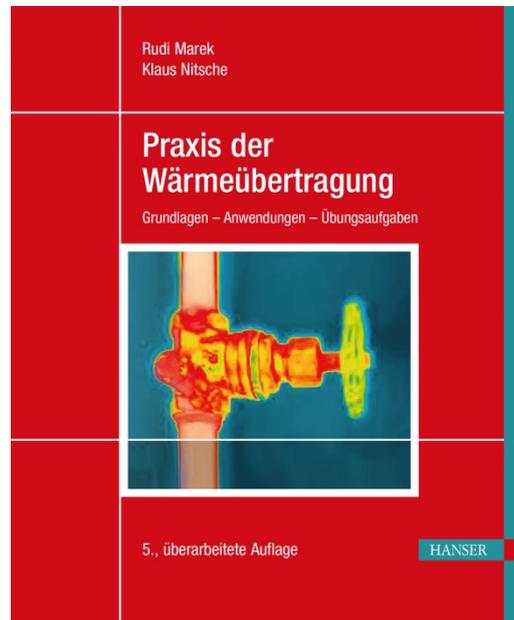


HANSER



Leseprobe

zu

„Praxis der Wärmeübertragung“

von Rudi Marek und Klaus Nitsche

Print-ISBN: 978-3-446-46124-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46125-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46124-6>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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.

Ein vertieftes Verständnis der Wärmeübertragung erfordert ein intensives Studium der Grundlagen und der Wärmeübertragungsmechanismen. Wie gut diese theoretischen Kenntnisse wirklich verstanden wurden, zeigt die erfolgreiche und zielorientierte Lösung praktischer Anwendungen und Aufgabenstellungen. Auf diesem teilweise beschwerlichen Weg will das reichlich illustrierte Werk aus den umfangreichen Lehrerfahrungen der Autoren an der Technischen Hochschule Deggendorf (THD) die Studierenden unterstützen und leiten. Die Leser finden zum Einstieg 50 ausführlich vorgerechnete Beispiele sowie 168 Übungsaufgaben mit mehr als 300 Seiten Lösungen zur Vertiefung, Prüfungsvorbereitung und Nachbereitung von Lehrveranstaltungen. Gleichzeitig liefern sie auch Anregungen, Informationen und wertvolle Hinweise für in der Praxis tätige Ingenieure, Physiker und Techniker. Zahlreiche umfassende und leicht erweiterbare MS Excel[®]-Programme ermöglichen eigene Berechnungen und Parametervariationen für Sensitivitätsanalysen.

Die mit der 4. Auflage begonnenen Präzisierungen und Ergänzungen wurden fortgesetzt (Wärmedurchgang in Teilgeometrien, Wärmestrom bei Rippen und Nadeln, Dreieck-Stern-Transformation im Helligkeitsverfahren, Periodische Randbedingungen beim HUK, RB 2. Art bei NGZ etc.). Die bewährten Arbeitshilfen wurden um drei neue Abschnitte mit den Schwerpunkten Instationäre Wärmeleitung, Mathematische Grundlagen und Methoden sowie Wirtschaftlichkeit von Wärmedämmmaßnahmen erweitert. 32 neue Aufgaben konnten aufgenommen und die MS Excel[®]-Programme erweitert werden. Die umfangreichen Lösungen und die Programmcodes stehen auf der Homepage des Verlags zum Download bereit.

Dem Carl Hanser Verlag, besonders Frau Dipl.-Ing. *Natalia Silakova* und ihrer Assistentin *Christina Kubiak* sowie Herrn *Frank Katzenmayer* danken wir für die gute Zusammenarbeit und das offene Ohr für unsere Wünsche. Bei zahlreichen Lesern aus der Praxis sowie von anderen Hochschulen und Ausbildungseinrichtungen bedanken wir uns für das erhaltene positive Feedback und die zahlreichen Hinweise und Anregungen. Die Studierenden der Technischen Hochschule Deggendorf lieferten abermals mit ihren Ideen, Fragen und fruchtbaren Diskussionen in unseren Lehrveranstaltungen und den Kursforen wertvolle Beiträge. Herr cand. bac. *Tobias Bürde* hat uns mit seiner Korrekturlesung gewinnbringend unterstützt. Großer Dank gebührt auch wieder unseren Familien für den Verzicht zugunsten des „MaNi“. Möge auch die 5. Auflage den Leserinnen und Lesern viele Erkenntnisgewinne und positive Aha-Erlebnisse bescheren. Für Fehlermeldungen, konstruktive Anregungen sowie Verbesserungsvorschläge sind wir stets dankbar.

Deggendorf, August 2019

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 Halibunendlicher 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 | 331 |
| 10.1 Gauß'sche Fehlerfunktion | 331 |
| 10.2 Bessel-Funktionen | 332 |
| 10.2.1 Bessel-Funktionen 1. Art | 332 |
| 10.2.2 Modifizierte Bessel-Funktionen 1. und 2. Art | 332 |
| 10.2.3 Zahlentafeln der Bessel-Funktionen | 334 |
| 10.3 Näherungslösung der eindimensionalen instationären Wärmeleitung | 338 |
| 10.4 Stoffwerte | 343 |
| 11 Lösungen der Übungsaufgaben | ↻ |
| Literatur | 345 |
| Arbeitshilfen | 346 |
| Index | 353 |

1 Grundlagen der Wärmeübertragung

1.1 Praktische Bedeutung

»Die Temperaturunterschiede streben dem Ausgleich zu.« [13]

Dies ist nicht nur eine wissenschaftliche Erkenntnis, sondern beschreibt auch bekannte „thermische“ Alltagserfahrungen, z. B.:

- Die Abkühlung einer heißen Kartoffel lässt sich durch kräftiges Anpusten beschleunigen.
- Beim Öffnen eines Fensters strömt im Winter kalte Außenluft ein und warme Raumluft aus.
- Jeder Automotor benötigt eine Warmlaufphase, bis er seine Betriebstemperatur erreicht.
- In klaren Nächten kann auch bei Temperaturen über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ Bodenfrost auftreten.
- Eine Kirche mit dicken Steinmauern bietet im Sommer bei hohen Außentemperaturen ein angenehmes Raumklima.

Auch wenn uns diese Vorgänge selbstverständlich und vertraut erscheinen, handelt es sich dabei doch um teilweise komplexe Vorgänge der Wärmeübertragung. Zur erfolgreichen Analyse, Berechnung und Optimierung von Wärmetransportvorgängen sowie zur Entwicklung neuer Verfahren und Technologien sind solide und umfassende Kenntnisse der Wärmeübertragung unerlässlich.

Die Wärmeübertragung ist keineswegs auf die klassischen Bereiche der Technik, wie

- Energietechnik (z. B. Kraftwerke, Turbinen, Fernwärmesysteme)
- Fahrzeugtechnik (z. B. Motorkühlung, Fahrzeugklimatisierung)
- Luft- und Raumfahrttechnik (z. B. Hitzeschilder für Wiedereintritt)
- Gebäudetechnik (z. B. Solarkollektoren, Heizkörper), beschränkt, sondern gewinnt zunehmend auch in angrenzenden Fachgebieten an Bedeutung:
- Elektrotechnik (z. B. energiesparende Kühl- und Gefriergeräte)
- Informationstechnologie (z. B. Hochleistungs-CPU's)
- Produktionstechnik (z. B. Wärmebehandlung von Werkstoffen)
- Messtechnik (z. B. Temperatursensoren, Wärmebildkameras)
- Mechatronik und Nanotechnologie (z. B. Nanoröhren, Nanobots)
- Umwelttechnik (z. B. regenerative Energien, Brennstoffzellen)
- Recycling und Entsorgungstechnik (z. B. thermische Trennverfahren)
- Bio- und Medizintechnik (z. B. Biosensoren, Thermografie zur Lokalisation von Entzündungen, Hyperthermie)
- Lebensmitteltechnologie (z. B. Kühlung von Lebensmitteln, Pasteurisierung, Transportbehälter)
- Meteorologie und Klimatologie (z. B. Treibhauseffekt, globale Erderwärmung)

Eine enge Beziehung der Wärmeübertragung besteht auch zur Stoffübertragung, die hier aber nicht behandelt wird.



Bild 1.1: Rückkühlwerk einer Klimaanlage.

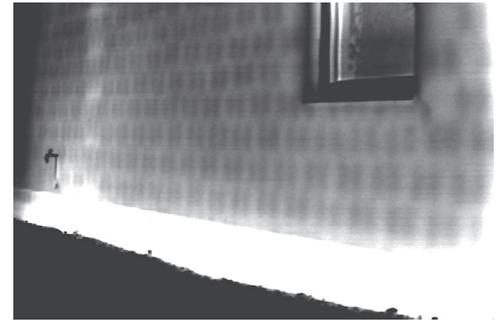


Bild 1.2: Thermogramm einer Fassade.



Bild 1.3: Glaskuppel des Reichstags Berlin.

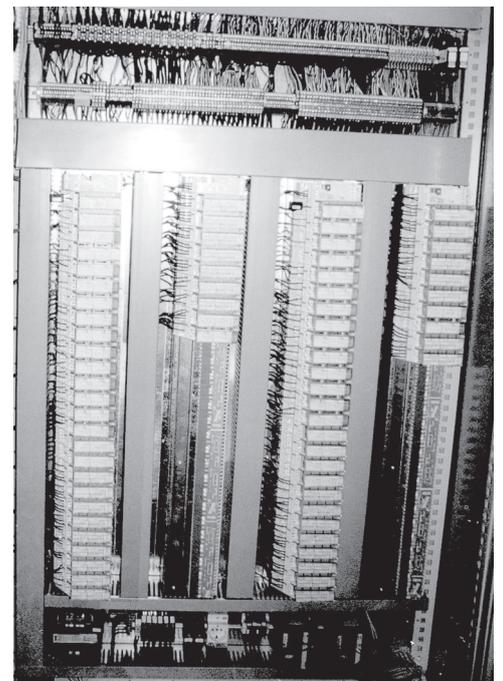


Bild 1.4: Elektrischer Schaltschrank.

Im Folgenden bezeichnet ϑ die Celsius-Temperatur, T die absolute Temperatur, t die Zeit, \dot{Q} den Wärmestrom und \dot{q} die Wärmestromdichte.

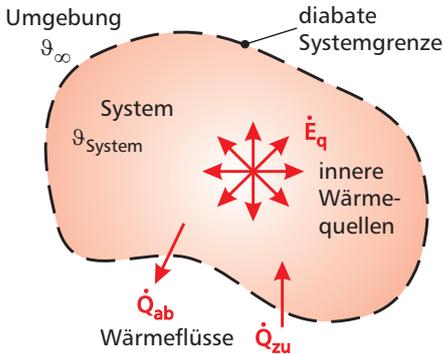


Bild 1.5: Wärmeübertragung durch Wärme-flüsse über eine diatherme Systemgrenze.

Ströme (z. B. Massen-, Volumen-, Wärme-, Enthalpieströme) werden mit einem über das betreffende Symbol gesetzten **Punkt** gekennzeichnet, also \dot{m} , \dot{V} , \dot{Q} , \dot{H} , während die vom jeweiligen Strom geänderten Quantitäten m , V , Q , H ohne Punkt notiert werden.

Die Aussage „Das System enthält 10 MJ Wärme.“ ist eigentlich unzutreffend. Besser ist die Sprechweise: „Dem System wurden 10 MJ Wärme zugeführt, wodurch sich die innere Energie um 10 MJ erhöhte.“



Die Begriffe „Temperaturaufnahme“ und „Temperaturabgabe“ entspringen der Fehlvorstellung eines „Temperaturflusses“. Tatsächlich führt ein Wärmefluss bzw. ein Wärmestrom zu Temperaturänderungen (Anstieg/Abnahme).

Thermodynamisch ist die Wärme wie die Arbeit keine Zustands-, sondern eine Prozessgröße. **Zustandsgrößen** (z. B. Temperatur T , innere Energie U) kennzeichnen als wegunabhängige Systemeigenschaften einen bestimmten Zustand eines thermodynamischen Systems. Demgegenüber beschreiben **Prozessgrößen** (z. B. Wärme Q , Arbeit W) die Form der Energieübertragung und hängen vom gewählten thermodynamischen Weg ab.

Intensive Zustandsgrößen hängen im Unterschied zu **extensiven** Zustandsgrößen nicht von der Masse bzw. der Stoffmenge des Systems ab. Bei Teilung eines Systems in zwei gleich große Teile besitzen beide Teile dieselben Werte der intensiven Zustandsgrößen wie das Ausgangssystem, während sie nur die halben Werte der extensiven Zustandsgrößen aufweisen.

Es wird davon ausgegangen, dass der (die) Leser(in) im Wesentlichen mit den Grundlagen der Wärmeübertragung vertraut ist. Die umfangreiche Literatur [1]–[23] bedient sich teilweise unterschiedlicher Bezeichnungen und Symbole, wobei sich das vorliegende Buch auf die gängige Nomenklatur stützt und diese bei Bedarf sinnvoll ergänzt.

1.2 Wärme, Wärmestrom, Wärmestromdichte

Wärme ist Energie, die an der diathermen (wärmedurchlässigen) Grenze zwischen Systemen verschiedener Temperatur auftritt und allein aufgrund des Temperaturunterschiedes ohne Arbeitsleistung zwischen den Systemen übertragen wird (Bild 1.5). Die **Thermodynamik** beschäftigt sich mit der Wärme Q in J (Joule) = $W \cdot s$, die bei verschiedenen **Gleichgewichtszuständen** eines Systems auftritt. Der gelegentlich verwendete Begriff Wärmemenge entstammt der unzutreffenden Vorstellung, Wärme bestünde aus einem Stoff, dem man eine gewisse Stoffmenge zuweisen könne. Die Wärme Q wird dadurch übertragen, dass in der Zeit $t = t_1 - t_0$ ein **Wärmestrom** \dot{Q} in W (Watt) = 1 J/s fließt:

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} \dot{Q}(t) dt; \quad \text{bzw.} \quad Q = \dot{Q} \cdot (t_1 - t_0), \quad \text{falls } \dot{Q} = \text{const.} \quad (1.1)$$

Häufig wird mit der **Wärmestromdichte** \dot{q} der auf die Fläche A bezogene Wärmestrom zur Beschreibung von Systemen verwendet:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad \text{und} \quad \dot{Q} = \dot{q} \cdot A \quad [\dot{q}] = \frac{W}{m^2} \quad (1.2)$$

Wärme fließt nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik selbsttätig entlang eines Temperaturgefälles stets von höherer zu niedrigerer Temperatur. Besitzen zwei Systeme in Abwesenheit thermoelektrischer Effekte (z. B. Peltier-Effekt) dieselbe Temperatur (thermisches Gleichgewicht nach dem 0. Hauptsatz), kommt der Wärmefluss zum Erliegen. Die Energieform Wärme tritt damit nur bei der Überschreitung der Systemgrenze in Erscheinung. Im System selbst ist die Wärme nicht feststellbar, sondern sie trägt zur Änderung der inneren Energie U des Systems bei. Die Erfassung der Änderung der inneren Energie ΔU (bei Festkörpern und Flüssigkeiten näherungsweise auch der Enthalpie ΔH) erfolgt indirekt über die Temperaturmessung.

Der Systembegriff der Thermodynamik ist auch in der Wärmeübertragung von zentraler Bedeutung. Das **thermodynamische System** ist ein durch eine **Systemgrenze** festgelegtes Gebiet, das zum Zweck der Analyse von seiner **Umgebung** gedanklich abgegrenzt wird (Bild 1.5). In Bezug auf das gesteckte Untersuchungsziel sollte die Systemgrenze so gewählt werden, dass eine möglichst einfache Lösung erreicht wird. Die Grenzen eines Systems können fest oder variabel, materiell oder imaginär, durchlässig oder undurchlässig sein. Thermodynamische Systeme lassen sich nach ihren Wechselwirkungen hinsichtlich des Energie- und Stofftransports mit der Umgebung einteilen.

Geschlossene Systeme sind massedicht und ermöglichen keinen Stofftransport über die Systemgrenze. Bei **offenen Systemen** treten Massenströme (ggf. an verschiedenen Stellen) über die Systemgrenze. Bei halb-offenen Systemen erfolgt der Massentransport nur in eine Richtung über die Systemgrenze (z. B. Ausströmen aus einem Behälter).

Hinsichtlich des Wärmetransports ist zwischen **adiabaten** (wärmedichten) und **diathermen** (wärmedurchlässigen) Systemen zu unterscheiden. Da eine thermisch ideale Wärmedämmung nicht möglich ist, stellt der Begriff „adiabat“ eine Idealisierung dar und wird in der Praxis für Systeme verwendet, bei denen der Wärmefluss über die Systemgrenze vernachlässigbar klein ist, wie z. B. bei sehr gut gedämmten Rohrleitungen (Bild 1.7).

1.3 Temperatur und Temperaturfelder

Im thermodynamischen Sinne ist die **Temperatur** eine intensive Zustandsgröße, die als Grundgröße nicht auf andere Größen zurückgeführt werden kann, sondern eindeutig definiert werden muss. Dies gelingt mithilfe des thermischen Gleichgewichts thermodynamischer Systeme (0. Hauptsatz). Danach haben zwei Systeme im thermischen Gleichgewicht immer dieselbe Temperatur, während Systeme, die nicht im thermischen Gleichgewicht miteinander stehen, stets unterschiedliche Temperaturen aufweisen.

Die Temperatur charakterisiert damit den **thermischen Zustand eines Systems**. Durch den Wärmesinn besitzt der Mensch mit „heiß“, „warm“ und „kalt“ qualitative und relative Vorstellungen über den thermischen Zustand von Systemen. Eine Quantifizierung dieser Empfindungen war jedoch erst mit der Einführung des Temperaturbegriffs und der Erfindung funktionierender Thermometer mit geeigneten Skalen möglich.

Temperaturen können entweder als **Celsius-Temperaturen** ϑ oder als **absolute (thermodynamische) Temperaturen** T notiert werden:

$$T = \frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} \cdot \text{K} + T_0; \quad [T] = \text{K} \quad \text{mit} \quad T_0 = 273,15 \text{ K} \quad (1.3)$$

$$\vartheta = \frac{T - T_0}{\text{K}} \cdot ^{\circ}\text{C}; \quad [\vartheta] = ^{\circ}\text{C} \quad (1.4)$$

Im Folgenden werden Temperaturen bis auf die Wärmestrahlung als Celsius-Temperaturen angegeben und mit dem Symbol ϑ notiert. Da sich beide Temperaturen nur um die additive Konstante T_0 unterscheiden, ist es unerheblich, ob **Temperaturdifferenzen** zwischen Celsius- oder Kelvin-Temperaturen berechnet werden.

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (1.5)$$

$$\Delta \vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2 \quad (1.6)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 = (\vartheta_1 + T_0) - (\vartheta_2 + T_0) = \vartheta_1 - \vartheta_2 = \Delta \vartheta \quad (1.7)$$

Es ist allerdings zu beachten, dass **Temperaturdifferenzen generell in K** angegeben werden, unabhängig davon, auf welcher Temperaturskala sie berechnet wurden. Der scheinbare Widerspruch, dass die Gln. (1.3) und (1.4) mit K und $^{\circ}\text{C}$ zwei unterschiedliche Einheiten verknüpfen, lässt sich dadurch auflösen, dass jede Celsius-Temperatur als Temperaturunterschied zum Nullpunkt der Celsius-Skala interpretiert und damit in K angegeben werden kann. In der Praxis sind daher auch Schreibweisen etabliert, die K und $^{\circ}\text{C}$ direkt verknüpfen, z. B. :

$$20 \text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15 \text{ K} = 293,15 \text{ K} \quad \text{oder} \quad 300 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = 26,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

 Die Begriffe „Isolation“ bzw. „isolieren“ kennzeichnen Schutzmaßnahmen gegen den elektrischen Strom. Im Zusammenhang mit wärmetechnischen Maßnahmen spricht man besser von „**Wärmedämmung**“ bzw. „**dämmen**“, auch wenn der Begriff „Isoliertechnik“ in der Praxis eingeführt ist.

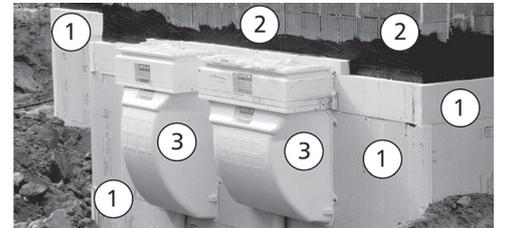


Bild 1.6: Beispiel für eine Wärmedämmung: Perimeterdämmung ① aus extrudiertem Polystyrol (XPS) an einer betonierten Kellerwand mit darüber liegender ungedämmter Ziegelwand ② sowie Aussparungen im Bereich der Lichtschächte ③. Oberhalb der Wärmedämmung ist eine Feuchtesperre in Form einer Bitumendickbeschichtung (schwarz) erkennbar, die ebenfalls keine „Isolierung“ darstellt.



Bild 1.7: Gedämmte Rohrleitungen.

 Im Unterschied zum Winkelmaß $^{\circ}$ (Grad) wird die Dimension $^{\circ}\text{C}$ mit einem Leerzeichen an die Maßzahl gesetzt, also 45° , aber $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Einheit $^{\circ}$ ist für Celsius-Temperaturen ebenso unzutreffend wie C.

► **Beispiel:** ◀

Zwischen der Temperatur im Wohnzimmer von Frieda Frostig von $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und der Außenlufttemperatur von $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ besteht eine Differenz von $\Delta \vartheta = \vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{außen}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} - (-5 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 30 \text{ K}$ (30 Kelvin).

 Die Angabe $^{\circ}\text{K}$ für eine Temperaturdifferenz ist falsch, richtig ist K.

 Das große griechische Δ wird sowohl als Vorsatz für Differenzen als auch für den Laplace-Operator verwendet.

► **Beispiel:** ◀

Bei einer im siedenden Wasser gekochten Kartoffel weist zunächst jeder Volumenpunkt eine einheitliche Temperatur von 100 °C auf. Auf einem Teller kühlt sie vom Rand her ab. An der Außenseite herrschen niedrigere Temperaturen als im Zentrum. Jeder Punkt hat eine eigene Temperatur, die sich mit der Zeit ändert. Es liegt ein instationäres dreidimensionales Temperaturfeld $\vartheta(x,y,z,t)$ vor.



Bild 1.8: Tauwasser und mehrdimensionales Temperaturfeld an einer Verglasung.



Da ein Wärmestrom gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik selbsttätig stets in einem Temperaturgefälle (von warm nach kalt) fließt, gibt der Temperaturgradient die **negative** Richtung des Wärmestroms an.

Bei eindimensionaler Geometrie lautet der Temperaturgradient $d\vartheta/dx$. Die hier gewählte allgemeinere Schreibweise $\partial\vartheta/\partial x$ gewährleistet die leichtere Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den mehrdimensionalen Fall.

Tabelle 1.1: Analogie zwischen dem Transport von Wärme und Wasser.

| Wärme ... | Wasser ... |
|-------------------------------|-------------------------------|
| ... benötigt zum Fließen ... | ... benötigt zum Fließen ... |
| ein Temperaturgefälle. | ein natürliches Gefälle. |
| ... fließt ... | ... fließt ... |
| von warm nach kalt. | vom Berg ins Tal. |
| ... kann nur durch Arbeit ... | ... kann nur durch Arbeit ... |
| von kalt nach warm | vom Tal bergauf |
| ... transportiert werden. | ... transportiert werden. |

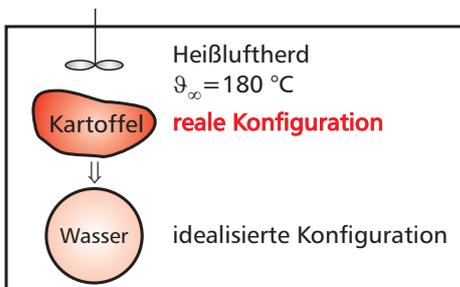


Bild 1.9: Modellierung einer Kartoffel als Kugel mit den Eigenschaften von Wasser.

Die Temperatur ist eine **skalare** Größe, d.h. sie besitzt keine Richtung. Hängt die Temperatur vom Ort ab, spricht man von einem **Temperaturfeld** (skalares Feld):

- eindimensionales Temperaturfeld $\vartheta = \vartheta(x)$
- zweidimensionales Temperaturfeld $\vartheta = \vartheta(x,y)$
- dreidimensionales Temperaturfeld $\vartheta = \vartheta(x,y,z)$

Hängt die Temperatur nur vom Ort und nicht von der Zeit ab, spricht man von einem **stationären** Temperaturfeld, anderenfalls von einem **instationären** (zeitabhängigen) Temperaturfeld:

- stationäres Temperaturfeld $\vartheta = \vartheta(\vec{x})$
- instationäres Temperaturfeld $\vartheta = \vartheta(\vec{x},t)$

Im Allgemeinen sind Temperaturfelder zeit- und ortsabhängig. Allerdings werden in der Praxis vielfach stationäre Zustände betrachtet, insbesondere wenn Gleichgewichtszustände interessieren (z. B. stationäre Betriebstemperatur in einem Verbrennungsmotor).

Der **Temperaturgradient** ist ein Vektor, der die Richtung des größten Temperaturanstiegs in einem Temperaturfeld angibt. Er berechnet sich aus den partiellen Ableitungen des Temperaturfeldes nach den Ortskoordinaten, z. B. gilt in kartesischen Koordinaten:

$$\text{grad } \vartheta = \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}, \frac{\partial \vartheta}{\partial y}, \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right)^T = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \cdot \vec{e}_x + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \cdot \vec{e}_y + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \cdot \vec{e}_z \quad (1.8)$$

Der Nabla-Operator erlaubt eine **koordinatenunabhängige** Notation:

$$\text{grad } \vartheta = \nabla \vartheta \quad (1.9)$$

1.4 Wärmetransportmechanismen

Um eine bessere Vorstellung des in der Regel nicht sichtbaren Wärmeflusses zu erhalten, verwendet man in der Praxis **Analogien** (vgl. Tabellen 1.1 und 1.2), die auf bekannte bzw. einfachere Vorgänge zurückgreifen. Eine bekannte Modellvorstellung ist der Vergleich zwischen Wärme- und Wasserstrom (Tabelle 1.1). Wärmeübertragungsvorgänge spielen in vielen alltäglichen, aber auch in zahlreichen technischen Prozessen eine überaus wichtige Rolle. Das qualitative Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen und die Fähigkeit, auch quantitative Aussagen in Form ingenieurmäßiger Berechnungen vornehmen zu können, sind wichtige Voraussetzungen zur Dimensionierung und Optimierung technischer Systeme.

Zur Analyse von Wärmetransportvorgängen werden in der Praxis Modelle eingesetzt, die je nach Genauigkeitsanforderungen und vertretbarem Aufwand mehr oder weniger genaue Abbilder der komplexen realen Systeme darstellen. Teils sind entsprechende Modelle bereits verfügbar (z. B. in der Literatur), teils müssen sie im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erst an den jeweiligen technischen Systemen erstellt werden. Um die Komplexität der Modelle sinnvoll zu begrenzen, werden geeignete Vereinfachungen und Vernachlässigungen durchgeführt (z. B. wie in Bild 1.9), wozu vertiefte Kenntnisse der Grundlagen der Wärmeübertragung notwendig sind.

Die mathematische Behandlung physikalischer Probleme führt auf Ausdrücke, die Unterschiede der maßgeblichen Variablen zueinander beinhalten (z. B. $\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta \vartheta}{\Delta x^2}$, $\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \approx \frac{\Delta \vartheta}{\Delta t}$). Je kleiner die Inkremente (z. B. Δx , Δt) gewählt werden, desto genauer ist die jeweilige Beschreibung.

Im Grenzfall infinitesimaler und differentieller Änderungen erhält man Differenzialgleichungen, die eine exakte Formulierung der zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten darstellen, wobei die jeweiligen Änderungsraten als Differenziale erscheinen. Daher werden zahlreiche Probleme im Ingenieurbereich durch **Differenzialgleichungen** beschrieben, zu deren Lösung die Mathematik die Grundlagen und Hilfsmittel (z. B. Trennung der Variablen, *e*-Funktionsansatz, Substitution, Potenzreihenansatz, Finite Differenzen, Finite Elemente etc.) bereitstellt. Jedoch sind zahlreiche praktische Probleme der Wärmeübertragung auch ohne Differenzialgleichungen lösbar.

1.4.1 Arten des Wärmetransports

Generell ist zwischen **stoffgebundenem** (Leitung und Konvektion) und **nichtstoffgebundenem** Wärmetransport (Strahlung) zu unterscheiden, so dass drei Transportmechanismen auftreten können:

- ▶ **Wärmeleitung** (in Festkörpern, untergeordnet in Flüssigkeiten und Gasen; z. B. Wärmetransport durch die Wandung eines Heizkörpers oder eine Zylinderbuchse in einem Verbrennungsmotor, winterliche Wärmeverluste durch eine Gebäudeaußenwand, s. a. Bild 1.10)
- ▶ **Konvektion** (Wärmemitführung durch Strömung, in Flüssigkeiten und Gasen; z. B. Wärmetransport durch Warmwasser vom Heizkessel zu den Heizkörpern, Umwälzung der Raumluft durch thermischen Auftrieb, Kühlwasser im Kühler eines Autos, s. a. Bild 1.12)
- ▶ **Wärmestrahlung** (zwischen zwei Körpern; z. B. Infrarotstrahler in einem Festzelt, Sonne, Glühlampe, Kachelofen, s. a. Bild 1.13)

Da sich die drei Wärmetransportmechanismen überlagern, ist die exakte Behandlung schwierig, und es sind in der Praxis meist Vereinfachungen notwendig (Modellbildung).

Die **Transportgesetze** der einzelnen Wärmeübertragungsarten lassen sich universell als Verknüpfung zwischen Wirkung (Strom bzw. Fluss) und Ursache (treibendes Gefälle) formulieren:

$$\text{Strom der Transportgröße} = \text{Transportkoeffizient} \times \text{Gefälle} \quad (1.10)$$

1.4.2 Wärmeleitung

Wärmeleitung stellt einen Energietransport infolge atomarer und molekularer Wechselwirkung unter dem Einfluss ungleichförmiger Temperaturverteilung dar. Sie ist vor allem in Festkörpern von Bedeutung (Bild 1.10), tritt aber auch in Flüssigkeiten und Gasen auf.

Der empirische **Fourier'sche Wärmeleitungsansatz** (1.11) (*J.B. Biot*, 1804, 1816; *J.B.J. Fourier*, 1822) verknüpft den **Wärmestrom** $\vec{Q}(\vec{x})$ in *W* bzw. die **Wärmestromdichte** $\vec{q}(\vec{x})$ (flächenbezogener Wärmestrom)

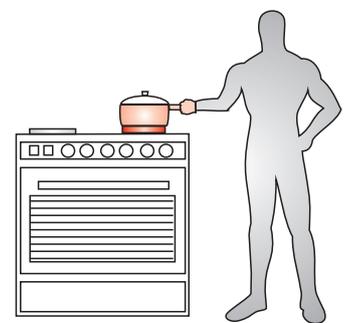
 Wärmetransportvorgänge werden prinzipiell in **3 Schritten** analysiert:

1. Identifikation aller maßgeblichen Variablen (z. B. instationäres 3dimensionales Temperaturfeld $\vartheta = \vartheta(x,y,z,t)$), Festlegung zutreffender Annahmen und Näherungen (z. B. Symmetrie in *y* und *z*), Anwendung relevanter physikalischer Gesetze und Prinzipien (z. B. Energiebilanz) zur mathematischen Problemformulierung.
2. Problemlösung mit geeigneten mathematischen Methoden (z. B. analytische oder numerische Lösung einer Dgl.). Als Lösung bezeichnet man
 - (a) eine Funktion $\vartheta(x,y,z,t)$, mit der die Berechnung der Temperatur in jedem Punkt (*x,y,z*) eines Körpers und zu jeder Zeit möglich ist (analytische Lösung).
 - (b) eine endliche Anzahl von Temperaturwerten, die bestimmten Punkten des Körpervolumens zugeordnet sind und entweder gemessen oder mit Computerprogrammen errechnet wurden (numerische Lösung).
3. physikalische Interpretation und Prüfung der Ergebnisse auf Plausibilität (z. B. Entfall nicht plausibler Lösungen bei quadratischen Gleichungen)

 Der in der Praxis für **Wärmetransport** gängige, physikalisch unzutreffende Begriff „**Wärmeaustausch**“ impliziert im Widerspruch zum 2. Hauptsatz einen gleichzeitigen Fluss in zwei Richtungen.

Tabelle 1.2: Analogie zwischen Wärmetransport und dem Transport von Wasser beim Löschen eines Feuers.

| Wärmetransport | Wassertransport |
|----------------|---------------------------|
| Wärmeleitung | Eimerkette |
| Konvektion | mit Eimer laufende Person |
| Wärmestrahlung | Feuerwehrschauch |



Herdplatte → Topf → Hand

Bild 1.10: Wärmetransport durch Leitung.

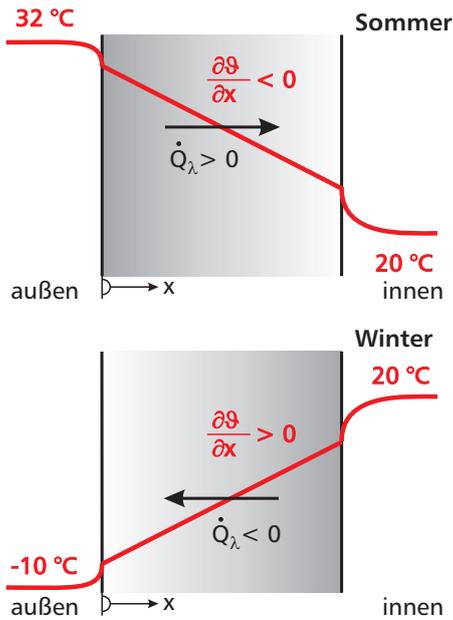


Bild 1.11: Stationäre Wärmeleitung in einer Außenwand mit beidseitigem Wärmeübergang (oben: im Sommer; unten: im Winter).

Das **negative Vorzeichen** in den Gl. (1.11) und (1.12) bedeutet, dass ein **positiver Wärmestrom** (in Richtung der positiven x-Achse, vgl. Bild 1.11) stets in Richtung **abnehmender Temperatur** (d. h. in Richtung eines negativen Temperaturgradienten von warm nach kalt) fließt. Im eindimensionalen Fall entspricht der Temperaturgradient $\partial\vartheta/\partial x = d\vartheta/dx$ der Steigung der Temperaturkurve (Tangente, Steigungsdreieck) in einem bestimmten Punkt.

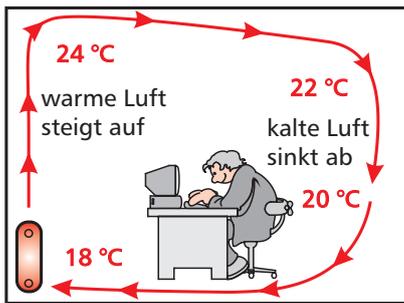


Bild 1.12: Wärmetransport in einem Raum durch freie Konvektion.

Analog zum **Wärmeübergang** gemäß Gl. (1.13) gilt beim **Stoffübergang** mit dem Stoffübergangskoeffizienten β (in m/s) für den **Massenstrom** \dot{m} bzw. die **Massenstromdichte** \dot{m}^* als Funktion der **Partialdichtedifferenz** $(\varrho_w - \varrho_\infty)$:

$$\dot{m} = \beta \cdot A \cdot (\varrho_w - \varrho_\infty) \quad \text{bzw.} \quad (1.14)$$

$$\dot{m}^* = \beta \cdot (\varrho_w - \varrho_\infty) \quad (1.15)$$

in W/m^2 infolge Wärmeleitung mit dem zum Temperaturunterschied proportionalen Temperaturgradienten $\text{grad } \vartheta$ in K/m und der durchströmten Fläche $A(\vec{x})$ in m^2 , wobei die jeweiligen Größen im allgemeinen Fall ortsabhängig sein können:

$$\vec{Q}_\lambda(\vec{x}) = -\lambda(\vec{x}) \cdot A(\vec{x}) \cdot \text{grad } \vartheta \quad \text{bzw.} \quad \vec{q}_\lambda(\vec{x}) = -\lambda(\vec{x}) \cdot \text{grad } \vartheta \quad (1.11)$$

Im **eindimensionalen Fall** (Ortskoordinate x) vereinfacht sich Gl. (1.11):

$$\dot{Q}_\lambda(x) = -\lambda(x) \cdot A(x) \cdot \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \quad \text{bzw.} \quad \dot{q}_\lambda(x) = -\lambda(x) \cdot \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \quad (1.12)$$

Weitere Vereinfachungen von Gl. (1.12) sind bei konstanter Wärmeleitfähigkeit λ bzw. konstanter Fläche A möglich.

Die **Wärmeleitfähigkeit** λ in $\text{W}/(\text{m K})$ ist eine Proportionalitätskonstante, die den maßgeblichen Transportkoeffizienten der stationären Wärmeleitung darstellt. λ ist als Stoffeigenschaft im Allgemeinen temperaturabhängig, allerdings ist dies in der Praxis aufgrund begrenzter Temperaturunterschiede häufig vernachlässigbar. In isotropen Stoffen ist λ zudem richtungsunabhängig. Holz besitzt als anisotroper Stoff quer zur Faser eine andere Wärmeleitfähigkeit als längs zur Faser.

1.4.3 Konvektion

Konvektion (Wärmemitführung) bezeichnet einen massegebundenen Energietransport in einem strömenden Fluid (Flüssigkeit, Gas) durch makroskopische Teilchenbewegung, der stets auch von Wärmeleitung (meist untergeordnet) begleitet wird. Je nach Antriebskraft ist zwischen **freier Konvektion** (natürlicher Konvektion) und **erzwungener Konvektion** (Zwangskonvektion) zu unterscheiden. Bei **Mischkonvektion** überlagern sich beide Konvektionsformen.

Der Wärmefluss zwischen einem Festkörper und einem bewegten Fluid wird als **konvektiver Wärmeübergang** bezeichnet. Bei einem Wärmetransport zwischen zwei durch einen Festkörper getrennten Fluiden (z. B. Wasser und Luft in einem Kühler) liegt ein **Wärmedurchgang** (Wärmetransmission, vgl. Bild 1.11) vor.

Bei der freien Konvektion (Bild 1.12) sind Strömungs- und Temperaturfeld über den thermischen Auftrieb gekoppelt, was die numerische Berechnung erschwert. Bei der erzwungenen Konvektion sind beide Felder voneinander entkoppelt, da der Antrieb durch einen äußeren Druckgradienten erfolgt.

Gemäß dem **Newton'schen Abkühlungsgesetz** (1.13) (I. Newton, 1701) ist der konvektiv übertragene Wärmestrom proportional zur wärmeübertragenden Fläche A und zum Temperaturunterschied zwischen Wand und Fluid $(\vartheta_w - \vartheta_\infty)$:

$$\dot{Q}_\alpha = \alpha_K \cdot A \cdot (\vartheta_w - \vartheta_\infty) \quad \text{bzw.} \quad \dot{q}_\alpha = \alpha_K \cdot (\vartheta_w - \vartheta_\infty) \quad (1.13)$$

Die Wärmestromrichtung ergibt sich aus dem Vorzeichen der wirksamen Temperaturdifferenz, wobei auch hier der 2. Hauptsatz der Thermodynamik (Wärmefluss von warm nach kalt) zu beachten ist.

Index

3/4-Regel, 28, 347

A

Abkühlungsgesetz
 Newton, 20, 27, 67, 82, 90, 110, 120, 129, 132, 201, 266, 282, 350
 Ableitung, s. Differenzial
 Absorption, solare, 94, 248, 280, 287
 Beispiel, 312
 Absorptionskoeffizient, 246
 solarer, 248
 Abstandhalter
 Beispiel, 320, 328, 329
 Abtriebsströmung, 192, 193
 Adiabase, 24
 Advektion, 58, 60
 Ähnlichkeitstheorie, 21, 186
 Ähnlichkeitsvariable, 144
 Amortisationsdauer, 301, 304, 352
 Analogie
 elektrische, 25, 124, 250, 271, 347, 350
 Beispiel, 29, 106, 116, 117, 250, 286–291, 294, 296, 301, 303–307, 309–312, 317, 318, 320, 321, 323–325, 328, 329
 Wortform, 347
 Wärme–Wasser, 18
 Anfangsbedingung, 24, 69, 85, 160
 dimensionslose, 140, 147, 167, 172
 normierte, s. dimensionslose
 anisotrop, 20
 Anströmlänge, 194
 Anzahl der Übertragungseinheiten, 192, 218
 äquidistant, 105
 Arbeitshilfen, 346–352
 Arena
 Beispiel, 308
 Außenwand, inhomogene
 Beispiel, 309, 310, 312
 Auftriebsströmung, 192
 Ausdehnungskoeffizient
 isobarer, 54, 186, 192
 Austrittstemperatur, 203, 218, 227
 Azimut, 23, 241
 Azimutwinkel, s. Azimut

B

Badewanne
 Beispiel, 61
 Bahngeschwindigkeit, 330
 Balkonplatte
 Beispiel, 94
 Bauteile
 mehrschichtige, 99
 Becherglas
 Beispiel, 317
 Behälter
 Beispiel, 184

Bernoulli-Gleichung, 52
 Bessel-Funktion, 148, 332
 Ableitung, 168
 modifizierte, 122, 332
 Bessel'sche Differenzialgleichung
 modifizierte, 122
 Betriebskosten, 352
 Bierkrug
 Beispiel, 299
 Bilanzgleichung
 Wortform, 57, 346
 Bilanzgröße, 50
 Biot-Zahl, 21, 138, 141, 144, 152, 154, 156, 186, 338, 348
 Hülle
 nicht speichernde, 143, 147, 348
 inverse, 149, 338
 modifizierte, 348
 Wärmedurchgang, 143, 147, 348
 Brauchwassererwärmung
 Beispiel, 236, 237
 Brennelement
 Beispiel, 95, 108
 Brennstoffersparnis, 318
 Brennstoffpreis, 352
 Brotbackautomat
 Beispiel, 302
 Bügeleisen
 Beispiel, 301

C

CPU
 Beispiel, 117, 128, 288, 311

D

Dämmradius
 kritischer, 115, 118
 Dämmstärke
 kritische, 114
 Rohr, 326
 variable, 327
 Deckenheizung
 Beispiel, 283
 Delta-Operator, 23
 diabat, s. diatherm
 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, 351

harmonische, 132
 homogene, 68, 85, 90, 107, 117, 132, 160, 227, 351
 Homogenisierung, 70, 74, 90, 128, 226
 inhomogene, 68, 72, 78, 79, 85, 90, 98, 108, 126, 159, 226, 351
 Lösungsschema, 351
 modifizierte harmonische, 132
 nichtlineare, 64, 300, 313
 Normierung, 82, 83, 125, 139, 158, 167
 partikuläre Lösung, 69, 73, 85, 160, 351
 Störansatz, 351
 Störterm, 68, 69, 73, 85, 98, 160, 351
 Superposition der Lösungen, 69, 351
 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, 311, 319
 Divergenz, 37, 49
 Beispiel, 47
 Doppelrohr-Wärmeübertrager
 Beispiel, 232, 234
 Dreieck-Stern-Transformation, 254
 Beispiel, 329
 Dreifachverglasung
 Beispiel, 328
 Druckverlust, 52
 Durchlauferhitzer
 Beispiel, 44
 Durchmesser
 hydraulischer, 191, 207

E

Effizienz
 thermische, 192, 282
 Eindringtiefe, periodische, 319, 348
 Beispiel, 319
 Einfachverglasung
 Beispiel, 29, 45
 Einlauf, 188
 hydrodynamischer, 189, 204
 thermischer, 189, 204
 Einzelnadel, 129
 Eis
 Beispiel, 47, 48, 286, 291
 Eisblumen
 Beispiel, 30

- Eisbrei (Ice Slurry)
 Beispiel, 320
- Eishockey-Stadion
 Beispiel, 285
- Eishöhle
 Beispiel, 325
- Emission, 21, 239, 241
- Emissionsgrad, 244, 247, 248, 296, 306, 308
- Endtemperatur, quasistationäre, 348
- Energie
 Gesamt-, 51
 innere, 57, 59
 kinetische, 51
 mechanische, 51
 potenzielle, 51
- Energiebedarf, 352
- Energiebilanz
 differenzielle, 49, 54, 57, 346
 Beispiel, 58, 77, 88, 94, 95, 98, 131, 137, 226, 227, 298, 302, 305, 313, 316, 317, 319, 327, 328
 Kontrollmöglichkeit, 57, 346
- gekoppelte Systeme
 Beispiel, 81, 88, 96, 97, 227
- geschlossenes System, 54
 Beispiel, 67, 75, 94, 201, 266
- globale, 54, 57, 346
 Beispiel, 67, 71, 75, 81, 92, 94–98, 201, 204, 218, 220, 286, 287, 290, 291, 293, 297–301, 307, 310, 312, 316, 319, 322–324, 326
- Hinweise, 346
- 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, 317
- 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, 346
- Energieeinsparverordnung
 Beispiel, 311, 313, 326
- Energiepreis, 352
- Energiestrom
 diffusiver, 60
 massegebundener, 51
- Energieverbrauch, 352
- Entdimensionierung, 82, 83, 158, 167, 169, 172, 186
- Entengrill
 Beispiel, 298
- Enthalpie, 53, 59
- Enthalpiestrom, 53, 58–60
- Erdoberflächtemperatur
 Beispiel, 319
- Erntefaktor, 318, 352
- error function, s. Fehlerfunktion
- Erwärmung eines Metallstabs
 Beispiel, 137
- erweiterter ideal gerührter Behälter,
 141, 151, 348
 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
 Rechenregeln, 170
- Extremwertsuche, 92, 115, 305
- F**
- Falschfarben, 105
- Fehlerfunktion, 145, 174, 330, 331
 komplementäre, 145, 162, 174, 331
- Feld
 quellenfreies, 37
 skalares, 17
- Fernwärmeleitungen
 Beispiel, 118
- Finite Differenzen, 104, 141
- Finite Elemente, 104, 141
- Fischteich
 Beispiel, 94
- Fixpunktiteration, 184, 351
 Beispiel, 326
- Flachdach
 Beispiel, 327
- Fluid
 dichtebeständiges, 50
 inkompressibles, 50
 Temperaturverlauf, 191, 217, 226, 298, 305
- Fluidbad
 Beispiel, 81, 323
- Fluidtemperierung
 Beispiel, 88, 97
- Fluxkondensator
 Beispiel, 302, 307
- Folienheizung
 Beispiel, 291
- Förderband
 Beispiel, 325
- Formfaktor, Wärmeleitung, 102
 Beispiel, 111, 118
 dimensionsloser, 103
- Fouling, 223
- Fourier'scher Wärmeleitungsansatz, 19,
 34, 77, 88, 90, 92, 110, 120, 131, 157, 168, 350
- 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, 348
- 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, 326
- Fußwärmer
 Beispiel, 322
- Füllstandshöhe, 63, 66
- G**
- Gammafunktion, 333
- Gartenmauer
 Beispiel, 287
- Gas
 ideales, 54, 55, 59
- Gauß'sche Fehlerfunktion, s. Fehlerfunktion
- Gauß'scher Algorithmus, 279
- Gebäudeaußenwand
 Beispiel, 45, 117, 118, 305, 309, 310, 312, 323

- Gefälledämmung
Beispiel, 327
- Geometrie, elementare
ebene, 351
räumliche, 351
- Geothermal-Wärmeübertrager
Beispiel, 232
- Gesamtwärmeübergangskoeffizient,
22, 254, 346
- Geschwindigkeitsenergie, 51
- Geschwindigkeitsfeld
stationäres, 47
- Getränkekühlung
Beispiel, 215, 297, 307
- Glasscheibe vor Kaminfeuer
Beispiel, 214
- Gleichgewicht, thermisches, 17
- Gleichung, nichtlineare
Lösung, 351
- Gleichungssystem
lineares, 272, 279, 328
nichtlineares, 269
- Glühlampe
Beispiel, 300
- Glühweinabkühlung
Beispiel, 293, 301
- 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
- Halbmesser, 144, 154
- halbunendlicher Körper, 141, 144
beidseitig, 146, 171, 174, 178, 179
Beispiel, 161, 164, 170, 171, 178–181,
319, 322, 330
- Hülle
nicht speichernde, 296
- Koordinatenrichtung, 144, 164
- Oberflächentemperatur, 162, 164
- Ortskoordinate
dimensionslose, 348
- Orts-Zeit-Koordinate, 144
- Randbedingung
dritter Art, 145, 348
erster Art, 145, 348
periodische, 319, 348
zweiter Art, 145, 161, 348
- Temperaturverlauf
dimensionsloser, 145
- Überlagerung, 146, 348
- Wärme
flächenbezogene, 145
- Wärmestromdichte, 145
- Halbwertszeit, 143
- halbzylindrisch, 288, 325
- 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
- Heizstempel
Beispiel, 325
- Heizstrahler
Beispiel, 284
- Heizungsrohr
Beispiel, 112, 313, 326
- Heizwert, 318, 352
- Helligkeit, 242
- Helligkeitsverfahren
Beispiel, 271, 276, 283–285, 298, 302,
306, 308, 329
- hemisphärisch, 289, 322, 324
- Himmelsabstrahlung
Beispiel, 266, 286
- Hitzdrahtanemometer
Beispiel, 201
- Hochleistungschip
Beispiel, 311
- Hülle
nicht speichernde, 143
Beispiel, 296, 315, 324, 325
- hydraulischer Durchmesser, 191, 207
- Hyperbelfunktionen, 91, 126, 128, 317
Additionstheorem, 127
- I**
- ideal gerührter Behälter, 49, 67, 141,
143, 348
Beispiel, 67, 97, 98, 181, 183, 184,
215, 290–293, 295, 299, 301,
307, 314, 316, 319, 320,
322–324
- Biot-Zahl, 144
- charakteristische Länge, 143
- Fourier-Zahl, 144
- Hülle
nicht speichernde, 143, 183, 184
- Temperaturverlauf, 143
- Wärmedurchgang, 143
- Iglu
Beispiel, 289
- Industrieofen
Beispiel, 270
- Infrarotstrahlung, 21, 239
- inkompressibel, 52, 59
- Integralsatz, Gauß-Green, 44
- Investitions(mehr)kosten, 352
- Isentropenexponent, 52
- Isolation, 17
- Isolierkanne
Beispiel, 318, 320
- Isolierverglasung
Beispiel, 46, 210, 287, 328
- Isothermen, 102, 105
- isotrop, 20
- Iteration
Beispiel, 184, 202, 300, 320, 321, 326,
329
Prinzip, 351
- J**
- Jacobi-Matrix, 269
- Jahresbrennstoffbedarf/-verbrauch, 352
- Jahresbrennstoffkosten, 352
- Jahresnutzungsgrad, 352
- K**
- Kaffeetasse
Beispiel, 137
- Kalksandsteine
Beispiel, 184
- kalorische Mitteltemperatur, 93, 110,
150, 151, 166, 176, 348
- Kaminrohr
Beispiel, 215
- Kanalströmung, 188
- kartesische Koordinaten, 23
- Kelvin, 17
- Kennzahlen
dimensionslose, 21, 138, 186
- Kesselwagen
Beispiel, 329
- Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz, 248
- Kleben von Stahlteilen
Beispiel, 96
- Knödelzubereitung
Beispiel, 292
- Kompressibilität, isotherme, 54
- Konserven
Beispiel, 183
- Kontakttemperatur, 147
Beispiel, 322, 325
- Kontaktwiderstand
thermischer, 25, 28, 136
- Kontinuitätsgleichung, 49
- Kontrollvolumen
infinitesimales, 22, 346
- Konvektion, 19, 20, 346
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, 323
Geschwindigkeitsfeld, 47
Grenzschichtdicke, 47
Wärmeübergangskoeffizient, 21
Grenzschicht, 185

- Stoffwerte
 Bezugstemperatur, 191, 192
 Koppelbedingung, 25, 92, 133
 Körperfarbe, 240
 Kräftebilanz, Fluidelement, 79
 Kreiszyylinder
 quer angeströmter, 202, 206, 212, 327
 Kreuzprodukt, 42
 Krokettzubereitung
 Beispiel, 295
 Kugel
 innere Wärmequellen, 102
 umströmte, 188
 Kugelkoordinaten, 23
 Kugellager
 Beispiel, 181, 182
 Kugelschale
 innere Wärmequellen, 102
 mehrschichtige, 100, 304
 Péclet-Gleichung, 100, 119
 Temperaturprofil, 100, 110
 Wärmedurchgangskoeffizient, 101
 Wärmeleitwiderstand, 100
 Kugelspalt, 304, 318
 Kugelspeicher, thermischer
 Beispiel, 299
 Kühlgutcontainer
 Beispiel, 296
 Kühlkörper, 28
 Beispiel, 128, 136, 215, 289, 317, 329
 Kühlregister
 Beispiel, 95
 Kühlschranks
 Beispiel, 304
 Kühlstern
 Beispiel, 137
 k-Wert, 27
 Beispiel, 113, 114, 117, 206, 226, 233, 235, 293, 299, 301, 303, 304, 310–312
 k-Wert-Hyperbel, 114
- L**
 Lageenergie, 51
 Laminarströmung
 hydrodynamischer Einlauf, 190
 thermischer Einlauf, 189
 vollständig ausgebildete, 189
 Längswärmeleitung, 58, 60, 226
 Laplace'sche Differenzialgleichung, 23, 102, 106, 158
 Laplace-Operator, 23, 37
 Lastkraftwagen
 Beispiel, 214, 293, 296, 299
 Leistung
 technische, 51, 54, 58
 Leitung, s. Wärmeleitung
 Leitwert
 elektrischer, 25
 thermischer, 25, 26, 28
 Beispiel, 98, 316, 318, 320, 321, 324
 Leuchtturm
 Beispiel, 119
 Licht
 sichtbares, 21, 239
 Lüftungskanal
 Beispiel, 214
 Luftwechsel, 55
- M**
 Mach-Zahl, 52
 Massenänderung
 zeitliche, 61, 63
 Massenbilanz
 Beispiel, 61, 63, 290
 differenzielle, 49
 globale, 50
 Hinweise, 346
 Wortform, 57, 346
 Massenstrom, 60
 Milchkühler
 Beispiel, 224
 Mindestwärmeschutz
 Beispiel, 309, 327
 Mischkonvektion, 20, 199, 213
 entgegengerichtete, 199
 gleichgerichtete, 199
 Mitteltemperatur
 kalorische, 93, 110, 150, 151, 166, 176, 348
 Mittelwert
 integraler, 351
 Mittentemperatur, 150, 348
 Modellbildung, 18, 104, 350
 Multilayer Insulation
 Beispiel, 321
- N**
 Näherungslösung für große Zeiten, 141
 Beispiel, 178, 181, 182, 322, 324
 Eigenwerte, 342
 kalorische Mitteltemperatur, 150
 Konstanten, 338–342
 Randbedingung
 dritter Art, 149, 348
 erster Art, 149, 348
 zweiter Art, 149, 348
 übertragene Wärme, 150
 Wandtemperatur, 150, 178
 Zentrumstemperatur, 150, 167, 178
 Nabla-Operator, 18, 23, 49, 166
 Nadel, 120
 Beispiel, 137
 konische, 124
 konkave parabolische, 124
 konvexe parabolische, 124
 Übertemperatur, 124
 Wärmestromberechnung, 350
 Widerstand
 thermischer, 124
 Wirkungsgrad, 327
 zylindrische, 122, 124
 beheizte, 316
 Beispiel, 128, 136, 316, 327
- Netto-Strahlungswärmestrom, 21
 Newton'scher Schubspannungsansatz, 79
 Newton'sches Abkühlungsgesetz, 20, 27, 67, 82, 90, 110, 120, 129, 132, 201, 266, 282, 350
 Newton-Verfahren
 Algorithmus, 38, 267, 351
 Beispiel, 38, 47, 129, 148, 162, 177, 267, 269, 288, 293, 296, 300, 310, 311, 320, 321, 329
 Konvergenzkriterium, 38
 mehrdimensionales, 269
 NTU, 192, 218
 Beispiel, 227, 234–236
 Nullstellenproblem, 351
 Nullstellensuche
 Beispiel, 37, 38, 47, 129, 148, 162, 177, 267, 269, 288, 293, 296, 300, 310, 311
 Nußelt-Zahl, 21, 186
 Nutzungsdauer, 318, 352
 Nutzwärme, 282
- O**
 Oberflächenhärten
 Beispiel, 161, 163
 Oberflächentemperatur, 101, 150, 348
 Beispiel, 30, 46, 116–119, 323, 329
 Ohm'sches Gesetz, 25, 250
 Ölkühler
 Beispiel, 203
 Ölofen
 Beispiel, 264
 opak, 242, 245
 Orange
 Beispiel, 181
 Orts-Zeit-Koordinate, 144
 Ortskoordinate
 dimensionslose, 138, 349
- P**
 Paketanalogie, 350
 Passivhauswand
 Beispiel, 312
 Pasteurisierung von Apfelsaft
 Beispiel, 235
 PC-Board
 Beispiel, 106
 Péclet-Gleichung, 99
 universelle, 119
 Péclet-Zahl, 21, 186
 Peltier-Element
 Beispiel, 297
 Periodendauer, 319, 348
 Pfannengriff
 Beispiel, 136
 Phasenübergang
 Wärmeübergangskoeffizient, 21
 Phasenverschiebung, 319
 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
 Preis-Leistungs-Verhältnis, 318, 352
 Produktansatz, 155
 Beispiel, 169, 171, 182, 183, 296, 314, 315, 325, 330
 Biot-Zahl, 156, 169, 173, 349
 Fourier-Zahl, 155, 172, 173, 349
 halbunendlicher Körper, 170
 Kombination 1D-Modelle, 349
 Übersicht, 349
 Profile
 quer angeströmte, 188
 Prozessgröße, 16
 Prozessor
 Beispiel, 117, 128, 288, 311
 Pulverbeschichten
 Beispiel, 273
- Q**
- Quellenfreiheit, 37
 Quellterm, 58
 Querschnitt
 nichtkreisförmiger, 191
 Querwärmeleitung, 306, 309, 310, 312, 318
- R**
- Randbedingung, 24, 78, 79, 89, 98, 108, 109, 127, 133, 135, 148, 164, 230
 Adiabasie, 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, s. dimensionslose
 Robin'sche, 24
 Stefan'sche, 25
 vierter Art, 25
 zweiter Art, 24
 Beispiel, 33
 dimensionslose, 140
 Raumklimatisierung
 Beispiel, 95
 Raumluftechnische Anlage
 Luftbezeichnungen, 237
 Raumlufttemperatur
 Beispiel, 31
 Raumwinkel, 241
 Rayleigh-Zahl, 21, 186
 Rechengitter, 104
 Regenerator, 217
 Regentonne
 Beispiel, 63
 Reibungsleistung, innere, 52
 Reifbildung
 Beispiel, 266
 Rekuperator, 217
 Reynolds-Zahl, 21, 186
 kritische, 187, 188
 Ringspalt, 291, 329
 Rippe, 120
 Beispiel, 90, 94, 289, 303, 306, 307, 317, 329
 Differenzialgleichung, 125
 normierte, 125
 universelle, 121
 Dreiecks-, 123
 Hauptgleichung, 120, 124, 350
 konkave parabolische, 123
 konvexe parabolische, 123
 Kreisring-, 122, 123
 Leistungsziffer, 121
 Beispiel, 130, 317
 Modellannahmen, 120
 optimale, 124
 Rechteck-, 121
 Beispiel, 136, 137, 215, 317, 329
 kurze, 122, 123
 Temperaturverlauf, 122
 unendlich lange, 122, 123
 Trapez-, 123
 Übertemperatur, 120–123, 126–128, 131, 134, 135
 Wärmestromberechnung, 350
 Widerstand, 347, 350
 Beispiel, 303
 thermischer, 124
 Wirkungsgrad, 120
 Beispiel, 130, 306, 307
 Rippenparameter, 90, 120, 122
 dimensionslos, 120
 Rippenrohr
 Beispiel, 136, 303
 Rohr, beheiztes
 Beispiel, 48, 305
 Rohrleitung
 Beispiel, 214, 290
 Temperaturabfall, 113
 Wärmedämmung, 112, 311, 313, 326
 Wärmedurchgangskoeffizient, 206
 Beispiel, 226, 326
 Wärmeverlust, 113
 Rohrreibung, 52
 Rohrströmung, 188
 Beispiel, 290, 298, 305
 Geschwindigkeitsprofil, 79
 Längskorrektur, 190, 205
 laminare, 79, 189, 203
 Temperaturkorrektur, 190, 206
 turbulente, 190, 205, 225
 Übergangsbereich, 191
 Rotation, 42
 Rücklaufzeit, 352
 Rückwärmzahl, 237
 Rührkessel
 Beispiel, 97, 98, 290
 Runge-Kutta-Verfahren, 313
- S**
- Sandwichbauteil
 Beispiel, 117, 293
 Sauerstoff, flüssiger
 Beispiel, 321
 Sauna
 Beispiel, 321
 Schallgeschwindigkeit, 52
 Schaltbild
 thermisches
 Beispiel, 46, 75, 106, 117, 118, 266, 271, 273, 277, 317, 318, 321, 325, 328, 329
 Scheibenabstand, 211
 Scheibenbremse
 Beispiel, 310
 Scheibenzwischenraum, 46, 210, 328
 Schichttemperatur, 101
 Beispiel, 323
 Schlafsack
 Beispiel, 288
 Schmelzen
 Beispiel, 47, 48, 320
 Schmelzwärme, 47, 48
 Schneckenwelle
 Beispiel, 163
 Schnittpunktproblem, 351
 Schockhärtung
 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
 sphärisch, 23, 303, 304, 318, 320, 321, 323
 Stahldraht, thermische Behandlung
 Beispiel, 313
 Stahlplatten
 Beispiel, 176, 324
 Ständerwand

Beispiel, 310, 318
 Stefan-Boltzmann'sches
 Strahlungsgesetz, 21, 239, 268
 Stefan-Boltzmann-Konstante, 21
 Steigungsdreieck, 20, 346
 Sternwiderstand, 26, 350
 Stoffwerte
 Luft, 343
 Wasser, 344
 Strahlung, s. Wärmestrahlung
 Absorption, 21
 Emission, 21
 Wellenlängenbereiche, 21
 Strahlungsaustauschkoeffizient, 255
 Strahlungsgesetz
 Planck, 239
 Stefan-Boltzmann, 21, 37, 239, 268
 Strahlungsheizung
 Beispiel, 277, 283, 284
 Strahlungskonstante der Anordnung,
 21, 37, 46, 252
 Strahlungsleistungsdichte
 spektrale, 239
 Strahlungsschutzschirm
 Beispiel, 263, 264
 Strahlungssternwiderstand, 254, 329
 Streuleistung, 52
 Stromdichte, 51
 Ströme, 51
 Nomenklatur, 16
 Stromfluss
 Beispiel, 98, 114
 Stromkabel
 Beispiel, 98, 114
 Strömung
 kompressible, 52
 Strömungsgeschwindigkeit, 202
 Suppenkessel
 Beispiel, 67, 322
 symmetrische Körper
 Hülle, nicht speichernde, 147
 Koordinatenrichtung, 147
 System, 49
 adiabates, 17
 atmendes, 54, 55, 71
 diathermes, 17
 Energiebilanz, 346
 geschlossenes, 16, 53
 halboffenes, 16
 ideal gerührtes, 67, 81, 94, 96–98,
 286, 292, 293, 297, 299, 301,
 310, 316, 319, 320, 322–324
 instationäres, 346
 Massenbilanz, 346
 offenes, 16, 55
 stationär durchströmtes, 94, 290,
 298, 305
 stationäres, 346
 thermodynamisches, 16
 Systemenergie, 57
 Systemgrenze, 16
 Systemtemperatur, 68, 72, 298

T

Tank
 kugelförmiger
 Beispiel, 183, 303, 304, 320, 321
 zylindrischer
 Beispiel, 294, 303
 Tassenhenkel
 Beispiel, 137
 Tauwasser
 Beispiel, 117
 Taylor-Reihe, 58, 77, 89, 90, 131, 226,
 228, 346
 Temperatur, 17
 absolute, 17
 Celsius-, 17, 348
 Kelvin-, 17
 normierte, 138, 348
 Umrechnung, 17
 Temperaturänderung
 Begriff, 16
 zeitliche, 36, 46, 67, 70, 81, 94–98,
 290, 291, 299–301, 307, 316,
 322, 323, 330
 Temperaturabhängigkeit der
 Stoffwerte
 Korrekturfaktor, 190, 191, 204, 206
 Temperaturamplitudendämpfung, 319
 Temperaturdifferenz, 17, 25
 dimensionslose, 138
 Temperaturfeld, 17
 dreidimensionales, 18
 eindimensionales, 18
 instationäres, 18, 22
 Beispiel, 35, 46, 330
 mehrdimensionales, 22, 349
 Richtungsableitung, 45, 47, 330
 stationäres, 18
 Beispiel, 39, 47, 107
 zweidimensionales, 18
 Beispiel, 39, 45, 47
 Temperaturgradient, 18, 20, 23, 24, 109
 Beispiel, 36, 41, 45, 46, 317, 328
 Temperaturleitfähigkeit, 22, 138
 Temperaturprofil
 lineares, 33
 Platte, 23
 Temperatursensor
 Beispiel, 97, 330
 Temperaturskala, 17
 Thermische Modelle
 eindimensionale stationäre, 350
 Thermoelement
 Beispiel, 181
 Thermografie, 21, 240
 Thermometer
 Strahlungsschutzschirm, 267
 Thermometerfehler, 267
 Thermosflasche
 Beispiel, 291
 Thermoskanne
 Beispiel, 318, 320
 Tiefkühlkost
 Beispiel, 169

Trans-Alaska-Pipeline
 Beispiel, 205
 Transformator
 Beispiel, 289, 319
 Transistor-Kühlkörper
 Beispiel, 136
 Transmissionswärmeverlust
 Beispiel, 29, 30, 309, 310, 312
 Transportgesetz, universelles, 19
 Transportgröße, 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, 294, 299, 316, 317,
 319
 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
 Verbindungsstab
 Beispiel, 135, 319
 Verdampfung
 Beispiel, 48, 321
 Verdampfungswärme, 48
 Verschiebearbeit, 51
 Verschiebeleistung, 51
 Verschiebungsgesetz
 Wien, 239
 Versuchszelle, sphärische
 Beispiel, 323
 Viskosität
 dynamische, 201, 204
 kinematische, 186, 201
 Vollbenutzungsstunden, 352
 Volumenänderungsarbeit, 51
 Volumenänderungsleistung, 51
 Volumenelement
 infinitesimales, 49, 57, 77, 79
 Volumenstrom, 60

W

Wälzkörper
 Beispiel, 181, 182
 Wandheizung
 Beispiel, 305
 Wandtemperatur, 150, 348
 konstante, 192

- Wandwärmestrom
konstanter, 192
- Wärme, 16
Beispiel, 44
- Wärmedämmung, Begriff, 17
- Wärmedämmverbundsystem
Beispiel, 118, 305
- Wärmedurchlasswiderstand, 26
- Wärmedurchgang, 20, 27, 346
Beispiel, 184, 288, 289, 318, 321, 323–325, 329
Teilgeometrie, 350
Beispiel, 288, 289, 322, 325
Vollgeometrie, 350
- Wärmedurchgangskoeffizient, 27, 347
Beispiel, 46, 113, 114, 117, 206, 293, 299, 301, 303, 304, 310–312, 321
Mittelung, 327
- Wärmedurchgangswiderstand, 27
Beispiel, 31, 207, 293, 299, 301, 303, 304, 310–312
- Wärmedurchlasskoeffizient, 26, 347
Beispiel, 319
- Wärmedurchgangswiderstand, 26
- Wärmedurchlasswiderstand, 27
- Wärmeeindringkoeffizient, 147, 322, 325
- Wärmeflusslinien, 102
- Wärmekapazität
spezifische
isobare, 67
isochore, 59
mittlere, 59, 219
volumetrische, 98, 321
- Wärmekapazitätsstrom, 218
- Wärmeleitfähigkeit, 20
- Wärmeleitfähigkeit
Beispiel, 31, 48
effektive, 321
Messung, 48
scheinbare, 195, 211
temperaturabhängige, 119
- Wärmeleitfähigkeitsgruppe, 117, 305, 310, 311
- Wärmeleitpaste, 28
- Wärmeleitung, 19, 346
Beispiel, 48, 292, 295, 296, 299, 314, 315, 317, 328
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, 348
exakte Lösung, 147, 167, 177
geringe Temperaturunterschiede, 143
Isothermen, 177
Kurzzeitznäherung, 151, 164, 178
Lösung für sehr kurze Zeiten, 144, 330
Lösungsfunktionen, 148
mehrdimensionale, 155, 169, 171, 296, 314, 315, 325, 349
Mitteltemperatur, 150, 348
Modellauswahl, 142
Modellvergleich, 141, 142, 150, 165
Näherungslösung für große Zeiten, 149, 167, 169, 173, 178
Oberflächentemperatur, 150, 169, 173, 348
Produktansatz, 155, 349
symmetrische Grundkörper, 147
Temperaturgradient, 149, 168
unendlich langer Zylinder, 164
Wärmestrom, 149, 157, 168
Wärmestromdichte, 149
Zeitbereiche, 142
Zentrumstemperatur, 150, 175, 348
- Kegelstumpf, 328
- koordinatenunabhängige
Darstellung, 23
- Operatoren Schreibweise, 23
stationäre, 99
axiale, 48, 317
eindimensionale, 101
mit Wärmequellen, 23, 101
ohne Wärmequellen, 23
zweidimensionale, 102
verallgemeinerte Gleichung, 23
- Wärmeleitungsdifferenzialgleichung
Fourier'sche
Beispiel, 181
- Wärmeleitungsansatz
Fourier, 19, 34, 77, 88, 90, 92, 110, 120, 131, 168, 350
negatives Vorzeichen, 20
- Wärmeleitungsansatz
Fourier, 157
- Wärmeleitungsdifferenzialgleichung
Fourier'sche
Beispiel, 33, 158, 166, 172
- Wärmeleitwiderstand, 26
- Wärmeleitwiderstand, 27
- Wärmemenge, 16
- Wärmemitführung, s. Konvektion
- Wärmequellen
innere, 22, 43, 51, 57, 58, 108, 119, 302, 316
- Wärmequellendichte, 22, 57
- Wärmestrahlung, 19, 21, 238, 346
Absorption, 245
Absorptionskoeffizient, 280
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, 326, 329, 330
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 endlicher Platte, 262
Kugel über großer Platte, 262
Kugel über Kreisscheibe, 262
Matrix, 258, 271, 275, 278, 329
Methode der gekreuzten Fäden, 259, 270, 330
parallele endliche Rechtecke, 260
parallele lange Platten, 260
parallele lange Zylinder, 261
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
- Kenngößen
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, s. 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
- Wärmedurchgangswiderstand
 Beispiel, 312
- Wärmetauscher, 216
- Wärmetransmission, 20, 27, 29, 30, 58, 71, 346
- Wärmetransport, Analyse, 19
- Wärmetransportmechanismen, 18, 346
 Analogie, 19
- Wärmeübergang
 konvektiver, 20, 24
 radiativer, 25
- Wärmeübergangskoeffizient, 347
 Beispiel, 201
 dimensionsloser, 21
 Größenordnungen, 21
 konvektiver, 21
 radiativer (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
- Wärmekapazitätsstrom, 219
- Wärmekapazitätsstromverhältnis, 219
- Wärmestrom, 218–221, 224, 232, 236
- Wärmewirkungsgrad, 222, 234
- Wärmerückgewinnung, 237
- Warmhaltevermögen
 Beispiel, 322
- Warmhaltevorrichtung für Pizzas
 Beispiel, 283
- Warmwasserspeicher
 Beispiel, 44, 48
- Wasserleitung
 Beispiel, 111, 181, 225
- Wassertank
 Beispiel, 294, 324
- Weihnachtstrucker
 Beispiel, 299
- Weinkeller
 Beispiel, 319
- Weißbierkühlung
 Beispiel, 81
- Wellen
 elektromagnetische, 21
- Wellenlänge, 21, 238
- Wellenspektrum, 238
- Werkstoffwahl für Rippe
 Beispiel, 137
- Widerstand
 elektrischer, 25
 thermischer, 25, 350
 Übersicht, 347
 2D-Wärmeleitung, 102, 294, 347
 Begriff, 25
 ebene Schicht, 26
 Ersatzwiderstand, 27
 Formfaktor, 102, 294
 Gesamtwiderstand, 27
 Kühlkörper, 136
 Konvektion, 26
 Kugel(schale), 347
 Nadel, 124
 Nomenklatur, 26
 Parallelschaltung, 28
 Platte, 347
 Reihenschaltung, 27
 Rippe, 124, 347, 350
 Schaltbild, 27
 Serienschaltung, 27, 99
 spezifischer, 26, 350
 Wärmeleitung, 26
 Zylinder(schale), 347
- Widerstandsbeiwert, 52
- Wien'sches Verschiebungsgesetz, 239
- Windkanal
 Beispiel, 315
- Wirkungsgrad
 Beispiel, 319
- Wirtschaftlichkeit, 114, 352
 Beispiel, 301, 304, 318
 dynamische Verfahren, 352
 statische Verfahren, 352
- Z**
- Zeitkonstante, 68, 74, 143
- Zenitwinkel, 23, 241
- Zentrumstemperatur, 150, 348
- 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, s. 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