Exponenten-Methode von Rayleigh . . . . .	140
5.3.3.2 Weitere Methoden der Dimensionsanalyse . . . . .	144
5.3.3.3 Die Signifikanz-Methode . . . . .	145
5.4 Physikalische Bedeutung von Kennzahlen . . . . .	160
5.5 Wichtige Kennzahlen der Verfahrenstechnik . . . . .	164

5.6	Modellversuche . . . . .	166
5.6.1	Modellversuche bei totaler Ähnlichkeit . . . . .	166
5.6.2	Modellversuche bei nicht kompensierter partieller Ähnlichkeit . . . . .	170
5.6.3	Modellversuche bei kompensierter partieller Ähnlichkeit . . . . .	172
5.6.4	Ermittlung umfassender Kennzahlen-Beziehungen mittels Modellversuchsreihen . . . . .	173
5.7	Grenzen und Kritik der Ähnlichkeitsphysik . . . . .	175
	Schrifttum zu Kapitel 5.0 . . . . .	176
<b>6.0</b>	<b>Analogie der Austauscheffekte . . . . .</b>	<b>179</b>
6.1	Strenge Analogie . . . . .	180
6.1.1	Analogie des Impuls- und Wärmeaustausches nach Reynolds . . . . .	180
6.1.2	Analogie des Wärme- und Stoffaustausches nach Lewis . . . . .	184
6.1.3	Die dreifache strenge Analogie . . . . .	185
6.2	Erweiterte Analogie . . . . .	187
6.2.1	Differentielle Analogiebeziehungen . . . . .	188
6.2.2	Die Prandtlsche Analogie des Impuls- und Wärmeaustausches und deren Abwandlungen . . . . .	189
6.2.3	Die Colburnsche Analogie . . . . .	191
6.2.4	Allgemeines Postulat der erweiterten Analogie des Impuls- und Wärmeaustausches . . . . .	192
6.2.5	Allgemeines Postulat der erweiterten Analogie des Stoff- und Wärmeaustausches . . . . .	193
6.2.6	Allgemeines Postulat der dreifachen erweiterten Analogie . . . . .	196
6.3	Allgemeine Analogie . . . . .	198
6.4	Grenzen und Kritik der Analogie . . . . .	200
	Schrifttum zu Kapitel 6.0 . . . . .	201
<b>7.0</b>	<b>Stoffaustausch in einphasigen Systemen . . . . .</b>	<b>203</b>
7.1	Stoffaustauschvorgänge in einphasigen Systemen . . . . .	203
7.2	Die Diffusion . . . . .	206
7.2.1	Äquimolare oder molengleiche Diffusion . . . . .	207
7.2.2	Einseitige Diffusion . . . . .	210
7.2.3	Nichtäquimolare zweiseitige Diffusion . . . . .	216
7.2.4	Instationäre Diffusion . . . . .	218
7.3	Berechnung von Diffusionskoeffizienten . . . . .	219
7.3.1	Molekularkinetische Berechnung des Diffusionskoeffizienten . . . . .	219
7.3.2	Empirische und halbempirische Gleichungen zur Berechnung des Diffusionskoeffizienten von Gasen . . . . .	225
7.3.3	Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten . . . . .	225
7.3.4	Druckabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten . . . . .	226
7.3.5	Der Einfluß der Konzentration auf den Diffusionskoeffizienten in Mehrstoffgemischen . . . . .	227
7.3.6	Empirische und halbempirische Gleichungen zur Berechnung des Diffusionskoeffizienten von Flüssigkeiten . . . . .	228
7.3.7	Diffusionskoeffizient von Flüssigkeiten und Gasen in Feststoffen . . . . .	230
	Schrifttum zu Kapitel 7.0 . . . . .	231
<b>8.0</b>	<b>Stoffübergang an festen Grenzflächen . . . . .</b>	<b>234</b>
8.1	Stoffübergang an ebenen Grenzflächen . . . . .	234
8.1.1	Reibungsfreie Strömung . . . . .	236



8.1.2	Strömung mit einem konstanten Geschwindigkeitsgradienten . . . . .	239
8.1.3	Laminare Grenzschichtströmung . . . . .	240
8.1.4	Einfluß der turbulenten Strömung auf den Stoffaustausch . . . . .	243
8.2	Stoffübergang an festen kugelförmigen Partikeln . . . . .	245
8.2.1	Stoffübergang für verschiedene Bereiche der Reynoldszahl . . . . .	245
8.3	Stoffübergang an den Grenzflächen überströmter Einzelkörper unterschiedlicher Form . . . . .	250
	Schrifttum zu Kapitel 8.0 . . . . .	253
<b>9.0</b>	<b>Stoffaustausch durch Grenzflächen . . . . .</b>	<b>255</b>
9.1	Gleichgewichtsbedingungen zwischen zwei Phasen . . . . .	256
9.2	Stoffübergang bei ruhenden oder laminar strömenden Medien . . . . .	258
9.3	Stoffübergang bei turbulent strömenden Medien . . . . .	259
9.4	Berechnung des Stoffaustausches mit Hilfe von Stoffdurchgangskoeffizienten . . . . .	261
9.5	Die Ermittlung des Stoffübergangskoeffizienten . . . . .	266
9.6	Modelltheorien des Stoffüberganges durch Grenzflächen . . . . .	271
9.6.1	Zweifilmtheorie . . . . .	271
9.6.2	Penetrationstheorie . . . . .	274
9.6.3	Oberflächenenergieerneuerungstheorie . . . . .	279
9.6.4	Kombinierte Film-Penetrationstheorie . . . . .	281
9.7	Einflußgrößen auf den Stoffübergang . . . . .	284
9.7.1	Der Einfluß der Temperatur auf den Stoffübergang . . . . .	284
9.7.2	Der Einfluß des Gesamtdruckes auf den Stoffübergang . . . . .	286
9.7.3	Der Einfluß des Partialdruckes auf den Stoffübergang . . . . .	287
9.7.4	Der Einfluß der Konzentration auf den Stoffübergang . . . . .	287
9.7.5	Der Einfluß der Geometrie auf den Stoffübergang . . . . .	289
9.7.6	Der Einfluß von Grenzflächeneffekten auf den Stoffaustausch . . . . .	290
	Schrifttum zu Kapitel 9.0 . . . . .	295
<b>10.0</b>	<b>Stoffübergang am Flüssigkeitsfilm . . . . .</b>	<b>297</b>
10.1	Gesetzmäßigkeiten der Filmströmung . . . . .	297
10.1.1	Rieselfilme mit glatter Oberfläche . . . . .	298
10.1.2	Rieselfilme mit welliger Oberfläche . . . . .	302
10.2	Flüssigkeitiger Stofftransport beim Flüssigkeitsfilm . . . . .	303
10.2.1	Stoffaustausch beim laminaren, wellenfreien Flüssigkeitsfilm . . . . .	303
10.2.2	Stoffaustausch beim Flüssigkeitsfilm mit welliger Oberfläche . . . . .	310
10.3	Gasseitiger Stofftransport beim Rieselfilm . . . . .	313
	Schrifttum zu Kapitel 10.0 . . . . .	315
<b>11.0</b>	<b>Stoffübergang an Blasen und Tropfen . . . . .</b>	<b>317</b>
11.1	Physikalisches Verhalten von Partikelsystemen . . . . .	317
11.1.1	Dynamik der Blasenbildung und Blasengröße . . . . .	318
11.1.2	Dynamik der Tropfenbildung und Tropfengröße . . . . .	321
11.1.3	Bewegung von Blasen und Tropfen . . . . .	323
11.2	Theorie des Stoffüberganges bei Blasen und Tropfen . . . . .	325
11.3	Empirische und halbempirische Beziehungen zur Berechnung des Stoffüberganges an Tropfen . . . . .	332
11.3.1	Stoffübergang vom Kontinuum in den Tropfen . . . . .	335
11.3.2	Stoffübergang vom Tropfen ins Kontinuum . . . . .	337

11.4 Empirische und halbempirische Beziehungen zur Berechnung des Stoffüberganges an Blasen . . . . .	339
11.4.1 Stoffübergang vom Kontinuum in die Blase. . . . .	342
11.4.2 Stoffübergang von der Blase ins Kontinuum . . . . .	342
Schrifttum zu Kapitel 11.0 . . . . .	343
<b>12.0 Stoffaustausch und chemische Reaktion . . . . .</b>	<b>346</b>
12.1 Die Reaktionsgeschwindigkeitsgleichung. . . . .	348
12.2 Heterogene Reaktionen . . . . .	349
12.2.1 Abschätzung der geschwindigkeitsbestimmenden Vorgänge bei heterogenkatalytischen Reaktionen. . . . .	351
12.2.2 Quantitative Bestimmung des Einflusses einer chemischen Reaktion auf den Stoffaustausch bei heterogen-katalytischen Reaktionen . . . . .	353
12.3 Homogene Reaktionen in heterogenen Systemen . . . . .	361
12.3.1 Abschätzung des geschwindigkeitsbestimmenden Schrittes bei homogenen Reaktionen in heterogenen Systemen. . . . .	363
12.3.2 Quantitative Behandlung des Einflusses einer chemischen Reaktion auf den Stoffaustausch bei homogenen Reaktionen in heterogenen Systemen . . . . .	365
Schrifttum zu Kapitel 12.0 . . . . .	367
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>369</b>
Die physikalische Bedeutung der vektoriiellen Differentialoperatoren . . . . .	369
Der Gradient . . . . .	369
Die Divergenz . . . . .	372
Kombinierte Differentialoperatoren . . . . .	372
Sachverzeichnis . . . . .	373