

*Marko Zlokarnik*

# **Scale-up**

Modellübertragung in der Verfahrenstechnik

2. vollst. überarb. u. erw. Auflage



**WILEY-  
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 1. Auflage XIII

Vorwort zur 2. Auflage XV

Symbolverzeichnis XVII

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Dimensionsanalyse</b>	<b>3</b>
2.1	Grundlage	3
2.2	Was ist eine Dimension?	3
2.3	Was ist eine physikalische Größe?	3
2.4	Grundgrößen und abgeleitete Größen; Dimensionskonstanten	4
2.5	Dimensionssysteme	5
2.6	Dimensionshomogenität einer physikalischen Beziehung	7
Beispiel 1:	Wovon hängt die Schwingungsperiode $\theta$ eines Pendels ab?	8
Beispiel 2	Wovon hängt die Falldauer $\theta$ eines Körpers im homogenen Gravitationsfeld ab (Gesetz des freien Falls)? Wovon hängt die Ausflußgeschwindigkeit $v$ einer Flüssigkeit aus einem Gefäß mit Öffnung ab (Torricellische Ausflußformel)?	10
Beispiel 3:	Zusammenhang zwischen der Größe des Bratens und der Bratzeit	12
2.7	Das pi-Theorem	15
<b>3</b>	<b>Erarbeitung von pi-Sätzen mittels Matrizenumformung</b>	<b>17</b>
Beispiel 4:	Druckverlust eines homogenen Fluids im geraden glatten Rohr (ohne Berücksichtigung der Einlauffeffekte)	17
<b>4</b>	<b>Maßstabsinvarianz des pi-Raumes – Grundlage der Modellübertragung</b>	<b>25</b>
Beispiel 5:	Wärmeübergang von geheizten Drähten und Rohren an den Luftstrom	27

<b>5</b>	<b>Wichtige Hinweise zur Aufstellung der Relevanzliste des Problems</b>	<b>31</b>
5.1	Behandlung von universellen physikalischen Konstanten	31
5.2	Einführung von Zwischengrößen	32
Beispiel 6:	Mischzeit-Charakteristik bei Gemischen mit Dichte- und Viskositätsunterschieden	33
Beispiel 7:	Flotationsvorgang bei der Druckentspannungsflotation	34
<b>6</b>	<b>Wichtige Aspekte bei der Modellübertragung</b>	<b>37</b>
6.1	Modellübertragung bei Nichtverfügbarkeit von Modell-Stoffsystemen	37
Beispiel 8:	Auslegungsunterlagen für mechanische Schaumzerstörer	37
6.2	Modellübertragung bei partieller Ähnlichkeit	41
Beispiel 9:	Schleppwiderstand eines Schiffskörpers	41
Beispiel 10:	Faustregeln beim Dimensionieren von Reaktionsapparaten: Volumenbezogene Rührleistung und Lehrrohrgeschwindigkeit als Dimensionierungskriterien für Rührbehälter bzw. für Blasensäulen	46
<b>7</b>	<b>Vorläufige Bestandsaufnahme</b>	<b>49</b>
7.1	Vorteile der Dimensionsanalyse	49
7.2	Anwendungsbereich der Dimensionsanalyse	50
7.3	Versuchstechnik bei der Modellübertragung	51
7.4	Versuchsdurchführung unter Maßstabsänderung	52
<b>8</b>	<b>Dimensionsanalytische Behandlung veränderlicher Stoffgrößen</b>	<b>55</b>
8.1	Wozu ist diese Betrachtung wichtig?	55
8.2	Dimensionslose Darstellung einer Stoff-Funktion	57
Beispiel 11:	Standarddarstellung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität	57
Beispiel 12:	Standarddarstellung der Temperaturabhängigkeit der Dichte	61
Beispiel 13:	Standarddarstellung der Bruchfestigkeit verschiedener Materialien in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser	62
Beispiel 14:	Trocknung nasser Polymermasse. Bezugsinvariante Darstellung der Stoff-Funktion $D(T, F)$	65
8.3	Bezugsinvariante Darstellung einer Stoff-Funktion	66
8.4	Der $\pi$ -Raum bei veränderlichen Stoffwerten	68
Beispiel 15:	Berücksichtigung der $\eta(T)$ -Abhängigkeit durch den $\eta_w/\eta$ -Term	68
Beispiel 16:	Berücksichtigung der $\rho(T)$ -Abhängigkeit durch die Grashof-Kennzahl $Gr$	71
8.5	Rheologische Normierungsfunktionen und Prozeßbeziehungen bei nicht-Newtonschen Flüssigkeiten	71
8.5.1	Rheologische Normierungsfunktionen	72
8.5.1.1	Fließverhalten nicht-Newtonscher Fluide vom Typ der pseudoplastischen Flüssigkeiten	72

8.5.1.2	Fließverhalten nicht-Newtonscher Fluide vom Typ der viskoelastischen Flüssigkeiten	75
8.5.1.3	Dimensionsanalytische Diskussion viskoelastischer Fluide	77
8.5.1.4	Erarbeitung von rheologischen Normierungsfunktionen	79
Beispiel 17:	Dimensionsanalytische Erfassung des <i>Weissenbergschen</i> Phänomens – Anleitung für eine Doktorarbeit	81
8.5.2	Prozeßbeziehungen bei nicht-Newtonschen Flüssigkeiten	86
8.5.2.1	Konzept der effektiven Viskosität $\eta_{\text{eff}}$ nach <i>Metzner-Otto</i>	86
8.5.2.2	Prozeßbeziehungen für mechanische Prozesse in Verbindung mit nicht-Newtonschen Stoffen	88
Beispiel 18:	Leistungs-Charakteristik eines Rührers	88
Beispiel 19:	Homogenisierungs-Charakteristik eines Rührers	90
8.5.2.3	Prozeßbeziehungen für thermische Prozesse in Verbindung mit nicht-Newtonschen Stoffen	91
8.5.2.4	Modellübertragung bei Vorgängen mit nicht-Newtonschen Flüssigkeiten	92

## 9 Reduktion des $\pi$ -Raumes 93

9.1	Die Kontroverse <i>Rayleigh</i> – <i>Riabouchinsky</i>	93
Beispiel 20:	Dimensionsanalytische Behandlung des Problems von <i>Boussinesq</i>	95
Beispiel 21:	Wärmetransport-Charakteristik eines Ruhrbehälters	97

## 10 Typische Probleme und Fehler bei der Anwendung der Dimensionsanalyse 101

10.1	Modellmaßstab und Strömungszustand: Scale-up und Miniplants	101
10.1.1	Die Größe der Laborapparatur und der Strömungszustand	102
10.1.2	Die Größe der Laborapparatur und der $\pi$ -Raum	103
10.1.3	Mikro- und Makromischung	104
10.1.4	Mikromischung und die Selektivität komplexer chemischer Reaktionen	105
10.1.5	Mini- und Mikroplants aus der Sicht des Scale-up	105
10.2	Mangelnde Sensitivität der Zielgröße	106
10.2.1	Homogenisierzeit $\theta$	106
10.2.2	Vollständige Aufwirbelung nach dem 1-s-Kriterium	106
10.3	Modellmaßstab und Meßgenauigkeit	108
10.3.1	Bestimmung der Rührleistung	108
10.3.2	Bestimmung des Stofftransportes im Stoffsystem G/L	108
10.4	Vollständige Erfassung des fraglichen $\pi$ -Satzes bei der Versuchsdurchführung	109
10.5	Richtiges Vorgehen bei der Anwendung der Dimensionsanalyse	111

10.5.1	Vorbereitung der Modellversuche	111
10.5.2	Durchführung der Modellversuche	111
10.5.3	Auswertung der Modellversuche	112
<b>11</b>	<b>Optimieren von Prozeßbedingungen durch Kombination von Prozeßcharakteristiken</b>	<b>113</b>
Beispiel 22:	Ermittlung von Rührbedingungen zur Durchführung des Homogenisierungsprozesses mit kleinster Mischarbeit	113
Beispiel 23:	Prozeßcharakteristiken eines selbstansaugenden Hohlrührers und Ermittlung seiner optimalen Betriebsbedingungen	118
Beispiel 24:	Optimieren von Rührern für eine maximale Abfuhr der Reaktionswärme	122
<b>12</b>	<b>Ausgewählte Beispiele der dimensionsanalytischen Behandlung von Prozessen aus dem Gebiet der mechanischen Verfahrenstechnik</b>	<b>125</b>
Beispiel 25:	Rührleistung in begaster Flüssigkeit. Auslegungsunterlagen für Rührer und Modellversuche für die Maßstabsübertragung	125
Beispiel 26:	Dimensionierung von Feststoffmischern	131
Beispiel 27:	Fördertechnische Charakteristiken einspindeliger Schneckenmaschinen	136
Beispiel 28:	Dimensionsanalytische Erfassung des Zerstäubens von Flüssigkeiten	140
Beispiel 29:	Das Phänomen des hängenden Films	144
Beispiel 30:	Herstellung von flüssig/flüssig-Emulsionen	147
Beispiel 31:	Zerkleinerung von Feststoffen	152
Beispiel 32:	Dimensionsanalytische Behandlung der Flotationstechnik im Abwasserbereich	157
Beispiel 33:	Beschreibung des zeitlichen Verlaufes des Trockenschleuderns bei Filterzentrifugen	164
Beispiel 34:	Beschreibung der Partikelabscheidung durch Trägheitskräfte	168
Beispiel 35:	Gasanteil in Blasensäulen in Abhängigkeit von geometrischen, stofflichen und prozessbedingten Parametern	172
Beispiel 36:	Dimensionsanalyse des Tablettierprozesses	176
<b>13</b>	<b>Ausgewählte Beispiele der dimensionsanalytischen Behandlung von Prozessen aus dem Gebiet der thermischen Verfahrenstechnik</b>	<b>181</b>
13.1	Einführende Anmerkung	181
Beispiel 37:	Stationäre Wärmeübertragung in Rührbehältern	182
Beispiel 38:	Stationäre Wärmeübertragung in Rohren	184
Beispiel 39:	Stationäre Wärmeübertragung in Blasensäulen	185
13.2	Grundlage des Stofftransportes im Stoffsystem Gas/Flüssigkeit (G/L)	189
Beispiel 40:	Stofftransport G/L bei der Oberflächenbelüftung mit Kreiselbelüftern	191

Beispiel 41: Stofftransport G/L bei der Flüssigkeitsbegasung in  
Rührbehältern 193

Beispiel 42: Stofftransport G/L bei der Flüssigkeitsbegasung in  
Blasensäulen mit Injektoren als Gaszerteilern.  
Optimierung der Betriebsbedingungen in bezug  
auf die Effizienz  $E \equiv G/\Sigma P$  [kg O<sub>2</sub>/kWh] 196

13.3 Koaleszenzverhalten im System G/L 204

Beispiel 43: Dimensionierung von Trocknern 206

#### **14 Ausgewählte Beispiele der dimensionsanalytischen Behandlung von Prozessen aus dem Gebiet der chemischen Verfahrenstechnik 213**

Beispiel 44: Kontinuierliche Reaktionsführung im Strömungsrohr 214

Beispiel 45: Dimensionsanalytische Beschreibung des Stoff- und  
Wärmetransportes bei feststoffkatalysierten Gasreaktionen 221

Beispiel 46: Dimensionierung von Reaktoren für katalytische Prozesse  
in der Petrochemie 228

Beispiel 47: Dimensionierung eines Rohrreaktors mit Düsenmischer  
zur Durchführung einer konkurrierenden Folgereaktion 231

Beispiel 48: Stofftransportlimitierung der Reaktionsgeschwindigkeit  
von schnellen chemischen Reaktionen im heterogenen  
Stoffsystem Gas/Flüssigkeit 235

#### **15 Ausgewählte Beispiele der dimensionsanalytischen Behandlung von Prozessen aus dem Gebiet der belebten Natur 239**

Beispiel 49: Dimensionsanalytische Betrachtung des Ruderns 240

Beispiel 50: Warum schwimmen die meisten Tiere unter Wasser? 242

Beispiel 51: Wandern auf dem Mond 243

Beispiel 52: Laufen und Springen auf der Wasseroberfläche 247

Beispiel 53: Was treibt den Saft in die Blätter der Bäume? 248

#### **16 Kurzer geschichtlicher Überblick zur Dimensionsanalyse und zur Modellübertragung 249**

16.1 Geschichtliche Entwicklung der Dimensionsanalyse 249

16.2 Geschichtliche Entwicklung der Modellübertragung 252

#### **17 Übungen zur Modellübertragung 255**

17.1 Aufgaben 255

17.2 Lösungen der Aufgaben 258

#### **18 Verzeichnis wichtiger benannter Kennzahlen 263**

#### **19 Literatur 265**

#### **Stichwortverzeichnis 273**