



Leseprobe

Rudi Marek, Klaus Nitsche

Praxis der Wärmeübertragung

Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben

ISBN (Buch): 978-3-446-44499-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-44552-9

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44499-7>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

Die Wärmeübertragung gehört traditionell zu den eher als schwierig empfundenen Fächern im Studium des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik. Zum einen verlangt sie wie die Thermodynamik eine analytische und abstrakte Denkweise in Systemen, Systemgrenzen, Systemvariablen und Bilanzen, die den Studierenden zunächst schwer fällt. Die einzelnen Mechanismen der Wärmeübertragung sind zudem meist miteinander gekoppelt und teilweise nichtlinear. Zum anderen setzt die Lösung wärmetechnischer Fragestellungen die sichere und zielgerichtete Anwendung mathematischer Methoden voraus. Auch der heute weit verbreitete Einsatz von Computern und Programmen zur numerischen Berechnung und Simulation von Wärmetransportvorgängen verlangt fundierte Grundkenntnisse und den Einsatz analytischer Methoden zur Verifikation und Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse.

Für ein vertieftes Verständnis der Wärmeübertragung ist ein intensives Studium der Grundlagen und der Wärmeübertragungsmechanismen unerlässlich. Wie gut diese theoretischen Grundkenntnisse wirklich verstanden wurden, zeigt die erfolgreiche und zielorientierte Lösung praktischer Anwendungen und Aufgabenstellungen. Auf diesem teilweise beschwerlichen Weg will das vorliegende Werk, das auf den umfangreichen Lehrerfahrungen der Autoren an der Technischen Hochschule Deggendorf (THD) basiert, die Studierenden unterstützen und leiten. Die enthaltenen Beispiele und Aufgaben können gezielt zur Prüfungsvorbereitung und zur Nachbereitung von Vorlesungsinhalten genutzt werden. Gleichzeitig liefern sie auch Anregungen, Informationen und wertvolle Hinweise für in der Praxis tätige Ingenieure, Physiker und Techniker.

Während sich die 3. Auflage primär auf Korrekturen beschränkte, beinhaltet die vorliegende 4. Auflage zahlreiche weitergehende Präzisierungen und Ergänzungen (z. B. Wärmeeindringkoeffizient, Kontakttemperatur, flächenbezogene Wärme beim halbunendlichen Körper, Anwendung des ideal gerührten Behälters, Heisler-Diagramme, dimensionsloser Rippenparameter, Paketanalogue, eindimensionale stationäre thermische Modelle etc.), umfassende Arbeitshilfen im Anhang sowie im Umfang erweiterte MS Excel[®]-Codes und 10 zusätzliche Aufgaben zum Selbststudium mit Lösungen.

Dem Carl Hanser Verlag, insbesondere Frau *Ute Eckardt*, danken wir für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Unseren Lesern aus der Praxis sowie von anderen Hochschulen und Ausbildungseinrichtungen danken wir für das positive Feedback und die zahlreichen Hinweise und Anregungen zu den früheren Auflagen. Die Studierenden der Technischen Hochschule Deggendorf lieferten mit ihren Ideen, Fragen und fruchtbaren Diskussionen in unseren Lehrveranstaltungen und den Kursforen erneut wertvolle Beiträge. Besonderer Dank gilt dabei Herrn cand. bac. *Vincent Kramer* für seine zahlreichen zielführenden Hinweise und scharfsinnigen Ergänzungen. Für die Umsetzung der Internetrepräsentanz bedanken wir uns bei Herrn B.Eng. *Philipp Achatz*. Last but not least gebührt unseren Familien und Frauen, ohne deren Verzicht auch die 4. Auflage nicht möglich gewesen wäre, großer Dank.

Den Leserinnen und Lesern wünschen wir auch mit der 4. Auflage viele Erkenntnisgewinne und positive Aha-Erlebnisse. Für Fehlermeldungen, konstruktive Anregungen sowie Verbesserungsvorschläge sind wir stets dankbar.

Deggendorf, August 2015

Rudi Marek
Klaus Nitsche

»Longum iter est per praecepta,
breve et efficax per exempla.«
»Lang ist der Weg durch Lehren,
kurz und erfolgreich durch Beispiele.«

(L.A. Seneca, Epistulae morales ad Lucilium, 6)

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen der Wärmeübertragung	15
1.1 Praktische Bedeutung	15
1.2 Wärme, Wärmestrom, Wärmestromdichte	16
1.3 Temperatur und Temperaturfelder	17
1.4 Wärmetransportmechanismen	18
1.4.1 Arten des Wärmetransports	19
1.4.2 Wärmeleitung	19
1.4.3 Konvektion	20
1.4.4 Wärmestrahlung	21
1.5 Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung	22
1.5.1 Mehrdimensionale instationäre Wärmeleitung mit inneren Wärmequellen	22
1.5.2 Koordinatenunabhängige Schreibweise	23
1.5.3 Eindimensionale instationäre Wärmeleitung	23
1.5.4 Stationäre Wärmeleitung mit Wärmequellen	23
1.5.5 Stationäre Wärmeleitung ohne Wärmequellen	23
1.6 Anfangs- und Randbedingungen	24
1.6.1 Anfangsbedingungen	24
1.6.2 Randbedingungen	24
1.6.3 Koppelbedingungen	25
1.7 Elektrische Analogie	25
1.7.1 Thermische Widerstände und Leitwerte	26
1.7.2 Spezifische thermische Widerstände und Leitwerte	26
1.7.3 Wärmedurchgangskoeffizient und Wärmedurchgangswiderstand	27
1.7.4 Reihenschaltung thermischer Widerstände	27
1.7.5 Parallelschaltung thermischer Widerstände	28
1.7.6 Thermischer Kontaktwiderstand	28
1.7.7 3/4-Regel	28
1.8 Beispiele	29
1.9 Aufgaben zum Selbststudium	45
2 Massen- und Energiebilanzen	49
2.1 Grundlagen	49
2.1.1 System	49
2.1.2 Kontinuitätsgleichung	49
2.1.3 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	50
2.1.4 Hinweise zur Aufstellung von Energiebilanzen	57
2.1.5 Innere Energie und Enthalpie	59
2.1.6 Enthalpieströme	59
2.2 Beispiele	61
2.3 Aufgaben zum Selbststudium	94

3 Stationäre Wärmeleitung	99
3.1 Grundlagen	99
3.1.1 Péclet-Gleichungen für mehrschichtige Bauteile	99
3.1.2 Mehrschichtige ebene Platte	99
3.1.3 Zylinderschalen	99
3.1.4 Kugelschalen	100
3.1.5 Oberflächen- und Schichttemperaturen	101
3.1.6 Stationäre eindimensionale Wärmeleitung mit inneren Wärmequellen	101
3.1.7 Ebene Platte mit Wärmequellen	101
3.1.8 Vollzylinder und Zylinderschale mit Wärmequellen	101
3.1.9 Vollkugel und Kugelschale mit Wärmequellen	102
3.1.10 Stationäre zweidimensionale Wärmeleitung ohne innere Wärmequellen	102
3.2 Beispiele	106
3.3 Aufgaben zum Selbststudium	117
4 Rippen und Nadeln	120
4.1 Grundlagen	120
4.1.1 Kenngrößen von Rippen	120
4.1.2 Universelle Rippendifferenzialgleichung	121
4.1.3 Rechteckrippen	121
4.1.4 Zylindrische Nadeln	122
4.1.5 Kreisringrippen	122
4.1.6 Weitere Formen von Rippen und Nadeln	122
4.1.7 Optimale Rippen	124
4.1.8 Thermischer Widerstand von Rippen und Nadeln	124
4.2 Beispiele	125
4.3 Aufgaben zum Selbststudium	136
5 Instationäre Wärmeleitung	138
5.1 Grundlagen	138
5.1.1 Dimensionslose Kennzahlen	138
5.1.2 Dimensionslose Grundgleichung	139
5.1.3 Dimensionslose Anfangs- und Randbedingungen	140
5.1.4 Modelle der instationären Wärmeleitung	141
5.1.5 Ideal gerührter Behälter	143
5.1.6 Halbbunendlicher Körper	144
5.1.7 Exakte Lösung für Platte, Zylinder und Kugel	147
5.1.8 Näherungslösung für große Zeiten	149
5.1.9 Kurzzeitznäherung des erweiterten ideal gerührten Behälters für RB 3. Art	151
5.1.10 Produktansatz bei mehrdimensionaler Wärmeleitung	155
5.2 Beispiele	158
5.3 Aufgaben zum Selbststudium	181

6 Konvektion	185
6.1 Grundlagen	185
6.1.1 Arten von Konvektion	185
6.1.2 Ähnlichkeitstheorie und dimensionslose Kennzahlen	186
6.1.3 Erzwungene Konvektion	187
6.1.4 Längs angeströmte ebene Platte und Kreisscheibe	187
6.1.5 Quer und schräg angeströmte Zylinder und Profile	187
6.1.6 Quer angeströmte Profile	188
6.1.7 Umströmte Kugel	188
6.1.8 Einlaufproblematik bei der Rohr- und Kanalströmung	188
6.1.9 Vollständig ausgebildete laminare Rohrströmung	189
6.1.10 Thermischer Einlauf bei laminarer Rohrströmung	189
6.1.11 Hydrodynamischer und thermischer Einlauf bei laminarer Rohrströmung	190
6.1.12 Vollständig ausgebildete turbulente Rohrströmung	190
6.1.13 Ausgebildete Rohrströmung im Übergangsbereich	191
6.1.14 Nichtkreisförmige Querschnitte	191
6.1.15 Fluidtemperaturänderung in Strömungsrichtung	191
6.1.16 Freie Konvektion	192
6.1.17 Vertikale ebene Platte	193
6.1.18 Vertikaler Zylinder	193
6.1.19 Geneigte ebene Platte	193
6.1.20 Horizontale ebene Platte und Kreisscheibe	194
6.1.21 Horizontaler Zylinder	194
6.1.22 Kugel	194
6.1.23 Freie Konvektion in geschlossenen Fluidschichten	195
6.1.24 Horizontale ebene Schichten	195
6.1.25 Geneigte ebene Schichten	196
6.1.26 Vertikale ebene Schichten	196
6.1.27 Freie Konvektion in offenen Fluidschichten	197
6.1.28 Senkrechte Kanäle	197
6.1.29 Geneigte Kanäle	198
6.1.30 Parallele vertikale Platten	199
6.1.31 Mischkonvektion an umströmten Körpern	199
6.2 Beispiele	201
6.3 Aufgaben zum Selbststudium	214
7 Wärmeübertrager	216
7.1 Grundlagen	216
7.1.1 Begriffe und Nomenklatur	216
7.1.2 Bauformen von Wärmeübertragern	217
7.1.3 Einseitig konstante Fluidtemperatur	217
7.1.4 Beidseitige Temperaturänderung	218
7.1.5 Wärmeübertrager-Hauptgleichung	219
7.1.6 Gleichstrom-Wärmeübertrager	219
7.1.7 Gegenstrom-Wärmeübertrager	220
7.1.8 Kreuzstrom-Wärmeübertrager	221
7.1.9 Wärmewirkungsgrade von Wärmeübertragern	222
7.1.10 Korrekturfaktor	223
7.1.11 Wärmeübertrager mit Phasenübergang	223
7.1.12 Ablagerungen (Fouling)	223
7.2 Beispiele	224
7.3 Aufgaben zum Selbststudium	236

8 Wärmestrahlung	238
8.1 Grundlagen	238
8.1.1 Wellenlängenbereiche der Strahlung	238
8.1.2 Modell des schwarzen Körpers	239
8.1.3 Strahlungsfunktion des schwarzen Körpers	240
8.1.4 Strahlungsintensität und emittierte Strahlung	241
8.1.5 Auftreffende Strahlung	242
8.1.6 Helligkeit	242
8.1.7 Spektrale Kenngrößen	243
8.1.8 Emissionsgrad	244
8.1.9 Absorption, Reflexion und Transmission	245
8.1.10 Graue und selektive Strahler	246
8.1.11 Kirchhoff'sches Gesetz	248
8.1.12 Helligkeit grauer opaker Oberflächen	249
8.1.13 Oberflächenwiderstand für Strahlung	249
8.1.14 Raumwiderstand zweier strahlender Oberflächen	250
8.1.15 Helligkeitsverfahren für Wärmestrahlungsprobleme	251
8.1.16 Wärmestrahlung zwischen zwei Oberflächen	252
8.1.17 Wärmestrahlung zwischen drei Oberflächen	253
8.1.18 Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung	254
8.1.19 Strahlungsaustauschkoeffizient	255
8.1.20 Einstrahlzahlen	255
8.1.21 Einstrahlzahlen zwischen zwei Flächen	255
8.1.22 Eigeneinstrahlzahlen	257
8.1.23 Einstrahlzahlen-Algebra	257
8.1.24 Methode der gekreuzten Fäden	259
8.1.25 Einstrahlzahlen einfacher Konfigurationen	259
8.1.26 Strahlungsschutzschirme	263
8.2 Beispiele	266
8.3 Aufgaben zum Selbststudium	283
9 Aufgaben aus verschiedenen Themengebieten	286
10 Anhang	317
10.1 Gauß'sche Fehlerfunktion	317
10.2 Bessel-Funktionen	318
10.2.1 Bessel-Funktionen 1. Art	318
10.2.2 Modifizierte Bessel-Funktionen 1. und 2. Art	318
10.2.3 Zahlentafeln der Bessel-Funktionen	320
10.3 Näherungslösung der eindimensionalen instationären Wärmeleitung	324
10.4 Stoffwerte	329
10.5 Lösungen der Übungsaufgaben	auf CD
Literatur	331
Arbeitshilfen	332
Index	337

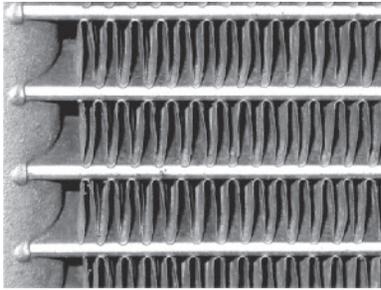


Bild 7.1: Filigrane Lamellenstruktur eines Autokühlers.

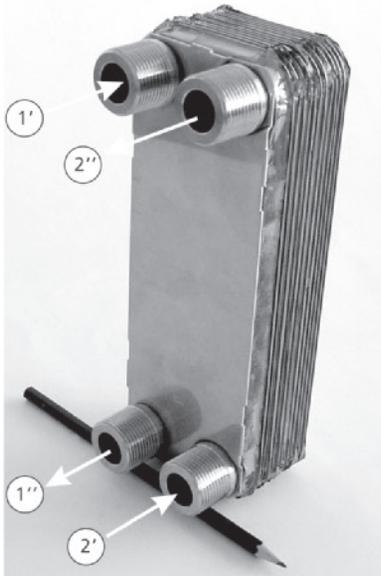


Bild 7.2: Kompakt-Wärmeübertrager aus gepressten Blechplatten in montiertem Zustand mit Anschlüssen für Fluid 1 und 2.



Bild 7.3: Das Fischgrättemuster zweier aufeinander folgender Blechplatten verläuft senkrecht zueinander.

7 Wärmeübertrager

7.1 Grundlagen

7.1.1 Begriffe und Nomenklatur

Unter einem **Wärmeübertrager** wird im Folgenden ein kalorischer Apparat verstanden, bei dem Wärme zwischen zwei Arbeitsmedien, die nicht in unmittelbarem thermischen Kontakt miteinander stehen, sondern durch eine feste Wand getrennt sind (z. B. Autokühler), übertragen wird. Daneben existieren auch Geräte mit direkter Wärmeübertragung (z. B. Nasskühltürme) auf die hier nicht eingegangen wird. Als Arbeitsfluide kommen meist Flüssigkeiten oder Gase zum Einsatz, in besonderen Fällen auch verdampfende Flüssigkeiten oder kondensierende Dämpfe.

Der Wärmedurchgang durch die Trennwand wird durch den Wärmedurchgangskoeffizienten k zwischen den beiden Medien beschrieben (vgl. Abschnitt 1.7.3). Insbesondere bei Wärmeübertragern mit Luft als Arbeitsmedium kommen zur Steigerung des Wärmeübergangs an der Trennwand Rippen und Lamellen zum Einsatz (Bild 7.1). Der Wärmewirkungsgrad eines Wärmeübertragers hängt maßgeblich von der Stromführung der beiden Medien ab.

Wärme fließt dabei stets vom wärmeabgebenden Medium (in der Regel mit 1 indiziert) zum wärmeaufnehmenden Medium (in der Regel mit 2 indiziert; Merkregel: „Fluid zwei = Wärmezuffluss“). Der Eintritt in den Wärmeübertrager wird mit dem **Index ' (1-Strich)**, der Austritt mit **'' (2-Strich)** gekennzeichnet. ϑ_1' kennzeichnet also die Eintrittstemperatur von Fluid 1, ϑ_2'' die Austrittstemperatur von Fluid 2. In der Literatur finden sich auch andere Bezeichnungen, was bei Verwendung der entsprechenden Beziehungen zu beachten ist.

Grundsätzliche Aufgaben sind die **Dimensionierung** (Auslegung) und **Nachrechnung von Wärmeübertragern**. Bei der Auslegung gilt es, bei bekannten Stoffströmen und Temperaturen die Übertragungsfähigkeit zu ermitteln, während beim Nachrechnen die Austrittstemperaturen der Medien und der übertragene Wärmestrom bestimmt wird.

In der Praxis hat sich für Wärmeübertrager der thermodynamisch unzutreffende Begriff **„Wärmetauscher“** bzw. **„Wärmeaustauscher“** eingebürgert, der mit **„heat exchanger“ (HX)** auch international üblich ist. Ein Wärmeaustausch zwischen den beiden Arbeitsmedien liegt allerdings nicht vor. Vielmehr erfolgt nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik ein in eine Richtung verlaufender Wärmetransport vom Medium höherer Temperatur zum Medium niedrigerer Temperatur. Der Begriff **„Wärmeaustausch“** würde dagegen implizieren, dass Wärme in beide Richtungen ausgetauscht wird. Bei gleichen Wärmekapazitätsströmen der beiden Medien wäre bei idealen Verhältnissen ein vollständiger **„Temperaturaustausch“** möglich, d. h. das wärmere Medium würde sich am Austritt auf die Eintrittstemperatur des kühleren Mediums abkühlen, während sich das wärmeaufnehmende Medium am Austritt auf die Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Mediums erwärmen würde. Im Folgenden wird daher nach einem Vorschlag von E. Schmidt der Begriff **„Wärmeübertrager“** verwendet.

7.1.2 Bauformen von Wärmeübertragern

Im allgemeinen Fall **ändern** sich durch die thermische Koppelung der Medien **beide Fluidtemperaturen mit zunehmender Lauflänge**. Eine besonders einfache Bauart von Wärmeübertragern ergibt sich, wenn ein Medium eine **konstante Temperatur** aufweist. Dies kann infolge sehr großer Wärmekapazität (z. B. Wärmeabgabe eines durchströmten Rohres an die Umgebung) oder infolge Phasenübergang (z. B. Verdampfer in einem Kühlschrank) der Fall sein. Die Berechnung vereinfacht sich in diesen Fällen, da sich nur eine Fluidtemperatur ändert. In der Praxis lassen sich folgende u. a. Bauformen unterscheiden:

- Rohrbündel-Wärmeübertrager (Bild 7.4)
- Platten-Wärmeübertrager (Bild 7.5)
- Spiral-Wärmeübertrager
- Rotations-Wärmeübertrager
- Schlangen-Wärmeübertrager

Weiter ist zwischen **Rekuperatoren** und **Regeneratoren** zu unterscheiden. Rekuperatoren werden gleichzeitig von zwei durch eine feste Wand getrennten Fluiden stationär durchströmt, d. h. es erfolgt ein kontinuierlicher Wärmeaustausch. Demgegenüber enthalten Regeneratoren eine für Gase durchlässige Formmasse (z. B. Formsteine mit Kanälen, Schüttung aus Steinen oder Metall). Sie werden diskontinuierlich, d. h. im zeitlichen Wechsel, von den Gasen durchströmt. Zusätzlich ist beim Regenerator meist auch noch ein Stoffaustausch möglich (z. B. Feuchteustausch in Klimaanlage).

7.1.3 Einseitig konstante Fluidtemperatur

Betrachtet wird zunächst der Wärmedurchgang von einem innen strömenden Medium der Temperatur ϑ_i durch eine feste Wand an ein äußeres Medium der **konstanten Temperatur** $\vartheta_e = \text{const}$ (vgl. Bild 6.15), was sowohl bei siedenden Medien in Verdampfern als auch bei kondensierenden Fluiden in Kondensatoren erfüllt ist. In Platten-Wärmeübertragern liegen ebene (Bild 7.7), in Rohr-Wärmeübertragern gekrümmte Trennflächen (Bild 7.8) vor.

Der Wärmedurchgang durch die jeweilige Trennfläche wird durch den Wärmedurchgangskoeffizienten k oder den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten k^* beschrieben:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad \text{und} \quad k^* = k \cdot B \quad \text{Platte} \quad (7.1)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{r_i}{r_e \cdot \alpha_e}} \quad \text{und} \quad k^* = k \cdot 2\pi \cdot r_i \quad \text{Rohr} \quad (7.2)$$

Aus der Energiebilanz am infinitesimalen Element quer zur Trennwand folgt nach Einführen der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Medien $\theta = \vartheta_i(x) - \vartheta_e$ und Integration der zugehörigen Differentialgleichung mit der Randbedingung am Fluideintritt $\vartheta_i(x=0) = \vartheta_{i0}$ eine **exponentielle Temperaturabnahme** des strömenden Mediums:

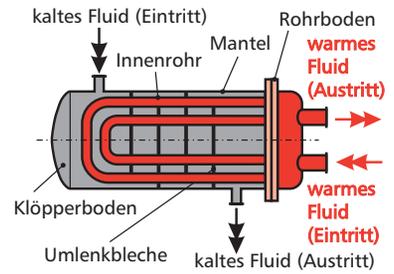


Bild 7.4: Rohrbündel-Wärmeübertrager im Schnitt.

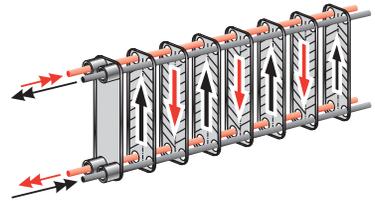


Bild 7.5: Platten-Wärmeübertrager.

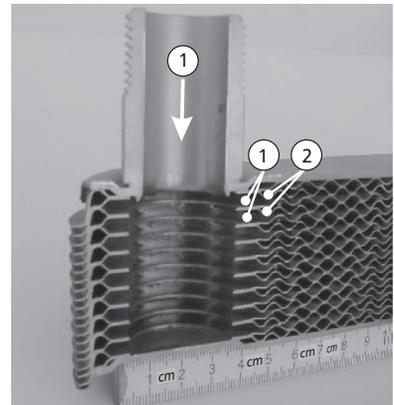


Bild 7.6: Innerer Aufbau eines Kompakt-Platten-Wärmeübertragers mit Anschlussstutzen für Fluid 1.

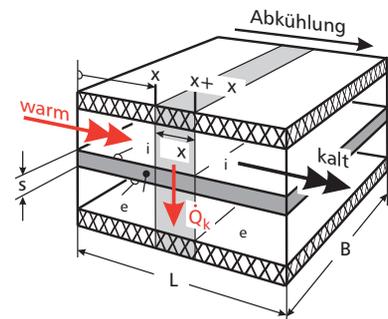


Bild 7.7: Wärmedurchgang durch ebene Wand an Fluid konstanter Temperatur.

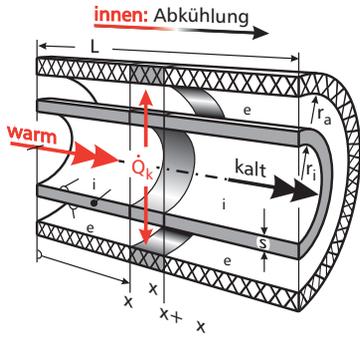


Bild 7.8: Wärmedurchgang durch Rohrwand an Fluid konstanter Temperatur.

Gl. (7.4) ist analog zu Gl. (6.56) aufgebaut, die den Temperaturabfall in einem Rohr mit konstanter Wandtemperatur beschreibt.

Alternativ zu Gl. (7.6) kann der im infinitesimalen Element fließende Wärmestrom $\frac{\dot{Q}_k}{\Delta x}$ über die Länge L integriert werden:

$$\dot{Q} = \int_0^L \frac{\dot{Q}_k}{\Delta x} dx = \int_0^L k^* \cdot [\vartheta_i(x) - \vartheta_e] dx \quad (7.7)$$

$\Delta\vartheta_{\log}$ ist die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz analog Gl. (6.58). Sie ergibt sich durch Integration der örtlichen Temperaturdifferenz $\vartheta_1 - \vartheta_2$ über die gesamte wärmeübertragende Fläche A des Wärmeübertragers:

$$\Delta\vartheta_{\log} = \frac{1}{A} \cdot \int (\vartheta_1 - \vartheta_2) dA \quad (7.9)$$



Je nach Fließrichtung der Medien (Gleichstrom=GS, Gegenstrom=GG) resultieren unterschiedliche logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenzen:

$$\Delta\vartheta_{\log,GS} = \frac{\vartheta'_1 - \vartheta'_2 - (\vartheta''_1 - \vartheta''_2)}{\ln \left(\frac{\vartheta'_1 - \vartheta'_2}{\vartheta''_1 - \vartheta''_2} \right)} \quad (7.12)$$

$$\Delta\vartheta_{\log,GG} = \frac{\vartheta''_1 - \vartheta'_2 - (\vartheta'_1 - \vartheta''_2)}{\ln \left(\frac{\vartheta''_1 - \vartheta'_2}{\vartheta'_1 - \vartheta''_2} \right)} \quad (7.13)$$

Im Sonderfall gleich großer Wärmekapazitätsströme $\dot{W}_1 = \dot{W}_2$ tritt beim Gegenstromer eine konstante Temperaturdifferenz zwischen beiden Medien über den gesamten Wärmeübertrager auf:

$$\Delta\vartheta_{\log,GG} = \vartheta''_1 - \vartheta'_2 = \vartheta'_1 - \vartheta''_2 \quad (7.14)$$

$$\theta(x) = (\vartheta_{i0} - \vartheta_e) \cdot \exp \left(-\frac{k^* \cdot x}{\dot{m} \cdot c_p} \right) = \theta_0 \cdot \exp \left(-\frac{k^* \cdot x}{\dot{m} \cdot c_p} \right) \quad (7.3)$$

Die Austrittstemperatur des Mediums bei $x=L$ beträgt:

$$\vartheta_{iL} = \vartheta_e + (\vartheta_{i0} - \vartheta_e) \cdot \exp \left(-\frac{k^* \cdot L}{\dot{m} \cdot c_p} \right) \quad (7.4)$$

Mit dem Wärmekapazitätsstrom des Fluids $\dot{W} = \dot{m} \cdot c_p$ und der Anzahl der Übertragungseinheiten $NTU = \frac{k^* \cdot L}{\dot{W}}$ gilt auch:

$$\vartheta_{iL} = \vartheta_e + (\vartheta_{i0} - \vartheta_e) \cdot \exp(-NTU) \quad (7.5)$$

Der insgesamt übertragene Wärmestrom \dot{Q} beträgt:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{iL} - \vartheta_{i0}) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\theta_L - \theta_0) \quad (7.6)$$

7.1.4 Beidseitige Temperaturänderung

Verändern beide Fluide ihre Temperatur, so sind zur Beschreibung von Wärmeübertragern verschiedene dimensionslose Kennzahlen üblich:

► **Dimensionslose mittlere Temperaturdifferenz Θ** ($0 \leq \Theta \leq 1$):

$$\Theta = \frac{\Delta\vartheta_{\log}}{\vartheta'_1 - \vartheta'_2} = \frac{\text{logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz}}{\text{Differenz der Eintrittstemperaturen}} \quad (7.8)$$

Im Unterschied zur normierten mittleren Temperaturdifferenz aus Gl. (7.8) stellt $\Delta\vartheta_{\log}$ aus Gl. (7.9) eine dimensionsbehaftete mittlere Temperaturdifferenz dar, die in K angegeben wird.

Weitere dimensionsbehaftete Temperaturdifferenzen können am Anfang des Wärmeübertragers bei $x=0$ (Index 0) und am Ende des Wärmeübertragers $x=L$ (Index L) gebildet werden:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_0 &= \vartheta_1(x=0) - \vartheta_2(x=0) \\ \Delta\vartheta_L &= \vartheta_1(x=L) - \vartheta_2(x=L) \end{aligned} \quad (7.10)$$

Die **logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\log}$** lässt sich damit wie folgt berechnen:

$$\Delta\vartheta_{\log} = \frac{\Delta\vartheta_0 - \Delta\vartheta_L}{\ln \left(\frac{\Delta\vartheta_0}{\Delta\vartheta_L} \right)} \quad (7.11)$$

Bei Heizkörpern wird sie z. B. als Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ verwendet:

$$\Delta\vartheta := \frac{\vartheta_{\text{Vorlauf}} - \vartheta_{\text{Rücklauf}}}{\ln \left[(\vartheta_{\text{Vorlauf}} - \vartheta_{\text{Luft}}) / (\vartheta_{\text{Rücklauf}} - \vartheta_{\text{Luft}}) \right]}$$

► **Betriebscharakteristiken (dimensionslose Temperaturänderungen der Stoffströme 1 und 2):**

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{\vartheta'_1 - \vartheta''_1}{\vartheta'_1 - \vartheta'_2} & 0 \leq P_1 \leq 1 \\ P_2 &= \frac{\vartheta''_2 - \vartheta'_2}{\vartheta'_1 - \vartheta'_2} & 0 \leq P_2 \leq 1 \end{aligned} \quad (7.15)$$

► **Anzahl der Übertragungseinheiten der Stoffströme 1 und 2 (Übertragungszahl, Number of Transfer Units):**

$$\begin{aligned} NTU_1 &= \frac{k \cdot A}{\dot{W}_1} \\ NTU_2 &= \frac{k \cdot A}{\dot{W}_2} \end{aligned} \quad (7.16)$$

Die **Wärmekapazitätsströme** (Wasserwerte) \dot{W}_1 und \dot{W}_2 ergeben sich aus den jeweiligen Massenströmen und mittleren spezifischen Wärmekapazitäten:

$$\begin{aligned} \dot{W}_1 &= \dot{m}_1 \cdot \bar{c}_{p1} \\ \dot{W}_2 &= \dot{m}_2 \cdot \bar{c}_{p2} \end{aligned} \quad (7.17)$$

► **Wärmekapazitätsstromverhältnisse (Wasserwertverhältnisse):**

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_2} = \frac{1}{R_2} & 0 \leq R_1 < \infty \\ R_2 &= \frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_1} = \frac{1}{R_1} & 0 \leq R_2 < \infty \end{aligned} \quad (7.19)$$

7.1.5 Wärmeübertrager-Hauptgleichung

Der zwischen den Medien übertragene Wärmestrom \dot{Q} folgt mit der mittleren Temperaturdifferenz aus der Wärmeübertrager-Hauptgleichung, wobei die Ermittlung der mittleren Temperaturdifferenz in einfacheren Fällen aus Gleichungen und ansonsten aus Diagrammen [24] erfolgen kann:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta_{\log} = k \cdot A \cdot \Theta \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta'_2) = \dot{W}_1 \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta''_1) = \dot{W}_2 \cdot (\vartheta''_2 - \vartheta'_2) \quad (7.22)$$

k ist der über die gesamte Wärmeübertragerfläche gemittelte Wärmedurchgangskoeffizient. Das Produkt

$$K := k \cdot A \quad (7.23)$$

wird als **Übertragungsfähigkeit** bezeichnet. Der Wärmedurchgangskoeffizient k kann damit als flächenbezogene (spezifische) Übertragungsfähigkeit interpretiert werden.

7.1.6 Gleichstrom-Wärmeübertrager

Beim **Gleichstrom-Wärmeübertrager** strömen beide Fluide in **dieselbe Richtung** und treten an derselben Stelle in den Wärmeübertrager ein (Temperaturen ϑ'_1 und ϑ'_2 in Bild 7.9). Die Temperaturdifferenz der beiden Fluide ist bei $x=0$ bekannt.

$$\Delta \vartheta_0 = \vartheta'_1 - \vartheta'_2 \quad (7.24)$$

Für die Temperaturdifferenz der beiden Medien gilt mit dem Umfang U in Abhängigkeit von der Lauflänge x :

$$\Delta \vartheta(x) = (\vartheta_1 - \vartheta_2)_x = \Delta \vartheta_0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{1}{\dot{m}_1 \cdot \bar{c}_{p1}} + \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot \bar{c}_{p2}} \right) \cdot k \cdot U \cdot x \right] \quad (7.25)$$

In der Literatur wird die auf den kleineren Wärmekapazitätsstrom $\min(\dot{W}_1, \dot{W}_2)$ bezogene Anzahl der Übertragungseinheiten zum Teil als Übertragungsfähigkeit des Wärmeübertragers bezeichnet, was zu Verwechslungen mit der Übertragungsfähigkeit $K := k \cdot A$ führen kann.

Die mittlere spezifische Wärmekapazität \bar{c}_{pj} folgt aus:

$$\bar{c}_{pj} = \frac{h'_j - h''_j}{\vartheta'_j - \vartheta''_j} \quad (j=1,2) \quad (7.18)$$



Zwischen den dargestellten dimensionslosen Kennzahlen gelten die Zusammenhänge:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{NTU_1}{NTU_2} = \frac{1}{R_1} = R_2 \quad (7.20)$$

$$\Theta = \frac{P_1}{NTU_1} = \frac{P_2}{NTU_2} \quad (7.21)$$

Durch die Einführung der dimensionslosen Kennzahlen wird die Anzahl der Parameter soweit reduziert, dass sich das Betriebsverhalten in Diagrammen darstellen lässt (vgl. VDI-Wärmeatlas [24]).



Im Allgemeinen werden bei Wärmeübertragern folgende **vereinfachte Annahmen** getroffen:

- Der Wärmeübertrager wird stationär betrieben.
- Er ist gegenüber der Umgebung adiab. Kinetische und potentielle Energien werden vernachlässigt. Die Enthalpieänderung der Stoffströme reduziert nur aus dem übertragenen Wärmestrom.
- Wärmeleitung in den Fluiden und deren Vermischung in Strömungsrichtung bleiben unberücksichtigt.
- Der Wärmedurchgangskoeffizient der Übertragungsfläche ist konstant.
- Tritt im Wärmeübertrager keine Phasenänderung der Fluide auf, sind die spezifischen Wärmekapazitäten und die Wärmekapazitätsströme konstant.
- Bei Phasenänderung von Reinstoffen unter konstantem Druck bleibt deren Temperatur konstant, der zugehörige Wärmekapazitätsstrom wird unendlich.

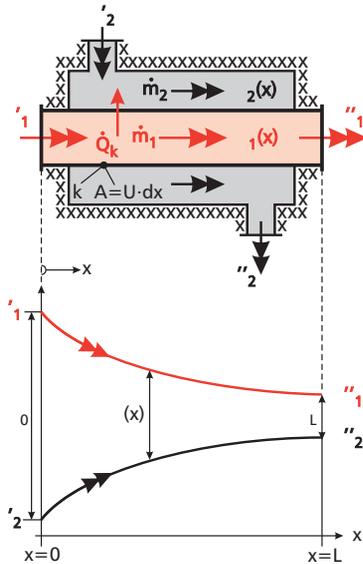


Bild 7.9: Fluidströme (oben) und Temperaturverlauf (unten) in einem Gleichstrom-Wärmeübertrager.

Der übertragene Wärmestrom \dot{Q} folgt aus einer globalen Enthalpiebilanz an den Medien:

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 \cdot \bar{c}_{p1} \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_1'') = -\dot{m}_2 \cdot \bar{c}_{p2} \cdot (\vartheta_2' - \vartheta_2'') = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_{\log,GS} \quad (7.26)$$

Mit den dimensionslosen Kenngrößen aus Gl. (7.15)–(7.19) gilt für den Gleichstrom-Wärmeübertrager in verschiedenen Umstellungen:

$$NTU_j = -\frac{\ln[1 - P_j \cdot (1 + R_j)]}{1 + R_j} \quad (j=1,2) \quad (7.27)$$

$$P_j = \frac{1 - \exp[-NTU_j \cdot (1 + R_j)]}{1 + R_j} \quad (j=1,2) \quad (7.28)$$

$$\Theta = -\frac{P_1 + P_2}{\ln[1 - (P_1 + P_2)]} \quad (7.29)$$

Die dimensionsbehafteten Temperaturdifferenzen betragen:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_0 &= \vartheta_1' - \vartheta_2' \\ \Delta\vartheta_L &= \vartheta_1'' - \vartheta_2'' \end{aligned} \quad (7.30)$$

Die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz folgt aus Gl. (7.12).

Der Gleichstrom-Wärmeübertrager besitzt bezüglich der thermischen Leistung eine **sehr ungünstige Stromführung**. Bei gleichen Betriebscharakteristiken und gleichen Wärmekapazitätsströmen benötigt ein Gleichstrom-Wärmeübertrager gegenüber anderen Bauarten stets eine größere Übertragungsfähigkeit $K = k \cdot A$.

Um beim Gleichstrom-Wärmeübertrager eine bestimmte Temperaturänderung P_j zu realisieren, ist gemäß Gl. (7.27) ein positives Argument des Logarithmus erforderlich, was auf folgende Bedingung führt:

$$P_j < \frac{1}{1 + R_j} \quad (j=1,2) \quad (7.31)$$

Selbst bei beliebig großer Übertragungsfähigkeit $K \rightarrow \infty$ sind größere dimensionslose Temperaturänderungen mit einem Gleichstrom-Wärmeübertrager **nicht** möglich. Beim Gegenstrom-Wärmeübertrager besteht diese Beschränkung grundsätzlich nicht. Hier sind prinzipiell beliebige dimensionslose Temperaturänderungen erreichbar. Damit sind beliebige Wärmeströme übertragbar, wenn die Übertragungsfähigkeit hinreichend groß bemessen wird.

7.1.7 Gegenstrom-Wärmeübertrager

Die beiden Medien strömen nun gegenläufig. Die Eintrittsstelle von Fluid 1 fällt mit der Austrittsstelle von Fluid 2 zusammen (Temperaturen ϑ_1' und ϑ_2'' in Bild 7.10). Gegenüber dem Gleichstrom-Wärmeübertrager sind die Temperaturdifferenzen $\Delta\vartheta_0$ und $\Delta\vartheta_L$ bei $x=0$ und $x=L$ nun **anders** definiert (Bild 7.10):

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_0 &= \vartheta_1' - \vartheta_2'' \\ \Delta\vartheta_L &= \vartheta_1'' - \vartheta_2' \end{aligned} \quad (7.32)$$

Die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz folgt aus Gl. (7.13). Für die Temperaturdifferenz der beiden Medien gilt in Abhängigkeit der Lauflänge x :

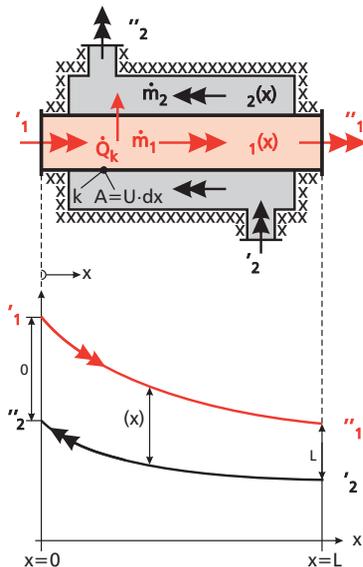


Bild 7.10: Fluidströme (oben) und Temperaturverlauf (unten) in einem Gegenstrom-Wärmeübertrager.

$$\Delta\vartheta(x) = (\vartheta_1 - \vartheta_2)_x = \Delta\vartheta_0 \cdot \exp\left[-\left(\frac{1}{\dot{m}_1 \cdot \bar{c}_{p1}} - \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot \bar{c}_{p2}}\right) \cdot k \cdot U \cdot x\right] \quad (7.33)$$

Gegenüber Gl. (7.25) tritt nun zwischen den Kehrwerten der Wärmekapazitätsströme ein **Minuszeichen** auf.

Der übertragene Wärmestrom \dot{Q} folgt ebenfalls aus einer globalen Enthalpiebilanz an den Medien, kann aber andererseits auch mithilfe der mittleren Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\log,GG}$ ermittelt werden.

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 \cdot \bar{c}_{p1} \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta''_1) = -\dot{m}_2 \cdot \bar{c}_{p2} \cdot (\vartheta'_2 - \vartheta''_2) = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_{\log,GG} \quad (7.34)$$

Hinsichtlich der dimensionslosen Kenngrößen ist der Fall ungleicher Wärmekapazitätsströme $R_1 \neq 1$ vom Fall gleicher Wärmekapazitätsströme $R_1 = 1$ zu unterscheiden. Für $R_1 \neq 1$ gilt:

$$NTU_j = \frac{1}{1 - R_j} \cdot \ln\left(\frac{1 - P_j \cdot R_j}{1 - P_j}\right) \quad (j=1,2) \quad (7.35)$$

$$P_j = \frac{1 - \exp[NTU_j \cdot (R_j - 1)]}{1 - R_j \cdot \exp[NTU_j \cdot (R_j - 1)]} \quad (j=1,2) \quad (7.36)$$

$$\Theta = \frac{P_1 - P_2}{\ln\left[\frac{1 - P_2}{1 - P_1}\right]} \quad (7.37)$$

Für $R_1 = 1$ erübrigt sich die Indizierung:

$$NTU = \frac{P}{1 - P} \quad (7.38)$$

$$P = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (7.39)$$

$$\Theta = 1 - P \quad (7.40)$$

Bei gegebenen NTU -Werten liefert der Gegenstrom-Wärmeübertrager gegenüber dem Gleichstrom-Wärmeübertrager die größeren Werte von P . Andererseits benötigt der Gegenströmer bei vorgegebener Betriebscharakteristik die kleinsten Übertragungszahlen.

7.1.8 Kreuzstrom-Wärmeübertrager

In Kreuzstrom-Wärmeübertragern strömen die Fluide 1 und 2 senkrecht zueinander (z. B. Autokühler, Heizregister einer Klimaanlage). Hinsichtlich der Stromführung sind zu unterscheiden:

- reiner Kreuzstrom (beide Ströme unvermischt)
- einseitig quervermischter Kreuzstrom (Rohrstrom unvermischt)
- beidseits quervermischter Kreuzstrom (beide Ströme quervermischt)

Für die Betriebscharakteristik des **unvermischten Kreuzstroms** wurde bereits 1930 von W. Nußelt eine Lösung in Form von Potenzreihen mitgeteilt:

$$P_j = \frac{1}{R_j \cdot NTU_j} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \left[1 - \exp(-NTU_j) \cdot \sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \cdot NTU_j^k \right] \cdot \left[1 - \exp(-R_j \cdot NTU_j) \cdot \sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \cdot (R_j \cdot NTU_j)^k \right] \right\} \quad (j=1,2) \quad (7.41)$$

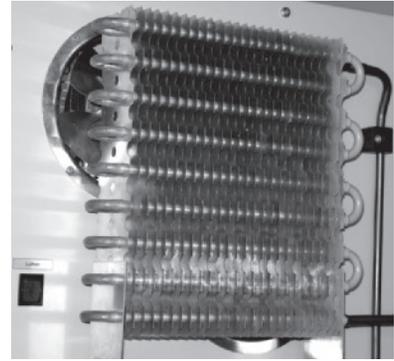


Bild 7.11: Kondensator eines Kühlkreislaufs mit dem Kältemittel R 134a ausgeführt als Kreuzstrom-Wärmeübertrager mit Ventilatoren zur Verstärkung der Wärmeabgabe an die Raumluft.

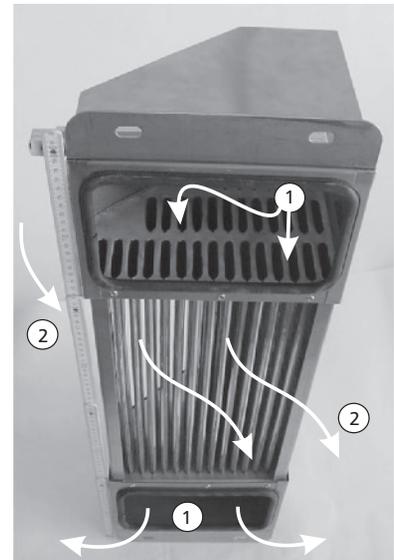
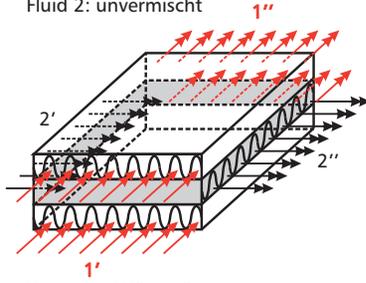


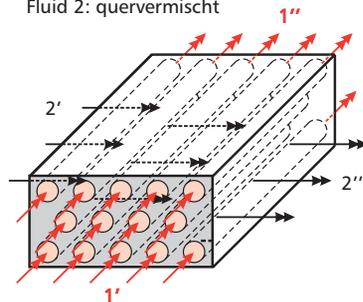
Bild 7.12: Kreuzstrom-Luft-Luft-Wärmeübertrager (Fa. Südluft) zur Wärmerückgewinnung in Großküchen. Die frische Zuluft ① wird im Rohrbündel mit ovalen Querschnitten, gefertigt aus dünnen Blechen, erwärmt und tritt unten aus der Sammelkammer aus. Im Kreuzstrom streicht die Abluft ② aus der Küche zwischen den Rohren hindurch. Große wärmeübertragende Flächen und geringe Wandstärken ermöglichen eine kompakte Bauweise.

Fluid 1: unvermischt
Fluid 2: unvermischt



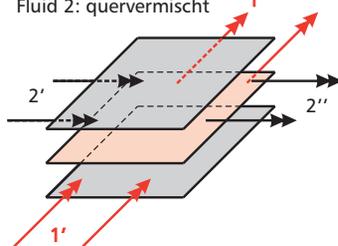
(a) Kompakt-Wärmeübertrager

Fluid 1: unvermischt
Fluid 2: quervermischt



(b) Glattrohrbündel-Wärmeübertrager

Fluid 1: quervermischt
Fluid 2: quervermischt



(c) Platten-Wärmeübertrager

Bild 7.13: Beispiele für reinen Kreuzstrom (a), einseitig vermischten Kreuzstrom (b) und beidseitig vermischten Kreuzstrom (c).

Der vielfach für den Austauschgrad ϵ synonym verwendete Begriff „Wirkungsgrad“ erweckt den Eindruck einer umfassenden Kenngröße von Wärmeübertragern. Dies trifft aber tatsächlich nicht zu, da auch noch Strömungsverluste in Form eines Druckabfalls auftreten. Der Austauschgrad beschreibt lediglich die thermischen Verhältnisse, so dass „Wärmewirkungsgrad“ oder „thermischer Wirkungsgrad“ zutreffender ist. Gelegentlich wird auch vom „Gütegrad“ des Wärmeübertragers gesprochen.

Gl. (7.41) ist nicht explizit nach der Anzahl der Übertragungseinheiten auflösbar, was die Berechnung erschwert. In der Praxis wird vielfach folgende Näherungsgleichung für das Fluid j mit dem geringeren Wärmekapazitätsstrom verwendet, die nur für $R_j = 1$ exakt ist:

$$P_j = 1 - \exp \left\{ \frac{1}{R_j} \cdot NTU_j^{0,22} \cdot \left[\exp(-R_j \cdot NTU_j^{0,78}) - 1 \right] \right\} \quad \begin{array}{l} (j=1 \text{ für } R_1 \leq 1) \\ (j=2 \text{ für } R_1 > 1) \end{array} \quad (7.42)$$

Für die Betriebscharakteristik des **einseitig vermischten Kreuzstroms** gilt, wobei der Index 1 den Fluidstrom im Rohr kennzeichnet:

$$P_1 = 1 - \exp \left\{ \frac{1}{R_1} \cdot \left[\exp(-R_1 \cdot NTU_1) - 1 \right] \right\} \\ P_2 = R_1 \cdot P_1 \quad (7.43)$$

Für die Anzahl der Übertragungseinheiten erhält man:

$$NTU_1 = -\frac{1}{R_1} \cdot \ln \left[1 + R_1 \cdot \ln(1 - P_1) \right] \\ NTU_2 = R_1 \cdot NTU_1 \quad (7.44)$$

Für den **beidseitig quervermischten Kreuzstrom** gilt:

$$\frac{1}{P_j} = \frac{1}{1 - \exp(-NTU_j)} + \frac{R_j}{1 - \exp(-R_j \cdot NTU_j)} - \frac{1}{NTU_j} \quad (j=1,2) \quad (7.45)$$

Auch Gl. (7.45) ist nicht explizit nach NTU auflösbar.

7.1.9 Wärmewirkungsgrade von Wärmeübertragern

Ein idealer Wärmeübertrager würde infinitesimale Temperaturunterschiede zwischen den beiden Fluiden aufweisen, so dass die Austrittstemperatur des wärmeaufnehmenden Fluids gleich der Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Fluids und umgekehrt wäre:

$$\vartheta'_1 = \vartheta''_2 \\ \vartheta'_2 = \vartheta''_1 \quad (7.46)$$

Mithilfe der Wärmeübertrager-Hauptgleichung (7.22) folgt, dass dies nur für $\dot{W}_1 = \dot{W}_2$ möglich wäre. Für $\dot{W}_1 < \dot{W}_2$ erfährt das wärmeabgebende Fluid die größere Temperaturänderung und würde sich auf ϑ'_2 abkühlen. Für $\dot{W}_1 > \dot{W}_2$ ist die Temperaturänderung im wärmeaufnehmenden Fluid größer. Dieses würde sich am Austritt auf ϑ'_1 erwärmen. Damit ergibt sich der maximale Wärmestrom zu:

$$\dot{Q}_{\max} = \min \left[\dot{W}_1, \dot{W}_2 \right] \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta'_2) = \dot{W}_{\min} \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta'_2) \quad (7.47)$$

Der **Wärmewirkungsgrad (Austauschgrad)** ϵ eines Wärmeübertragers ist das Verhältnis des übertragenen Wärmestroms \dot{Q} zum maximal möglichen Wärmestrom \dot{Q}_{\max} . Mit den Gln. (7.15) und (7.22) folgt:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{\dot{W}_1 \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta''_1)}{\dot{W}_{\min} \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta'_2)} = \frac{\dot{W}_1 \cdot P_1}{\dot{W}_{\min}} = \frac{\dot{W}_2 \cdot (\vartheta'_2 - \vartheta'_1)}{\dot{W}_{\min} \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta'_2)} = \frac{\dot{W}_2 \cdot P_2}{\dot{W}_{\min}} \quad (7.48)$$

Falls $\dot{W}_1 < \dot{W}_2$, ist $\frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_{\min}} = 1$. Anderenfalls ist $\frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_{\min}} = 1$. Damit erhält man für den Austauschgrad:

$$\epsilon = \begin{cases} P_1 & \text{für } \dot{W}_1 < \dot{W}_2 \\ P_2 & \text{für } \dot{W}_1 > \dot{W}_2 \end{cases} \quad (7.49)$$

Der Wärmewirkungsgrad eines Wärmeübertragers ist damit gleich der dimensionslosen Temperaturänderung des Fluids mit dem geringeren Wärmekapazitätsstrom. Bild 7.14 zeigt die Austauschgrade für verschiedene Stromführungen in Abhängigkeit der normierten mittleren Temperaturdifferenz. Der Gegenstrom-Wärmeübertrager weist den höchsten Wärmewirkungsgrad auf, während der Gleichstrom-Wärmeübertrager den geringsten Austauschgrad besitzt. Sehr wirkungsvoll ist auch der reine Kreuzstrom-Wärmeübertrager.

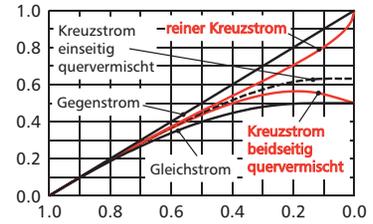


Bild 7.14: Vergleich des Wärmewirkungsgrads verschiedener Wärmeübertrager.

7.1.10 Korrekturfaktor

Der Korrekturfaktor F ist die dimensionslose mittlere Temperaturdifferenz Θ bezogen auf die dimensionslose mittlere Temperaturdifferenz Θ_{GG} des Gegenstrom-Wärmeübertragers (Index GG):

$$F := \frac{\Theta}{\Theta_{GG}} = \frac{NTU_{j,GG}}{NTU_j} \quad j=1,2 \quad (7.50)$$

Der Referenz-Gegenstrom-Wärmeübertrager erreicht dabei dieselben dimensionslosen Temperaturänderungen P_1 und P_2 wie die betrachtete Stromführung mit Θ und NTU_j . Bei reinem Gegenstrom ist $F = 1$. Spang und Roetzel (1995) geben für F bei symmetrischen Stromführungen ohne Längsvermischung folgende Näherungsgleichung an:

$$F = \frac{1}{(1 + A \cdot R_1^{0,5 \cdot B} \cdot NTU_1^B)^C} \quad (7.51)$$

Tabelle 7.1: Konstanten von Gl. (7.51).

Stromführung	A	B	C
reiner Gleichstrom	0,671	2,11	0,534
reiner Kreuzstrom	0,433	1,60	0,267
beidseitig quervermischter Kreuzstrom	0,251	2,06	0,677

Für die dimensionslose Temperaturänderung des Stoffstroms 1 gilt:

$$P_1 = \frac{1 - \exp [F \cdot NTU_1 \cdot (R_1 - 1)]}{1 - R_1 \cdot \exp [F \cdot NTU_1 \cdot (R_1 - 1)]} \quad \text{für } R_1 \neq 1$$

$$P_1 = \frac{F \cdot NTU_1}{1 + F \cdot NTU_1} = \frac{F \cdot NTU}{1 + F \cdot NTU} \quad \text{für } R_1 = 1 \quad (7.52)$$

7.1.11 Wärmeübertrager mit Phasenübergang

Ist ein Arbeitsmedium ein verdampfendes oder kondensierendes Fluid, wird die für den Phasenübergang benötigte bzw. dabei freigesetzte Verdampfungsenthalpie h_{fg} vom anderen Medium geliefert bzw. aufgenommen. Dabei bleibt die Temperatur des verdampfenden bzw. kondensierenden Fluids konstant. Für einen Wärmeübertrager mit Verdampfung ist ϑ_2 konstant ($P_2 = 0$), was einem unendlichen Wärmekapazitätsstrom \dot{W}_2 bzw. $R_1 = 0$ entspricht. Unabhängig von der Bauart bzw. der Stromführung gelten dann die Zusammenhänge:

$$P_1 = 1 - \exp(-NTU_1) \quad (7.53)$$

$$NTU_1 = -\ln(1 - P_1) \quad (7.54)$$

7.1.12 Ablagerungen (Fouling)

Im Betrieb von Wärmeübertragern kommt es zu Ablagerungen (Fouling) an den Trennwänden (z. B. Oxidschichten, Ablagerungen aus den Fluiden, Sand, Schlamm, Rost, Kalk, Algen, Muscheln etc.), die den Wärmedurchgang herabsetzen und so den Wirkungsgrad des Wärmeübertragers vermindern. Rechnerisch kann diesem Umstand durch den spezifischen Verschmutzungswiderstand R_f Rechnung getragen werden (Tab. 7.2), der den Wärmedurchgangskoeffizienten k verringert.

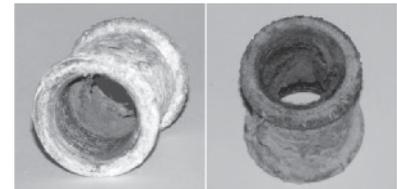


Bild 7.15: Beispiele für Ablagerungen in einer Rohrmuffe.

Tabelle 7.2: Anhaltswerte von Verschmutzungswiderständen in Wärmeübertragern.

Fluid	R_f in $10^{-3} \cdot (\text{m}^2 \text{K})/\text{W}$
Seewasser	0,1 ÷ 0,5
Flusswasser	0,2 ÷ 1,0
Abgase	1,8
Heizöl	0,9
Transformatoröl	0,2
Speiseöl	0,5
Benzin	0,2
Kältemittel	0,2
Wasserdampf	0,1 ÷ 0,2
Druckluft	0,35
destilliertes Wasser	0,1

7.2 Beispiele

Bekannte Größen:

▷ Milch:

Eintrittstemperatur: $\vartheta'_1 = 38^\circ\text{C}$

Austrittstemperatur: $\vartheta''_1 = 8^\circ\text{C}$

Massenstrom: $\dot{m}_1 = 1\text{ kg/s}$

spezifische Wärmekapazität:

$$c_{p1} = 3,94 \cdot 10^3\text{ J/(kg K)}$$

▷ Kühlwasser:

Eintrittstemperatur: $\vartheta'_2 = 4^\circ\text{C}$

Massenstrom: $\dot{m}_2 = 1,5\text{ kg/s}$

spezifische Wärmekapazität:

$$c_{p2} = 4,18 \cdot 10^3\text{ J/(kg K)}$$

Gesuchte Größen:

Wärmestrom: \dot{Q}

Austrittstemperatur Kühlwasser: ϑ''_2

logarithmische gemittelte Temperatur-

differenz: $\Delta\vartheta_{\log}$

Übertragungsfähigkeit: K

► Beispiel 7.1:

Bauer Moritz Molke will Kuhmilch ($c_{p1} = 3,94\text{ kJ/(kg K)}$, $\dot{m}_1 = 1\text{ kg/s}$) von der Temperatur $\vartheta'_1 = 38^\circ\text{C}$ auf die Temperatur $\vartheta''_1 = 8^\circ\text{C}$ abkühlen. In einem im Gegenstrom betriebenen Wärmeübertrager steht ihm dazu Kühlwasser ($c_{p2} = 4,18\text{ kJ/(kg K)}$, $\dot{m}_2 = 1,5\text{ kg/s}$) der Temperatur $\vartheta'_2 = 4^\circ\text{C}$ zur Verfügung.

- Welcher Wärmestrom \dot{Q} wird der Milch dabei entzogen?
- Mit welcher Temperatur ϑ''_2 tritt das Kühlwasser aus dem Wärmeübertrager aus?
- Wie groß ist die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\log}$?
- Welche Übertragungsfähigkeit K des Wärmeübertragers ist dazu erforderlich?

Lösung:

(a) übertragener Wärmestrom:

Der übertragene Wärmestrom lässt sich mithilfe der Wärmeübertrager-Hauptgleichung (7.22) berechnen, da die Ein- und Austrittstemperatur der Milch (Fluid 1) bekannt ist:

$$\dot{Q} = \dot{W}_1 \cdot (\vartheta'_1 - \vartheta''_1) \quad (7.55)$$

Der Wärmekapazitätsstrom der Milch ergibt sich dazu aus Gl. (7.17):

$$\dot{W}_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} = 3940\text{ W/K} \quad (7.56)$$

Damit beträgt der übertragene Wärmestrom:

$$\dot{Q} = 3940\text{ W/K} \cdot (38^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}) = 118\,200\text{ W} = 118,2\text{ kW} \quad (7.57)$$

(b) Austrittstemperatur des Kühlwassers:

Die Austrittstemperatur ϑ''_2 des Kühlwassers lässt sich ebenfalls über die Wärmeübertrager-Hauptgleichung (7.22) in Verbindung mit dem Wärmekapazitätsstrom \dot{W}_2 des Kühlwassers berechnen:

$$\dot{W}_2 = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} = 6\,270\text{ W/K} \quad (7.58)$$

$$\dot{Q} = \dot{W}_2 \cdot (\vartheta''_2 - \vartheta'_2) \Rightarrow \vartheta''_2 = \vartheta'_2 + \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_2} = 4^\circ\text{C} + \frac{118\,200\text{ W}}{6\,270\text{ W/K}} = 22,85^\circ\text{C} \quad (7.59)$$

(c) logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz:

Bei der Ermittlung der logarithmisch gemittelten ist zu beachten, dass es sich um einen Gegenstrom-Wärmeübertrager handelt. Daher ist Gl. (7.13) auszuwerten:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{\log} &= \frac{\vartheta'_1 - \vartheta'_2 - (\vartheta'_1 - \vartheta''_2)}{\ln\left(\frac{\vartheta'_1 - \vartheta'_2}{\vartheta'_1 - \vartheta''_2}\right)} = \frac{(8^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}) - (38^\circ\text{C} - 22,85^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{8^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}}{38^\circ\text{C} - 22,85^\circ\text{C}}\right)} \\ &= \frac{4\text{ K} - 15,15\text{ K}}{\ln\left(\frac{4\text{ K}}{15,15\text{ K}}\right)} = \frac{-11,15\text{ K}}{\ln(0,264)} = 8,37\text{ K} \end{aligned} \quad (7.60)$$



Bei Vertauschen der Indizes (1 für die Milch und 2 für das Kühlwasser) würde sich ein negativer Wärmestrom \dot{Q} und auch eine negative logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\log}$ ergeben.



Anschaulich stellt die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\log}$ den mittleren Temperaturunterschied zwischen Milch und Kühlwasser dar.



Der Zähler in Gl. (7.60) ist negativ, allerdings liefert auch der natürliche Logarithmus im Nenner einen negativen Wert, da er von einem Zahlenwert kleiner 1 berechnet wird.

(d) Übertragungsfähigkeit:

Die erforderliche Übertragungsfähigkeit des Wärmeübertragers K kann ebenfalls über die Wärmeübertrager-Hauptgleichung (7.22) in Verbindung mit der logarithmisch gemittelten Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\log}$ ermittelt werden:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_{\log} \Rightarrow K = k \cdot A = \frac{\dot{Q}}{\Delta\vartheta_{\log}} = \frac{118\,200 \text{ W}}{8,37 \text{ K}} = 1,41 \cdot 10^4 \text{ W/K} \quad (7.61)$$

► Beispiel 7.2:

In den Kellerräumen von Anja Assel ist eine ungedämmte Wasserleitung DN 20 aus Stahl (Innendurchmesser $D_i = 21,6 \text{ mm}$, Wandstärke $s = 2,65 \text{ mm}$, Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 50 \text{ W/(m K)}$, Länge $L = 8 \text{ m}$) horizontal verlegt. Das mit einer Geschwindigkeit von $w = 2 \text{ m/s}$ fließende Kaltwasser (Dichte $\rho_W = 999,9 \text{ kg/m}^3$, spezifische Wärmekapazität $c_{pW} = 4196 \text{ J/(kg K)}$, Wärmeleitfähigkeit $\lambda_W = 576,2 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m K)}$, kinematische Viskosität $\nu_W = 1,385 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $Pr_W = 10,09$) tritt mit einer Temperatur von $\vartheta_0 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ in die Wasserleitung ein. Der Wärmeübergangskoeffizient an der Rohraußenseite zur konstanten Kellertemperatur $\vartheta_\infty = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt $\alpha_e = 12,5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$.

- Wie groß ist der an der Rohrinneiseite auftretende Wärmeübergangskoeffizient α_i ?
- Wie groß ist der auf die innere Rohroberfläche bezogene Wärmedurchgangskoeffizient k_i ?
- Leiten Sie aus einer Energiebilanz am infinitesimalen Fluidelement eine Gleichung für den Temperaturverlauf des Wassers im Rohr her und ermitteln Sie die allgemeine Lösung $\vartheta_W(x)$.
- Welche Temperatur ϑ_L hat das Wasser am Ende des Rohrs angenommen?

Lösung:**(a) wasserseitiger Wärmeübergangskoeffizient:**

Es liegt erzwungene Konvektion im Rohr vor, so dass zunächst die Reynolds-Zahl und dann die Nußelt-Zahl zu ermitteln ist, um daraus den gesuchten Wärmeübergangskoeffizient zu berechnen. Gemäß Gl. (6.9) gilt:

$$Re = \frac{w \cdot D_i}{\nu_W} = 3,12 \cdot 10^4 > 2320 \Rightarrow \text{turbulent} \quad (7.62)$$

Für die turbulente Rohrströmung folgt aus den Gln. (6.40) und (6.43):

$$\zeta = (1,8 \cdot \log Re - 1,64)^{-2} = 0,024$$

$$K_L = 1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{2}{3}} = 1,019$$

$$Nu = Nu_0 \cdot K_L = \frac{\frac{\zeta}{8} \cdot Re \cdot Pr_W}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{8}} \cdot \left(Pr_W^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot K_L = 270,90 \quad (7.63)$$

Zusammenfassung und Ausblick:

- Eine universelle Berechnung von Wärmeübertragern ist vorteilhaft mit der Wärmeübertrager-Hauptgleichung (7.22) möglich.

Bekannte Größen:**▷ Rohr:**

Innendurchmesser:	$D_i = 21,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Wandstärke:	$s = 2,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Länge:	$L = 8 \text{ m}$
Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda = 50 \text{ W/(m K)}$

▷ Kaltwasser:

Eintrittstemperatur:	$\vartheta_0 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$
Geschwindigkeit:	$w = 2 \text{ m/s}$
Dichte:	$\rho_W = 999,9 \text{ kg/m}^3$
kinematische Viskosität:	$\nu_W = 1,385 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda_W = 0,5762 \text{ W/(m K)}$
spezifische Wärmekapazität:	

$c_{pW} = 4196 \text{ J/(kg K)}$	
Prandtl-Zahl:	$Pr_W = 10,09$

▷ Keller:

Temperatur:	$\vartheta_\infty = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
Wärmeübergangskoeffizient:	$\alpha_e = 12,5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

Gesuchte Größen:

Wärmeübergangskoeffizient innen:	α_i
Wärmedurchgangskoeffizient:	k_i
Temperaturverlauf im Rohr:	$\vartheta_W(x)$
Temperatur am Rohrende:	ϑ_L

 Auf die Korrektur der Temperaturabhängigkeit wird aufgrund der geringen Temperaturunterschiede verzichtet ($K_T = 1$).

Wegen $\alpha_i \gg \alpha_e$ ist zu erwarten, dass der wasserseitige Wärmeübergang nur wenig zum Wärmedurchgangswiderstand beiträgt.

Auch der Wärmeleitwiderstand des Stahlrohrs leistet einen vergleichsweise geringen Beitrag zum thermischen Gesamtwiderstand. Der auf die äußere Rohroberfläche $A_e = D_e \cdot \pi \cdot L = 0,68 \text{ m}^2$ bezogene Wärmedurchgangskoeffizient k_e liegt mit $12,46 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ nur wenig unter dem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten, der den Wärmedurchgang dominiert.

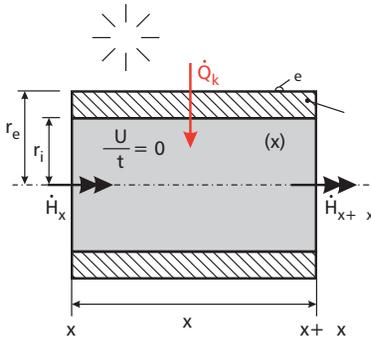


Bild 7.16: Energiebilanz am infinitesimalen Fluidelement.

Die Längswärmeleitung im Fluid wird vernachlässigt, da gilt:

$$Nu \ll (Re \cdot Pr_W)^2$$

Ebenso bleibt die Längswärmeleitung in der Rohrwand außer Acht.

Da die Kellertemperatur ϑ_∞ konstant ist, gilt:

$$\frac{d\vartheta(x)}{dx} = \frac{d[\vartheta_\infty - \vartheta(x)]}{dx} = -\frac{d\vartheta(x)}{dx} \quad (7.71)$$

Aus Gl. (6.4) folgt der gesuchte Wärmeübergangskoeffizient zu:

$$\alpha_i = \frac{Nu \cdot \lambda_W}{D_i} = 7226,51 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \quad (7.64)$$

(b) auf die Rohrinnenfläche bezogener Wärmedurchgangskoeffizient:

Der auf die innere Rohroberfläche $A_i = D_i \cdot \pi \cdot L = 0,54 \text{ m}^2$ bezogene Wärmedurchgangskoeffizient k_i kann mit $r_i = D_i/2 = 10,8 \text{ mm}$ aus Gl. (7.2) berechnet werden:

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{r_i}{r_e \cdot \alpha_e}} = 15,52 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \quad (7.65)$$

(c) Temperaturverlauf im Rohr:

Zur Formulierung der Energiebilanz wird ein infinitesimales Fluidelement der Länge Δx aus dem Rohr herausgeschnitten. Da die Wassertemperatur nur von der Lauflänge x , aber nicht vom Radius r abhängt, besitzt das Kontrollvolumen den Radius r_i . Weiterhin wird eine stationäre Durchströmung des Rohres betrachtet, so dass keine Änderung der inneren Energie $\frac{\partial U}{\partial t} = 0$ auftritt. In das Kontrollvolumen tritt an der Stelle x der Enthalpiestrom \dot{H}_x ein, während bei $x + \Delta x$ der Enthalpiestrom $\dot{H}_{x+\Delta x}$ austritt. Am Umfang des Elements erfolgt aus der Umgebung die Wärmezufuhr \dot{Q}_k infolge des Wärmedurchgangs. Damit lässt sich die Energiebilanz wie folgt formulieren:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0 = \dot{H}_x - \dot{H}_{x+\Delta x} + \dot{Q}_k \quad (7.66)$$

Für den eintretenden Enthalpiestrom gilt:

$$\dot{H}_x = \dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot \vartheta(x) \quad (7.67)$$

Der austretende Enthalpiestrom folgt mithilfe einer Taylor-Reihe, die nach dem zweiten Glied abgebrochen wird:

$$\dot{H}_{x+\Delta x} \approx \dot{H}_x + \frac{d\dot{H}_x}{dx} \cdot \Delta x \quad (7.68)$$

Für die Wärmetransmission an der Umfangsfläche ΔA_U erhält man:

$$\dot{Q}_k = k \cdot \Delta A_U \cdot [\vartheta_\infty - \vartheta(x)] = k \cdot 2\pi \cdot r_i \cdot \Delta x \cdot [\vartheta_\infty - \vartheta(x)] \quad (7.69)$$

Einsetzen der Gln. (7.67)–(7.69) in die Energiebilanz (7.66) liefert:

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{H}_x}{dx} \cdot \Delta x + k \cdot 2\pi \cdot r_i \cdot \Delta x \cdot [\vartheta_\infty - \vartheta(x)] &= 0 \Rightarrow \\ -\frac{d}{dx} (\dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot \vartheta(x)) + k \cdot 2\pi \cdot r_i \cdot [\vartheta_\infty - \vartheta(x)] &= 0 \Rightarrow \\ -\dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot \frac{d\vartheta(x)}{dx} + k \cdot 2\pi \cdot r_i \cdot [\vartheta_\infty - \vartheta(x)] &= 0 \Rightarrow \\ -\frac{d\vartheta(x)}{dx} + \frac{k \cdot 2\pi \cdot r_i}{\dot{m}_W \cdot c_{pW}} \cdot [\vartheta_\infty - \vartheta(x)] &= 0 \end{aligned} \quad (7.70)$$

Gl. (7.70) ist eine inhomogene gewöhnliche Differenzialgleichung 1. Ordnung, die mithilfe der Übertemperatur $\theta(x) := \vartheta_\infty - \vartheta(x)$ homogenisiert werden kann:

$$-\left(-\frac{d\theta(x)}{dx}\right) + \frac{k \cdot 2\pi \cdot r_i}{\dot{m}_W \cdot c_{pW}} \cdot \theta(x) = 0 \Rightarrow \frac{d\theta(x)}{dx} + \kappa \cdot \theta(x) = 0 \quad (7.72)$$

Die spezifische Anzahl der Übertragungseinheiten κ beträgt:

$$\dot{m}_W = \rho_W \cdot w \cdot A = \rho_W \cdot w \cdot \frac{D_i^2 \cdot \pi}{4} = 0,73 \text{ kg/s}$$

$$\kappa = \frac{k \cdot 2\pi \cdot r_i}{\dot{m}_W \cdot c_{pW}} = 3,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} \quad (7.73)$$

Der Exponentialfunktionsansatz

$$\theta(x) = C \cdot \exp(\gamma \cdot x) \quad (7.74)$$

führt mit

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = \gamma \cdot C \cdot \exp(\gamma \cdot x) \quad (7.75)$$

durch Einsetzen in Gl. (7.72) auf die charakteristische Gleichung:

$$\begin{aligned} \gamma \cdot C \cdot \exp(\gamma \cdot x) + \kappa \cdot C \cdot \exp(\gamma \cdot x) &= 0 \Rightarrow \\ (\gamma + \kappa) \cdot C \cdot \exp(\gamma \cdot x) &= 0 \Rightarrow \\ \gamma &= -\kappa \end{aligned} \quad (7.76)$$

Damit lautet die allgemeine Lösung der Übertemperatur:

$$\theta(x) = C \cdot \exp(-\kappa \cdot x) \quad (7.77)$$

Für den allgemeinen Temperaturverlauf im Wasserrohr erhält man damit:

$$\vartheta(x) = \vartheta_\infty - \theta(x) = \vartheta_\infty - C \cdot \exp(-\kappa \cdot x) \quad (7.78)$$

Die Konstante C lässt sich mithilfe der Randbedingung bei $x=0$, d. h. der bekannten Wassereintrittstemperatur ϑ_0 , bestimmen:

$$\vartheta(x=0) = \vartheta_0 = \vartheta_\infty - C \cdot \exp(-\kappa \cdot 0) \Rightarrow C = \vartheta_\infty - \vartheta_0 \quad (7.79)$$

Damit lautet der Temperaturverlauf in der Kaltwasserleitung:

$$\vartheta(x) = \vartheta_\infty - (\vartheta_\infty - \vartheta_0) \cdot \exp(-\kappa \cdot x) \quad (7.80)$$

(d) Temperatur am Rohrende:

Die Wassertemperatur am Rohrende erhält man durch Einsetzen von $x=L$ in Gl. (7.80):

$$\begin{aligned} \vartheta_L = \vartheta(x=L) &= \vartheta_\infty - (\vartheta_\infty - \vartheta_0) \cdot \exp(-\kappa \cdot L) \\ &= 15^\circ\text{C} - (15^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}) \cdot \exp(-3,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} \cdot 8 \text{ m}) = 8,02^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (7.81)$$

► Beispiel 7.3:

Leiten Sie anhand geeigneter Energiebilanzen an den Arbeitsfluiden 1 und 2 eine Gleichung für die Temperaturverläufe $\vartheta_1(x)$ und $\vartheta_2(x)$ in einem nach außen hin adiabaten, stationär durchströmten Gleichstrom-Wärmeübertrager der Übertragungsfähigkeit $K = k \cdot A$ und der Länge L für den allgemeinen Fall unterschiedlicher Wärmekapazitätsströme \dot{W}_1 und \dot{W}_2 ab. Als Parameter sollen dabei nur die Ein- und Austrittstemperaturen der Fluide $\vartheta'_1, \vartheta'_2$ und $\vartheta''_1, \vartheta''_2$ sowie die jeweilige Anzahl der Übertragungseinheiten NTU_1 und NTU_2 auftreten.

 Gl. (7.72) ist eine homogene Differenzialgleichung 1. Ordnung, die durch Trennung der Variablen oder Exponentialfunktionsansatz lösbar ist.

 Die Definition der „Untertemperatur“ $\theta^* := \vartheta(x) - \vartheta_\infty$ hätte auf denselben Temperaturverlauf wie in Gl. (7.80) geführt.

 Das Produkt $\kappa \cdot x$ bezeichnet laut Abschnitt 6.1.15 die Anzahl der Übertragungseinheiten NTU . Gl. (7.80) stimmt damit mit Gl. (7.3) bzw. Gl. (7.4) überein. Im vorliegenden Fall der Wärmezufuhr von außen beschreibt Gl. (7.80) eine exponentielle Temperaturzunahme im Fluid.

Zusammenfassung und Ausblick:

- Es tritt nur eine sehr schwache Temperaturerhöhung im Kaltwasser auf, so dass eine Wärmedämmung der Rohrleitung (aus diesem Grunde) nicht erforderlich ist.
- Die praktisch vernachlässigbare Temperaturzunahme im Fluid resultiert aus dem sehr großen Wärmekapazitätsstrom des Wassers $\dot{W}_W = \dot{m}_W \cdot c_{pW} = 3063,08 \text{ W/K}$, was auch aus dem sehr niedrigen Wert der Anzahl der Übertragungseinheiten $NTU = \kappa \cdot L = 2,75 \cdot 10^{-3}$ anschaulich klar wird.
- Wasser ist daher sehr gut als Wärmeträgermedium geeignet.

Index

3/4-Regel, 28, 333

A

Abkühlungsgesetz
 Newton, 20, 27, 67, 82, 90, 110,
 120, 129, 132, 201, 266, 282,
 334
 Ableitung, *siehe* Differenzial
 Absorption
 solare, 94, 248, 280, 287
 Beispiel, 312
 Abtriebsströmung, 192, 193
 Adiabase, 24
 Advektion, 58, 60
 Ähnlichkeitstheorie, 21, 186
 Ähnlichkeitsvariable, 144
 Analogie
 elektrische, 25, 124, 250, 271, 333
 Beispiel, 29, 106, 116, 117, 250,
 286–291, 294, 296, 301,
 303–307, 309–312
 Wärme–Wasser, 18
 Anfangsbedingung, 24, 69, 85, 160
 dimensionslose, 140, 147, 167, 172
 normierte, *siehe* dimensionslose
 anisotrop, 20
 Anströmlänge, 194
 Anzahl der Übertragungseinheiten,
 192, 218
 äquidistant, 105
 Arbeitshilfen, 332
 Arena
 Beispiel, 308
 Außenwand
 inhomogene
 Beispiel, 309, 310, 312
 Auftriebsströmung, 192
 Ausdehnungskoeffizient
 isobarer, 54, 186, 192
 Austrittstemperatur, 203, 218, 227
 Azimut, 23, 241
 Azimutwinkel, 23, 241

B

Bügeleisen
 Beispiel, 301
 Badewanne
 Beispiel, 61
 Balkonplatte
 Beispiel, 94
 Bauteile
 mehrschichtige, 99
 Behälter
 quaderförmiger
 Beispiel, 184
 zylindrischer
 Beispiel, 184, 294
 Behälter mit Verbindungsstab
 Beispiel, 135
 Bernoulli-Gleichung, 52

Bessel'sche Differenzialgleichung
 modifizierte, 122
 Bessel-Funktion, 148, 318
 Ableitung, 168
 modifizierte, 122, 318
 Bierkrug
 Beispiel, 299
 Bilanzgröße, 50
 Biot-Zahl, 21, 138, 141, 144, 152, 154,
 156, 186
 inverse, 149
 Brauchwassererwärmung
 Beispiel, 236, 237
 Brennelement
 Beispiel, 95, 108
 Brotbackautomat
 Beispiel, 302

C

CPU
 Beispiel, 117, 128, 288, 311

D

Dämmradius
 kritischer, 115, 118
 Dämmstärke
 kritische, 114
 Deckenheizung
 Beispiel, 283
 Delta-Operator, 23
 diatherm, 16
 Differenzial
 gewöhnliches, 51
 partielles, 51
 substanzielles, 50
 Differenzialgleichung
 1. Ordnung, 68, 72, 159, 226, 229
 2. Ordnung, 78, 79, 87, 89, 90, 107,
 108, 117, 126, 132
 charakteristische Gleichung, 126,
 227
 Exponentialfunktionsansatz, 68,
 87, 91, 126, 132, 159, 227
 harmonische, 132
 homogene, 68, 85, 90, 107, 117,
 132, 160, 227
 Homogenisierung, 70, 74, 90, 128,
 226
 inhomogene, 68, 72, 78, 79, 85, 90,
 98, 108, 126, 159, 226
 modifizierte harmonische, 132
 nichtlineare, 300, 313
 Normierung, 82, 83, 125, 139, 158,
 167
 partikuläre Lösung, 69, 73, 85, 160
 Störterm, 68, 69, 73, 85, 98, 160
 Superposition der Lösungen, 69

Trennung der Variablen, 68, 69, 73,
 159, 160
 Differenzialgleichungssystem, 82, 96,
 97, 313
 Differenztemperatur, 85, 229
 Summentemperatur, 87
 Diffusionslänge, 145, 164
 Dimensionsanalyse, 41, 68, 84
 Diskretisierung, 104
 Dissipation, 51
 Beispiel, 98, 117, 128, 288
 Divergenz, 37, 49
 Beispiel, 47
 Doppelrohr-Wärmeübertrager
 Beispiel, 232, 234
 Druckverlust, 52
 Durchlauferhitzer
 Beispiel, 44
 Durchmesser
 hydraulischer, 191, 207

E

Effizienz
 thermische, 192, 282
 Einfachverglasung
 Beispiel, 29, 45
 Einlauf, 188
 hydrodynamischer, 189, 204
 thermischer, 189, 204
 Einzelnadel, 129
 Eis
 Beispiel, 47, 48, 286, 291
 Eisblumen
 Beispiel, 30
 Eishockey-Stadion
 Beispiel, 285
 Emission, 21, 239, 241
 Energie
 Gesamt-, 51
 innere, 57, 59
 kinetische, 51
 mechanische, 51
 potenzielle, 51
 Energiebilanz
 differenzielle, 49, 54, 57, 332
 Beispiel, 58, 77, 94, 95, 98, 131,
 137, 226, 227, 298, 305, 313,
 316
 gekoppelte Systeme
 Beispiel, 81, 88, 96, 97, 227
 geschlossenes System, 54
 Beispiel, 67, 75, 94, 201, 266
 globale, 54, 57, 332
 Beispiel, 75, 92, 98, 201, 204,
 218, 220, 286, 287, 290, 291,
 293, 297–301, 307, 310, 316
 Hinweise, 332
 innere Wärmequellen

- Beispiel, 75, 88, 95, 302
 instationäre, 51
 Beispiel, 67, 71, 94, 95, 98, 286,
 290, 291, 293, 297, 299–301,
 307, 310
 integrale, 54
 Kontrollvolumen, 22
 Kreisringelement, 98
 Kugelschale, 98
 offenes System, 51
 Beispiel, 71, 94, 227
 Rippe, 121, 136
 Rohrleitung, 112
 Skizze, 67, 71, 82
 stationäre, 54
 Beispiel, 75, 88, 90, 95, 201, 266,
 268, 287, 293, 298, 302, 305,
 312, 313
 Teilsysteme, 82
 Volumenelement, 57
 Vorgehen beim Aufstellen, 58
 Wortform, 57
 Energieeinsparverordnung
 Beispiel, 311, 313
 Energiestrom
 diffusiver, 60
 massegebundener, 51
 Entdimensionierung, 82, 83, 158,
 167, 169, 172, 186
 Entengrill
 Beispiel, 298
 Enthalpie, 53, 59
 Enthalpiestrom, 53, 58–60
 Erhaltungsgröße, 19
 error function, *siehe* Fehlerfunktion
 Erwärmung eines Metallstabs
 Beispiel, 137
 erweiterter ideal gerührter Behälter,
 141, 151
 Beispiel, 165
 Temperaturverteilung, 154
 Erzwungene Konvektion
 durchströmtes Kreisrohr, 225
 Kreisscheibe, 294
 längs angeströmte, 187
 Kugel
 umströmte, 188
 Platte
 längs angeströmte, 187
 Profile
 quer angeströmte, 187, 188
 schräg angeströmte, 187
 Rohr- und Kanalströmung, 188
 Zylinder
 quer angeströmter, 187
 schräg angeströmter, 187
 Euler-Cauchy-Verfahren, 313
 Exponentialfunktion, 170
 Extremwertsuche, 92, 115, 305
- F**
- Falschfarben, 105
 Fehlerfunktion, 145, 174, 317
 komplementäre, 145, 162, 174, 317
 Feld
 skalares, 17
 Fernwärmeleitungen
 Beispiel, 118
 Finite Differenzen, 104, 141
 Finite Elemente, 104, 141
 Fischteich
 Beispiel, 94
 Fixpunktiteration, 184
 Fluid
 dichtebeständiges, 50
 inkompressibles, 50
 Temperaturverlauf, 191, 217, 226,
 298, 305
 Fluidtemperierung
 Beispiel, 97
 Fluxkondensator
 Beispiel, 302, 307
 Folienheizung
 Beispiel, 291
 Formfaktor, 102
 Wärmeleitung
 Beispiel, 111, 118
 dimensionsloser, 103
 Fouling, 223
 Fourier'scher Wärmeleitungsansatz,
 19, 34, 77, 88, 90, 92, 110,
 120, 131, 157, 168, 334
 Fourier-Reihe, 141, 148, 167
 Randbedingung
 dritter Art, 148
 erster Art, 148
 Fourier-Zahl, 138, 141, 144, 154, 155,
 164, 169, 170, 172, 173, 175,
 186
 Freie Konvektion, 192
 ebene Platte
 geneigte, 193
 horizontale, 194
 vertikale, 193
 Fluidschicht
 geneigte, 196
 geschlossene, 195
 horizontale, 195
 offene, 197
 vertikale, 196, 210
 Kanal
 geneigter, 198
 senkrechter, 197
 Kreisscheibe
 horizontale, 194
 Kugel, 194
 parallele vertikale Platten, 199
 Platte
 horizontale, 209
 vertikale, 208
 Zylinder
 horizontaler, 194, 212
 vertikaler, 193
 Frequenz, 238
 Fußbodenheizung
 Beispiel, 277, 284
- G**
- Gartenmauer
 Beispiel, 287
 Gas
 ideales, 54, 55, 59
 Gauß'sche Fehlerfunktion, *siehe* Fehlerfunktion
 Gauß'scher Algorithmus, 279
 Gebäudeaußenwand
 Beispiel, 117, 118, 305, 309, 310,
 312
 Geothermal-Wärmeübertrager
 Beispiel, 232
 Gesamtwärmeübergangskoeffizient,
 22, 254, 332
 Geschwindigkeitsenergie, 51
 Geschwindigkeitsfeld
 stationäres, 47
 Getränkekühlung
 Beispiel, 215, 297, 307
 Glühlampe
 Beispiel, 300
 Glühweinabkühlung
 Beispiel, 293, 301
 Glasscheibe vor Kaminfeuer
 Beispiel, 214
 Gleichgewicht
 thermisches, 17
 Gleichungssystem
 lineares, 272, 279
 nichtlineares, 269
 Graetz-Zahl, 21, 186
 Grashof-Zahl, 21, 186
 Grenzschicht, 188, 192, 193, 200
 laminare, 187
 turbulente, 187
 Griff
 Beispiel, 316
- H**
- Hagen-Poiseuille'sches Gesetz, 80
 halbbunendlicher Körper, 141, 144
 beidseitig, 146, 171, 174, 178, 179
 Beispiel, 161, 164, 170, 171,
 178–181
 Koordinatenrichtung, 144, 164
 Oberflächentemperatur, 162, 164
 Orts-Zeit-Koordinate, 144
 Randbedingung
 dritter Art, 145
 erster Art, 145
 zweiter Art, 145, 161
 Temperaturverlauf
 dimensionsloser, 145
 Halbwertszeit, 143
 Hallenheizung
 Beispiel, 284, 303
 Handwärmer
 Beispiel, 316
 Hauptsatz
 erster, 50, 53
 nullter, 16, 17

zweiter, 16, 18, 20
 Hebel
 Beispiel, 131
 Heckscheibenheizung
 Beispiel, 291
 Heizrohr
 Beispiel, 313
 Heizstrahler
 Beispiel, 284
 Heizungsleitung
 Beispiel, 112, 313
 Helligkeit, 242
 Helligkeitsverfahren
 Beispiel, 271, 276, 283–285, 298,
 302, 306, 308
 Himmelsabstrahlung
 Beispiel, 266, 286
 Hitzdrahtanemometer
 Beispiel, 201
 Hochleistungschip
 Beispiel, 311
 hydraulischer Durchmesser, 191, 207
 Hyperbelfunktionen, 91, 126, 128
 Additionstheorem, 127

I

ideal gerührter Behälter, 49, 67, 141,
 143
 Beispiel, 67, 97, 98, 181, 183, 184,
 215, 290–293, 295, 299, 301,
 307, 314, 316
 Biot-Zahl, 144
 charakteristische Länge, 143
 Fourier-Zahl, 144
 nichtspeichernde Hülle, 183, 184
 Temperaturverlauf, 143
 Wärmedurchgang, 143

Iglu
 Beispiel, 289

Industrieofen
 Beispiel, 270

Infrarot-Strahlung, 21, 239

inkompressibel, 52, 59

Integralsatz
 Gauß-Green, 44

Isentropenexponent, 52

Isolation, 17

Isolierverglasung
 Beispiel, 46, 210, 287

Isothermen, 102, 105

isotrop, 20

Iteration
 Beispiel, 184, 202, 300

J

Jacobi-Matrix, 269

K

k-Wert, 27
 Beispiel, 113, 114, 117, 206, 226,
 233, 235, 293, 299, 301, 303,
 304, 310–312

k-Wert-Hyperbel, 114
 Körperfarbe, 240
 Kühlgutcontainer
 Beispiel, 296
 Kühlkörper, 28
 Beispiel, 128, 136, 215
 Kühlregister
 Beispiel, 95
 Kühlschrank
 Beispiel, 304
 Kühlstern
 Beispiel, 137
 Kaffeetasche
 Beispiel, 137
 Kalksandsteine
 Beispiel, 184
 kalorische Mitteltemperatur, 93, 110,
 150, 151, 166, 176
 Kaminrohr
 Beispiel, 215
 Kanalströmung, 188
 kartesische Koordinaten, 23
 Kelvin, 17
 Kennzahlen
 dimensionslose, 21, 138, 186
 Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz,
 248
 Kleben von Stahlteilen
 Beispiel, 96
 Knödelzubereitung
 Beispiel, 292
 Kompressibilität
 isotherme, 54
 Konserven
 Beispiel, 183
 Kontakttemperatur, 147
 Kontaktwiderstand
 thermischer, 25, 28, 136
 Kontinuitätsgleichung, 49
 Kontrollvolumen
 infinitesimales, 22
 Konvektion, 19, 20
 Arten, 185
 erzwungene, 20, 185
 Beispiel, 204–206, 213, 214, 293,
 294, 299, 307
 durchströmtes Kreisrohr,
 189–191
 nichtkreisförmiger Querschnitt,
 191
 Wärmeübergangskoeffizient, 21
 freie, 20, 185, 192
 Beispiel, 47, 208, 209, 213–215,
 293, 294, 299
 Geschwindigkeitsfeld, 47
 Grenzschichtdicke, 47
 Wärmeübergangskoeffizient, 21
 Grenzschicht, 185
 Koppelbedingung, 25, 92, 133
 Kräftebilanz, 79
 Kreiszyylinder
 quer angeströmter, 202, 206, 212
 Kreuzprodukt, 42

Krokettenzubereitung
 Beispiel, 295

Kugel
 innere Wärmequellen, 102
 umströmte, 188

kugelförmiger Tank
 Beispiel, 183, 303, 304

Kugelkoordinaten, 23

Kugellager
 Beispiel, 181, 182

Kugelschale
 innere Wärmequellen, 102
 mehrschichtige, 100, 304
 Péclet-Gleichung, 100, 119
 Temperaturprofil, 100, 110
 Wärmedurchgangskoeffizient, 101
 Wärmeleitwiderstand, 100

Kugelspeicher
 thermischer
 Beispiel, 299

L

Längswärmeleitung, 58, 60, 226

Lüftungskanal
 Beispiel, 214

Lageenergie, 51

Laminarströmung
 hydrodynamischer Einlauf, 190
 thermischer Einlauf, 189
 vollständig ausgebildete, 189

Laplace'sche Differenzialgleichung,
 23, 102, 106, 158

Laplace-Operator, 23, 37

Lastkraftwagen
 Beispiel, 214, 293, 296, 299

Leistung
 technische, 51, 54, 58

Leitung, *siehe* Wärmeleitung

Leitwert
 elektrischer, 25
 thermischer, 25, 26, 28
 Beispiel, 98, 316

Leuchtturm
 Beispiel, 119

Licht
 sichtbares, 21, 239

Luftwechsel, 55

M

Mach-Zahl, 52

Massenbilanz
 differenzielle, 49
 globale, 50
 Hinweise, 332

Massenstrom, 60

Milchkühler
 Beispiel, 224

Mindestwärmeschutz
 Beispiel, 309

Mischkonvektion, 20, 199, 213
 entgegengerichtete, 199
 gleichgerichtete, 199

- Mitteltemperatur
kalorische, 93, 110, 150, 151, 166, 176
- Modellbildung, 18, 104, 336
- N**
- Näherungslösung für große Zeiten, 141
übertragene Wärme, 150
Beispiel, 181, 182
kalorische Mitteltemperatur, 150
Randbedingung
dritter Art, 149
erster Art, 149
Wandtemperatur, 150, 178
Zentrumstemperatur, 150, 167, 178
- Nabla-Operator, 18, 23, 49, 166
- Nadel, 120
Übertemperatur, 124
Beispiel, 137
konische, 124
konkave parabolische, 124
konvexe parabolische, 124
Widerstand
thermischer, 124
zylindrische, 122, 124
beheizte, 316
Beispiel, 128, 136, 316
- Netto-Strahlungswärmestrom, 21
- Newton'scher Schubspannungsansatz, 79
- Newton'sches Abkühlungsgesetz, 20, 27, 67, 82, 90, 110, 120, 129, 132, 201, 266, 282, 334
- Newton-Verfahren
Algorithmus, 38, 267
Beispiel, 38, 47, 129, 148, 162, 177, 267, 269, 288, 293, 296, 300, 310, 311
Konvergenzkriterium, 38
mehrdimensionales, 269
- NTU, 192, 218
- Nußelt-Zahl, 21, 186
- Nullstellensuche
Beispiel, 37, 38, 47, 129, 148, 162, 177, 267, 269, 288, 293, 296, 300, 310, 311
- Nutzwärme, 282
- O**
- Oberflächenhärten
Beispiel, 161, 163
- Oberflächentemperatur, 101
Beispiel, 30, 46, 116–119
- Ohm'sches Gesetz, 25, 250
- Ölkühler
Beispiel, 203
- opak, 245
- Orange
Beispiel, 181
- Ortskoordinate
dimensionslose, 138
- P**
- Péclet-Gleichung, 99
universelle, 119
- Péclet-Zahl, 21, 186
- Passivhauswand
Beispiel, 312
- Pasteurisierung von Apfelsaft
Beispiel, 235
- PC-Board
Beispiel, 106
- Pfannengriff
Beispiel, 136
- Phasenübergang
Wärmeübergangskoeffizient, 21
- Planck'sches Strahlungsgesetz, 239
- Platine
Beispiel, 106
- Platte
Grenzschicht, 187
innere Wärmequellen, 101
längs angeströmte, 187
mehrschichtige, 99
Péclet-Gleichung, 99, 119
Temperaturprofil, 99, 119
- Plattenheizkörper
Beispiel, 207
- Poisson'sche Differenzialgleichung, 23, 158
- Potenzialgleichung, 23
- Prandtl-Zahl, 21, 186
- Produktansatz, 155, 169, 171
Biot-Zahl, 156, 169, 173
Fourier-Zahl, 155, 172, 173
halbunendlicher Körper, 170
- Profile
quer angeströmte, 188
- Prozessgröße, 16
- Prozessor
Beispiel, 117, 128, 288, 311
- Pulverbeschichten
Beispiel, 273
- Q**
- Quellterm, 58
- Querschnitt
nichtkreisförmiger, 191
- R**
- Rückwärmzahl, 237
- Rührkessel
Beispiel, 97, 98, 290
- Randbedingung, 24, 78, 79, 89, 98, 108, 109, 127, 133, 135, 148, 164, 230
Adiabasis, 24, 140
dimensionslose, 167, 173
Dirichlet'sche, 24
dritter Art, 24
Beispiel, 34
dimensionslose, 140
erster Art, 24
Beispiel, 33
- dimensionslose, 140
Grenzwert, 24
- Neumann'sche, 24
- Newton'sche, 24
- normierte, *siehe* dimensionslose
- Robin'sche, 24
- Stefan'sche, 25
- vierter Art, 25
- zweiter Art, 24
Beispiel, 33
- dimensionslose, 140
- Raumklimatisierung
Beispiel, 95
- Raumlufttemperatur
Beispiel, 31
- Raumwinkel, 241
- Rayleigh-Zahl, 21, 186
- Rechengitter, 104
- Rechteckrippe
Beispiel, 215
- Regenerator, 217
- Regentonne
Beispiel, 63
- Reibungsleistung
innere, 52
- Reifbildung
Beispiel, 266
- Rekuperator, 217
- Reynolds-Zahl, 21, 186
kritische, 187, 188
- Rippe, 120
Übertemperatur, 120–123, 126–128, 131, 134, 135
Beispiel, 90, 94, 289, 303, 306, 307
Differenzialgleichung, 125
normierte, 125
- Dreiecks-, 123
- konkave parabolische, 123
- konvexe parabolische, 123
- Kreisring-, 122, 123
- Leistungsziffer, 121
Beispiel, 130
- Modellannahmen, 120
- optimale, 124
- Rechteck-, 121
Beispiel, 136, 137
kurze, 122, 123
Temperaturverlauf, 122
unendlich lange, 122, 123
- Trapez-, 123
- universelle Differenzialgleichung, 121
- Widerstand
Beispiel, 303
thermischer, 124
- Wirkungsgrad, 120
Beispiel, 130, 306, 307
- Rippenparameter, 90, 120, 122
- Rippenrohr
Beispiel, 136, 303
- Rohr
beheiztes
Beispiel, 48, 305

- Rohrleitung
 Beispiel, 214, 290
 Temperaturabfall, 113
 Wärmedämmung, 112, 311, 313
 Wärmedurchgangskoeffizient, 206
 Beispiel, 226
 Wärmeverlust, 113
- Rohrreibung, 52
- Rohrströmung, 188
 Übergangsbereich, 191
 Beispiel, 290, 298, 305
 Geschwindigkeitsprofil, 79
 Längenkorrektur, 190
 laminare, 79, 189, 203
 Temperaturkorrektur, 190, 206
 turbulente, 190, 205, 225
- Rotation, 42
- Runge-Kutta-Verfahren, 313
- S**
- Sandwichbauteil
 Beispiel, 117, 293
- Schallgeschwindigkeit, 52
- Schaltbild
 thermisches
 Beispiel, 46, 75, 106, 117, 118, 266, 271, 273, 277
- Scheibenabstand, 211
- Scheibenbremse
 Beispiel, 310
- Scheibenzwischenraum, 46, 210
- Schichttemperatur, 101
- Schlafsack
 Beispiel, 288
- Schmelzwärme
 Beispiel, 47, 48
- Schneckenwelle
 Beispiel, 163
- Schock-Härtung
 Beispiel, 161
- SMD-Bauteile
 Beispiel, 106
- Solarabsorber
 Beispiel, 280
- Solarkollektor
 Beispiel, 296
- Solarkonstante, 249
- Solarspeicher
 Beispiel, 184
- Sonne, 248
- Spaltweite
 charakteristische, 195, 210
- Spannungskoeffizient
 isochorer, 54
- Stahldraht
 thermische Behandlung
 Beispiel, 313
- Stahlplatten
 Beispiel, 176
- Stefan-Boltzmann'sches Strahlungsgesetz, 21, 239, 268, 334
- Stefan-Boltzmann-Konstante, 21
- Ströme, 51
- Nomenklatur, 16
- Strömung
 kompressible, 52
- Strömungsgeschwindigkeit, 202
- Strahlung, *siehe* Wärmestrahlung
 Absorption, 21
 Emission, 21
 Wellenlängenbereiche, 21
- Strahlungsaustauschkoeffizient, 255
- Strahlungsgesetz
 Planck, 239
 Stefan-Boltzmann, 21, 37, 239, 268, 334
- Strahlungsheizung
 Beispiel, 277, 283, 284
- Strahlungskonstante der Anordnung, 21, 37, 46, 252
- Strahlungsleistungsdichte
 spektrale, 239
- Streuleistung, 52
- Stromdichte, 51
- Stromfluss
 Beispiel, 98, 114
- Stromkabel
 Beispiel, 98, 114
- System, 49
 adiabates, 17
 atmendes, 54, 55, 71
 diathermes, 17
 geschlossenes, 16, 53
 halboffenes, 16
 offenes, 16, 55
 thermodynamisches, 16
- Systemenergie, 57
- Systemgrenze, 16
- Systemtemperatur, 68, 72
- T**
- Tank
 kugelförmiger
 Beispiel, 303, 304
 zylindrischer
 Beispiel, 303
- Tassenhenkel
 Beispiel, 137
- Tauwasser
 Beispiel, 117
- Taylor-Reihe, 58, 77, 89, 90, 131, 226, 228
- Temperatur, 17
 absolute, 17
 Celsius-, 17
 Kelvin-, 17
 normierte, 138
- Temperaturänderung
 zeitliche, 36, 46
- Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte, 187, 190, 191, 204, 206
- Temperaturdifferenz, 17, 25
- dimensionslose, 138
- Temperaturfeld, 17
- dreidimensionales, 18
- eindimensionales, 18
- instationäres, 18, 22
 Beispiel, 35, 46
- mehrdimensionales, 22
- Richtungsableitung, 45, 47
- stationäres, 18
 Beispiel, 39, 47, 107
- zweidimensionales, 18
 Beispiel, 39, 45, 47
- Temperaturgradient, 18, 20, 23, 24, 109
 Beispiel, 36, 41, 45, 46
- Temperaturleitfähigkeit, 22, 138
- Temperaturprofil
 lineares, 33
 Beispiel, 33
- Platte, 23
- Temperatursensor
 Beispiel, 97
- Temperaturskala, 17
- Thermische Modelle
 eindimensionale stationäre, 336
- Thermoelement
 Beispiel, 181
- Thermografie, 21, 240
- Thermometer
 Strahlungsschutzschirm, 267
- Thermometerfehler, 267
- Thermosflasche
 Beispiel, 291
- Tiefkühlkost
 Beispiel, 169
- Trans-Alaska-Pipeline
 Beispiel, 205
- Transformator
 Beispiel, 289
- Transistor-Kühlkörper
 Beispiel, 136
- Transmissionswärmeverlust
 Beispiel, 29, 30, 309, 310, 312
- Transportgesetz
 universelles, 19
- Transportkoeffizient, 19, 22
- Trockenanlage
 Beispiel, 284, 306
- Trockenofen
 Beispiel, 119
- U**
- Überströmlänge, 187, 206, 212
- Übertemperatur, 69, 74, 90, 120–128, 131, 132, 134, 135, 137, 160, 226, 227
 normierte, 137
- Übertragungsfähigkeit, 219
- Umfangswinkel, 23, 241
- Umgebung, 16
- Umschlag
 laminar-turbulent, 187, 188, 193
- USB-Wärmeplatte
 Beispiel, 316
- UV-Strahlung, 21, 239

V

Vektorprodukt, 42
 Verdampfung
 Beispiel, 48
 Verdampfungswärme, 48
 Verschiebearbeit, 51
 Verschiebeleistung, 51
 Verschiebungsgesetz
 Wien, 239
 Viskosität
 dynamische, 201, 204
 kinematische, 186, 201
 Volumenänderungsarbeit, 51
 Volumenänderungsleistung, 51
 Volumenelement
 infinitesimales, 49, 57, 77, 79
 Volumenstrom, 60

W

Wälzkörper
 Beispiel, 181, 182
 Wärme, 16
 Beispiel, 44
 Wärmeübergang
 konvektiver, 20, 24
 Strahlung, 25
 Wärmeübergangskoeffizient
 Beispiel, 201
 dimensionsloser, 21
 Größenordnungen, 21
 konvektiver, 21
 radiativer, 22, 254, 267
 Strahlung, 22, 254, 267
 thermischer Kontakt, 28
 Wärmeübergangswiderstand
 äußerer, 26, 27
 Beispiel, 45, 115
 innerer, 26, 27
 Wärmeübergangszahl, 21
 Wärmeübertrager, 216
 Übertragungsfähigkeit, 219, 225, 232
 Ablagerungen, 223, 233
 Anzahl der Übertragungseinheiten, 219, 234
 Austauschgrad, 222
 Austrittstemperatur, 224, 232
 Bauform, 217
 Betriebscharakteristik, 218, 234
 einseitig konstante Fluidtemperatur, 217
 Fouling, 223, 233
 Gegenstrom-, 220, 236, 237
 Beispiel, 224, 232, 235
 Gleichstrom-, 219, 231, 236
 Hauptgleichung, 219
 Kennzahlen, 218, 234
 Korrekturfaktor, 223
 Kreuzstrom-, 221
 beidseitig quervermischt, 222
 einseitig vermischt, 222
 unvermischt, 221

mit Phasenübergang, 223
 Beispiel, 235
 Modellannahmen, 219
 Nomenklatur, 216
 Temperaturdifferenz
 dimensionslose mittlere, 218
 logarithmisch gemittelte, 218, 224, 235
 normierte mittlere, 218
 Temperaturverlauf, 217, 227, 231, 236
 Verschmutzungswiderstand, 223
 Wärmeübertragungsfläche, 235
 Wärmedurchgangskoeffizient, 217, 233
 Wärmekapazitätsströme, 219
 Wärmekapazitätsstromverhältnis, 219
 Wärmestrom, 218–221, 224, 232, 236
 Wärmewirkungsgrad, 222, 234
 Wärmedämmung, 17
 Rohr
 Beispiel, 311, 313
 Wärmedämmverbundsystem
 Beispiel, 118, 305
 Wärmedurchgang, 20, 27, 332
 Beispiel, 184
 Wärmedurchgangskoeffizient, 27
 Beispiel, 46, 113, 114, 117, 206, 293, 299, 301, 303, 304, 310–312
 Wärmedurchgangswiderstand, 26, 27
 Beispiel, 31, 207, 293, 299, 301, 303, 304, 310–312
 Wärmedurchlasskoeffizient, 26
 Wärmedurchlasswiderstand, 26, 27
 Wärmeeindringkoeffizient, 147
 Wärmeflusslinien, 102
 Wärmekapazität
 spezifische
 isobare, 67
 isochore, 59
 mittlere, 59, 219
 volumetrische, 98
 Wärmekapazitätsstrom, 218
 Wärmeleitfähigkeit, 20
 Beispiel, 31, 48
 scheinbare, 195, 211
 temperaturabhängige, 119
 Wärmeleitfähigkeitsgruppe, 117, 305, 310, 311
 Wärmeleitpaste, 28
 Wärmeleitung, 19
 Beispiel, 48, 292, 295, 296, 299, 314, 315
 Formfaktor, 102
 Beispiel, 111, 118
 dimensionsloser, 103
 Fourier'sche Differenzialgleichung, 22
 Grundgleichung

dimensionslose, 139
 instationäre, 138, 184, 292, 295, 296, 299, 314, 315
 übertragene Wärme, 157, 176
 charakteristische Länge, 156, 169, 172, 177
 Eigenwertbestimmung, 148, 177
 eindimensionale, 23
 exakte Lösung, 147, 167, 177
 geringe Temperaturunterschiede, 143
 Isothermen, 177
 Kurzzeitznäherung, 151, 164, 178
 Lösung für sehr kurze Zeiten, 144
 Lösungsfunktionen, 148
 mehrdimensionale, 155, 169, 171
 Modellvergleich, 141, 142, 150, 165
 Näherungslösung für große Zeiten, 149, 167, 169, 173, 178
 Oberflächentemperatur, 169, 173
 symmetrische Grundkörper, 147
 Temperaturgradient, 149, 168
 unendlich langer Zylinder, 164
 Wärmestrom, 149, 157, 168
 Wärmestromdichte, 149
 Zentrumstemperatur, 175
 koordinatenunabhängige Darstellung, 23
 Operatorenschreibweise, 23
 stationäre, 99
 axiale, 48
 eindimensionale, 101
 mit Wärmequellen, 23, 101
 ohne Wärmequellen, 23
 zweidimensionale, 102
 verallgemeinerte Gleichung, 23
 Wärmeleitungsansatz
 Fourier, 19, 34, 77, 88, 90, 92, 110, 120, 131, 157, 168, 334
 negatives Vorzeichen, 20
 Wärmeleitungsdifferenzialgleichung
 Fourier'sche
 Beispiel, 33, 158, 166, 172, 181
 Wärmeleitwiderstand, 26, 27
 Wärmemenge, 16
 Wärmemitführung, *siehe* Konvektion
 Wärmequellen
 innere, 22, 43, 51, 57, 58, 108, 119, 302, 316
 Wärmequellendichte, 22, 57
 Wärmerückgewinnung, 237
 Wärmestrahlung, 19, 21, 238
 Absorption, 245
 Absorptionskoeffizient, 280
 solarer, 248
 auftreffende Strahlung, 242
 diffuse Strahlung, 241
 diffuser Strahler, 239
 drei Oberflächen, 253

- Einstrahlzahl, 250, 252, 255
 Beispiel, 271, 273, 277, 285, 298, 302, 306, 308
 Eigen-, 257
 geneigte lange Platten, 261
 koaxiale parallele Scheiben, 260
 koaxiale Scheiben, 273
 konzentrische Kugeln, 262, 285
 konzentrische kurze Zylinder, 263
 konzentrische lange Zylinder, 260
 Kugel über großer Platte, 262
 Kugel über Kreisscheibe, 262
 Matrix, 258, 271, 275, 278
 Methode der gekreuzten Fäden, 259, 270
 parallele endliche Rechtecke, 260
 parallele lange Platten, 261
 parallele lange Zylinder, 262
 parallele Zylinder über großer Platte, 262
 Reziprozität, 250, 257, 271, 274, 277
 senkrechte endliche Rechtecke, 260
 senkrechte lange Platten, 261
 senkrechte Rechtecke, 277
 Summation, 257, 271, 274, 277, 278
 Superposition, 258, 274
 Symmetrie, 258
 symmetrische parallele lange Platten, 261
 Tetraeder, 263
 zwei Flächen, 255
 Zylinder über endlicher Platte, 261
 Zylinder über großer Platte, 261
 Emission, 239, 241
 spektrale, 239, 247
 Emissionsgrad, 244, 282
 hemisphärischer, 245
 integraler, 245
 spektraler, 245
 emittierte Strahlung, 241
 grauer Strahler, 244, 246
 Helligkeit, 242
 adiabate Oberfläche, 250, 254
 graue Oberfläche, 249
 rückstrahlende Oberfläche, 250, 254
 schwarzer Körper, 249, 254
 Helligkeitsverfahren, 251
 Beispiel, 271, 276, 283–285, 298, 302, 306, 308
 Intensität, 241
 Iteration, 39
 Kenngrößen
 integrale, 243
 spektrale, 243
 Kirchhoff'sches Gesetz, 248
 Linearisierung, 22
 Oberflächenwiderstand, 249
 Raumwiderstand, 250
 realer Strahler, 244, 246
 Reflexion, 245
 schwarzer Körper, 239, 244, 248
 Strahlungsfunktion, 240, 241, 280
 schwarzer Strahler, *siehe* schwarzer Körper
 selektiver Strahler, 244, 246
 solare Strahlung, 249
 diffuse, 249
 direkte, 249
 Gesamt-, 249, 282
 Strahlungsaustauschkoeffizient, 255
 Strahlungskoeffizienten, 245
 Strahlungsschutzschirm, 263, 265, 268
 Kugelschalen, 265
 parallele Platten, 263
 Zylinderschalen, 265
 Transmission, 245
 Wellenlänge, 238
 zwei Oberflächen, 252
 konzentrische Kugeln, 253
 konzentrische lange Zylinder, 253
 parallele große Platten, 253
 vollständig umschlossener Körper, 252
 Wärmestrom, 16, 51, 58, 99
 Richtung, 18
 Wärmestromdichte, 99
 Beispiel, 29, 37, 45, 46
 Wärmestromrichtung
 Merkregel, 30
 Wärmetauscher, 216
 Wärmemitmission, 20, 27, 29, 30, 58, 71
 Wärmemittransport, 19
 wichtige Gleichungen, 334
 Wärmemittransportmechanismen, 18, 332
 Analogie, 19
 Wärmemittransportvorgang
 Analyse, 19
 Wandheizung
 Beispiel, 305
 Wandtemperatur
 konstante, 192
 Wandwärmestrom
 konstanter, 192
 Warmhaltevorrichtung für Pizzas
 Beispiel, 283
 Warmwasserspeicher
 Beispiel, 44, 48
 Wasserbehälter
 Beispiel, 294
 Wasserleitung
 Beispiel, 111, 181, 225
 Wassertank
 Beispiel, 294
 Weißbierkühlung
 Beispiel, 81
 Weihnachtstrucker
 Beispiel, 299
 Wellen
 elektromagnetische, 21
 Wellenlänge, 21, 238
 Wellenspektrum, 238
 Werkstoffwahl für Rippe
 Beispiel, 137
 Widerstand
 elektrischer, 25
 thermischer, 25, 336
 Übersicht, 333
 2D-Wärmeleitung, 102, 294
 ebene Schicht, 26
 Ersatzwiderstand, 27
 Formfaktor, 102, 294
 Gesamtwiderstand, 27
 Kühlkörper, 136
 Konvektion, 26
 Nadel, 124
 Nomenklatur, 26
 Parallelschaltung, 28
 Reihenschaltung, 27
 Rippe, 124
 Schaltbild, 27
 Serienschaltung, 27, 99
 spezifischer, 26, 336
 Wärmeleitung, 26
 Widerstandsbeiwert, 52
 Wien'sches Verschiebungsgesetz, 239
 Windkanal
 Beispiel, 315
 Wirtschaftlichkeit, 114
 Beispiel, 301, 304
- Z**
- Zeitkonstante, 74, 143
 Zenitwinkel, 23, 241
 Ziegelstein
 Beispiel, 171
 Zustandsgleichung
 kalorische, 59
 Zustandsgröße, 16, 49, 53, 54, 59
 extensive, 16
 intensive, 16
 Zylinder
 innere Wärmequellen, 101
 quer angeströmter, 187
 schräg angeströmter, 187
 Zylinderfunktion, *siehe* Bessel-Funktion
 Zylinderkoordinaten, 23
 Zylinderschale
 Bezugsfläche, 100
 innere Wärmequellen, 101
 k-Wert, 100
 mehrschichtige, 99
 Péclet-Gleichung, 99, 119, 207
 Temperaturprofil, 99
 Wärmedurchgangskoeffizient, 100
 Wärmeleitwiderstand, 99