

# 1 Das Handbuch: Inhalt und Nutzung

## 1.1 Nutzungshinweise

Das FDBR-Handbuch Wärme- und Strömungstechnik wurde erstellt als Arbeitshilfe zur wärme- und strömungstechnischen Berechnung und Auslegung von Anlagen und Komponenten.

Die einzelnen Kapitel des Handbuchs werden vom FDBR– im Ergebnis der Konsultationen im FDBR-Lenkungsgremium Wärme- und Strömungstechnik – regelmäßig überarbeitet und aktualisiert.

Die aktuellen Kapitel werden mit jeweils gültigem Ausgabedatum ausschließlich als pdf-Dateien unter [www.fdbbr.de](http://www.fdbbr.de) zur Verfügung gestellt.

Nach Neuveröffentlichung eines Kapitels verlieren Veröffentlichungen dieses Kapitels mit älterem Ausgabedatum ihre Gültigkeit.

Das FDBR-Handbuch Wärme- und Strömungstechnik steht grundsätzlich allen Mitarbeitern aus FDBR-Mitgliedsunternehmen zur Nutzung zur Verfügung.

Da in diesem Handbuch Erfahrungen von Mitgliedsfirmen des FDBR verarbeitet sind und es unter erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand der beteiligten Firmen und des FDBR erarbeitet wurde, ist eine Weitergabe an Mitarbeiter aus Unternehmen, die nicht Mitglied des FDBR sind, nicht zulässig.

Der FDBR e. V. Fachverband Anlagenbau und alle in seinem Namen handelnden Personen übernehmen weder Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit des Inhalts dieses Handbuchs noch jegliche Haftung für Schäden, die sich aus seiner Anwendung ergeben könnten.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Um alle Nutzer dieses Handbuchs über neue oder aktualisierte Inhalte informieren zu können und ihnen so die zeitnahe Nutzung dieser Inhalte zu ermöglichen, behält sich der FDBR eine namentliche Registrierung aller an der Nutzung des Handbuchs interessierten Mitarbeiter aus FDBR-Mitgliedsunternehmen vor.

Für eine Registrierung als Nutzer des Handbuchs wenden Sie sich unter Angabe Ihres Namens, Ihres Unternehmens und Ihrer Mailadresse an den FDBR.

© FDBR e. V.  
Fachverband Anlagenbau  
Sternstraße 36  
D-40479 Düsseldorf

Dipl.-Ing. Bernd Hausmann  
T: +49/(0)211/49870-35  
F: +49/(0)211/49870-36  
@: [b.hausmann@fdbbr.de](mailto:b.hausmann@fdbbr.de)



## 1.2 Inhaltsübersicht

Fehler! Word kann die Datei nicht öffnen. Der entsprechende Verweis befindet sich auf Seite 1

<b>1</b>	<b>Das Handbuch: Inhalt und Nutzung</b>
1.1	Nutzungshinweise
1.2	Inhaltsübersicht
1.3	Inhaltsverzeichnis
<b>2</b>	<b>Einheiten</b>
2.1	Einleitung
2.2	SI-Einheiten
2.3	Einheiten außerhalb des SI
2.4	Schrifttum
<b>3</b>	<b>Verbrennung</b>
3.1	Einleitung
3.2	Formelzeichen
3.3	Elementare Zusammensetzung eines Brennstoffs
3.4	Statistische Zusammensetzung eines Brennstoffs
3.5	Verbrennungsrechnung
3.6	Verbrennung von chlor- und fluorhaltigen Brennstoffen
3.7	Direktentschwefelung
3.8	Verbrennung mehrerer Brennstoffe
3.9	Schrifttum
<b>4</b>	<b>Stoffwerte</b>
4.1	Einleitung
4.2	Formelzeichen
4.3	Ideales Gas
4.4	Gemische idealer Gase
4.5	Luft
4.6	Rauchgas
4.7	Reale Gase
4.8	Gemische realer Gase
4.9	Physikalische Eigenschaften fester Brennstoffe
4.10	Physikalische Eigenschaften flüssiger Brennstoffe
4.11	Physikalische Eigenschaften gasförmiger Brennstoffe
4.12	Physikalische Eigenschaften von Asche und Zuschlagstoffen
4.13	Schrifttum
<b>5</b>	<b>Ähnlichkeitskennzahlen der Wärme- und Strömungstechnik</b>
5.1	Reynolds-Zahl
5.2	Froude-Zahl
5.3	Prandtl-Zahl
5.4	Nußelt-Zahl
5.5	Biot-Zahl
5.6	Peclet-Zahl
5.7	Grashof-Zahl
<b>7</b>	<b>Wärmeübergang</b>
7.1	Einleitung

- 
- 7.2 Formelzeichen
  - 7.3 Wärmestrahlung
  - 7.4 Wärmeübergang durch Konvektion an Wasser, Wasser/Dampf und Dampf in beheizten Rohren
  - 7.5 Wärmeübergang durch Konvektion an Gase in Rohren und Kanälen und im Ringspalt
  - 7.6 Wärmeübergang durch Konvektion an quer angeströmten Glattrohren
  - 7.7 Wärmeübergang durch Konvektion an quer angeströmten Rippenrohrbündeln
  - 7.8 Wärmeübergang bei freier Konvektion
  - 7.9 Wärmeübergang beim Behältersieden (Sieden bei freier Konvektion)
  - 7.10 Wärmeübergang durch Kondensation
  - 7.11 Literaturverzeichnis
- 8 [ohne Inhalt]**
- 10 Dampfkesselanlagen**
- 10.1 Formelzeichen
  - 10.2 Einleitung
  - 10.3 Wasserrohrkessel mit Naturumlauf- oder Zwangumlaufverdampfern
  - 10.4 Energie- und Massenbilanzen
  - 10.5 Temperaturen in Flossenrohrwänden bei einseitiger Beheizung durch Strahlung
  - 10.6 Literaturverzeichnis

## **1.3 Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Das Handbuch: Inhalt und Nutzung .....</b>	<b>1.1-1</b>
1.1	Nutzungshinweise .....	1.1-1
1.2	Inhaltsübersicht .....	1.2-1
1.3	Inhaltsverzeichnis .....	1.3-1
<b>2</b>	<b>Einheiten .....</b>	<b>2-1</b>
2.1	Einleitung .....	2.1-1
2.2	SI-Einheiten .....	2.2-1
2.2.1	Allgemeines .....	2.2-1
2.2.2	SI-Basiseinheiten .....	2.2-1
2.2.3	Abgeleitete SI-Einheiten .....	2.2-1
2.2.4	Vorsätze und Vorsatzzeichen .....	2.2-2
2.3	Einheiten außerhalb des SI .....	2.3-1
2.3.1	Einheiten, die gemeinsam mit SI-Einheiten benutzt werden können .....	2.3-1
2.3.2	Nicht mehr anzuwendende Einheiten .....	2.3-1
2.3.3	Angloamerikanische Einheiten .....	2.3-2
2.4	Schrifttum .....	2.4-1
<b>3</b>	<b>Verbrennung .....</b>	<b>3-1</b>
3.1	Einleitung .....	3.1-1
3.2	Formelzeichen .....	3.2-1
3.3	Elementare Zusammensetzung eines Brennstoffs .....	3.3-1
3.3.1	Feste und flüssige Brennstoffe .....	3.3-1
3.3.2	Gasförmige Brennstoffe (Brenngase) .....	3.3-1
3.4	Statistische Zusammensetzung eines Brennstoffs .....	3.4-1
3.4.1	Statistische Zusammensetzung (C, H, O, N, S) .....	3.4-1
3.4.2	Angepasste statistische Brennstoffzusammensetzung für saures Erdgas .....	3.4-2
3.5	Verbrennungsrechnung .....	3.5-1
3.5.1	Sauerstoffträger .....	3.5-1
3.5.2	Stöchiometrische Verbrennungsgleichungen .....	3.5-2
3.5.2.1	Brennstoffmassenbezogene Luft- und Rauchgasmasse .....	3.5-2
3.5.2.2	Brennstoffmassenbezogenes Luft- und Rauchgasvolumen .....	3.5-3
3.5.3	Verbrennungsgleichungen mit Luftüberschuss .....	3.5-4
3.5.3.1	Brennstoffmassenbezogene Luft- und Rauchgasmasse .....	3.5-4
3.5.3.2	Rauchgaszusammensetzung in Massenanteilen .....	3.5-5
3.5.3.3	Brennstoffmassenbezogenes Luft- und Rauchgasvolumen .....	3.5-5
3.5.3.4	Rauchgaszusammensetzung in Volumenanteilen .....	3.5-6
3.5.4	Bestimmung des Luftverhältnisses aus der Rauchgasanalyse .....	3.5-6
3.5.5	Bestimmung des Luftverhältnisses und des Sauerstoffverhältnisses bei Rauchgasrezirkulation .....	3.5-8
3.6	Verbrennung von chlor- und fluorhaltigen Brennstoffen .....	3.6-1
3.7	Direktentschwefelung .....	3.7-1
3.7.1	Allgemeines .....	3.7-1
3.7.2	Brennstoffmassenbezogene Luft- und Rauchgasmasse .....	3.7-2
3.7.3	Brennstoffmassenbezogenes Luft- und Rauchgasvolumen .....	3.7-3
3.7.4	Bestimmung der Verbrennungsparameter aus der Rauchgasanalyse .....	3.7-4
3.8	Verbrennung mehrerer Brennstoffe .....	3.8-1

3.9	Schrifttum .....	3.9-1
Anhang A	Koeffizienten der statistischen Brennstoffzusammensetzung.....	A-1
Anhang B	Brennstoffanalysen .....	B-1
B.1	Erdgase/Erdölgase .....	B-1
B.2	Industriegase (wasserfrei) .....	B-3
B.3	Flüssigkeiten .....	B-5
B.4	Laugen (Cellulosegewinnung).....	B-6
B.5	Kohlen.....	B-7
B.6	Biomasse und weitere feste Brennstoffe.....	B-10
Anhang C	Heizwert und Brennwert.....	C-1
C.1	Zusammenhang zwischen Heizwert und Brennwert.....	C-1
C.2	Umrechnung von Bezugszustand "roh" auf "wasser- und aschefrei" .....	C-1
C.3	Umrechnung auf eine andere Bezugstemperatur .....	C-1
C.4	Heizwert und Brennwert von Gasmischen.....	C-1
C.5	Beziehung zwischen massen-, volumen- und stoffmengenbezogenem Brennwert / Heizwert.....	C-2
Anhang D	SO <sub>3</sub> -Korrektur des Aschegehaltes bei Wirbelschichtanlagen .....	D-1
<b>4</b>	<b>Stoffwerte.....</b>	<b>4-1</b>
4.1	Einleitung.....	4.1-1
4.1.1	Normzustand, Bezugszustand.....	4.1-1
4.1.2	FDBR-Referenzwerte, berechnete Stoffwerte .....	4.1-1
4.2	Formelzeichen.....	4.2-1
4.3	Ideales Gas.....	4.3-1
4.3.1	Thermische Zustandsgleichung .....	4.3-1
4.3.2	Spezifische kalorische Zustandsgrößen .....	4.3-1
4.3.3	Dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Prandtl-Zahl .....	4.3-2
4.4	Gemische idealer Gase.....	4.4-1
4.4.1	Allgemeines, Anwendungsbereich .....	4.4-1
4.4.2	Molare Masse, spezifische Gaskonstante, Dichte.....	4.4-1
4.4.3	Spezifische Wärmekapazität und spezifische Enthalpie .....	4.4-2
4.4.4	Dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Prandtl-Zahl .....	4.4-2
4.5	Luft .....	4.5-1
4.5.1	Allgemeines .....	4.5-1
4.5.2	Luftfeuchtigkeit, relative Luftfeuchte.....	4.5-1
4.5.3	Molare Masse, spezifische Gaskonstante, Dichte.....	4.5-3
4.5.4	Spezifische Wärmekapazität und spezifische Enthalpie.....	4.5-3
4.5.5	Dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und Prandtl-Zahl .....	4.5-5
4.6	Rauchgas.....	4.6-1
4.6.1	Vereinfachte Rauchgaszusammensetzung .....	4.6-1
4.6.2	Molare Masse, spezifische Gaskonstante, spezifisches Normvolumen .....	4.6-2
4.6.3	Spezifische Wärmekapazität und spezifische Enthalpie.....	4.6-2
4.6.4	Dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Prandtl-Zahl .....	4.6-3
4.6.5	Fehlerbetrachtung .....	4.6-3
4.7	Reale Gase .....	4.7-1

4.7.1	Thermische Zustandsgleichung .....	4.7-1
4.7.2	Realgasfaktor .....	4.7-1
4.7.3	Zustandsgrößen .....	4.7-2
4.7.4	Dampfdruckkurve, azentrischer Faktor .....	4.7-5
4.7.5	Dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit .....	4.7-7
4.8	Gemische realer Gase .....	4.8-1
4.8.1	Allgemeines .....	4.8-1
4.8.2	Molare Masse, Molanteil, Masseanteil .....	4.8-1
4.8.3	Pseudokritische Daten .....	4.8-1
4.8.4	Partialdruck .....	4.8-2
4.8.5	Kondensation .....	4.8-3
4.8.6	Dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit .....	4.8-5
4.9	Physikalische Eigenschaften fester Brennstoffe .....	4.9-1
4.9.1	Dichte, Schüttdichte .....	4.9-1
4.9.2	Spezifische Wärmekapazität .....	4.9-2
4.9.3	Siebanalyse .....	4.9-5
4.9.4	Immediatanalyse, Fixer Kohlenstoff, Flüchtige Bestandteile, Heizwert .....	4.9-6
4.10	Physikalische Eigenschaften flüssiger Brennstoffe .....	4.10-1
4.10.1	Heizwert, Dichte .....	4.10-1
4.10.2	Spezifische Wärmekapazität .....	4.10-1
4.10.3	Kinematische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Ausdehnungskoeffizient .....	4.10-2
4.10.4	Mindestanforderungen an Heizöl .....	4.10-4
4.11	Physikalische Eigenschaften gasförmiger Brennstoffe .....	4.11-1
4.11.1	Brennwert, Heizwert .....	4.11-1
4.11.2	Dichte, Wobbewert .....	4.11-1
4.11.3	Spezifische Wärmekapazität .....	4.11-2
4.11.4	Dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit .....	4.11-2
4.11.5	Dampfdruck .....	4.11-3
4.12	Physikalische Eigenschaften von Asche und Zuschlagstoffen .....	4.12-1
4.12.1	Schüttdichte, Kornverteilung .....	4.12-1
4.12.2	Spezifische Wärmekapazität .....	4.12-3
4.13	Schrifttum .....	4.13-1
Anhang A	Stoffwerte, FDBR-Referenzwerte .....	A-1
A.1	Molare Gaskonstante, molares Normvolumen idealer Gase, relative Atommassen der Elemente .....	A-1
A.2	Stoffwerte einiger reiner Stoffe .....	A-2
A.3	Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf .....	A-9
A.4	Trockene Luft .....	A-10
A.5	Stoffwerte einiger reiner Stoffe als Funktion der Temperatur .....	A-11
A.6	Stoffwerte von Luft als Funktion der Temperatur .....	A-19
A.7	Stoffwerte von Bau- und Dämmstoffen .....	A-20
Anhang B	Koeffizienten und Konstanten der Näherungsgleichungen .....	B-1
B.1	Reine Stoffe .....	B-1
B.2	Luft, Rauchgas .....	B-4
B.3	Reale Gase (Kapitel 4.7) .....	B-5
B.4	spezifische Wärmekapazität von Asche (Kapitel 4.12.3) .....	B-7

Anhang C	Iterative Lösung der Gleichung von Lee und Kesler .....	C-1
Anhang D	Zusammenhänge zwischen den kalorischen Zustandsgrößen.....	D-1
D.1	Ideale Gase.....	D-1
D.2	Reale Gase .....	D-2
Anhang E	Umgebungs Zustand der Luft.....	E-1
Anhang F	Bestimmung der relativen Feuchte (Sprung'sche Formel) .....	F-1
<b>5</b>	<b>Ähnlichkeitskennzahlen der Wärme- und Strömungstechnik.....</b>	<b>1</b>
5.1	Reynolds-Zahl.....	1
5.2	Froude-Zahl .....	1
5.3	Prandtl-Zahl .....	1
5.4	Nußelt-Zahl.....	1
5.5	Biot-Zahl.....	1
5.6	Peclet-Zahl.....	1
5.7	Grashof-Zahl.....	1
<b>7</b>	<b>Wärmeübergang .....</b>	<b>7-1</b>
7.1	Einleitung.....	7.1-1
7.2	Formelzeichen.....	7.2-1
7.3	Wärmestrahlung.....	7.3-1
7.3.1	Strahlungseigenschaften .....	7.3-1
7.3.2	Strahlung des Schwarzen Körpers .....	7.3-1
7.3.3	Strahlung diffus-grauer Oberflächen .....	7.3-2
7.3.3.1	Emissionsgrad.....	7.3-2
7.3.3.2	Absorptionsgrad.....	7.3-2
7.3.3.3	Reflexionsgrad.....	7.3-3
7.3.3.4	Absorptionsgrad verschiedener Oberflächen .....	7.3-3
7.3.4	Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen .....	7.3-4
7.3.4.1	Einstrahlzahlen.....	7.3-4
7.3.4.2	Einstrahlung in ein Rohrbündel .....	7.3-4
7.3.4.3	Einstrahlung in Rohre vor einer gemauerten Feuerraumwand .....	7.3-6
7.3.4.4	Örtliche und mittlere Einstrahlung in Rohrreihe und Flossenrohrwand .....	7.3-7
7.3.4.5	Bilanzgleichungen nach der Netto-Strahlungsmethode.....	7.3-9
7.3.5	Gasstrahlung .....	7.3-10
7.3.5.1	Gleichwertige Schichtdicke .....	7.3-10
7.3.5.2	Strahlungseigenschaften .....	7.3-13
7.3.5.3	Gasstrahlung von Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf .....	7.3-14
7.3.5.4	Gasstrahlung nach dem Bandenmodell.....	7.3-22
7.3.6	Strahlungsaustausch zwischen Gas und Begrenzungswänden.....	7.3-28
7.3.6.1	Bilanzgleichungen nach der Netto-Strahlungsmethode.....	7.3-28
7.3.6.2	Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung.....	7.3-28
7.3.6.3	Vereinfachte Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten .....	7.3-29
7.3.7	Kombinierte Staub- und Gasstrahlung.....	7.3-33
7.3.7.1	Staubstrahlung .....	7.3-33
7.3.7.2	Absorption und Rückstreuung .....	7.3-35
7.3.7.3	Optische Dichte.....	7.3-35
7.3.7.4	Staubstrahlung bei einer Korngrößenverteilung .....	7.3-38
7.3.7.5	Mischung verschiedener Staubarten .....	7.3-39
7.3.7.6	Kombinierte Staub- und Gasstrahlung.....	7.3-40
7.3.7.7	Strahlungsaustausch zwischen Staub-Gas-Gemisch und Wand .....	7.3-41
7.3.8	Flammenstrahlung .....	7.3-43
7.3.9	Einfaches Feuerraummodell, Allgemeines .....	7.3-44



7.3.9.1	Einleitung.....	7.3-44
7.3.9.2	Modellbeschreibung, Randbedingungen.....	7.3-44
7.3.9.3	Einstrahlzahl, gleichwertige Schichtdicke .....	7.3-45
7.3.9.4	Zugeführte Energie, adiabate Verbrennungstemperatur .....	7.3-45
7.3.10	Einfaches Feuerraummodell für quaderförmige Feuerräume .....	7.3-45
7.3.10.1	Energiebilanz .....	7.3-45
7.3.10.2	Bestimmung der Flammen-/Rauchgastemperaturen.....	7.3-46
7.3.10.3	Abschätzung der mittleren Flammen-/Rauchgastemperaturen .....	7.3-47
7.3.10.4	Strahlungsaustauschkoeffizienten.....	7.3-48
7.3.11	Einfaches Feuerraummodell für rotationssymmetrische Feuerräume.....	7.3-49
7.3.11.1	Energiebilanz .....	7.3-49
7.3.11.2	Bestimmung der Flammen-/Rauchgastemperaturen.....	7.3-49
7.3.11.3	Modell von Hertel.....	7.3-49
7.4	Wärmeübergang durch Konvektion an Wasser, Wasser/Dampf und Dampf in beheizten Rohren.....	7.4-1
7.4.1	Einführung .....	7.4-1
7.4.1.1	Wärmeübergangsbereiche.....	7.4-1
7.4.1.2	Kritische Siedezustände (Siedekrise).....	7.4-3
7.4.2	Konvektiver einphasiger Wärmeübergang .....	7.4-4
7.4.2.1	Kennzahlen .....	7.4-4
7.4.2.2	Laminare Strömung .....	7.4-4
7.4.2.3	Turbulente Strömung .....	7.4-6
7.4.2.4	Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung .....	7.4-6
7.4.2.5	Einfluss der temperaturabhängigen Stoffwerte.....	7.4-6
7.4.2.6	Grenzen der Anwendbarkeit .....	7.4-7
7.4.3	Wärmeübergang beim unterkühlten Sieden.....	7.4-7
7.4.4	Blasensieden und konvektives Sieden .....	7.4-8
7.4.4.1	Blasensieden .....	7.4-8
7.4.4.2	Konvektives Sieden .....	7.4-9
7.4.4.3	Gesamter Wärmeübergang .....	7.4-10
7.4.5	Siedekrise.....	7.4-10
7.4.5.1	Senkrechte Rohre.....	7.4-11
7.4.5.2	Geneigte bis waagerechte Rohre.....	7.4-23
7.4.6	Wärmeübergang nach der Siedekrise.....	7.4-23
7.4.6.1	Filmsieden.....	7.4-24
7.4.6.2	Austrocknung (Post-Dryout).....	7.4-24
7.4.7	Zusammenfassung .....	7.4-27
7.5	Wärmeübergang durch Konvektion an Gase in Rohren und Kanälen und im Ringspalt 7.5- 1	
7.5.1	Wärmeübergangskoeffizient.....	7.5-1
7.5.2	Vereinfachte Berechnung .....	7.5-1
7.5.2.1	Allgemeines .....	7.5-1
7.5.2.2	Trockene Luft .....	7.5-2
7.5.2.3	Rauchgas und feuchte Luft .....	7.5-2
7.5.3	Turbulente Strömung im Ringspalt.....	7.5-3
7.6	Wärmeübergang durch Konvektion an quer angeströmten Glattrohren .....	7.6-1
7.6.1	Wärmeübergangskoeffizient.....	7.6-1
7.6.1.1	Einzelrohr .....	7.6-1
7.6.1.2	Rohrbündel .....	7.6-1
7.6.2	Vereinfachte Berechnung .....	7.6-5
7.6.2.1	Allgemeines .....	7.6-5

7.6.2.2	Einzelrohr .....	7.6-5
7.6.2.3	Rohrbündel .....	7.6-5
7.6.2.4	Trockene Luft .....	7.6-6
7.6.2.5	Rauchgas und feuchte Luft .....	7.6-6
7.7	Wärmeübergang durch Konvektion an quer angeströmten Rippenrohrbündeln.....	7.7-1
7.7.1	Allgemeines .....	7.7-1
7.7.2	Geometrie .....	7.7-2
7.7.2.1	Rippenrohrbereiche.....	7.7-2
7.7.2.2	Spezifische Heizflächen.....	7.7-2
7.7.2.3	Kreisrippen (Vollrippen).....	7.7-2
7.7.2.4	Spiralrippen (Vollrippen).....	7.7-2
7.7.2.5	Rechteckrippen (Vollrippen) .....	7.7-3
7.7.2.6	Segmentierte Spiralrippen.....	7.7-3
7.7.3	Rauchgasquerschnitt .....	7.7-3
7.7.4	Wärmeübergangskoeffizient und Wärmedurchgangskoeffizient.....	7.7-4
7.7.4.1	Allgemeines .....	7.7-4
7.7.4.2	Spiral-, Kreis- und Rechteckrippen (Vollrippen).....	7.7-5
7.7.4.3	Segmentierte Spiralrippen.....	7.7-5
7.7.5	Rippentemperaturen.....	7.7-6
7.7.6	Rippenwirkungsgrad und Kopfwirkungsgrad.....	7.7-7
7.7.6.1	Allgemeines .....	7.7-7
7.7.6.2	Spiral-, Kreis- und Rechteckrippen (Vollrippen).....	7.7-7
7.7.6.3	Segmentierte Spiralrippen.....	7.7-8
7.8	Wärmeübergang bei freier Konvektion .....	7.8-1
7.8.1	Allgemeines .....	7.8-1
7.8.2	Waagerechte Rohre.....	7.8-1
7.8.3	Senkrechte Wand .....	7.8-2
7.8.4	Vereinfachte Berechnung .....	7.8-2
7.8.4.1	Allgemeines .....	7.8-2
7.8.4.2	Wärmeübergang an waagerechte Rohre - Wasser nahe der Siedelinie.....	7.8-3
7.8.4.3	Wärmeübergang an waagerechte Rohre - trockene Luft .....	7.8-3
7.8.4.4	Wärmeübergang an senkrechter Wand - trockene Luft .....	7.8-4
7.9	Wärmeübergang beim Behältersieden (Sieden bei freier Konvektion) .....	7.9-1
7.10	Wärmeübergang durch Kondensation.....	7.10-1
7.10.1	Filmkondensation reiner Dämpfe an senkrechten Rohren (Dampfschubspannung vernachlässigt) .....	7.10-1
7.10.1.1	Örtlicher Wärmeübergangskoeffizient.....	7.10-1
7.10.1.2	Mittlerer Wärmeübergangskoeffizient.....	7.10-2
7.10.2	Kondensation reiner Dämpfe an waagerechten Rohrbündeln .....	7.10-3
7.10.3	Kondensation eines Dampfes mit Inertgasanteil.....	7.10-3
7.11	Literaturverzeichnis .....	7.11-1
Anhang A	Testwerte für Computerprogramme.....	A-1
A.1	Testwerte zu Kapitel 7.3.5.3 und 7.3.6.2 .....	A-1
A.2	Testwerte zu Kapitel 7.3.5.4 .....	A-2
A.3	Testwerte zu Kapitel 7.7 .....	A-7
<b>8</b>	<b>[ohne Inhalt]</b> .....	<b>1</b>
<b>9</b>	<b>Strömung</b> .....	<b>9-1</b>
9.1	Formelzeichen.....	9-4

9.1.1	Lateinische Buchstaben .....	9-4
9.1.2	Griechische Buchstaben.....	9-6
9.1.3	Indizes .....	9-7
9.2	Einleitung.....	9-9
9.2.1	Randbedingungen .....	9-9
9.2.2	Bilanzgleichungen .....	9-9
9.2.2.1	Erhaltung der Masse .....	9-9
9.2.2.2	Impulserhaltung .....	9-10
9.2.2.3	Energieerhaltung.....	9-10
9.3	Flüssigkeits- oder Gasströmung in Rohren (Einphasenströmung) .....	9-12
9.3.1	Druckverlustberechnung .....	9-12
9.3.2	Gerade Rohre mit konstantem Querschnitt.....	9-12
9.3.3	Gekrümmte Rohre.....	9-17
9.3.3.1	Rohrbogen mit Kreisquerschnitt .....	9-17
9.3.3.2	Kniestücke mit Kreisquerschnitt.....	9-18
9.3.3.3	Rechteckkrümmer und –kniestücke.....	9-19
9.3.3.4	Aufeinanderfolgende Bögen und Krümmer.....	9-19
9.3.3.5	Schraubenförmig gewendelte Rohre.....	9-20
9.3.4	Rohre mit stetiger Querschnittsänderung.....	9-21
9.3.4.1	Querschnittserweiterung (Diffusor).....	9-21
9.3.4.2	Querschnittsverengung .....	9-23
9.3.5	Rohre mit unstetiger Querschnittsveränderung .....	9-24
9.3.5.1	Querschnittserweiterung .....	9-24
9.3.5.2	Querschnittsverengung .....	9-25
9.3.5.3	Eintritt und Austritt.....	9-25
9.3.6	Rohrverzweigung und –vereinigung.....	9-29
9.3.6.1	Allgemeines .....	9-29
9.3.6.2	T-Stücke mit recht- und schiefwinkligen Abzweigen.....	9-29
9.3.6.3	T-Verteiler-Stücke .....	9-36
9.3.6.4	Hosenstücke .....	9-36
9.3.7	Genormte Drosselgeräte .....	9-39
9.3.7.1	Allgemeines .....	9-39
9.3.7.2	Blenden und Düsen.....	9-39
9.3.7.3	Venturirohre und Venturidüsen .....	9-41
9.3.8	Drosselscheiben, Lochplatten und Drahtgitter.....	9-47
9.3.8.1	Öffnungsverhältnis, Reynolds-Zahl.....	9-47
9.3.8.2	Drosselscheiben und Lochplatten mit scharfen Öffnungskanten.....	9-47
9.3.8.3	Zwei hintereinander angeordnete Drosselscheiben.....	9-50
9.3.8.4	Drosselscheiben und Lochplatten mit gerundeten Kanten an den Öffnungen .....	9-51
9.3.8.5	Drosselscheiben mit einer konischen Erweiterung der Bohrung .....	9-51
9.3.8.6	Gitter .....	9-52
9.3.9	Absperrorgane.....	9-53
9.3.9.1	Allgemeines .....	9-53
9.3.9.2	Vollgeöffnete Ventile und Schieber.....	9-54
9.3.9.3	Teilgeöffnete Absperrorgane .....	9-55
9.4	Dampf-Flüssigkeitsströmung in Rohren (Zweiphasenströmung) .....	9-61
9.4.1	Allgemeines .....	9-61
9.4.2	Dampfanteil, Strömungsmodelle .....	9-61
9.4.2.1	Dampfanteil, weitere Grundbegriffe .....	9-61
9.4.2.2	Homogenes Zweiphasenströmungsmodell .....	9-62
9.4.2.3	Heterogenes Zweiphasenströmungsmodell .....	9-63
9.4.2.4	Vergleich der beiden Strömungsmodelle.....	9-63

9.4.3	Druckverlust .....	9-64
9.4.3.1	Druckverlustberechnung .....	9-64
9.4.3.2	Beschleunigungsdruckverlust .....	9-65
9.4.3.3	Geodätischer Druckverlust .....	9-65
9.4.3.4	Reibungsdruckverlust .....	9-66
9.4.3.5	Darstellung der Druckverlustanteile und Einfluss der Strömungsmodelle .....	9-67
9.4.4	Strömungsformen.....	9-69
9.4.4.1	Allgemeines .....	9-69
9.4.4.2	Horizontale Strömung.....	9-70
9.4.4.3	Vertikale Strömung.....	9-73
9.5	Druckverlust und Durchflussverteilung bei Einphasenströmung in Verteilern und Sammlern .....	9-75
9.5.1	Allgemeines .....	9-75
9.5.2	Kennzahlen .....	9-76
9.5.3	Axial angeströmter Verteiler, radial abgeströmter Sammler .....	9-77
9.5.4	Radial angeströmter Verteiler, axial abgeströmter Sammler .....	9-79
9.5.5	Verteiler und Sammler in U-Anordnung .....	9-81
9.5.6	Verteiler und Sammler in Z-Anordnung .....	9-85
9.5.7	System mit Durchflussverzweigung .....	9-91
9.6	Druckverlust in quer angeströmten Rohrbündeln .....	9-99
9.6.1	Glattrohrbündel.....	9-99
9.6.1.1	Widerstandsbeiwert .....	9-99
9.6.1.2	Laminarer Bereich .....	9-100
9.6.1.3	Turbulenter Bereich .....	9-100
9.6.1.4	Einfluss der temperaturabhängigen Stoffwerte.....	9-101
9.6.1.5	Einfluss der Anzahl der Rohrreihen.....	9-101
9.6.1.6	Schräge Anströmung.....	9-103
9.6.2	Rippenrohrbündel .....	9-104
9.6.2.1	Allgemeines .....	9-104
9.6.2.2	Kreisrippen, Spiralrippen, segmentierte Spiralrippen.....	9-105
9.6.2.3	Rechteckrippen .....	9-106
9.7	Schwingungen in Rauchgaskanälen mit Bündelheizflächen .....	9-109
9.7.1	Allgemeines .....	9-109
9.7.2	Erregerfrequenz, Eigenfrequenz .....	9-109
9.7.3	Beseitigung von Resonanzen .....	9-109
9.7.4	Bestimmung der Strouhal-Zahl.....	9-110
9.7.4.1	Strouhal-Diagramme.....	9-110
9.7.4.2	Näherungspolynome .....	9-112
9.8	Literaturverzeichnis .....	9-114
<b>Anhang 9.A Grenzkurven in Bild 9.4-6 .....</b>		<b>9-117</b>
<b>10</b>	<b>Dampfkesselanlagen .....</b>	<b>10-1</b>
10.1	Formelzeichen.....	10-3
10.1.1	Lateinische Buchstaben .....	10-3
10.1.2	Griechische Buchstaben.....	10-4
10.1.3	Indizes .....	10-4
10.2	Einleitung.....	10-6
10.3	Wasserrohrkessel mit Naturumlauf- oder Zwangumlaufverdampfern .....	10-7
10.3.1	Zulässige Druckabsenkungsgeschwindigkeit in Fallrohren.....	10-7
10.3.1.1	Naturumlaufkessel .....	10-7

10.3.1.2	Zwangumlaufkessel .....	10-8
10.3.2	Instationäre Vorgänge in einer Dampftrommel .....	10-8
10.3.2.1	Einleitung.....	10-8
10.3.2.2	Druck-, Temperatur und Massengradienten .....	10-9
10.3.3	Berechnung der Dampfraumbelastung und der Wasserspiegelbelastung in Trommeln ..	10-12
10.3.3.1	Anwendungsbereich.....	10-12
10.3.3.2	Dampfraumbelastung.....	10-12
10.3.3.3	Wirksamer Dampfraum .....	10-12
10.3.3.4	Wasserspiegelbelastung.....	10-13
10.3.3.5	Zulässige Dampfraumbelastung und zulässige Wasserspiegelbelastung.....	10-14
10.3.4	Wasserumlauf .....	10-15
10.3.4.1	Einleitung.....	10-15
10.3.4.2	Rohrkennlinien.....	10-17
10.3.4.3	Ermittlung der Wasserumlaufmengen .....	10-18
10.4	Energie- und Massenbilanzen.....	10-20
10.4.1	Berücksichtigung der Direktentschwefelung in der Energiebilanz.....	10-20
10.5	Temperaturen in Flossenrohrwänden bei einseitiger Beheizung durch Strahlung.....	10-22
10.5.1	Einleitung.....	10-22
10.5.2	Berechnung der Materialtemperaturen .....	10-22
10.5.2.1	Randbedingungen .....	10-22
10.5.2.2	Materialtemperaturgleichungen .....	10-23
10.5.3	Materialtemperaturen für ausgewählte Geometrien.....	10-29
10.5.4	Wärmespannung im Rohrscheitel .....	10-29
10.6	Literaturverzeichnis .....	10-36