

GRUNDLAGEN DER CHEMISCHEN TECHNIK

Verfahrenstechnik der chemischen **und** verwandter **Industrien**

Herausgegeben von Prof. Dr. Hermann Mohler, Zürich

Prof. Dr.-Ing. Otto Fuchs, Konstanz

Dr.-Ing. Hermann Kraussold, Ingelheim am Rhein

Prof. Dr. Kurt Dialer, München

Wärmeaustausch und Wärmeaustauscher

Zweite, stark erweiterte und verbesserte Auflage
des Buches *Wärmeaustauscher*

**Konstruktionssystematik - Serienproduktion - Rohrschwingungen —
Fertigungsgerechte wirtschaftliche Optimierung aufgrund von
Exergieverlusten**

von Dr. sc. techn. ETH Romano Gregorig

o.Professor für Wärmeübertragung an der Technischen Universität Berlin
Prof. h. c. an der Escola de Engenharia der Universität Minas Gerais,
Belo Horizonte (Brasilien)

Mit 357 Abbildungen

Inhaltsverzeichnis

Häufig verwendete Formelzeichen und Kenngrößen	22
Einleitung	25

Erster Teil: Wärmeübertragung, Strömungstechnisches und Rohrschwingungen

Kapitel 1 Einleitung

1.1	Wärmeübertragung	29
1.1.1	Wärmeübergangskoeffizient - Newtonscher Ansatz - Wärmedurchgangskoeffizient	29
1.1.2	Über die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung und über deren Mechanismus	31
1.1.3	Kennzahlen	32
1.1.4	Stoffwerte	39
1.2	Bezeichnung, Klassifikation und Funktionelles der Wärmeaustauscher	48
	Literatur zu Kapitel 1	51

Kapitel 2 Wärmeübertragung durch Wärmeleitung

2.1	Grundbegriffe, Differentialgleichung und Modelltheorie der Wärmeleitung	59
2.1.1	Temperaturfeld	59
2.1.2	Fouriersche Differentialgleichung	60
2.1.3	Allgemeine Aufgabenstellung und Grenzbedingungen	64
2.1.4	Ähnliche Temperaturfelder - Modelltheorie - Fouriersche Kennzahl - Biotsche Kennzahl	65
2.2	Stationäre Wärmeleitung	69
2.2.1	Eindimensionale Wärmeströmung: ebene und gekrümmte Wände	69
2.2.2	Wärmefluß in Rippen - Rippenwirkungsgrad	72
2.2.3	Elektrische Analogie - Potentialströmung - Konforme Abbildung	77
2.2.4	Wärmefluß mit Wärmequellen	81
2.3	Nichtstationärer Zustand	83
2.3.1	Eindimensionale Wärmeströmung in einem Halbraum	83
2.3.2	Räumlich eindimensionale Wärmeströmung in einer Platte, in einem Kreiszyylinder und in einer Kugel	91
2.3.3	Differenzenverfahren	93
	Literatur zu Kapitel 2	95

Kapitel 3 Konvektiver Wärmeübergang ohne Änderung des Aggregatzustandes

3.1	Einleitung und Klassifikation	97
3.2	Wärmeübergang durch freie oder natürliche Konvektion	97
3.2.1	Strömungstechnischer Mechanismus	97
3.2.2	Grashofische Kennzahl - Schleichende Bewegung	98
3.2.3	Theoretische Ansätze	100
3.2.4	Gebrauchsformeln für den Wärmeübergang bei freier Konvektion	103
3.3	Wärmeübergang durch erzwungene Konvektion	107
3.3.1	Differentialgleichungen, strömungs- und wärmetechnischer Mechanismus und Analogien zwischen Impuls- und Wärmeaustausch	107
3.3.2	Wärmeübergang zwischen flüssigen Metallen und Rohrwänden	125
3.3.3	Gebrauchsformeln für erzwungene Konvektion in Rohren und Kanälen	126

3.3.3.1	Laminare Strömung in Rohren mit Kreisquerschnitt	127
3.3.3.2	Turbulente Strömung - Gleichwertiger Durchmesser	127
3.3.4	Wärmeübergang bei umströmten Körpern	133
3.3.4.1	Strömung um Rohre	133
3.3.4.2	Strömung um eine volle Kugel und um eine Platte	139
3.3.5	Sonderfälle des Wärmeüberganges durch erzwungene Konvektion	141
3.3.5.1	Wärmeübergang bei hohen Geschwindigkeiten	141
3.3.5.2	Wärmeübergang bei erzwungener Konvektion und großen Knudsen-Zahlen (kleine Drücke)	143
3.3.5.3	Wärmeübergang zwischen zwei Medien in unmittelbarer Berührung miteinander	145
3.3.5.4	Wärmeübergang in Rohrschlangen	160
3.3.5.5	Wirbelschichtverfahren	161
3.3.5.6	Wärmeübergang in Rührwerken	165
3.3.5.7	Wärmeübergang an rotierenden Flächen	167
3.4	Verallgemeinerter Ausdruck für den Einfluß temperaturabhängiger Stoffwerte auf den turbulenten Wärmeübergang in geraden Kanälen	167
	Literatur zu Kapitel 3	173

Kapitel 4 Wärmeübergang mit Änderung des Aggregatzustandes

4.1	Erstarren und Schmelzen	181
4.2	Verdampfung	188
4.2.1	Mechanismus der Verdampfung	188
4.2.2	Beschreibung der Formen der Verdampfung - Kritische Wärmestromdichte, burnout	197
4.2.3	Einfluß der Heizwandeigenschaften auf den Mechanismus der Blasenverdampfung	200
4.2.4	Entspannungsverdampfung mit natürlichem und erzwungenem Umlauf - Instabilität	216
4.2.5	Flüssigkeitsfilmverdampfung	222
4.2.6	Gebrauchsformeln	223
4.3	Kondensation - Einführung mit Klassifikation	226
4.3.1	Film- oder Hautkondensation	227
4.3.1.1	Laminare Strömung im Film	227
4.3.1.1.1	Nusseltsche Wasserhauttheorie bei konstanter Kühlwandtemperatur - ohne Einfluß der Dampf Strömung	228
4.3.1.1.2	Einfluß der Strömungsrichtung des Kühlmittels bei variabler Kühlwandtemperatur und vertikaler Kühlwand	232
4.3.1.1.3	Wärmeübertragung bei Filmkondensation im Gleich- und Gegenstrom bei Rohrbündeln mit horizontalen Rohren	248
4.3.1.2	Turbulente Strömung im Kondensatfilm	252
4.3.2	Tropfenkondensation	254
4.3.2.1	Einfluß des Unterschiedes Sattdampf-Kühlwand-Temperatur	255
4.3.2.2	Einfluß der Höhe der Kühlwand	264
4.3.2.3	Film- und Tropfenkondensation in der Praxis	270
4.3.3	Filmkondensation an feingewellten Oberflächen bei Berücksichtigung der Oberflächenspannungen	271
4.3.4	Kondensation von Dämpfen bei relativ kleinem Druck unter Berücksichtigung der Druckverluste der Dampfströmung	290
4.3.4.1	Allgemeines	290
4.3.4.2	Annahmen	290
4.3.4.3	Abgrenzung des Problems	291

4.3.4.4	Rohrbündel im Querstrom	292
4.3.4.4.1	Berechnung der Wärmeübertragung beim Kondensieren des durch eine Seitenfläche eines prismatischen Rohrbündels mit rechteckigem Querschnitt einströmenden Dampfes.	292
4.3.4.4.2	Angenäherte Berechnung der Wärmeübertragung beim Kondensieren des durch eine Seitenfläche in ein prismatisches Rohrbündel mit rechteckigem Querschnitt eintretenden Dampfes.	299
4.3.4.4.3	Angenäherte Berechnung der Wärmeübertragung beim Kondensieren des durch die Mantelfläche eines kreiszylindrischen Rohrbündels einströmenden Gases.	301
4.3.4.5	Rohrbündel im Längsstrom.	305
4.3.5	Einfluß der Rauigkeit der Oberfläche der Kühlwand auf die Filmkondensation bei laminarer Kondensatströmung	310
4.3.6	Einfluß von inerten Gasen auf die Kondensation von reinen Dämpfen	317
4.3.7	Einige Richtlinien für den Entwurf von Kondensatoren im Hinblick auf die Wärmeübertragung	319
	Literatur zu Kapitel 4.	321

Kapitel 5 Wärmeübertragung durch Strahlung

5.1	Einführung	326
5.2	Grundlegende Begriffe.	327
5.3	Schwarze Strahlung - schwarzer Körper.	328
5.3.1	Die Lambertschen Strahlungsgesetze.	328
5.3.2	Das Plancksche Strahlungsgesetz.	329
5.3.3	Das Wiensche Verschiebungsgesetz.	330
5.3.4	Der schwarze Körper in der Praxis.	331
5.3.5	Das Stefan Boltzmannsche Gesetz.	331
5.4	Strahlung zwischen zwei festen Körpern, die durch diathermane Gase getrennt sind.	335
5.4.1	Die Kirchhoffschen Gesetze.	336
5.4.2	Absorption und Emission nicht-schwarzer Körper.	337
5.4.3	Zwei parallele graue Wände.	339
5.4.4	Strahlungsschutz.	341
5.4.5	Strahlung zwischen zwei beliebigen Elementen und Integration in der Praxis.	344
5.4.6	Kombination der Strahlung mit anderen Arten der Wärmeübertragung	347
5.5	Strahlung von Dämpfen und Gasen.	348
5.5.1	Grundbegriffe.	348
5.5.2	Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen einem Gas und einer schwarzen Wand.	351
5.5.3	Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen einem Gas und einer grauen Wand.	352
5.5.4	Wärmeübergang durch Strahlung von Gas- und Dampfgemischen (insbesondere von Kohlendioxid und Wasserdampf).	353
5.5.5	Wirksame Dicke der Gasschicht bei verschiedenen Formen des Gasraumes	353
	Literatur zu Kapitel 5.	356

Kapitel 6 Strömungstechnisches und Rohrschwingungen

	Einleitung	358
6.1	Druckverluste des strömenden Fluids	358
6.1.1	Strömung in Rohren, Kanälen und Spalten	358
6.1.1.1	Eintritts-, Anlauf- und Austrittsverlust	358
6.1.1.2	Druckverlust bei ausgebildetem Strömungszustand	359
6.1.1.3	Strömung in Rohrkrümmern	364
6.1.1.4	Druckverlust in Rohrschlangen	366
6.1.2	Strömung außerhalb der Rohre	367
6.1.2.1	Längsangeströmte Rohre	367
6.1.2.2	Querangeströmte Rohre	368
6.1.2.3	Querangeströmte und längsangeströmte querberippte Rohre	371
6.1.2.4	Strömung im Schüttgut	373
6.1.2.5	Strömung in der Wirbelschicht	374
6.1.3	Zusätzliche Druckverluste in Rohrbündelwärmeaustauschern	375
6.2	Rohrschwingungen	377
6.2.1	Eigenschwingungsfrequenz eines um- und durchströmten Rohres	378
6.2.2	Querangeströmte Rohre	384
6.2.2.1	Schwingungskriterium	391
6.2.2.2	Grundlegende Versuchsergebnisse	392
6.2.2.3	Rohrschwingungen in Rohrbündeln mit konstanter Rohrteilung und versetzter Rohranordnung	397
6.2.2.4	Rohrschwingungen in Rohrbündeln mit konstanter Rohrteilung und fluchtender Rohranordnung	405
6.2.3	Längsangeströmte Rohre	406
6.2.4	Maßnahmen zur Verhinderung der Schwingungen von querangeströmten Rohren	408
6.2.4.1	Es wird beim Projektieren eine geeignete Eigenfrequenz des Rohres vorgesehen	408
6.2.4.2	Dämpfung durch trockene Reibung	413
6.2.5	Zur praktischen Anwendung der Arbeitsblätter - Bilder 6.19, 6.20 und 6.23	417
6.2.6	Akustische Störungen	419
	Literatur zu Kapitel 6	420

Zweiter Teil: Wärmedurchgang

Kapitel 7 Wärmedurchgangskoeffizient

7.1	Wärmefluß durch ebene Wände und dünnwandige Rohre	426
7.2	Wärmefluß durch gekrümmte Wände	426
7.3	Wärmefluß durch berippte Wände	429
	Literatur zu Kapitel 7	430

Kapitel 8 Temperaturverlauf und mittlerer Temperaturunterschied

8.1	Allgemeines	431
8.2	Gegen- und Gleichstrom	431
8.3	Reiner Kreuzstrom	435
8.4	Gleichzeitiges Auftreten von Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom	436

8.5	Berechnung des Temperaturverlaufs über die wärmeübertragende Fläche und der Austrittstemperaturen	439
8.6	Beweis der Überlegenheit der Gegenstromführung gegenüber Gleichstromführung	445
	Literatur zu Kapitel 8	447

Kapitel 9 Betriebliche Gesichtspunkte

9.1	Ist eine Schmutzschicht bei konvektiver Wärmeübertragung immer ungünstig ?	449
9.1.1	Verschmutzung von Rohren mit Kreisquerschnitt	451
9.1.2	Verschmutzung von Plattenwärmeaustauschern (Spaltströmung).	455
9.1.3	Richtlinien für das Dimensionieren eines Wärmeaustauschers	457
9.2	Wann lohnt sich eine Verbesserung des Wärmeüberganges?	458
	Literatur zu Kapitel 9	458

Dritter Teil: Wirtschaftliches Dimensionieren und Optimieren auf Grund von Exergieverlusten

Allgemeines	459
-----------------------	-----

Kapitel 10 Exergieverluste der Wärmeaustauscher

	Einleitung	462
	Übersicht über die verschiedenen Exergieverluste	465
	Analyse der Exergieverluste durch Druckverlust, endliches Temperaturgefälle und Mischung	465
10.1	Exergieverlust infolge Reibung	470
	Exergieverlust bei Fluida mit konstanter Dichte	473
	Exergieverlust bei Fluida mit veränderlicher Dichte	474
10.2	Exergieverluste infolge des endlichen Temperaturunterschiedes zwischen den wärmeübertragenden Fluida	478
10.3	Exergieverluste durch Mischung	485
	Literatur zu Kapitel 10	498

Kapitel 11 Unterlagen zum wirtschaftlichen Dimensionieren

11.1	Kosten des eigentlichen Wärmeaustauschers und der elektrischen Energie	499
11.1.1	Preise der Halbfabrikate	499
11.1.2	Preise der elektrischen Energie	500
11.1.3	Herstellungszeiten	503
11.1.4	Kostenberechnung des Wärmeaustauschers	506
11.1.5	Neuer fertigungsgerechterer Ausdruck für den Preis eines Wärmeaustauschers für seine Optimierung	507
11.2	Vereinfachter Ausdruck für den Wärmedurchgangskoeffizienten	519
11.2.1	Wärmeübergangskoeffizient für ein Fluid, veränderlich mit der Belastung, für das andere konstant, bei verschiedenen Dimensionen des Wärmeaustauschers, also $a_x = \text{var.}$, $a_2 = \text{const}$	519

11.2.2	Wärmeübergangskoeffizient in beiden Fluida veränderlich mit der Belastung und den Dimensionen des Wärmeaustauschers ($m_1 = m_2 = m$)	523
11.2.3	Wärmeübergangskoeffizient in beiden Fluida veränderlich mit der Belastung und den Dimensionen des Wärmeaustauschers ($m_1 \neq m_2$)	524
11.3	Durch den Betrieb verursachte Unkosten	528
11.3.1	Allgemeines	528
11.3.2	Durch Reibung verursachte Unkosten	528
11.3.2.1	Vereinfachter Ausdruck für den Druckverlust ohne Berücksichtigung der Energieverluste am Ein- und am Auslauf	531
11.3.2.2	Durch Reibung verursachte Unkosten unter Berücksichtigung der Verluste beim Ein- und Austritt der Fluida aus dem Austauscher	535
11.3.3	Durch endlichen Temperaturunterschied zwischen den Fluida verursachte Unkosten	537
11.4	Unkosten des eigentlichen Wärmeaustauschers	541
	Literatur zu Kapitel 11	541

Kapitel 12 Rechnerische Verfahren zum wirtschaftlichen Dimensionieren und Optimieren

12.1	Wärmeaustauscher in Anlagen mit Einfluß auf Energiegewinnung und ohne Einschränkungen und Vorschriften	544
12.1.1	Wärmeübergangskoeffizient, auf der Seite des einen Fluids veränderlich mit der Belastung, auf der anderen konstant, bei veränderlichen Dimensionen des Wärmeaustauschers. Die Exergieverluste infolge Reibung werden nur für das Fluid mit veränderlichem Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt	544
12.1.1.1	Keine Verluste am Ein- und Austritt	544
12.1.1.2	Mit Berücksichtigung der Energie Verluste am Ein- und Auslauf der Rohre	545
12.1.2	Wärmeübergangskoeffizient beider Fluida veränderlich	552
12.1.2.1	Reiner Gegenstrom	553
12.1.2.2	Reiner Kreuzstrom und gemischte Führung	554
12.2	Wärmeaustauscher in Anlagen mit Einfluß auf Energiegewinnung und mit Einschränkungen und Vorschriften	554
12.2.1	Allgemeines	554
12.2.2	Beschränkung der Rohrlänge	555
12.2.3	Beschränkung des mittleren Temperaturunterschiedes	557
12.2.4	Beschränkung der mittleren Geschwindigkeit	557
12.2.5	Vorgeschriebener Druckverlust	558
12.3	Wärmeaustauscher in Anlagen ohne Einfluß auf Energiegewinnung und mit Einschränkungen und Vorschriften	559
12.4	Anwendung von in Serie hergestellten Wärmeaustauschern	559
12.4.1	Vollständig in Serie hergestellte Wärmeaustauscher	560
12.4.2	Wärmeaustauscher, die teilweise in Serie hergestellt werden	561
12.5	Verbesserte und fertigungsgerechtere Optimierung im Anschluß an Abschnitt 11.1.4	562
12.6	Optimierungsprobleme beim Entwurf von Wärmeaustauschern	571
12.7	Einfluß falscher Berechnungsunterlagen auf die Optimierung	572
	Literatur zu Kapitel 12	575

Vierter Teil: Konstruktion

Kapitel 13 Einige Gesichtspunkte aus der Konstruktionssystematik

13.1	Über das Wesen der Konstruktionssystematik	577
13.2	Präzisierung der Aufgabenstellung	578
13.3	Der Ausführung dienendes Grundprinzip	580
13.4	Dem Grundprinzip dienende Arbeitsprinzipien	583
13.5	Bewertung der verschiedenen Arbeitsprinzipien	585
	Literatur zu Kapitel 13	593

Kapitel 14 Allgemeine Gesichtspunkte zur Formgebung beim Konstruieren

14.1	Berücksichtigung der Normen bei der Formgebung	594
14.2	Einfluß des Funktionellen auf die Formgebung	594
14.2.1	Einfluß der Festigkeit (mechanischen, thermischen und chemischen) auf die Formgebung	594
14.2.2	Berücksichtigung der Strömungstechnik und des Wärmeüberganges bei der Formgebung	604
14.3	Berücksichtigung der Fertigung bei der Formgebung	606
14.3.1	Plastisches Verformen des Werkstoffes bei der Fertigung	606
14.3.2	Schweißen	609
14.3.3	Löten	610
14.3.4	Spanabhebende Bearbeitung des Werkstoffes	611
14.4	Berücksichtigung von Montage, Betrieb und Wartung bei der Formgebung	612
14.4.1	Montage	612
14.4.2	Betrieb und Wartung	613
	Literatur zu Kapitel 14	614

Kapitel 15 Werkstoffe und ihre Anwendung

15.1	Wichtige Eigenschaften der Werkstoffe für den Bau von Wärmeaustauschern	615
15.2	Werkstoffe mit günstigen Festigkeitseigenschaften	616
15.2.1	Werkstoffe mit günstigen Festigkeitseigenschaften bei Temperaturschwankungen	616
15.2.2	Werkstoffe mit günstigen Festigkeitseigenschaften bei niedrigen Temperaturen	617
15.2.3	Werkstoffe mit günstigen Festigkeitseigenschaften bei hohen Temperaturen und beim Kriechen	618
15.2.4	Erosions- und kavitationsbeständige Werkstoffe - Kavitation	621
15.3	Korrosionsbeständige Werkstoffe als Grundwerkstoffe und als Schutzschichten	624
15.3.1	Allgemeines und theoretische Vorstellungen	624
15.3.2	Korrosionsfeste Werkstoffe bei gegebenen aggressiven Fluida	627
15.3.3	Korrosionsschutz	628
15.4	Werkstoffe mit günstigen Fertigungseigenschaften	635
15.4.1	Werkstoffe mit günstigen Fertigungseigenschaften in bezug auf die Kalt- und Warmverformung	635
15.4.2	Werkstoffe mit günstigen Eigenschaften für das Schweißen	636
	Literatur zu Kapitel 15	637

Kapitel 16 Bauelemente

16.1	Wärmeübertragende Wände	643
16.1.1	Unberippte Oberflächen	643
16.1.2	Vergrößerte Oberflächen durch Rippen und andere Elemente	650
16.2	Rohrbündel	659
16.2.1	Rohrbündel aus unberippten Rohren	659
16.2.2	Rohrbündel aus berippten Rohren	670
16.2.3	Halterung der Rohre und Führung des äußeren Fluids - Einfluß einer ungenauen Rohrteilung und einer ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung auf den Wärmeübergang	670
16.3	Übrige Bauelemente	678
16.3.1	Mantel und Deckel des Wärmeaustauschers	678
16.3.2	Flansche, Dichtungen und Packungen	680
16.3.3	Eintritts- und Austrittsstutzen	689
16.3.4	Umlenkammern bei mehrfachem Durchgang und Verteilerkammern	691
	Literatur zu Kapitel 16	693

Kapitel 17 Leitungen und Isolation

17.1	Zufluß- und Abflußleitungen	697
17.1.1	Wirtschaftlichster Durchmesser der Rohrleitungen	697
17.1.2	Festigkeitsberechnung von Rohrleitungssträngen	699
17.2	Isolation der Wärmeaustauscher und der Leitungen	706
17.2.1	Bestimmung des Wärmeverlustes einer isolierten Wand	711
17.2.2	Bestimmung der wirtschaftlichsten Isolierdicke bei einem Rohr	713
17.3	Dehnungselemente	716
17.3.1	Berechnungsbeispiele	725
17.3.1.1	Dimensionieren eines Wellrohrdehnungselements mit kleinstmöglicher Anzahl Wellen	725
17.3.1.2	Kontrollrechnung für ein schon entworfenes Wellrohrdehnungselement	728
17.4	Einbau von Dehnungselementen in Rohrleitungen	729
	Literatur zu Kapitel 17	733

Kapitel 18 Sonderbauarten und Serienapparate

18.1	Besondere konstruktive Merkmale	735
18.1.1	Führung der Fluida	735
18.1.1.1	Gegen-, Gleich-, Kreuz- und Kreuzgegenstrom	735
18.1.1.2	Geschwindigkeitserhöhung (Gangzahl, Leitbleche)	739
18.1.2	Besondere Herstellung	741
18.1.2.1	Ebene oder quasi ebene wärmeübertragende Flächen	741
18.1.2.2	Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche und des Wärmeüberganges	745
18.1.3	Werkstoffe	751
18.2	Besondere Anforderungen	762
18.2.1	Geometrische, mechanische und thermische	762
18.2.2	Physikalisch-chemische (Verkrustung und Korrosion)	762
18.3	Besondere Aufgaben	763
18.3.1	Vorwärmen und Kühlen	763
18.3.2	Verdampfen, Eindampfen und Eindicken	764
18.3.3	Kühlen oder Heizen von Schüttgütern und festen Stoffen	771
18.4	Besondere betriebliche Gegebenheiten und Wärmequellen	774

18.4.1 Billiger Dampf 774
 18.4.2 Ausnutzung der Brüden und Abwärmeverwertung 775
 18.4.2.1 Kaskadenschaltung 775
 18.4.2.2 Thermokompression 775
 18.4.2.3 Abwärmeverwertung 776
 18.4.3 Rücksichten auf aggressive und schmutzabsetzende Fluida 776
 18.5 Sonderausführungen 778
 18.5.1 Dünnschichtverdampfer 778
 18.5.2 Sonstige Apparate 783
 18.6 Serienapparate 789
 18.6.1 Normung der Benennung der Bauelemente von Rohrbündelwärmeaus-
 tauschern 791
 18.6.2 Normung von Bauelementen für Rohrbündelwärmeaustauscher 791
 18.6.3 Normung von Rohrbündel-Wärmeaustauschertypen 797
 18.6.4 Richtlinien für den Entwurf von in Serie herzustellenden Wärmeaustau-
 schern, die keine Rohrbündelwärmeaustauscher sind 801
 18.6.5 Einige Gedanken über die Normung im allgemeinen und von Wärmeaus-
 tauschern im besonderen 805
 Literatur zu Kapitel 18 806

Fünfter Teil: Betrieb von Wärmeaustauschern

Allgemeines 811

**Kapitel 19 Instationärer Betrieb von Wärmeaustauschern und Unterlagen für seine
 Regelung**

19.1 Einleitung 812
 19.2 Grundsätzliches 813
 19.3 Ableitung der Differentialgleichungen 815
 19.3.1 Berechnung der Wärmespeicherung in der wärmeübertragenden Wand . . 815
 19.3.1.1 Annahmen 815
 19.3.1.2 Berechnung für die ebene Wand konstanter Dicke 817
 19.3.1.3 Berechnung für eine kreiszylindrische Wand 817
 19.3.2 Eingliederung des Wärmeleitwiderstandes der Wand in die Wärmeüber-
 gangswiderstände zwischen Wand und Fluida 818
 19.3.2.1 Ebene Wand konstanter Dicke 818
 19.3.2.2 Kreiszyllindrische Wand 819
 19.3.3 Ableitung der Differentialgleichungen für die zeitliche und örtliche Ände-
 rung der Temperatur der Fluida 821
 19.3.3.1 Einleitung 821
 19.3.3.2 Annahmen 822
 19.3.3.3 Wärmeübergang durch erzwungene Konvektion auf beiden Seiten der
 wärmeübertragenden Wand und ohne Änderung des Aggregatzustandes
 der Fluida 824
 19.3.3.4 Wärmeübergang durch erzwungene Konvektion auf einer Seite der Wand,
 durch Kondensation oder Verdampfung auf der anderen Seite der Wand . 832
 19.3.3.5 Ort- und zeitabhängiger Wärmeübergang durch erzwungene Konvektion
 auf der einen Seite der Wand und durch orts- und zeitabhängige Heizung
 auf der anderen Seite der Wand 833
 19.4 Übergangsfunktion und Frequenzgang in der Regelungstechnik 834
 Literatur zu Kapitel 19 837

Kapitel 20 Messungen an Wärmeaustauschern

	Einleitung	841
20.1	Messungen am Wärmeaustauscher vor dessen Übergabe an den Kunden; gesetzlich vorgeschriebene Prüfungen und Überwachung während des Betriebes.	841
20.2	Abnahmeversuche bei der Inbetriebnahme zur Kontrolle der vom Hersteller des Apparates gegebenen Betriebsgarantien.	842
20.3	Messungen während des Betriebes und einige Gründe für Fehlmessungen	843
20.3.1	Extensive Größen.	844
20.3.1.1	Masse (Gewicht).	844
20.3.1.2	Massenstrom.	845
20.3.2	Intensive Größen.	848
20.3.2.1	Messung des Druckes - Wo und wie soll er gemessen werden?.	848
20.3.2.2	Messung der Temperatur.	851
	Literatur zu Kapitel 20.	855

Kapitel 21 Unterlagen zur Berechnung der Betriebsperiode bei periodischer Reinigung des Wärmeaustauschers

	Allgemeines.	857
21.1	Wärmedurchgangskoeffizient als Funktion der Zeit	858
21.2	Druckverlust A_p als Funktion der Zeit	861
21.3	Experimentelle Bestimmung der linearen Zeitfunktionen des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Druckverlustes aus den Meßergebnissen der ersten Betriebsperiode.	862
21.3.1	Lineare Zeitfunktion des Wärmedurchgangskoeffizienten	862
21.3.2	Lineare Zeitfunktion des Druckverlustes.	863
	Literatur zu Kapitel 21.	869

Kapitel 22 Berechnung der Betriebsperiode bei periodischer Reinigung des Wärmeaustauschers

	Einleitung	870
22.1	Wärmeaustauscher mit Einfluß auf die Energiegewinnung einer Anlage, jedoch bei gleichbleibender Leistung der Wärmeübertragung.	870
22.2	Wärmeaustauscher in Anlagen ohne Einfluß auf Energiegewinnung, bei gleichbleibender Leistung der Wärmeübertragung	881
22.3	Wann ist ein Reservewärmeaustauscher notwendig ?.	883

Kapitel 23 Reinigungsmethoden und Methoden des Reinhaltens des Wärmeaustauschers

23.1	Reinigung während des Betriebes des Wärmeaustauschers.	886
23.2	Reinhaltens des Wärmeaustauschers während des Betriebes.	890
23.3	Reinigung des Wärmeaustauschers in der Betriebspause.	891
23.3.1	Mechanische Reinigungsverfahren.	891
23.3.2	Chemische Reinigungsverfahren	893
	Literatur zu Kapitel 23	894

Kapitel 24 Einige Betriebserfahrungen an Wärmeaustauschern

24.1	Konstruktion, Herstellung und Montage	896
24.2	Betrieb und Unterhalt der Anlage - Korrosionsfragen	898
24.3	Einflüsse der Umgebung: Kühlwasser, Luft, Frost und Lebewesen	903
	Literatur zu Kapitel 24	905
	Allgemeine Zahlentafeln	907
	Umrechnungsfaktoren	926
	Zahlentafeln zu Seite 240.	932 u. 933
	Namenverzeichnis	934
	Sachverzeichnis	941