

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Wirtschaftliche Bestimmungsgrößen</b>	<b>1</b>
1.1	Konstruktions- und Planungstätigkeiten im Apparate- und Anlagenbau, Begriffe und Übersicht	1
1.2	Planen und Entscheiden	3
1.2.1	Planungstätigkeiten und -abschnitte	4
1.2.1.1	Kostenfindung, Vorkalkulation	4
1.2.1.1.1	Allgemeines	4
1.2.1.1.2	Einzelermittlung der Kosten für Hauptausrüstungen (HAA)	9
1.2.1.1.3	Ermittlung der Investitionskosten mittels Degressionsexponenten und Preisindexkurven	15
1.2.1.1.4	Kostenermittlung durch Zuschlagsfaktoren	16
1.2.1.1.5	Vorkalkulation der Ausgaben	20
1.2.1.2	Standortwahl	22
1.2.1.2.1	Allgemeines	22
1.2.1.2.2	Verkehrslage	23
1.2.1.2.3	Arbeitsmarkt	24
1.2.1.2.4	Energiebedarf und -versorgung	24
1.2.1.2.5	Wasser, Abwasser, Rückkühlverfahren	28
1.2.2	Planungshilfsmittel	32
1.2.2.1	Netzplantechnik	32
1.2.2.2	Fließbilder	36
1.2.2.2.1	Grundfließbild	36
1.2.2.2.2	Verfahrensfließbild	37
1.2.2.2.3	Konstruktives (Rohrleitungs- und Instrumenten-) Fließbild	39
1.2.2.3	Modelle	40
1.2.3	Entscheidungsgrundlagen	43
1.2.3.1	Kostenvergleich	44
1.2.3.2	Kapitalrückflußzeit	44
1.2.3.3	Rentabilität	45
1.2.3.4	Dynamische Investitionsrechnung	46
1.3	Struktur des Herstellers	46
1.3.1	Apparatebau	48
1.3.2	Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau	50
1.3.3	Ingenieurunternehmen, Projektierungsfirmen, Anlagenbau	51
1.4	Wirtschaftliche Bestimmungsgrößen für Planung, Abwicklung und Betrieb	53
1.4.1	Normung, Typisierung	53
1.4.1.1	Normungsebenen	53
1.4.1.2	Rationalisierung durch Normung, Veränderung der Kostenstruktur durch Vereinheitlichungen	55

1.4.1.3	Die wichtigsten Normungsinstitutionen . . . . .	56
1.4.1.4	Normen für die Chemische Technik . . . . .	57
1.4.2	Verluste verschiedener Herkunft . . . . .	61
1.4.2.1	Berechnung von Exergieverlusten . . . . .	61
1.4.3	Fertigung, Vorfertigung . . . . .	63
1.4.3.1	Produktionstypen . . . . .	63
1.4.3.2	Fertigung von Apparaten und Einzelausrüstungen . . . . .	64
1.4.3.2.1	Klassifizierungssystem für Bauelemente und methodisches Vorgehen bei der Fertigungsplanung . . . . .	66
1.4.3.3	Vorfertigung, Vormontage im Chemieanlagenbau . . . . .	69
1.4.4	Auswirkungen von Änderungen . . . . .	72
	Literatur zu Kapitel 1 . . . . .	74

<b>2</b>	<b>Werkstoffe, Fügeverfahren</b> . . . . .	<b>79</b>
2.1	Gesichtspunkte für die Werkstoffauswahl . . . . .	79
2.2	Werkstoffeigenschaften, Anwendungsgesichtspunkte . . . . .	83
2.2.1	Mechanisch-technologische Eigenschaften . . . . .	83
2.2.2	Physikalische Eigenschaften . . . . .	85
2.2.3	Metallische Werkstoffe . . . . .	86
2.2.3.1	Eisenwerkstoffe . . . . .	86
2.2.3.1.1	Unlegierte und niedriglegierte Eisenwerkstoffe . . . . .	88
2.2.3.1.2	Hochlegierte ferritische Stähle . . . . .	91
2.2.3.1.3	Austenitische Stähle . . . . .	93
2.2.3.2	Nickel und Nickellegierungen . . . . .	95
2.2.3.3	Sondermetalle (Titan, Tantal, Zirkonium) . . . . .	95
2.2.4	Kunststoffe . . . . .	96
2.3	Werkstoffmechanik . . . . .	100
2.3.1	Plastizität . . . . .	100
2.3.1.1	Begriffe, Bedeutung der Plastizität für Konstruktionstätigkeiten im Apparate- und Anlagenbau . . . . .	100
2.3.1.2	Fließhypthesen . . . . .	104
2.3.1.3	Traglast, Be- und Entlastungsvorgänge im plastischen Bereich . . . . .	106
2.3.1.4	Kriechen . . . . .	109
2.3.2	Spannungskonzentration und Stützwirkung . . . . .	112
2.3.3	Eigenspannungen . . . . .	115
2.3.3.1	Schweißeigenspannungen . . . . .	117
2.3.3.2	Auswirkungen und Bewertung von Eigenspannungen . . . . .	119
2.3.3.3	Abbau von Eigenspannungen . . . . .	120
2.3.4	Ermüdung, Wechselwirkung zwischen Kriechen und Ermüden . . . . .	121
2.4	Korrosion . . . . .	126
2.4.1	Allgemeines, Erscheinungsformen der Korrosion . . . . .	127
2.4.1.1	Elektrochemische Korrosion . . . . .	128
2.4.1.1.1	Ebenmäßig abtragende Korrosion . . . . .	128
2.4.1.1.2	Lochfraß . . . . .	129
2.4.1.1.3	Interkristalline Korrosion . . . . .	130
2.4.1.1.4	Spaltkorrosion . . . . .	130
2.4.1.1.5	Kontaktkorrosion . . . . .	132
2.4.1.2	Elektrochemische Korrosion bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung . . . . .	133
2.4.1.2.1	Spannungsrißkorrosion (SpRK) . . . . .	133
2.4.1.2.2	Schwingungsrißkorrosion (SRK) . . . . .	133

2.4.1.2.3 Dehnungsinduzierte (dehnungsgeschwindigkeitsinduzierte) Korrosion . . . . .	135
2.4.1.3 Strömungsbedingte Korrosion . . . . .	136
2.4.1.4 Chemische Korrosion mit/ohne mechanische Beanspruchung . . . . .	137
2.4.1.4.1 Brenngase . . . . .	137
2.4.1.4.2 Synthesegase (mit Ausnahme Druckwasserstoff) . . . . .	139
2.4.1.4.3 Druckwasserstoff . . . . .	139
2.4.1.4.4 Heißwasserkorrosion . . . . .	140
2.4.1.5 Werkstoffverhalten bei Neutronenbestrahlung . . . . .	141
2.5 Behandlungsmethoden . . . . .	142
2.5.1 Wärmebehandlung . . . . .	142
2.5.2 Oberflächenbehandlung . . . . .	145
2.6 Fügeverfahren (Schweißen) . . . . .	150
2.6.1 Schweißverfahren, Entwicklung . . . . .	151
2.6.1.1 Anwendungsgesichtspunkte (Chemieapparatebau) . . . . .	153
2.6.1.2 Schweißen im Rohrleitungsbau . . . . .	155
2.6.2 Schweißbarkeit und Werkstoffbeeinflussung durch das Schweißen . . . . .	155
2.6.2.1 Vorgänge in der Wärmeeinflußzone (WEZ) . . . . .	157
2.6.3 Schweißgerechte Gestaltung, konstruktive Durchbildung . . . . .	161
2.6.4 Fertigungsgesichtspunkte beim Schweißen . . . . .	163
2.6.5 Spannungsnachweis in Schweißverbindungen . . . . .	163
2.6.6 Festigkeit von Schweißverbindungen . . . . .	164
2.6.7 Qualitätssicherung, Fehler, Schäden . . . . .	164
2.6.8 Schweißplattieren, plattierte Werkstoffe . . . . .	165
2.6.8.1 Bedeutung von Verbundsystemen, Begriffe . . . . .	165
2.6.8.2 Schmelzschweißplattieren . . . . .	166
2.6.8.3 Preßschweißplattieren . . . . .	169
2.6.9 Weiterverarbeitung plattierter Werkstoffe . . . . .	170
Literatur zu Kapitel 2 . . . . .	172
<b>3 Randbedingungen und Auswirkungen von Prozessen auf den Entwurf von Komponenten stoff- und energiewandelnder Produktionseinrichtungen . . . . .</b>	<b>180</b>
3.1 Die Rolle von Prozessen für die Anlagenstruktur . . . . .	180
3.1.1 Trennprozesse . . . . .	182
3.2 Stoffdaten . . . . .	184
3.3 Randbedingungen . . . . .	187
3.3.1 Durch Transportvorgänge bestimmte Randbedingungen . . . . .	187
3.3.2 Örtliche und zeitliche Randbedingungen . . . . .	189
3.3.3 Wärmeübergangs- und Wärmedurchgangskoeffizient . . . . .	191
3.3.4 Druckverlust . . . . .	194
3.4. Verfahrens- und stoffbezogene Ähnlichkeitskennzahlen . . . . .	197
3.5 Wärmezu- und -abfuhr . . . . .	198
3.5.1 Ziele und Funktionsmerkmale von Einrichtungen zur Wärmezu- und -abfuhr	198
3.5.2 Eigenschaften und Auswahl von Wärmeträgern . . . . .	201
3.5.3 Heiz- und Kühlkreisläufe, Schaltungen . . . . .	206
3.5.4 Konstruktive Ausführung von Heiz- und Kühlkreisläufen . . . . .	209
3.6 Stromführung in Apparaten . . . . .	210
3.6.1 Begriffe, Allgemeines . . . . .	210

<b>3.6.1.1</b>	Phasenverteilungszustände (Strömungsformen) . . . . .	211
<b>3.6.1.2</b>	Einfluß der Beheizung auf die Phasenverteilung . . . . .	212
<b>3.6.2</b>	Stromführung in Apparaten zur Wärmeübertragung (Rekuperatoren) . . . . .	214
<b>3.6.3</b>	Stromführung in Apparaten zur Stoffübertragung . . . . .	223
<b>3.6.3.1</b>	Rohrbündelapparate . . . . .	225
<b>3.6.3.2</b>	Kolonnenapparate . . . . .	233
<b>3.6.4</b>	Stromführung und Bauteilverhalten . . . . .	240
<b>3.6.4.1</b>	Anregungsmechanismen . . . . .	241
<b>3.6.4.2</b>	Ansätze zur Beschreibung des Strukturverhaltens . . . . .	245
<b>3.6.4.3</b>	Auswirkungen der Stromführung auf die Stabilität . . . . .	248
<b>3.7</b>	Schaltungsalternativen . . . . .	249
<b>3.7.1</b>	Allgemeines . . . . .	249
<b>3.7.2</b>	Freiheitsgrad von Prozeßeinheiten . . . . .	250
<b>3.7.2.1</b>	Einfache Prozeßeinheiten . . . . .	252
<b>3.7.2.2</b>	Zusammengesetzte Prozeßeinheiten . . . . .	253
<b>3.7.3</b>	Schaltungsalternativen für Wärmetauscher (WT) und Verdampfer . . . . .	253
<b>3.7.4</b>	Schaltungsalternativen für Kolonnenapparate für die thermische Trennung . . . . .	258
<b>3.7.5</b>	Schaltungsgesichtspunkte für Kombinationen von thermischen Apparaten und Arbeitsmaschinen . . . . .	261
<b>3.7.6</b>	Schaltungsalternativen für Kühlkreisläufe . . . . .	263
<b>3.8</b>	Fördern und Lagern . . . . .	263
<b>3.8.1</b>	Allgemeines . . . . .	264
<b>3.8.2</b>	Förderhilfsmittel . . . . .	265
<b>3.8.3</b>	Fördermittel . . . . .	266
<b>3.8.4</b>	Förderung von Flüssigkeiten . . . . .	268
<b>3.8.5</b>	Förderung und Verdichtung von Gasen . . . . .	271
<b>3.8.6</b>	Feststofftransport durch Rohrleitungen . . . . .	274
<b>3.8.7</b>	Lagerung, Bauformen der Lager . . . . .	276
<b>3.8.8</b>	Dosierung, Dosiereinrichtungen . . . . .	277
<b>3.9</b>	Isolation (Wärme- und Kälteschutz) . . . . .	278
<b>3.9.1</b>	Allgemeines . . . . .	279
<b>3.9.2</b>	Konstruktive Gesichtspunkte beim Wärme- und Kälteschutz . . . . .	280
<b>3.9.3</b>	Thermodynamische Zusammenhänge . . . . .	280
<b>3.9.4</b>	Bestimmung der wirtschaftlichsten Dämmstoffdicke für kreiszylindrische Geometrien . . . . .	282
<b>3.9.5</b>	Überschlägige Bestimmung der Wärmeverluste mit Einschluß nichtzylindrischer Geometrien . . . . .	284
<b>3.9.6</b>	Dämmstoffe und Dämmarten . . . . .	286
<b>3.9.7</b>	Dämmwirkung von Luftsichten (Luftschichtisolierung) . . . . .	290
<b>3.9.8</b>	Transpirationskühlung . . . . .	295
<b>Literatur zu Kapitel 3</b>	. . . . .	296
<b>4</b>	<b>Nachrechnung und Dimensionierung, Konstruktionsprinzipien</b> . . . . .	303
<b>4.1</b>	Modellbetrachtungen im konstruktiven Apparate- und Anlagenbau; Konstruktionsbezogene Ähnlichkeitskennzahlen. . . . .	303
<b>4.1.1</b>	Modellgesetze für statische Spannungen und Deformationen . . . . .	305
<b>4.1.2</b>	Modellgesetze für dynamische Struktureigenschaften . . . . .	306
<b>4.1.3</b>	Einfache und spezielle Ähnlichkeiten; Maßstabsfaktoren . . . . .	307
<b>4.1.4</b>	Ähnlichkeitsdefekte und übergeordnete Ähnlichkeiten . . . . .	309
<b>4.1.5</b>	Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik auf das Bauteilverhalten bei Anregung durch strömende Fluide . . . . .	310

<b>4.2</b>	<b>Festigkeitsnachweis . . . . .</b>	<b>311</b>
4.2.1	Neunspannungsnachweis . . . . .	312
4.2.1.1	Berechnungsdruck und Berechnungstemperatur . . . . .	313
4.2.1.2	Regelwerke . . . . .	314
4.2.2	Sicherheitsbegriff . . . . .	316
4.2.3	Zuschläge . . . . .	318
4.2.4	Festigkeitsgerechtes Konstruieren . . . . .	318
<b>4.3</b>	<b>Verformungsgerechtes Konstruieren . . . . .</b>	<b>319</b>
4.3.1	Allgemeine Verformungsbetrachtungen . . . . .	319
4.3.2	Kriech- und relaxationsgerechtes Konstruieren . . . . .	321
4.3.3	Ausdehnungsgerechtes Konstruieren . . . . .	324
4.3.3.1	Die physikalische Erscheinung der Ausdehnung . . . . .	324
4.3.3.2	Geometrisch-kinetische Forderungen an ausdehnungsgerechte Konstruktionen . . . . .	324
4.3.3.3	Relativausdehnung und ihre Beherrschung durch geeignete Wahl von Einflußgrößen . . . . .	325
4.3.3.4	Beispiele für ausdehnungsgerechtes Gestalten im Apparate- und Anlagenbau	327
<b>4.4</b>	<b>Emissionsfreies Konstruieren, Schallschutzplanung . . . . .</b>	<b>330</b>
4.4.1	Schallschutzplanung, Allgemeines und Definitionen . . . . .	331
4.4.2	Meßgrößen; Mittelungspiegel, Summenpegel, Beurteilungspiegel, spezifischer Schalleistungspiegel . . . . .	333
4.4.3	Schallenergiebilanz und Schallausbreitung . . . . .	335
4.4.4	Schallschutzmaßnahmen . . . . .	337
<b>4.5</b>	<b>Rechnerunterstützter Entwurf . . . . .</b>	<b>339</b>
4.5.1	Rechnerunterstützter Entwurf, Ziele und Auswirkungen . . . . .	339
4.5.2	Rechneranwendung . . . . .	342
Literatur zu Kapitel 4 . . . . .		343

<b>5</b>	<b>Bauteilunabhängige, konstruktionsbezogene Berechnungsverfahren und Phänomene . . . . .</b>	<b>346</b>
<b>5.1</b>	<b>Produktunabhängige, konstruktionsbezogen Berechnungsverfahren . . . . .</b>	<b>346</b>
5.1.1	Allgemeines und Zielsetzung . . . . .	346
5.1.2	Methode der Finiten Elemente (FE-Methoden) . . . . .	350
5.1.3	Verfahren der Finiten Differenzen (FD-Verfahren) . . . . .	354
5.1.4	Stufenkörperverfahren, Übertragungsmatrizen . . . . .	356
<b>5.2</b>	<b>Schwingungen . . . . .</b>	<b>359</b>
5.2.1	Allgemeines; Schwingungen in Apparaten und Anlagen . . . . .	360
5.2.2	Bauteil- und systembezogene Schwingungsuntersuchungen, Schrifttumsübersicht . . . . .	361
5.2.3	Anregungsmechanismen von Einzelrohren und Rohrgruppen . . . . .	363
5.2.4	Rechnerische Ermittlung der Eigenfrequenzen von Einzelrohren und Rohrgruppen, Schwingungsnachweis . . . . .	366
5.2.5	Konstruktive Gesichtspunkte für die Vermeidung strömungsbedingter Schäden in Rohrbündeln . . . . .	372
<b>5.3</b>	<b>Stabilitätsfälle . . . . .</b>	<b>375</b>
5.3.1	Bedeutung von Stabilitätsfällen für den Anlagenbau; Definitionen; Schadensfälle . . . . .	376
5.3.2	Grundsätzlicher Aufbau und Gliederung von Beulvorschriften und Berechnungsansätzen für Kreiszylinder . . . . .	377
5.3.3	Glatter (isotroper) Zylinder . . . . .	378
5.3.3.1	Elastisches Beulen glatter Zylinder . . . . .	378

5.3.3.2	Plastisches Beulen glatter Zylinder . . . . .	380
5.3.3.3	Vergleich von Beulvorschriften für glatte Zylinder unter Außendruck . . . . .	380
5.3.3.4	Beulen gekrümmter Kreisrohre unter Außendruck . . . . .	380
5.3.3.5	Beulen glatter Zylinder unter Axiallasten . . . . .	381
5.3.4	Der in der Wanddicke abgestufte Zylinder . . . . .	382
5.3.5	Der versteifte Zylinder . . . . .	383
5.3.5.1	Bemessung von Versteifungen . . . . .	385
5.3.6	Kugelschalen . . . . .	385
5.4	Wärmespannungen . . . . .	386
5.4.1	Verursachung, Begriffe, Bedeutung für Komponenten des Apparate- und Anlagenbaues . . . . .	386
5.4.2	Grundgleichung der linearisierten Elastomechanik und Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung . . . . .	387
5.4.3	Grundsätzliche Überlegungen zum Einfluß der Zeit . . . . .	389
5.4.4	Wärmespannungen in Hohlzylindern . . . . .	392
5.4.4.1	Instationäre Wärmespannungen . . . . .	392
5.4.4.2	Stationäre Wärmespannungen . . . . .	393
5.4.4.3	Überlagerung stationärer Wärme- und Lastspannungen . . . . .	395
5.4.4.4	Sonderfälle zylindrischer Geometrien . . . . .	397
5.4.4.5	Hohlzylinder mit Wärmequellen . . . . .	400
5.4.5	Wärmespannungen in Platten . . . . .	401
5.4.5.1	Stationäre Wärmespannungen . . . . .	401
5.4.5.2	Instationäre Wärmespannungen . . . . .	402
5.4.6	Bewertung von Wärmespannungen . . . . .	405
5.4.7	Wärmespannungsgünstige Konstruktionen . . . . .	406
5.5	Örtliche Einleitung von Lasten . . . . .	407
5.5.1	Allgemeines zu Lastfällen . . . . .	407
5.5.2	Der stehende Zylinder (randferner Bereich) . . . . .	409
5.5.2.1	Theorie . . . . .	409
5.5.2.2	Lösungsverfahren . . . . .	411
5.5.3	Der liegende zylindrische Behälter . . . . .	416
5.5.4	Kegelschalen . . . . .	419
5.5.5	Kugelschale und Kugelbehälter . . . . .	419
5.5.5.1	Lagerung von Kugelbehältern . . . . .	420
5.6	Bruchmechanik . . . . .	423
5.6.1	Definitionen; Bedeutung für den Anlagenbau . . . . .	423
5.6.2	Untersuchung des Sprödbruchverhaltens . . . . .	424
5.6.3	Der $K_{Ic}$ -Wert als Werkstoffkenngröße . . . . .	425
5.6.4	Verhältnisse an der Rißspitze; Zusammenhang zwischen den Rißabmessungen und Nennspannung $\sigma_a$ . . . . .	426
5.6.5	Rißöffnungsverschiebungs-Konzept (COD-Konzept) . . . . .	428
5.6.5.1	Anwendung von COD-Messungen auf Versuchsbehälter . . . . .	429
5.6.6	Anwendungsmöglichkeiten der linear-elastischen Bruchmechanik . . . . .	430
5.6.6.1	Beurteilung von Fehlern und Festlegung eines Sicherheitsabstandes gegen Sprödbruch, Zähbruch oder unterkritisches Rißwachstum . . . . .	431
5.6.6.2	Bruchmechanische Bewertung der Wasserdruckprobe . . . . .	434
5.6.7	$J$ -Integral und $J_{Ic}$ -Wert . . . . .	434
Literatur zu Kapitel 5	. . . . .	435
<b>6</b>	<b>Bauteilabhängige Berechnung und Gestaltung . . . . .</b>	<b>445</b>
6.1	Zylindrische Wandungen, Rohre, Schüsse . . . . .	446
6.1.1	Allgemeines, Stellung und Funktion zylindrischer Hohlkörper in stoff- und energiewandelnden Anlagen . . . . .	449

6.1.2	Rohrformen . . . . .	450
6.1.3	Berechnung zylindrischer Hohlkörper . . . . .	452
6.1.3.1	Elastische Hauptspannungen des dickwandigen Hohlzylinders . . . . .	453
6.1.3.2	Die dünnwandige Zylinderschale . . . . .	456
6.1.3.3	Dünnwandiges Rohr bei schwelender Innendruckbeanspruchung . . . . .	457
6.1.3.4	Der elastisch-plastische Hohlzylinder . . . . .	458
6.1.3.5	Sonderfälle des ebenen Spannungszustandes in zylindrischen Rohren . . . . .	460
6.1.3.6	Randstörungen, Einflußlängen . . . . .	461
6.1.3.7	Die abgesetzte Zylinderschale . . . . .	463
6.1.3.8	Die durch Ringe verstiefe Kreiszylinderschale unter Innendruck . . . . .	465
6.1.3.9	Unrunde Zylinderschalen . . . . .	467
6.2	Rohrbogen . . . . .	469
6.3	Behälterabschlüsse . . . . .	471
6.3.1	Ebene Böden . . . . .	471
6.3.1.1	Funktion in der Anlage, geometrische Variationsbreite, Vorkommenshäufigkeit . . . . .	472
6.3.1.2	Belastungsarten, Beanspruchung . . . . .	473
6.3.1.3	Konstruktive Gesichtspunkte . . . . .	473
6.3.1.4	Verschwächung des Plattenquerschnittes . . . . .	474
6.3.1.5	Berechnungsansätze, Bemessung . . . . .	476
6.3.1.5.1	Bemessung von Rohrplatten nach AD-Merkblatt B 5 (Näherungsverfahren) . . . . .	477
6.3.1.5.2	Berücksichtigung überelastischer Verformungen . . . . .	480
6.3.1.5.3	Grenzen der Kirchhoffschen Plattentheorie (dicke Rohrplatten) . . . . .	481
6.3.1.5.4	Berechnung von Rohrplatten mittels hochentwickelter, analytischer Verfahren . . . . .	481
6.3.1.5.5	Spannungsnachweis von Rohrplatten nach diskreten Verfahren . . . . .	482
6.3.2	Gewölbte Böden . . . . .	484
6.3.2.1	Allgemeines und konstruktive Gesichtspunkte . . . . .	484
6.3.2.2	Berechnung . . . . .	485
6.3.3	Hochdruckverschlüsse . . . . .	488
6.4	Stutzen/Durchdringungen . . . . .	489
6.4.1	Allgemeines, konstruktive Gesichtspunkte . . . . .	490
6.4.2	Berechnung von Stutzen und Ausschnitten . . . . .	493
6.4.2.1	Berechnung gegen Innendruck . . . . .	494
6.4.2.2	Beanspruchung durch äußere Kräfte und Momente . . . . .	496
6.5	Ausgleichselemente . . . . .	499
6.5.1	Grundsätzliches, Funktion . . . . .	499
6.5.2	Bauarten . . . . .	501
6.5.3	Einbau von Ausgleichselementen und Beanspruchungsverhältnisse . . . . .	501
6.5.4	Berechnung von Balgkompensatoren . . . . .	504
6.6	Flanschverbindungen . . . . .	507
6.6.1	Allgemeines . . . . .	508
6.6.2	Flanschberechnung . . . . .	510
6.6.2.1	Festigkeitsbedingungen für den festen Flansch . . . . .	511
6.6.2.2	Zulässige Grenzverformung für Flansche . . . . .	512
6.6.2.3	Große Apparateflansche (DN 1000 und größer) . . . . .	513
6.6.2.4	Berechnungsmethodik bei besonderen Dichtheitsforderungen . . . . .	514
6.6.2.5	Flanschberechnung nach Näherungsverfahren . . . . .	514
6.6.2.6	Bestimmungsgleichungen für den Flanschwiderstand . . . . .	518
6.6.2.7	Rechteckflansche und quadratische Losflansche . . . . .	520
6.6.2.8	Kraft-Verformungs-Verhalten bei erhöhter Temperatur . . . . .	520
6.6.3	Statische Dichtungen . . . . .	521
6.6.3.1	Eigenschaften statischer Dichtungen . . . . .	522
6.6.3.2	Berechnung von statischen Dichtungen . . . . .	522

6.6.3.3	Gesichtspunkte für den Entwurf statischer Dichtverbindungen . . . . .	523
6.6.3.4	Dichtung und Dichtfläche - Technologie des Dichtens . . . . .	526
6.6.3.5	Behebung von Leckagen während des Betriebes . . . . .	528
6.6.4	Schrauben . . . . .	529
6.6.4.1	Allgemeines und Konstruktionshinweise . . . . .	529
6.6.4.2	Berechnung von Schraubenverbindungen . . . . .	530
6.7	Abdichtung bewegter Bauelemente . . . . .	531
6.7.1	Allgemeines . . . . .	531
6.7.2	Funktion, Werkstoffe und Anwendungsbereich der Packungsstopfbuchsen .	533
6.7.3	Funktion, Werkstoffe und Anwendungsbereich von Gleitringdichtungen .	537
6.8	Lagerung umlaufender Apparate- und Anlagenkomponenten . . . . .	539
6.8.1	Bemessung von Wellen, Gestaltung, Verbindungselemente . . . . .	540
6.8.2	Auswahl und Gestaltung von Lagern, Konstruktionshinweise . . . . .	545
6.8.3	Abdichtung von Lagern . . . . .	548
Literatur zu Kapitel 6 . . . . .		549
<b>7</b>	<b>Rohrleitungstechnik und -elemente . . . . .</b>	<b>559</b>
7.1	Planung und Errichtung von Rohrleitungen . . . . .	559
7.1.1	Planungsvoraussetzungen, -abschnitte und -ergebnisse bei Produkt- und Energieleitungen . . . . .	560
7.1.1.1	Einsatz der EDV für die Rohrleitungsplanung . . . . .	564
7.1.2	Planungsvoraussetzungen, -abschnitte und -ergebnisse bei Rohrfernleitungen .	566
7.1.3	Verfahrens- und strömungstechnische Auslegung von Rohrleitungen . .	569
7.1.3.1	Widerstandsgesetze . . . . .	573
7.1.4	Druckstöße und Druckstoßberechnung . . . . .	579
7.1.5	Rohrleitungsstatik — Elastizitätsberechnung von Rohrleitungssystemen .	582
7.2	Rohrleitungselemente . . . . .	585
7.2.1	Armaturen (Rohrleitungsschalter) . . . . .	585
7.2.1.1	Allgemeines . . . . .	586
7.2.1.2	Ventile, Schieber, Hähne, Klappen . . . . .	587
7.2.1.3	Auslegung von Stellgliedern, insbesondere von Ventilen . . . . .	589
7.2.1.4	Stellantriebe in der Prozeßtechnik . . . . .	591
7.2.1.5	Sicherheitsventile . . . . .	593
7.2.2	Formstücke (Fittings) . . . . .	595
7.2.3	Rohrhalterungen . . . . .	596
7.2.4	Begleitheizung von Rohren . . . . .	599
Literatur zu Kapitel 7 . . . . .		603
<b>8</b>	<b>Berechnung und Gestaltung von Baugruppen . . . . .</b>	<b>607</b>
8.1	Apparate für die Wärmeübertragung (Rohrbündelapparate) einschließlich Verdampfern . . . . .	607
8.1.1	Einsatz- und Funktionsmerkmale, wärmetechnische Auslegung . . . . .	607
8.1.2	Bauarten und Konstruktionsprinzipien der Rohrbündelapparate . . . . .	609
8.1.3	Entwurf von Rohrböden, Verbindung Rohr/Rohrplatte . . . . .	612
8.1.4	Sonderbauarten . . . . .	617
8.1.5	Hochtemperaturwärmeübertrager . . . . .	620
8.1.6	Verdampfer und Eindampfapparate . . . . .	627
8.1.7	Dünnenschichtapparate . . . . .	631

8.2	Druckbehälter . . . . .	632
8.2.1	Funktion von Druckbehältern (DB), Stellung im Betrieb . . . . .	633
8.2.2	Berechnung und Gestaltung von Druckbehältern (DB) . . . . .	637
8.2.2.1	Elemente, Baugruppen, Zusatzausrüstungen . . . . .	637
8.2.2.2	Versagensarten und Werkstoffverhalten — Folgerungen für die Konstruktion von Druckbehältern . . . . .	638
8.2.2.3	Berechnung von Vollwanddruckbehältern . . . . .	640
8.2.2.3.1	Autofrettage . . . . .	647
8.2.2.4	Funktionstrennung in Behälterwandungen, Verbund, Auskleidung . . . . .	651
8.2.2.5	Wechselbeanspruchung von Behältern . . . . .	655
8.2.3	Druckbehälter in Mehrlagenbauweise . . . . .	657
8.2.3.1	Bauarten der Mehrlagenbehälter . . . . .	659
8.2.3.1.1	Mechanischer Verbund . . . . .	659
8.2.3.1.2	Geschweißter Verbund . . . . .	659
8.2.3.2	Doppelmantel- (Doppelwand-) Behälter . . . . .	662
8.2.3.3	Berechnung von Mehrlagendruckbehältern . . . . .	664
8.3	Kolonnenapparate einschließlich Einbauten . . . . .	668
8.3.1	Allgemeine Gesichtspunkte . . . . .	668
8.3.2	Wahl des Kolonnendurchmessers . . . . .	669
8.3.3	Unterscheidungsmerkmale der Austauschböden . . . . .	671
8.3.4	Befestigung und Abdichtung von Kolonnenböden, Gesichtspunkte für die Gestaltung von Kolonnenapparaten . . . . .	675
8.3.5	Fertigungsgesichtspunkte, Werkstoffwahl . . . . .	680
8.3.6	Festigkeitsberechnung von Kolonnenapparaten . . . . .	680
8.3.6.1	Eingangsgrößen für die Kolonnenberechnung . . . . .	681
8.3.6.2	Übersichtsskizze . . . . .	681
8.3.6.3	Lastkombinationen . . . . .	681
8.3.6.4	Standsicherheitsnachweis, Festigkeitsnachweis . . . . .	682
8.3.6.5	Ergebnisse (gegebenenfalls Rechnerausgabe) . . . . .	683
Literatur zu Kapitel 8 . . . . .	683	
<b>9</b>	<b>Montage, Anlagenaufstellung Betrieb . . . . .</b>	<b>689</b>
9.1	Anordnungsbeziehungen, Aufstellungsplan . . . . .	689
9.1.1	Allgemeines . . . . .	689
9.1.2	Voraussetzungen für die Klärung von Anordnungsbeziehungen . . . . .	690
9.1.3	Informationsgehalt und Zielaspekte des Layouts im Hinblick auf die Aufstellungsplanung . . . . .	691
9.2	Fundamente . . . . .	694
9.2.1	Allgemeines . . . . .	694
9.2.2	Bemessung von Fundamenten . . . . .	695
9.2.2.1	Sohldruckverteilungen . . . . .	695
9.2.2.2	Berechnung der Sohldruckverteilung . . . . .	696
9.2.2.3	Baugrundmodelle . . . . .	697
9.2.2.4	Statischer Nachweis für Flächengründungen . . . . .	698
9.2.3	Bauliche Ausführung von Fundamenten . . . . .	702
9.3	Stahl- und Gerüstbau . . . . .	705
9.3.1	Allgemeines . . . . .	707
9.3.2	Lastannahmen . . . . .	708
9.3.2.1	Hauptlasten für Stahlkonstruktionen in Chemieanlagen . . . . .	708
9.3.2.2	Zusatzzlasten für Stahlkonstruktionen in Chemieanlagen . . . . .	709
9.3.2.3	Sonderlasten für Stahlkonstruktionen in Chemieanlagen . . . . .	709
9.3.3	Festigkeits- und Stabilitätsnachweis . . . . .	709

<b>9.3.4</b>	<b>Spannungsnachweis für Schweißnähte . . . . .</b>	<b>712</b>
<b>9.3.5</b>	<b>Werkstoffe und Korrosionsschutz . . . . .</b>	<b>714</b>
<b>9.3.6</b>	<b>Bauliche Durchbildung von Rahmentragwerken . . . . .</b>	<b>715</b>
<b>9.3.7</b>	<b>Trägerlagerung, Stützenfüße, Verankerung . . . . .</b>	<b>719</b>
<b>9.3.8</b>	<b>Rohr- und Energiebrücken . . . . .</b>	<b>721</b>
<b>9.3.9</b>	<b>Vereinbarungsbereich für die Vergabe von Stahlbauarbeiten . . . . .</b>	<b>722</b>
<b>9.4</b>	<b>Montage . . . . .</b>	<b>723</b>
<b>9.4.1</b>	<b>Zum Begriff Montage . . . . .</b>	<b>723</b>
<b>9.4.2</b>	<b>Montageorganisation . . . . .</b>	<b>724</b>
<b>9.4.3</b>	<b>Transport, Montagehilfsmittel . . . . .</b>	<b>727</b>
<b>9.4.4</b>	<b>Behälter- und Sondermontagen . . . . .</b>	<b>730</b>
<b>9.4.5</b>	<b>Rohrleitungsmontagen . . . . .</b>	<b>730</b>
<b>9.4.6</b>	<b>Rechnereinsatz für Montageplanung und -leitung . . . . .</b>	<b>733</b>
<b>9.5</b>	<b>Inbetriebnahme . . . . .</b>	<b>734</b>
<b>9.6</b>	<b>Möglichkeiten zur Begehung und Entleerung . . . . .</b>	<b>737</b>
<b>9.7</b>	<b>Instandhaltung . . . . .</b>	<b>738</b>
<b>9.7.1</b>	<b>Allgemeines . . . . .</b>	<b>738</b>
<b>9.7.2</b>	<b>Bereiche der Instandhaltung . . . . .</b>	<b>739</b>
<b>9.7.3</b>	<b>Instandhaltungskosten . . . . .</b>	<b>741</b>
<b>9.7.4</b>	<b>Schwachstellenforschung . . . . .</b>	<b>741</b>
<b>Literatur zu Kapitel 9 . . . . .</b>		<b>742</b>
<b>10</b>	<b>Sicherheit und Zuverlässigkeit . . . . .</b>	<b>745</b>
<b>10.1</b>	<b>Verfügbarkeit . . . . .</b>	<b>746</b>
<b>10.1.1</b>	<b>Verfügbarkeit im technischen Sprachgebrauch . . . . .</b>	<b>746</b>
<b>10.1.2</b>	<b>Statistische Definition der Verfügbarkeit; Zuverlässigkeit von Einzelausrüstungen und Systemen . . . . .</b>	<b>748</b>
<b>10.1.2.1</b>	<b>Zuverlässigkeitssparameter . . . . .</b>	<b>748</b>
<b>10.1.2.2</b>	<b>Zuverlässigkeit von Einzelausrüstungen . . . . .</b>	<b>749</b>
<b>10.1.2.3</b>	<b>Zuverlässigkeit von Systemen und Anlagen . . . . .</b>	<b>751</b>
<b>10.1.3</b>	<b>Redundanz und Reserve . . . . .</b>	<b>753</b>
<b>10.2</b>	<b>Maßnahmen zur Steigerung der Verfügbarkeit . . . . .</b>	<b>756</b>
<b>10.2.1</b>	<b>Risikobetrachtungen . . . . .</b>	<b>757</b>
<b>10.2.1.1</b>	<b>Risiken in stoff- und energiewandelnden Anlagen, Schwellenwerte . . . . .</b>	<b>757</b>
<b>10.2.1.2</b>	<b>Unerwünschte exotherme Reaktionen, Entspannungsvorgänge . . . . .</b>	<b>759</b>
<b>10.2.1.3</b>	<b>Kontinuierliche und diskontinuierliche Betriebsführung . . . . .</b>	<b>760</b>
<b>10.2.1.4</b>	<b>Maßnahmen zur Vermeidung von Explosionen und Bränden sowie von Schäden durch unzulässigen Druckanstieg . . . . .</b>	<b>761</b>
<b>10.2.2</b>	<b>Bereiche der Sicherheitstechnik und Sicherheitsprinzipien . . . . .</b>	<b>763</b>
<b>10.2.2.1</b>	<b>Unmittelbare Sicherheitstechnik, Sicherheitstechnik aus konstruktiver Sicht . . . . .</b>	<b>765</b>
<b>10.2.2.2</b>	<b>Mittelbare Sicherheitstechnik, Schutzsysteme . . . . .</b>	<b>768</b>
<b>10.3</b>	<b>Prüfen und Prüfverfahren . . . . .</b>	<b>771</b>
<b>10.3.1</b>	<b>Prüfinstanzen . . . . .</b>	<b>775</b>
<b>10.3.2</b>	<b>Prüfungen und ihre zeitliche Zuordnung zu den verschiedenen Fertigungs- und Betriebsabschnitten . . . . .</b>	<b>775</b>
<b>10.3.2.1</b>	<b>Vorabprüfungen . . . . .</b>	<b>776</b>
<b>10.3.2.2</b>	<b>Primärprüfungen . . . . .</b>	<b>776</b>
<b>10.3.2.3</b>	<b>Sekundärprüfungen . . . . .</b>	<b>778</b>

<b>10.3.2.4</b>	<b>Wiederholungsprüfungen</b>	<b>781</b>
<b>10.3.3</b>	<b>Prüfverfahren</b>	<b>781</b>
<b>10.3.3.1</b>	<b>Oberflächenrißprüfverfahren</b>	<b>783</b>
<b>10.3.3.2</b>	<b>Radiografische Verfahren (Durchstrahlungsverfahren)</b>	<b>784</b>
<b>10.3.3.3</b>	<b>Ultraschallverfahren</b>	<b>786</b>
<b>10.3.3.4</b>	<b>Dichtheitsprüfungen</b>	<b>787</b>
<b>10.4</b>	<b>Vorschriften</b>	<b>788</b>
<b>10.4.1</b>	<b>Grundsätze und gesetzliche Verankerung</b>	<b>788</b>
<b>10.4.2</b>	<b>Genehmigungspflichtige Anlagen</b>	<b>789</b>
<b>10.4.3</b>	<b>Vorschriften für Bau und Abnahme von Apparaten in stoffumwandelnden Anlagen</b>	<b>791</b>
<b>10.4.4</b>	<b>Nationale Vorschriften für Bau und Betrieb von Druckbehältern</b>	<b>793</b>
<b>10.4.5</b>	<b>Stand der abgedruckten AD-Merkblätter</b>	<b>795</b>
<b>10.5</b>	<b>Fehler und Schäden</b>	<b>796</b>
<b>10.5.1</b>	<b>Definitionen, Erscheinungsformen, Übertragbarkeit</b>	<b>796</b>
<b>10.5.2</b>	<b>Schadensursachen</b>	<b>797</b>
<b>10.5.2.1</b>	<b>Ursachengruppe Bruch und Verformung</b>	<b>799</b>
<b>10.5.2.2</b>	<b>Ursachengruppe Korrosion</b>	<b>805</b>
<b>10.5.3</b>	<b>Methodik der Beurteilung und Bewertung von Schäden</b>	<b>808</b>
<b>10.5.4</b>	<b>Beispiele für Bedienungs- und Herstellungsfehler</b>	<b>810</b>
<b>10.5.5</b>	<b>Wirtschaftliche Bewertung von Fehlern/Schäden</b>	<b>813</b>
<b>Literatur zu Kapitel 10</b>		<b>814</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>819</b>