

*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

1	<b>Einführung</b>	1
2	<b>Dimensionsanalyse</b>	3
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
3	<b>Erarbeitung von pi-Sätzen mittels Matrizenumformung</b>	17
Beispiel 4:	Druckverlust eines homogenen Fluids im geraden glatten Rohr (ohne Berücksichtigung der Einlaufeffekte)	17
4	<b>Maßstabsinvarianz des pi-Raumes – Grundlage der Modellübertragung</b>	25
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>	31
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>	37
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>	49
7.1	Vorteile der Dimensionsanalyse	49
7.2	Anwendbarkeitsbereich 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>	55
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-Newtonischen Flüssigkeiten	71
8.5.1	Rheologische Normierungsfunktionen	72
8.5.1.1	Fließverhalten nicht-Newtonischer Fluide vom Typ der pseudo-plastischen Flüssigkeiten	72

8.5.1.2	Fließverhalten nicht-Newtonsscher Fluide vom Typ der visko-elastischen 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 Weissenbergschen Phänomens – Anleitung für eine Doktorarbeit	81
8.5.2	Prozeßbeziehungen bei nicht-Newtonsschen Flüssigkeiten	86
8.5.2.1	Konzept der effektiven Viskosität $\eta_{eff}$ nach Metzner-Otto	86
8.5.2.2	Prozeßbeziehungen für mechanische Prozesse in Verbindung mit nicht-Newtonsschen 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-Newtonsschen Stoffen	91
8.5.2.4	Modellübertragung bei Vorgängen mit nicht-Newtonsschen Flüssigkeiten	92
<b>9</b>	<b>Reduktion des pi-Raumes</b>	93
9.1	Die Kontroverse Rayleigh - Riabouchinsky	93
Beispiel 20:	Dimensionsanalytische Behandlung des Problems von Boussinesq	95
Beispiel 21:	Wärmetransport-Charakteristik eines Rührbehälters	97
<b>10</b>	<b>Typische Probleme und Fehler bei der Anwendung der Dimensionsanalyse</b>	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 Stofftransports im Stoffsysteem 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 kleinsten Mischarbeit	113
Beispiel 23:	Prozeßcharakteristiken eines selbstansaugenden Hohlührers 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 Stofftransports 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
<b>14</b>	<b>Ausgewählte Beispiele der dimensionsanalytischen Behandlung von Prozessen aus dem Gebiet der chemischen Verfahrenstechnik</b>	<b>213</b>
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 Stoffsysteem Gas/Flüssigkeit	235
<b>15</b>	<b>Ausgewählte Beispiele der dimensionsanalytischen Behandlung von Prozessen aus dem Gebiet der belebten Natur</b>	<b>239</b>
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
<b>16</b>	<b>Kurzer geschichtlicher Überblick zur Dimensionsanalyse und zur Modellübertragung</b>	<b>249</b>
16.1	Geschichtliche Entwicklung der Dimensionsanalyse	249
16.2	Geschichtliche Entwicklung der Modellübertragung	252
<b>17</b>	<b>Übungen zur Modellübertragung</b>	<b>255</b>
17.1	Aufgaben	255
17.2	Lösungen der Aufgaben	258
<b>18</b>	<b>Verzeichnis wichtiger benannter Kennzahlen</b>	<b>263</b>
<b>19</b>	<b>Literatur</b>	<b>265</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>273</b>