

Patat-Kirchner
Praktikum der Technischen Chemie

Praktikum der Technischen Chemie

von

Franz Patat · Kurt Kirchner

3., neubearbeitete und erweiterte Auflage



Walter de Gruyter · Berlin · New York
1975

Prof. Dr. Dr. h. c. Franz Patat

**Direktor des Institutes für Technische Chemie
Technische Universität München**

Prof. Dr. Kurt Kirchner

**Technische Universität München
Leiter der Abteilung Technische Chemie des Dechema Institutes
Frankfurt/Main**

Mit 40 Aufgaben, 7 Tabellen und 82 Abbildungen

ISBN 3 11 004616 4

© Copyright 1975 by Walter de Gruyter & Co., vormals C. J. Göschen'sche Verlagshandlung, J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung, Georg Reimer, Karl J. Trübner, Veit & Comp., Berlin 30.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Photokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme vervielfältigt oder verbreitet werden.

Printed in Germany.

Satz und Druck: Walter de Gruyter & Co., 1 Berlin 30
Buchbinder: Wübben & Co., 1 Berlin 42

Vorwort zur 3. Auflage

Die vorliegende Auflage beinhaltet eine gründliche Bearbeitung der theoretischen und experimentellen Abschnitte, wobei viele Anregungen und Vorschläge von Fachkollegen aus Industrie und Hochschule berücksichtigt wurden.

Der verfahrenstechnische Teil erfuhr Ergänzungen durch die Aufgaben „Untersuchung von Kolonnenböden“ S. 96 ff und „Arbeitsaufwand beim Suspendieren von Feststoffen“ S. 123 ff. Das Kapitel Reaktionstechnik wurde um zwei Aufgaben aus dem Gebiet der heterogenen Katalyse (S. 202 ff) erweitert. Schließlich wurde das Literaturverzeichnis erweitert und auf den neuesten Stand gebracht.

Der Abschnitt Optimierung kann nur als kurzer Hinweis auf dieses wichtige Gebiet gelten. Darüberhinaus sei auf die Monographie von Hoffmann/Hofmann „Einführung in die Optimierung“ verwiesen.

Wir möchten mit dem Dank für alle Stellungnahmen wieder die Bitte um weitere Kritik verbinden. Herrn Klühs sei für die Durchsicht des Textes gedankt.

Januar 1975

F. PATAT — K. KIRCHNER

Vorwort zur 1. Auflage

Die Lehre der technischen Chemie hat in den letzten Jahrzehnten insofern einen Strukturwandel erfahren, als das Gemeinsame der zahlreichen, kaum mehr überblickbaren chemischen Techniken als allgemeine Grundlage des Gebietes herausgeschält wurde und in der Verfahrenstechnik und chemischen Reaktionstechnik präzise Formulierungen fand. Diesbezügliche Lehr- und Handbücher existieren im deutschen und vor allem im angelsächsischen Schrifttum in hinreichender Auswahl. Auch wenn ihr Inhalt auf Chemiker, Ingenieure und Physiker zugeschnitten ist, wird der Chemiestudent das für ihn Maßgebende ohne Mühe finden können. Anders steht es mit Anleitungen zu Übungsaufgaben, die auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik durch die Berücksichtigung von apparativen Einzelheiten häufig weit über die speziellen Interessen eines Chemikers hinausgehen und für die chemische Reaktionstechnik praktisch fehlen.

Um nun auch für die erwähnten Grundzüge der technischen Chemie ein Praktikum als bewährtes Fundament der Chemieausbildung in der Hand zu haben, wurden die vorliegenden Aufgaben zusammengestellt. Oberster Leitsatz war dabei die Beschränkung des Stoffes auf das für eine qualifizierte Gesamtausbildung in Chemie unbedingt Notwendige, das das im organischen, anorganischen und physikalisch-chemischen Praktikum Erarbeitete ergänzt und damit zum derzeitigen Rüstzeug jeden Chemikers, gleich welcher Interessenrichtung, gehört.

Die Ausführungen sind in drei Abschnitte gegliedert. Der verfahrenstechnische Teil ist vergleichsweise umfangreich ausgefallen, da hier bereits Grundlagen, wie die Gesetze des Wärme- und Stofftransports gebracht und an Hand von einfachen Aufgaben erläutert werden, deren Kenntnis für die chemische Reaktionstechnik wichtig ist. Die Kapitel über Regelungstechnik umfassen nur wenige typische Aufgaben und sollen dem Chemiker lediglich einen kurzen Eindruck dieses Gebietes vermitteln.

Da die Aufgaben danach ausgewählt wurden, quantitativ formulierbare Gesetzmäßigkeiten der Verfahrenstechnik und der chemischen Reaktionstechnik zu belegen, tritt darin das Stoffliche notwendigerweise in den Hintergrund. Dieser Mangel in technologischer Sicht mag speziell bei den Aufgaben über Mikrokinetik heterogener Katalysen stören, wo für die zu erläuternden Gesetzmäßigkeiten technisch unwichtige Um-

setzungen herangezogen wurden, da keine hinreichend geklärten, technisch wichtigen Umsetzungen zur Verfügung stehen. Die Aufgaben zur Homogenkinetik wurden im Hinblick auf den Umfang, den solche Aufgaben in physikalisch-chemischen Praktikumsbüchern einnehmen, beschränkt.

Auf Grund der Einführungen können aber ohne Schwierigkeit die Aufgaben mit anderen Stoffsystemen ergänzt und variiert werden. Entsprechende Hinweise sind unterlassen, um den Unterschied zu den vorliegenden Aufgaben, die in allen Einzelheiten durchprobiert wurden, nicht zu verwischen.

Ebenso haben wir das schematische Fließbild mit Stoff- und Energieschema nicht erläutert, obwohl sich eine solche Übungsaufgabe als Abschlußarbeit des Praktikums sehr empfiehlt. Entsprechende Unterlagen können leicht aus einschlägigen Monographien (WINNACKER-KÜCHLER, Chemische Technologie; ULLMANN'S Encyclopädie der Technischen Chemie, 3. Auflage; KÖLBEL-SCHULZE, Projektierung und Vorkalkulation in der Chemischen Industrie) ausgewählt, die Darstellungsform dem DIN-Blatt 7091 (Das schematische Fließbild) entnommen werden.

Die Durchführung der Übungsaufgaben ist ausführlich beschrieben. Die theoretischen Voraussetzungen und Zusammenhänge konnten in dem gesteckten Rahmen nicht in gleicher Ausführlichkeit gebracht werden. Sie gehen nur in den Fällen, wie beispielsweise in der Regelungstechnik, über eine Skizzierung hinaus, in denen der Chemiestudent auf Grund seiner Ausbildung nicht ohne weiteres in der Lage ist, sich die theoretischen Voraussetzungen selbst zu erarbeiten.

Abschließend möchten wir, verbunden mit der Bitte um weitere Anregung zur Ausgestaltung der Aufgabensammlung, noch den engeren Fachkollegen unseren Dank sagen, die uns bei der Auswahl der Aufgaben und durch kritische Durchsicht des Textes geholfen haben. In erster Linie haben wir Herrn Professor KÖLBEL, der uns zur Abfassung dieses Praktikums ermutigte, für den Austausch von Aufgaben, Herrn Professor KNEULE für die Texte zweier verfahrenstechnischer Aufgaben und Herrn Professor MERZ für die Durchsicht der „Meß- und Regelungstechnik“, zu danken. Herrn Dr. NITTSCH danken wir für die Durchsicht von Text und Korrekturen.

August 1963

F. PATAT — K. KIRCHNER

Vorwort zur 2. Auflage

Die 1. Auflage des Buches „Praktikum der Technischen Chemie“ erschien 1963 und fand eine gute Aufnahme. Sie kam offensichtlich einem Bedürfnis nach, so daß sie bereits nach zwei Jahren vergriffen war. Bei der gründlichen Neubearbeitung des Buches haben wir versucht, die in den vergangenen vier Jahren im Unterricht gewonnenen Erfahrungen einzuarbeiten und uns zugegangene Kritiken, vor allem zwei Anregungen, zu berücksichtigen.

Einmal wurde das von der IUPAC empfohlene MKSA-System eingeführt. Zum anderen erfuhr der reaktionstechnische Teil wesentliche Ergänzungen. Zwei Beispiele zur Mikrokinetik (S 145 ff.) und ein Kapitel über die Optimierung chemischer Reaktoren (S. 213) wurden neu aufgenommen. Ergänzt wurde auch ein Beispiel über das Fördern von Flüssigkeiten (S. 16). Schließlich soll das im Anhang beigelegte Normblatt dem Studenten die Anfertigung des schematischen Fließbildes eines chemischen Verfahrens erleichtern.

Wir hoffen, das Buch mit den eben erwähnten Änderungen und Ergänzungen weiter vervollständigt zu haben und möchten mit dem Dank für alle Stellungnahmen die Bitte um Kritik zur weiteren Ausgestaltung der Aufgabensammlung wiederholen.

Unser Dank gilt ferner den Herren Dr. Klein, Dr. Reichert und Dr. Talsky für die Unterstützung beim Lesen der Korrekturen. Dem Verlag danken wir dafür, daß er auf alle unsere Wünsche mit großem Verständnis eingegangen ist.

Juli 1967

F. PATAT—K. KIRCHNER

Inhaltsübersicht

A. Grundoperationen (Verfahrenstechnik)	1
I. Wärme- und Stofftransport	1
Grundlagen der Ähnlichkeitslehre	1
1. Wärmetransport durch Wärmeleitung und Konvektion in einem Doppelrohrwärmeaustauscher	4
2. Wärmetransport durch Strahlung. Berechnung der Wärme- abstrahlung verschiedener Oberflächen	12
3. Fördern strukturviskoser Flüssigkeiten Betriebsverhalten einer Zahnradpumpe	16
II. Eigenschaften von Schüttgut- und Wirbelschichten	20
4. Durchströmung und Aufwirbelung von Schüttgutschichten durch Wasser	20
5. Wärmeübergang in Gaswirbelschichten	28
III. Stofftrennung	31
a) Zerkleinerung	31
6. Hartzerkleinerung in der Kugelmühle	31
b) Trennung fester Stoffe	37
7. Sieben. Bestimmung der Kornverteilung und der Oberfläche eines Gutes (Dispersoids)	37
8. Sedimentation. Bestimmung der Kornverteilung eines Dis- persoids nach der Pipettenmethode von Andreasen	43
9. Windsichten. Trennwirkung einer Windsichtstrecke	49
10. Flotation. Trennung von Feststoffen durch Flotation . . .	52
Flotation von Flußspat	55
Selektive Flotation eines sulfidischen Blei-Zink-Erzes . . .	55

c) Trennung von Feststoff und Flüssigkeit	58
11. Filtration. Abhängigkeit des Filterdurchsatzes vom Filtermittel, Konzentration der Trübe und Filterdruck	58
12. Trocknung. Trocknung eines nichthygroskopischen, wasserhaltigen Gutes	63
d) Trennung von Flüssigkeiten	77
α) Rektifikation.	78
13. Gleichgewichtskurve und Siedediagramm binärer Mischungen	78
14. Ermittlung der theoretischen Bodenzahl einer Kolonne bei unendlichem Rücklaufverhältnis	83
15. Ermittlung der theoretischen Bodenzahl einer Kolonne bei endlichen Rücklaufverhältnissen	89
16. Untersuchung von Kolonnenböden	96
β) Flüssig-flüssig-Extraktion	100
17. Bestimmung der theoretischen Stufenzahl einer Scheibekolonne	100
e) Trennung von Gasen	108
18. Adsorption. Wirksamkeit verschiedener Adsorbentien für die Trennung von Dampf-Luft-Gemischen	108
IV. Stoffvereinigung	115
19. Rühren	115
Arbeitsaufwand beim Lösen von Feststoffen durch Rühren	120
Arbeitsaufwand beim Suspendieren von Feststoffen . . .	123
B. Chemische Reaktionstechnik	124
Einleitung	124
Grundbegriffe der Reaktionskinetik	125
I. Mikrokinetik	131
a) Homogene Reaktionen	131
20. Polymerisation von Styrol (mit freien Radikalen aus Azobisisobuttersäurenitril)	131

21. Ermittlung von Polymerisationsgraden aus Viskositätsmessungen	140
22. Enzymreaktionen	145
Esterhydrolyse von N- α -Benzoyl-L-argininäthylester.	148
Dehydrierung von Äthanol mit Alkoholdehydrogenase	150
b) Heterogene Reaktionen	152
23. Distickstoffmonoxidzerfall an Kupferoxid	
Selbsthemmung der Reaktion durch entstehenden Sauerstoff	152
24. Ameisensäurezerfall an Silber-Zink-Legierungen	
Einfluß der Elektronendichte auf die Aktivierungsenergie	159
25. Der Kompensationseffekt beim Distickstoffmonoxidzerfall und bei der Bildung von Vinylchlorid	164
II. Makrokinetik	171
Reaktorformen	171
a) Arten der Reaktionsführung	173
26. Der isotherm, homogen, nichtstationär arbeitende Reaktor	
Diskontinuierliche Verseifung von Äthylacetat im Idealkessel	173
27. Der isotherm, homogen, stationär arbeitende Reaktor	
Kontinuierliche Verseifung von Äthylacetat im Idealkessel	175
28. Der isotherm, nichthomogen, stationär arbeitende Reaktor	
Kontinuierliche Esterverseifung im Strömungsrohr	177
29. Kontinuierliche isotherme Verseifung von Äthylacetat in der Kaskade	178
30. Verweilzeitspektrum	
Bestimmung der Summenkurve eines Idealkessels, einer Idealkaskade und eines Idealrohres	183
b) Wärmehaushalt von Reaktoren	189
31. Berechnung stabiler Betriebszustände eines Idealkessels bei kontinuierlicher Reaktionsführung.	189

c) Transportprozesse bei der heterogenen Katalyse	196
32. Methanolzerfall an Zinkoxid	196
33. Oxidation von Kohlenwasserstoffen (Schadstoffen) in Wabenrohrkatalysatoren	202
34. Testen von Katalysatoren	
Methanoxidation an Edelmetallkatalysatoren	208
III. Optimierung	213
35. Optimierung eines zweistufigen Reaktors	213
36. Optimierung einer Elektrolysezelle	222
C. Meß- und Regelungstechnik	229
37. Regelung eines Lufterhitzers	229
38. Regelung eines Wärmeaustauschers	241
39. Regelung eines Absorbers	242
D. Anhang	245
40. Darstellung einer vollständigen Funktion physikalischer oder chemischer Einflußgrößen als Funktion dimensionsloser Kenngrößen	245
Literaturverzeichnis	255
Sachverzeichnis	261

Zeichenerklärung

Symbol	Bedeutung	Seite	Kohärente Einheit ¹⁾ des SI-Systems
Große Buchstaben			
<i>A</i>	Arbeit	118	J $\equiv$ kg m ² /s ²
	Komponente im Reaktionsgemisch .	126	—
	Häufigkeitsfaktor, Stoßzahl	129	—
<i>Az</i>	Abkürzung für Essigsäureäthylester .	174	—
<i>B</i>	Komponente im Reaktionsgemisch . .	126	—
<i>C</i>	Komponente im Reaktionsgemisch . .	127	—
	Größe allgemein		
<i>C_a</i>	rel. Kettenübertragungskonstante	136	—
<i>C_{gr}</i>	Strahlungszahl des grauen Körpers . .	13	W/m ² K ⁴
<i>C_s</i>	Strahlungszahl des schwarzen Körpers	12	W/m ² K ⁴
<i>C_w</i>	Widerstandsbeiwert	20	—
<i>D</i>	Siebdurchgang	37	—
	Diffusionskoeffizient	67	m ² /s
	Geschwindigkeitsgefälle senkrecht zur Strömungsrichtung	16	1/s
<i>$\dot{D}$</i>	Dampfstrom	90	kmol/s
<i>E</i>	Extraktmenge	101	kg
	Aktivierungsenergie	129	J/kmol
	Enzym	146	—
	Elektrolyt	222	—
<i>$\dot{E}$</i>	Destillatstrom	85	kmol/s

¹⁾ Einige nach Forschern benannte Einheiten des SI-Systems

J	JOULE	Energieeinheit	$\equiv$ kgm ² /s ²
N	Newton	Krafteinheit	$\equiv$ kgm/s ²
W	Watt	Leistungseinheit	$\equiv$ kgm ² /s ³
Pa	Pascal	Druckeinheit	$\equiv$ kg/ms ²

Symbol	Bedeutung	Seite	Kohärente Einheit des SI-Systems
E_s	Emissionsvermögen des schwarzen Strahlers	12	W/m ²
F	Fläche	5	m ²
	Größe allgemein		
G	Stoffmenge (Masse)	33	kg
$\dot{G}$	Stoffstrom.	10	kg/s
H	Hagenbach Korrektur	143	s
ΔH_R	Reaktionsenthalpie	190	J/kmol
I	Initiator, Starter.	131	—
K	Kosten	223	—
	Größe allgemein		
K_m	Michaelis-Konstante	147	kmol/m ³
K_p	Gleichgewichtskonstante	219	
K	Kraft, Gewicht	43	N $\equiv$ kg m/s ²
L	Leistung(-saufnahme).	115	W $\equiv$ kg m ² /s ³
L_v	Verdampfungswärme	69	J/kg
M	Monomeres	131	—
	molare Masse	64	kg/kmol
	Größe allgemein		
$\mathfrak{M}$	Drehmoment	118	kg m ² /s ²
N	Drehzahl	18	1/s
	Größe allgemein		
O	spez. Oberfläche eines Gutes	38	m ² /kg
O'_k	Idealisierte spez. Oberfläche eines Gutes	38	m ² /kg
P	Gesamtdruck	18	N/m ²
$\left. \begin{array}{l} \overline{P}_n \\ \overline{P}_w \\ \overline{P}_\eta \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{ll} \text{mittlerer} & \text{Zahlen-} \\ \text{Polymeri-} & \text{Gewichts-} \\ \text{sationsgrad} & \text{Viskositäts-} \end{array} \right\}$ mittel . .	$\left. \begin{array}{l} 135 \\ 136 \\ 136 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} \text{—} \\ \text{—} \\ \text{—} \end{array} \right\}$
Q	Wärmemenge (1 kcal = 4,187 · 10 ³ J)	11	kg m ² /s ²
	Elektrizitätsmenge	223	A s
$\dot{Q}$	Wärmestrom	5	W $\equiv$ kgm ² /s ³
R	Siebrückstand	37	—
	Gaskonstante 1,987 kcal/kmol K = 8314	64	J/kmol K
	Raffinatmenge	101	kg

Symbol	Bedeutung	Seite	Kohärente Einheit des SI-Systems
	Widerstand	224	Wm^2/A^2
$\dot{R}$	Rücklaufstrom	85	kmol/s
	Raffinatstrom	102	kg/s
$R^\cdot$	Initiatorradikal	131	—
$RM^\cdot$	Monomerradikal	131	—
S	Lösungsmittelmenge	101	kg
	Lösungsmittel	135	—
	Substrat	146	—
$\dot{S}$	Lösungsmittelstrom	102	kg/s
T	absolute Temperatur	12	K
U	Umfang	11	m
	Umsatz	139	—
	Spannung	223	W/A
	Größe allgemein		
V	Volumen	2	m^3
V_R	Rücklaufverhältnis	85	—
	Verstärkungsfaktor	232	$\text{m}/^\circ\text{C}, \text{m}$
W	Strömungswiderstand	20	$\text{N} \equiv \text{kg m/s}^2$
X_p	Proportionalbereich	232	$^\circ\text{C/m}, 1/\text{m}$

Kleine Buchstaben

a	Absorptionsverhältnis	12	—
	Größe allgemein		
b	Adsorptionskoeffizient	108	m^2/N
	Strompreis	223	—
	Größe allgemein		
c	Konzentration	10	kg/m^3
	Größe allgemein		
c_p	spez. Wärme bei konst. Druck . . .	7	$\text{J/kg } ^\circ\text{C}$
d	Durchmesser, charakteristische Ab- messung	7	m

Symbol	Bedeutung	Seite	Kohärente Einheit des SI-Systems
<i>f</i>	Füllungsgrad	18	—
	Heywood'sche Zahl	39	—
	Bruchteil der kettenstartenden Radi- kale	134	—
<i>g</i>	Erdbeschleunigung	9	m/s ²
<i>h</i>	Höhe	20	m
	Größe allgemein		
<i>i</i>	Stromdichte	223	A/m ²
<i>k</i>	Geschwindigkeitskonstante	33	
	Größe allgemein		
<i>k</i>	Wärmedurchgangszahl	6	W/m ² °C
<i>l</i>	Länge	7	m
<i>m</i>	Exponent, Größe		
<i>n</i>	Molzahl	198	kmol
	Zahl der Reaktionsgefäße einer Kaskade	185	
	Exponent, Größe		
<i>p</i>	Dampf (partial)druck, Druck	59	N/m ²
	Exponent, Größe		
<i>r</i>	Radius	59	m
	Größe allgemein		
<i>s</i>	Exponent, Größe		
<i>s_m</i>	mittleres Verstärungsverhältnis	85	—
<i>t</i>	Zeit	33	s
<i>u</i>	Größe allgemein		
<i>v</i>	Reaktionsgeschwindigkeit	133	
<i>v_z</i>	Zerkleinerungsgeschwindigkeit	33	kg/s
	Zerfallsgeschwindigkeit	133	kmol/m ³ s
<i>v</i>	Volumenstrom	11	m ³ /s
<i>w</i>	Lineargeschwindigkeit	7	m/s
<i>x</i>	Molenbruch	78	kmol/kmol
	Beladung	101	kg/kg
	Größe allgemein		
<i>y</i>	Molenbruch	78	kmol/kmol
	Beladung	101	kg/kg
	Größe allgemein		
<i>z</i>	Größe allgemein		

Symbol	Bedeutung	Seite	Kohärente Einheit des SI-Systems
Griechische Buchstaben			
α	Wärmeübergangszahl Größe, Exponent	6	W/m ² °C
β	Stoffübergangszahl Größe allgemein	10	m/s
Δ	Differenz zweier Größen		
δ	Dicke einer (hypothetischen) Schicht, Wand	5	m
ε	Emissionsverhältnis relatives Zwischenkornvolumen	12 22	— —
η	dynamische Zähigkeit Größe allgemein	7	kg/ms
$[\eta]$	Staudingerindex	141	m ³ /kg
ϑ	Temperatur	5	°C
θ	Inversionstemperatur	167	K
$\times$	Größe allgemein		
λ	Wärmeleitzahl Wellenlänge Adsorptionswärme Größe allgemein	5 12 109	W/m °C m J/kmol
μ	Diffusionswiderstandszahl	72	—
ν	kinematische Zähigkeit stöchiometrische Umsatzzahl Größe allgemein	8 126	m ² /s —
ϱ	Dichte	2	kg/m ³
σ	Bruchteil der Oberfläche d. d. Sorbenden besetzt ist Oberflächenspannung Größe allgemein	108 64	— kg/s ²
τ	mittlere Verweilzeit Schubspannung	176 16	s kg/ms ²
φ	Verhältnis von Größen		—
φ (m)	Formfaktor	21	—
χ	mittlere Gutfeuchtigkeit	63	kg/kg
Σ	Zeichen für Summe		—

Symbol	Bedeutung	Seite	Kohärente Einheit des SI-Systems
Π	Zeichen für Produkt		—
[]	Dimension einer Größe		—
[]	Konzentration einer Größe		kmol/m ³
$\approx$	annähernd gleich		—
$\sim$	proportional		—

Bemerkungen zur Zeichenerklärung

In den folgenden Ausführungen sind neben einigen Zahlenwertgleichungen Größengleichungen angegeben. Größengleichungen liefern nur, aber dann immer ein richtiges Ergebnis, wenn alle Größen in Einheiten desselben Maßsystems (Kohärente Einheiten) gemessen und eingesetzt werden (vgl. hierzu 30). Es ist also prinzipiell gleichgültig, welches Maßsystem gewählt wird. Die Grundeinheiten des SI-Systems sind Meter, Kilogramm, Sekunde und Ampere (m, kg, s, A). Für den Bereich der Thermodynamik ist das °C bzw. K eingeführt. Die kohärenten Einheiten des SI-Systems sind in Spalte 4 der Zeichenerklärung aufgeführt. Es wurde deshalb darauf verzichtet, die Einheiten im Text nochmals hinter den Größen in Klammern anzugeben.

Die angegebenen Zahlenwertgleichungen liefern, wenn nicht ausdrücklich im Text anders vermerkt ist, dann ein richtiges Ergebnis, wenn der Zahlenwert der in kohärenten Einheiten des SI-Systems gemessenen Größe in die Gleichung eingesetzt wird. Die Zahlenwerte in den Tabellen sind mit den entsprechenden Einheiten des SI-Systems zu multiplizieren, um die am Kopf der Tabelle stehende Größe zu erhalten.

Bei den Angaben im experimentellen Teil wurden zum Teil nicht die kohärenten Einheiten des SI-Systems verwendet, was jedoch jeweils im Text sorgfältig vermerkt wurde. Die Wahl anderer Einheiten, vor allem in den Versuchsvorschriften, geschah aus folgendem Grunde:

Es ist unpraktisch, in einer Laboratoriumsvorschrift beispielsweise eine Zeit von 3 Stunden in Sekunden anzugeben, da Umrechnungen ausgeführt werden müssen, um das entsprechende Meßinstrument, die Uhr, verwenden zu können, und um sich eine Vorstellung von der Größe zu machen. Notwendige Umrechnungen werden jedoch zweckmäßig nach der Versuchsdurchführung, also nicht am Versuchsplatz, vorgenommen.

Zur Auswertung der Meßergebnisse wird empfohlen, erst alle Größen in die kohärenten Einheiten eines Maßsystems umzurechnen, um dann mit den umgerechneten Größen weiterzuarbeiten. Derartige Umrechnungen werden bei chemisch-technischen Problemen fast immer notwendig sein, wenn man auf Literaturwerte (Tabellen oder Diagramme) zurückgreifen muß. Einige wichtige Umrechnungsfaktoren finden sich im „Taschenbuch für Chemiker und Physiker“ von D'Ans und Lax.

A. Grundoperationen (Verfahrenstechnik)

I. Wärme- und Stofftransport

Grundlagen der Ähnlichkeitslehre

Die Ähnlichkeitslehre oder Theorie der dimensionslosen Kenngrößen baut sich auf dem Begriff der Ähnlichkeit der elementaren Geometrie auf. Zwei Rechtecke sind einander ähnlich, wenn das Verhältnis von Länge zu Breite bei beiden gleich ist. Das Verhältnis zweier Längen ist, wenn sie in der gleichen Einheit gemessen sind, unabhängig von der Art des benutzten Maßsystems und der Einheit. Ferner ist es dimensionslos, und man bezeichnet es deshalb auch als dimensionslose Kenngröße oder dimensionsloses Produkt.

Die notwendige und hinreichende Bedingung für die geometrische Ähnlichkeit zweier Rechtecke ist also, daß zwei dimensionslose Zahlen gleich sind.

Bei physikalischen und chemischen Prozessen sind neben der Länge noch weitere *Grundgrößen*, z. B. die Zeit, von Einfluß und damit *Einflußgrößen*. Neben den *Grundgrößen* können aber auch *abgeleitete Größen* für einen betrachteten Vorgang maßgebend sein. Solche *Einflußgrößen* sind beispielsweise Kraft bzw. Masse, Geschwindigkeit, Druck, Zähigkeit. Sie lassen sich immer auf Grundgrößen, präziser gesagt auf Potenzprodukte von Grundgrößen, zurückführen.

Die Dimensionen der genannten abgeleiteten Einflußgrößen sind, je nachdem, ob man sie im SI-System oder technischen Maßsystem ausdrückt:

Einflußgröße	Dimension	
	SI-System	technisches Maßsystem
Kraft	MLT^{-2}	K
Masse	M	$KL^{-1}T^2$
Geschwindigkeit	LT^{-1}	LT^{-1}
Druck	$ML^{-1}T^{-2}$	KL^{-2}
Zähigkeit	$ML^{-1}T^{-1}$	$KL^{-2}T$
Grundgröße ist im SI-System die Masse, im techn. Maßsystem die Kraft.		

Um nun das Ähnlichkeitsprinzip auf Einflußgrößen physikalisch-chemischer Vorgänge anzuwenden, geht man im allgemeinen folgendermaßen vor:

Man überlegt zuerst alle Einflußgrößen, die für einen betrachteten Vorgang maßgebend sein könnten. Dann schreibt man diese Einflußgrößen und ihre Dimensionen auf und versucht, aus ihnen durch geeignete Multiplikationen und Divisionen Produkte und Quotienten zu bilden, die dimensionslos sind. Sind *alle* Einflußgrößen zu dimensionslosen *Kenngrößen* zusammengefaßt, so sollen zwei physikalische Vorgänge einander „ähnlich“ sein, wenn alle entsprechenden Kenngrößen bei beiden Vorgängen dieselben Werte haben.

Die Ähnlichkeitsbedingung sei an einem einfachen Beispiel erläutert: Ein runder Stab, dessen Volumen V_s und dessen Dichte ρ_s betragen möge, schwimme auf einer Flüssigkeit, deren Dichte ρ_l sei. Nach dem ARCHIMEDESSchen Prinzip wird der in die Flüssigkeit eintauchende Teil des Stabes V_e lediglich von den aufgeführten Größen, nämlich V_s , ρ_s und ρ_l , abhängen, d. h. es ist

$$V_e = F(V_s, \rho_s, \rho_l). \quad (1)$$

Die Dimensionen der Einflußgrößen sind L^3 und M/L^3 ; sie lassen sich also auf die Grunddimensionen Länge L und Masse M zurückführen. Wir bilden durch Division der Einflußgrößen die beiden Kenngrößen

$$\frac{V_e}{V_s} \text{ und } \frac{\rho_l}{\rho_s}.$$

Die Ähnlichkeitslehre fordert, daß alle Fälle dieses physikalischen Prozesses bzw. Modell- und Hauptausführung ähnlich sind, wenn neben den geometrischen Kenngrößen die abgeleiteten Kenngrößen gleich sind, damit

$$\frac{V_{e,M}}{V_{s,M}} = \frac{V_{e,H}}{V_{s,H}} \text{ und } \frac{\rho_{l,M}}{\rho_{s,M}} = \frac{\rho_{l,H}}{\rho_{s,H}}$$

sind, wenn durch die Indizes M und H die Modell- und Hauptausführung gekennzeichnet werden. Es ist ersichtlich, daß Ähnlichkeit auch dann besteht, wenn bei beiden Ausführungen verschiedene Flüssigkeits- und Feststoffdichten gewählt werden, da lediglich gefordert ist, daß das Verhältnis der Dichten in beiden Fällen gleich ist.

Dem Beispiel ist weiter zu entnehmen, daß zur Ermittlung der Kenngrößen die Kenntnis des ARCHIMEDESSchen Prinzips Gl. (2a) nicht notwendig ist, sondern lediglich die der allgemeinen Funktion Gl. (1), d. h. aller Einflußgrößen, die den Vorgang bestimmen. Es genügt also, die Einflußgrößen, die einen gegebenen physikalischen Vorgang bestimmen, auf Grund von Erfahrungen oder theoretischen Überlegungen anzunehmen und sie in Kenngrößen zusammenzufassen, um die Ähnlichkeit zwischen zwei Fällen dieses Vorgangs zu entscheiden. Voraussetzung

ist allerdings, daß die physikalischen Größen, von denen man vermutet, daß sie den Vorgang beeinflussen, richtig gewählt werden, m. a. W. die richtige Aufstellung der Beziehung (1) entsprechenden allgemeinen Funktion.

Die Wahl der Einflußgrößen erfordert für verwickelte Vorgänge erhebliche physikalische und chemische Kenntnisse und entsprechendes Verständnis.

Einen ersten Hinweis für die falsche Auswahl der Einflußgrößen gibt die Ähnlichkeitslehre selbst. Wird beim Aufstellen der allgemeinen Funktion eine maßgebende Größe nicht berücksichtigt, ist es nicht mehr möglich, alle Größen zu Kenngrößen zusammenzufassen. Wäre in unserem Beispiel die Dichte des Feststoffes (ϱ_s) nicht in Gl. (1) enthalten, wäre es nicht möglich gewesen, die drei übrigen Einflußgrößen in dimensionslose Kenngrößen umzuformen, da die Dichte (ϱ_l) sich nicht einfügen ließe. Entweder spielte in einem solchen Falle die betreffende Größe (ϱ_l) keine Rolle, oder aber es gäbe noch eine Größe (ϱ_s), die nicht berücksichtigt wurde. Ihre Dimension könnte dann durch Anwendung der Ähnlichkeitstheorie angegeben werden, vorausgesetzt, die vergessene Einflußgröße enthält Grundgrößen, die nur noch in einer einzigen anderen Einflußgröße vorkommen.

Die Ähnlichkeitslehre führt weiter zu der wichtigen Aussage, daß jede Kenngröße, die im Sinne der Ähnlichkeitsbedingung maßgebend ist, eine Funktion der übrigen Kenngrößen ist. Allerdings kann die Ähnlichkeitslehre im allgemeinen keine Aussage über die die Kenngrößen verbindende Funktion machen. Diese kann nur durch Vergleich mit dem Naturgesetz oder durch Versuche erhalten werden.

Für unser Beispiel erhalten wir somit

$$\varphi \left(\frac{V_e}{V_s}, \frac{\varrho_l}{\varrho_s} \right) = 0. \quad (2)$$

Diese Gleichung steht mit dem ARCHIMEDESSchen Prinzip

$$V_e \varrho_l = V_s \varrho_s \quad (2a)$$

bzw.

$$\frac{V_e}{V_s} \cdot \frac{\varrho_l}{\varrho_s} - 1 = 0$$

in Einklang.

Ein Vergleich von Gl. (1) und (2) zeigt, daß die Zahl der Kenngrößen kleiner ist als die Zahl der ursprünglichen Einflußgrößen. Bestände die Aufgabe, falls das ARCHIMEDESSche Prinzip nicht bekannt wäre, die Abhängigkeit des V_s von den Einflußgrößen experimentell zu ermitteln, wären in einem Fall drei Größen, im anderen Fall jedoch nur eine Größe zu variieren, wobei es noch gleichgültig wäre, ob ϱ_s oder ϱ_l oder beide gleichzeitig geändert würden. Die Aussage der Ähnlichkeitslehre, daß jede Kenngröße eine Funktion der übrigen ist, bedeutet also eine beträchtliche Einsparung von Versuchsarbeit. Im allgemeinen ist die Zahl der Kenngrößen gleich der Zahl der Einflußgrößen, vermindert um die Zahl

der Grunddimensionen, die in den Dimensionen der Einflußgrößen enthalten sind. (In unserem Beispiel ist die Anzahl der Einflußgrößen $n = 4$, die Zahl der Grunddimensionen $m = 2$ und die Zahl der Kenngrößen $= 2$.) Die vorstehenden Ausführungen zeigen, daß es in manchen Fällen vorteilhaft ist, eine Funktion zwischen mehreren Einflußgrößen als Funktion der aus ihnen gebildeten dimensionslosen Produkte darzustellen. Die Ableitung dieser Produkte kann auf verschiedene Weise erfolgen, beispielsweise

durch Vergleich der auftretenden Kräfte,
durch Vergleich der auftretenden Energien,
durch Vergleich der Stoffwertquotienten,
auf Grund der Identität der Differentialgleichungen oder sonstigen Problemgleichungen,
auf Grund der Dimensionsanalyse.

Im Anhang wird eine dieser Methoden, die Ableitung der dimensionslosen Produkte mit Hilfe der Dimensionsanalyse, zunächst allgemein, dann am Beispiel des Wärmeübergangs gezeigt werden. Die wichtigsten Kennzahlen sind in (30) zusammengestellt.

Weitere Literatur: (14), (30), (71), (81), (107), (120).

1. Wärmetransport durch Wärmeleitung und Konvektion in einem Doppelrohrwärmeaustauscher

Allgemeines. Wir unterscheiden drei Arten des Wärmetransportes:

1. Wärmetransport durch Leitung in festen oder in *unbewegten* flüssigen und *unbewegten* gasförmigen Stoffen, d. h. lediglich durch thermische Molekularbewegung.
2. Wärmetransport durch freie oder erzwungene Konvektion (Mitführung) durch bewegte flüssige oder gasförmige Stoffe.
3. Wärmetransport durch Strahlung, der sich ohne Mitwirkung von Materie vollzieht.

In der Heiz- und Kühltechnik sind prinzipiell alle drei Arten des Wärmetransportes zu berücksichtigen. Bei „direkter“ Beheizung, also unmittelbarer Energiezufuhr, ist die Strahlung mit einem großen Anteil an der Wärmeübertragung beteiligt. Bei der „indirekten“ Beheizung und Kühlung durch stoffliche Wärmeträger, die im Bereich von tieferen Temperaturen bis etwa 300° C maßgebend ist, wird die Wärme überwiegend durch Leitung und Konvektion übertragen. Bei Isolationsproblemen kann aber der Strahlungsverlust auch bei tiefen Temperaturen entscheidend ins Gewicht fallen.

Beim Doppelrohrwärmeaustauscher kann man die Wärmeübertragung durch Strahlung unter den gewählten Versuchsbedingungen vernachlässigen. Die Wärme wird damit vor allem durch Leitung und Konvektion übertragen.

Grundlagen. Strömen zwei Flüssigkeiten verschiedener Temperatur entlang einer Wand (Abb. 1, 1), so wird Wärme von der heißeren Flüssigkeit auf die kältere durch die Wand übertragen. Einen derartigen Vorgang bezeichnet man als Wärmedurchgang. Der Wärmedurchgang zerfällt in drei Abschnitte:

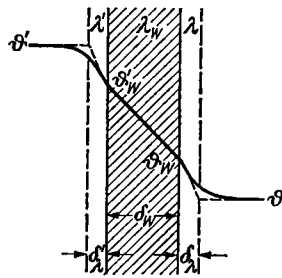


Abb. 1, 1. Wärmedurchgang durch eine ebene Wand. Turbulente Flüssigkeitsströmungen

— — — Wahrer Temperaturverlauf
 - - - Der Rechnung zugrunde gelegter Temperaturverlauf

1. Wärmeübergang von der heißeren Flüssigkeit auf die Wand.
2. Wärmeleitung durch die Wand.
3. Wärmeübergang von der Wand auf die kältere Flüssigkeit.

Wärmeleitung. Werden die beiden Oberflächen F einer ebenen Wand (Abb. 1, 1), deren Dicke δ_w betragen möge, auf verschiedener Temperatur ϑ_w bzw. ϑ'_w gehalten, so ist die Wärmemenge $\dot{Q}_w$, die in der Zeiteinheit durch die Fläche F strömt, nach dem FOURIERSchen Gesetz

$$\dot{Q}_w = F \frac{\lambda_w}{\delta_w} (\vartheta'_w - \vartheta_w). \quad (1)$$

Die Konstante λ_w wird als Wärmeleitzahl bezeichnet und ist — im Gegensatz zu der im folgenden Abschnitt definierten Wärmeübergangszahl — eine Stoffkonstante. Die Größe $\dot{Q}_w$ nennt man Wärmestrom.

Wärmeübergang. Der Wärmeübergang zwischen einer Wand und einer Flüssigkeit ist ein komplizierter Vorgang, der von den verschiedensten Einflußgrößen, vor allem aber von dem Strömungszustand der Flüssigkeit, abhängt.

Um eine formal einfache Beziehung zu erhalten, rechnet man so, als ob zwischen der Temperatur der Wandoberfläche ϑ'_w und der mittleren Temperatur der Flüssigkeit ϑ' ein Temperatursprung bestünde, was bei turbulenter Strömung in etwa zutrifft. Der Wärmestrom $\dot{Q}'$ pro Flächeneinheit wird dieser Temperaturdifferenz proportional gesetzt, wobei man für den Wärmeübergang von der Flüssigkeit auf die Wand

$$\dot{Q}' = F \alpha' (\vartheta' - \vartheta'_w) \quad (2)$$

erhält. Der Proportionalitätsfaktor wird Wärmeübergangszahl genannt. Entsprechend gilt für den Wärmeübergang von der Wand auf die zweite Flüssigkeit

$$\dot{Q} = F \alpha (\vartheta_w - \vartheta). \quad (3)$$

Wärmedurchgang. Werden aus Gl. (1), (2) und (3) ϑ'_w und ϑ_w eliminiert, so erhalten wir für den stationären Zustand ($\dot{Q} = \dot{Q}' = \dot{Q}_w$) die Beziehung¹⁾

$$\dot{Q} = F \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha'}} (\vartheta' - \vartheta) = F k (\vartheta' - \vartheta), \quad (4)$$

d. h. den Wärmestrom, der durch die Fläche F von einer Flüssigkeit mit der Temperatur ϑ' auf eine zweite Flüssigkeit der Temperatur ϑ übergeht.

Die Konstante der Gleichung (4)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha'}} \quad (5)$$

bezeichnet man als Wärmedurchgangszahl. Ihre Dimension ist gleich der der Wärmeübergangszahl.

Anwendung der Ähnlichkeitstheorie auf den Wärmeübergang. Etwas vereinfacht kann man sich den Wärmeübergang von einer Wand auf eine strömende Flüssigkeit etwa folgendermaßen vorstellen: Die Wärmeübertragung kommt durch Leitung und vor allem durch Konvektion zustande. Der Anteil der Konvektion hängt vom Strömungszustand der Flüssigkeit ab, der laminar oder turbulent sein kann.

Bei laminarer Strömung kann man sich die Strömung aus Schichten bzw. Stromröhren aufgebaut denken. Die Wärme wird lediglich durch Leitung quer zur Strömungsrichtung von der Wand auf die Flüssigkeit übertragen. Von einer Konvektion kann man nur insofern sprechen, als die durch

¹⁾ Diese Beziehung bzw. (5) gilt nur für ebene Wände. Bei einem Doppelrohrwärmeaustauscher wäre strenggenommen noch die Krümmung der Wände zu berücksichtigen, wodurch $F' \neq F$ wird (41).

Leitung von der Wand an die Flüssigkeit übertragene Wärme durch die strömende Flüssigkeit so weit abgeführt werden muß, daß das gewählte Temperaturgefälle aufrechterhalten wird.

Bei turbulenter Strömung bildet sich an der Wand ein laminar strömender (hydrodynamischer) Grenzfilm aus, während weiter außen in der Flüssigkeit starke Mischbewegungen auftreten. Der Wärmetransport durch die Grenzschicht erfolgt durch Wärmeleitung. Der weitere Transport in das Innere der Flüssigkeit erfolgt durch die infolge der Turbulenz auftretenden Mischbewegungen. Da die Mischbewegungen sehr intensiv sind, wird innerhalb des turbulenten Kerns annähernd konstante Temperatur herrschen, während in der Grenzschicht ein Temperaturabfall auftritt. Folglich wird der Wärmeübergang von der Wand auf die Flüssigkeit vor allem von der Dicke und Wärmeleitfähigkeit des laminaren Grenzfilms abhängen.

Gehen wir einen Schritt weiter und rechnen so, als ob der gesamte Widerstand gegen den Wärmeübergang in der laminaren Grenzschicht liegt, so erhalten wir

$$\dot{Q} = F \frac{\lambda}{\delta_\lambda} (\vartheta_w - \vartheta) \quad (6)$$

und durch Vergleich von Gl. (6) und (3)

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta_\lambda}. \quad (6a)$$

Die Dicke der mittels Gl. (6a) berechneten Grenzschicht δ_λ ist im Prinzip nicht — also keinesfalls zwangsläufig — gleich der Dicke der hydrodynamischen Grenzschicht oder der sog. Diffusionsgrenzschicht δ_d (vgl. Aufg. 12), da Gl. (6a) unter der Voraussetzung abgeleitet wurde, daß der gesamte Widerstand gegen die Wärmeübertragung allein in der Grenzschicht liegen soll und damit die unbekannten Akkommodationskoeffizienten Wand — Grenzschicht, Grenzschicht — Flüssigkeit der den Impuls übertragenden Molekel durch die „Dicke der Grenzschicht“ mit erfaßt werden. Vgl. hierzu (30).

Um die Ähnlichkeitslehre auf den Wärmeübergang anwenden zu können, stellen wir zunächst eine allgemeine Funktion sämtlicher physikalischer Größen auf, von denen wir glauben, daß sie den Vorgang beeinflussen:

Nach den obigen Ausführungen wird die Wärmeübergangszahl α bei turbulenter Strömung vor allem von der Wärmeleitfähigkeit λ des Mediums und von seiner Zähigkeit η , die die Dicke der Grenzschicht beeinflußt, bestimmt. Da ferner erzwungene Konvektion eine Rolle spielt, wird α auch von der Dichte ρ , der spez. Wärme c_p und von der mittleren Geschwindigkeit w der Flüssigkeit abhängen. α wird ferner, wenn es sich um einen Doppelrohrwärmeaustauscher handelt, eine Funktion vom Rohrdurchmesser oder einer entsprechenden Abmessung d und in geringem Maße auch eine Funktion der Länge l des Austauschers sein.

Wir erhalten somit die allgemeine Funktion

$$\alpha = F(d, \varrho, \eta, \lambda, w, c_p, l).$$

Auf Grund der Ähnlichkeitstheorie läßt sich diese Funktion in Form von dimensionslosen Produkten darstellen (vgl. Aufg. 40):

$$F\left(\frac{\alpha d}{\lambda}, \frac{\varrho w d}{\eta}, \frac{c_p \eta}{\lambda}, \frac{l}{d}\right) = 0.$$

Die ersten drei Kenngrößen sind unter dem Namen

NUSSELTsche Kenngröße	$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda},$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{da} \\ \eta = \nu \cdot \varrho \\ \nu = \text{kinemat.} \\ \text{Zähigkeit} \end{array}$
REYNOLDSSche Kenngröße	$Re = \frac{\varrho w d}{\eta} \text{ bzw. } \frac{w d}{\nu} \text{ und}$	
PRANDTLsche Kenngröße	$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} \text{ bzw. } \frac{c_p \varrho \nu}{\lambda}$	

bekannt.

Über die die Kenngrößen verbindenden Funktionen kann die Ähnlichkeitstheorie keine Aussage machen.

Experimentelle Untersuchungen an Doppelrohrwärmeaustauschern zeigten, daß sich die Meßwerte durch die Beziehung¹⁾

$$Nu = 0,116 \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{1/4} \right] (Re^{1/4} - 125) Pr^{1/4} \quad (7)$$

im Bereich $2300 < Re < 10^4$ wiedergeben lassen (41).

Für $Re > 10^4$ und $Re < 2300$ gelten die Beziehungen

$$Nu = C Re^m Pr^n \left(\frac{l}{d} \right)^p. \quad (7a)$$

C , m , n und p sind Konstanten (61).

Die Gültigkeit dieser Beziehung (7a) ist nicht auf Doppelrohrwärmeaustauscher beschränkt, sondern kann auch auf andere Wärmeübergangsprobleme angewendet werden. Die Exponenten und die Konstanten sind jeweils experimentell zu bestimmen oder einer Tabelle (vgl. (61)) zu entnehmen²⁾.

Bei laminarer Strömung von Flüssigkeiten in Rohren gilt beispielsweise:

	C	m	n	p
Heizung	15	0,23	0,23	— 0,5
bzw. Kühlung	11,5	0,23	0,23	— 0,5

für $Re < 2300$, $Pr = 2,5$ bis 4000 und $\frac{l}{d} = 100$ bis 400.

Um den Wärmeübergang bei freier Strömung in Gasen oder Flüssigkeiten zu beschreiben, wird häufig die Beziehung

$$Nu = C Pr^n Gr^n \quad (7b)$$

¹⁾ Strenggenommen enthält die Gleichung noch ein Glied, das unter den gegebenen Versuchsbedingungen vernachlässigt werden kann (92).

²⁾ Neuere Untersuchungen vor allem zum Ringraum vgl. (21), (147).

verwendet. Gr ist die GRASHOFsche Kenngröße

$$Gr = \frac{d^3 g \beta \Delta \vartheta}{\nu^2}, \quad \beta = \text{thermischer Ausdehnungskoeffizient}$$

die die freie Konvektion berücksichtigt.

Die mittlere Temperaturdifferenz im Wärmeaustauscher. Die Wärmedurchgangszahlen sind für die Berechnung von Wärmeaustauschern wesentlich, da bei Kenntnis von k mittels Gl. (4) die Austauschfläche F für einen gegebenen Wärmestrom berechnet werden kann.

Bei Anwendung der Gl. (4) auf Doppelrohrwärmeaustauscher ist jedoch zu beachten, daß sich die Temperaturen der durchströmenden Flüssigkeiten in der Längsrichtung des Wärmeaustauschers ändern; infolgedessen wird die in Gl. (4) eingehende Temperaturdifferenz ebenfalls für jeden Querschnitt des Austauschers verschieden sein. Behält man die Form von Gl. (4) bei, sind entsprechende Mittelwerte für ϑ und ϑ' bzw. für deren Differenz einzusetzen. Sei $\Delta \vartheta_m$ der entsprechende Mittelwert der Temperaturdifferenz, so erhalten wir für die übertragene Wärmemenge

$$\dot{Q} = F k \Delta \vartheta_m. \quad (8)$$

$\Delta \vartheta_m$, die sog. mittlere logarithmische Temperaturdifferenz, ergibt sich (Ableitung vgl. (41)) zu

$$\Delta \vartheta_m = \frac{\Delta \vartheta_a - \Delta \vartheta_b}{\ln \frac{\Delta \vartheta_a}{\Delta \vartheta_b}}. \quad (9)$$

Es bedeuten $\Delta \vartheta_a$ die Temperaturdifferenz zwischen den Flüssigkeiten an einem Ende des Kühlers und $\Delta \vartheta_b$ die entsprechende Differenz am anderen Ende. Für Berechnungen ist für $\Delta \vartheta_a$ die größere und $\Delta \vartheta_b$ die kleinere Temperaturdifferenz in Gl. (9) einzusetzen. Bei der Ermittlung der logarithmischen Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta_m$ ist es gleichgültig, ob der Kühler im Gleichstrom oder im Gegenstrom gefahren wird.

Stofftransport. Neben dem Wärmetransport sei auf den Stofftransport kurz eingegangen, da beide Prozesse in vielfacher Hinsicht ähnlich sind, was ihre theoretische wie experimentelle Behandlung wesentlich erleichtert.

Wir unterscheiden:

1. Stofftransport in festen oder *unbewegten* flüssigen und *unbewegten* gasförmigen Stoffen, der durch molekulare Diffusion zustande kommt und das Analogon zur Wärmeleitung darstellt. Der Vorgang kann entweder durch das 1. bzw. 2. FICKSche Gesetz oder aber, wenn die Rückdiffusion zu berücksichtigen ist, durch das STEFANSche Diffusionsgesetz beschrieben werden.