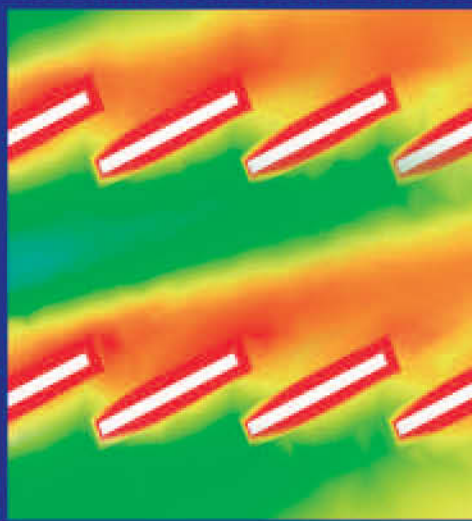


**ing**  
maschinenbau



Wolfgang Polifke  
Jan Kopitz

# Wärmeübertragung

Grundlagen, analytische und numerische  
Methoden

2., aktualisierte Auflage

**Wolfgang Polifke  
Jan Kopitz**

# **Wärmeübertragung**

**Grundlagen, analytische  
und numerische Methoden**

**2., aktualisierte Auflage**

**PEARSON**  
**Studium**

---

ein Imprint von Pearson Education  
München • Boston • San Francisco • Harlow, England  
Don Mills, Ontario • Sydney • Mexico City  
Madrid • Amsterdam

# Wärmeübertragung - PDF

## Inhaltsverzeichnis

Wärmeübertragung - Grundlagen, analytische und numerische Methoden / 2.,  
aktualisierte Auflage

### Inhaltsverzeichnis

Vorwort

#### Teil I Grundlagen

Kapitel 1 Einführung

Kapitel 2 Grundbegriffe der Wärmeleitung

Kapitel 3 Stationäre Wärmeleitung

Kapitel 4 Instationäre Wärmeübertragung

Kapitel 5 Physikalische Grundlagen der Wärmestrahlung

Kapitel 6 Wärmeübertragung durch Strahlung

Kapitel 7 Massen- und Energiebilanzen beim konvektiven Transport

Kapitel 8 Wärmeübertrager

Kapitel 9 Grundbegriffe der Thermofluiddynamik

Kapitel 10 Konvektiver Wärmeübergang und Nusselt-Zahl

Kapitel 11 Eine Integralmethode für die Grenzschicht

Kapitel 12 Kennzahlen und Ähnlichkeitstheorie

Kapitel 13 Freie Konvektion

#### Teil II Analytische Methoden Weitere Phänomene

Kapitel 14 Quasi-eindimensionale instationäre Wärmeleitung

Kapitel 15 Rippen und Nadeln

Kapitel 16 Wärmeübertragung mit Phasenumwandlung

Kapitel 17 Stoffübertragung

Kapitel 18 Richtungsabhängigkeiten der thermischen Strahlung

Kapitel 19 Konvektiver Wärmeübergang in Rohrleitungen

Kapitel 20 Instabilität und Chaos in freier Konvektion

Kapitel 21 Selbstähnliche Lösungen

#### Teil III Numerische Methoden

Kapitel 22 Grundwerkzeuge der Numerik

Kapitel 23 Lineare Gleichungssysteme

Kapitel 24 Diskretisierung von Differentialgleichungen

Kapitel 25 Nichtlineare Gleichungssysteme

Kapitel 26 Die Finite-Elemente-Methode

#### Literaturverzeichnis

Anhang

Index

Vorwort

Zum Inhalt

# Inhaltsverzeichnis

Zusätzliche Materialien

Ergänzende und weiterführende Literatur

Danksagung

## Teil I Grundlagen

### 1 Einführung

Einleitung

Anwendungen

Erhaltungssätze, Flüsse und Transportgesetze

Transportmechanismen

Konvektiver Wärmeübergang

Die Erhaltungsgleichungen der Thermodynamik

Massenerhaltung

Impulserhaltung

Energieerhaltung

Wärmeübertragung und Thermodynamik

Zustandsgleichungen und Wärmekapazitäten

Abgrenzung zur Thermodynamik

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

### 2 Grundbegriffe der Wärmeleitung

Einleitung

Das Fourier'sche Gesetz der Wärmeleitung

Fourier'sche Differentialgleichung (DGL)

Energiebilanz am kartesischen Volumenelement

Herleitung aus der Energieerhaltungsgleichung

Symmetrien und Koordinatensysteme

Zeitliche und örtliche Randbedingungen

Randbedingung der ersten Art

Randbedingung der zweiten Art

Randbedingung der dritten Art

Koppelbedingungen

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

### 3 Stationäre Wärmeleitung

Einleitung

Einfache Geometrien

Stationäre Wärmeleitung in der Platte

Stationäre Wärmeleitung im Zylinder

Stationäre Wärmeleitung in der Kugelschale

Wärmeleitwiderstand

Alternative Herleitung aus einer Wärmestrombilanz

# Inhaltsverzeichnis

Dimensionslose Variablen

## Wärmedurchgang und Péclet-Gleichungen

Péclet-Gleichung für die Platte

Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)

Grafische Lösung für den Wärmedurchgang

Péclet-Gleichung für den Zylinder

Péclet-Gleichung für die Kugelschale

Sonderfälle

Kennzahl von Biot

## Wärmeleitung mit Wärmequellen

Konstante Wärmequellendichte

Dimensionslose Darstellung der Lösung

## Zweidimensionale Wärmeleitung (Formfaktoren)

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

## 4 Instationäre Wärmeübertragung

Einleitung

### Methode der Blockkapazität

Sprungantwort einer Blockkapazität

Thermometerfehler der ersten Art

### Die dimensionslosen Kennzahlen von Biot und Fourier

Gültigkeitsbereich der Näherung Blockkapazität

Fourier-Zahl

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

## 5 Physikalische Grundlagen der Wärmestrahlung

Einleitung

Begriffe und Definitionen

### Schwarze Körper

Das Planck'sche Strahlungsgesetz

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz

Das Gesetz von Stefan-Boltzmann

### Diffuse Strahler

Wellenlängenabhängigkeiten der thermischen Strahlung bei nicht-schwarzen

Strahlern

Emissionsgrad eines grauen Strahlers

Der spektrale Emissionsgrad eines realen Strahlers

Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsgrade

Kirchhoff'sches Gesetz

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgabe

# Inhaltsverzeichnis

## 6 Wärmeübertragung durch Strahlung

- Einleitung
- Einfache Strahlungsaustauschbeziehungen
- Strahlung und Wärmeübergang
- Der Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient
- Schwarzkörperfunktion
- Gasstrahlung
- Zusammenfassung
- eXerzitien
- Übungsaufgaben

## 7 Massen- und Energiebilanzen beim konvektiven Transport

- Einleitung
- Ideal gerührter Behälter mit Zu- und Ablauf
- Wärmeverluste bei Strömung im Rohr
  - Globale Energiebilanz
  - Lokale Energiebilanz
- Kühlung eines Brennstabs mit ortsabhängiger Wärmequellendichte
- Zusammenfassung
- eXerzitien
- Übungsaufgabe

## 8 Wärmeübertrager

- Einleitung
- Dimensionslose Kennzahlen
- Betriebscharakteristik, Nachrechnen und Auslegen
- Analyse des Gegenstrom-Wärmeübertragers
- Wirkungsgrad eines Wärmeübertragers
- Mittlere Temperaturdifferenz des Gegenstrom-Wärmeübertragers
- Wärmeübertrager mit Phasenumwandlung
- Weitere Bauformen von Wärmeübertragern
- Ausblick
- Zusammenfassung
- eXerzitien
- Übungsaufgaben

## 9 Grundbegriffe der Thermofluiddynamik

- Einleitung
- Wichtige Begriffe und Ergebnisse der Strömungslehre
  - Bernoulli-Gleichung
  - Zähigkeit und Schubspannung
  - Reibungs- und Widerstandsbeiwert
  - Der Begriff der Turbulenz nach Reynolds
- Die hydrodynamischen Grundgesetze viskoser Fluide
- Reynolds-, Péclet- und Prandtl-Zahl

# Inhaltsverzeichnis

Der Begriff der Grenzschicht nach Prandtl

Grenzschichtgleichungen für Zwangskonvektion

Grenzschichtablösung

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

## 10 Konvektiver Wärmeübergang und Nußelt-Zahl

Einleitung

Strömungsphysik des konvektiven Wärmeübergangs

Nußelt-Zahl

Die Nußelt-Zahl als dimensionsloser Wärmeübergangskoeffizient

Die Nußelt-Zahl als dimensionsloser Temperaturgradient

Die Nußelt-Zahl als Maß für die Grenzschichtdicke

Bestimmung der Nußelt-Zahl aus Korrelationen

Berechnung von Wärmeübergangskoeffizient und Wärmestrom über die

Nußelt-Zahl

Korrelationen für die Nußelt-Zahl

Längs angeströmte ebene Platte

Umströmte Körper

Rohr- und Kanalströmung

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

## 11 Eine Integralmethode für die Grenzschicht

Einleitung

Integrale Impulsbilanz

Näherungslösung der Impulsbilanz

Integrale Energiebilanz

Dicke der thermischen Grenzschicht (laminar)

Nußelt-Zahl

Ausblick

Übungsaufgabe

eXerzitien

## 12 Kennzahlen und Ähnlichkeitstheorie

Einleitung

Zum Begriff der Ähnlichkeit

Bestimmung von Kennzahlen aus den Differentialgleichungen

Dimensionsanalyse und -Theorem

Wärmedurchgang beim Zylinder

Sprungantwort eines Körpers

Sprungantwort eines gut wärmeleitenden Körpers

Buckingham's -Theorem

Auslegung von Modellversuchen

# Inhaltsverzeichnis

Darstellung experimenteller Ergebnisse

Differentialgleichungen und Kennzahlen der Thermofluiddynamik

Reynolds-Analogie

Ausblick: Dimensionslose Form der Lösungen und Ähnlichkeitslösungen

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

## 13 Freie Konvektion

Einleitung

Freie, laminare Konvektion an der isothermen Wand

Grenzschichtgleichungen bei freier Konvektion

Boussinesq-Näherung der Grenzschichtgleichungen

Kennzahlen der freien Konvektion

Korrelationen für freie Konvektion

Freie Konvektion an Platte, Zylinder und Kugel

Freie Konvektion in zylindrischen und ebenen Schichten

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

## Teil II Analytische Methoden - Weitere Phänomene

### 14 Quasi-eindimensionale instationäre Wärmeleitung

Einleitung

Temperaturausgleich in Platte, Zylinder oder Kugel

Reihenlösung für die ebene Platte

Reihenlösungen für Zylinder und Kugel

Berechnung der insgesamt abgeführten Wärme

Näherungslösungen für große Zeiten

Näherungslösung für kleine Zeiten

Vergleich mit der Sprungantwort einer Blockkapazität

Wärmestrom-Randbedingung

Temperatur-Randbedingung

Instationäre Wärmeleitung im halbumendlichen Körper

Temperatur-Randbedingung

Wärmestrom-Randbedingung

Randbedingung der dritten Art

Der halbumendliche Körper als Kurzzeitleösung

Zwei halbumendliche Körper im thermischen Kontakt

Quellenfunktion der Fourier'schen DGL

Ausblick

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

### 15 Rippen und Nadeln



# Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Energiebilanz bei veränderlicher Querschnittsfläche

Rippe konstanten Querschnitts

Adiabate Rippenspitze

Konvektiver Wärmeübergang an der Rippenspitze

Leistungsziffer und Wirkungsgrad einer Rippe

Optimale Dimensionierung einer Rechteckrippe

Optimales Profil einer geraden, spitzen Rippe

Gesamtwärmestrom einer berippten Oberfläche

Zusammenfassung

eXerziten

Übungsaufgaben

## 16 Wärmeübertragung mit Phasenumwandlung

Einleitung

Schmelzen und Erstarren

Ansatz 1: Quasi-stationär mit Dichtesprung an der Phasengrenze

Ansatz 2: Quasi-stationär bei konstanter Dichte

Einflussgrößen und Kennzahlen des Wärmeübergangs mit Phasenumwandlung

Kondensation

Laminare Kondensation an einer senkrechten Wand -- Nußelt'sche Wasserhaut

Dimensionslose Darstellung und Kennzahlen

Turbulente Filmkondensation

Weitere Ergebnisse

Sieden

Behältersieden -- Siedekurve nach Nukijama

Siede-Korrelationen

Wachstum von Dampfblasen in überhitzter Flüssigkeit

Zusammenfassung

eXerziten

Übungsaufgaben

## 17 Stoffübertragung

Einleitung

Begriffe und Bilanzen

Binäre Diffusion in ruhenden Medien

Konvektiver Stoffübergang

Erweiterte Reynolds-Analogie, Stanton-Zahlen

Tropfenverdampfung

Stofftransport

Wärmetransport

Kopplung von Stoff- und Energietransport

Grafische Bestimmung eines quasi-stationären Zustands

Verdunstung und Verdunstungskühlung

D<sub>2</sub>-Gesetz

Betriebsverhalten und Löschgrenzen eines Reaktors mit exothermer Reaktion

# Inhaltsverzeichnis

- Spezies- und Energiebilanzen
- Qualitative Analyse des Reaktorbetriebs
- Näherungsweise Berechnung der Löschgrenze

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

## 18 Richtungsabhängigkeiten der thermischen Strahlung

Einleitung

Richtungsabhängigkeit der Emission

- Gerichtete spektrale Intensität
- Weitere Definitionen und Zusammenhänge
- Diffuse Strahler

Richtungsabhängigkeiten beim Strahlungsaustausch

- Lambert'sches Cosinus-Gesetz
- Photometrisches Grundgesetz
- Sichtfaktoren
- Rechenregeln für Sichtfaktoren

Strahlungsaustausch zwischen schwarzen Körpern

Strahlungsaustausch zwischen diffus-grauen Strahlern

Strahlungsaustausch in diffus-grauen Hohlräumen

- Strahlungsenergiebilanz im Hohlraum
- Herleitung von Strahlungsaustauschkoeffizienten
- Strahlungsaustausch im stationären Gleichgewicht
- Instationärer Strahlungsaustausch

Zusammenfassung

eXerzitien

Übungsaufgaben

## 19 Konvektiver Wärmeübergang in Rohrleitungen

Einleitung

Kritische Reynolds-Zahl und Einlauflänge

Hydrodynamik der ausgebildeten Rohrströmung

- Geschwindigkeitsprofil in laminarer Rohrströmung
- Druckverlust und Rohrreibungsbeiwert
- Turbulente Strömung

Nußelt-Zahl der ausgebildeten laminaren Rohrströmung

- Adiabate Mischungstemperatur
- Wärmeübergangskoeffizient und Nußelt-Zahl
- Lokale und globale Energiebilanz, dimensionslose Temperatur
- Einfache Abschätzung der Nußelt-Zahl
- Differentialgleichung für die Temperaturverteilung im Rohr bei thermisch ausgebildeter Strömung
- Ausgebildete Rohrströmung bei konstanter Wärmestromdichte
- Ausgebildete Rohrströmung bei konstanter Wandtemperatur

Thermische Einlaufströmung

- Thermische Einlaufströmung bei ausgebildetem Geschwindigkeitsprofil -- das

# Inhaltsverzeichnis

## **Graetz-Nußelt-Problem**

Thermische Einlaufströmung bei nicht ausgebildetem Geschwindigkeitsprofil

Weitere Kanalgeometrien und empirische Korrelationen

Korrelationen für turbulente Rohrströmung

Zusammenfassung

eXerziten

Übungsaufgaben

## **20 Instabilität und Chaos in freier Konvektion**

Einleitung

Boussinesq-Näherung der Navier-Stokes-Gleichungen

Hydrostatisches Gleichgewicht in Dichteschichtungen

Instabiles hydrostatisches Gleichgewicht

Thermische Instabilität einer von unten beheizten Flüssigkeit --

Rayleigh-Benard-Konvektion

Der Lorenz-Attraktor -- Chaos in der Konvektion

Zusammenfassung

eXerziten

Übungsaufgaben

## **21 Selbstähnliche Lösungen**

Einleitung

Zwangskonvektion an der ebenen Platte

Ähnlichkeitslösung für das Geschwindigkeitsfeld

Ähnlichkeitslösung für das Temperaturfeld

Freie Konvektion an der isothermen Wand

Skalierung der Grenzschichtdicke, Referenzgeschwindigkeit

Zusammenfassung

eXerziten

Übungsaufgabe

## **Teil III Numerische Methoden**

### **22 Grundwerkzeuge der Numerik**

Einleitung

Warum Numerik?

Mathematik-Software Scilab

Erste Schritte mit Scilab

Umgang mit den Hilfedateien auf der Companion Website

Numerischer Rundungsfehler

Abbruchfehler

Iterative Nullstellensuche

Numerische Lösungsstrategie

Zusammenfassung

Übungsaufgaben

### **23 Lineare Gleichungssysteme**

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Darstellung und grundlegende Eigenschaften eines linearen Gleichungssystems

Der Gauß-Algorithmus

Gauß-Elimination

Rücksstitution

Pivot-Suche

Lösungsbeispiel für ein 44-Gleichungssystem

LU-Zerlegung

Vorwärts- und Rücksubstitution

Bestimmung der Dreiecksmatrizen

LU-Zerlegung und Pivot-Suche

Warum LU-Zerlegung?

Reduzierung des Speicherplatzbedarfs

Tridiagonale Matrizen

Zusammenfassung

Übungsaufgaben

## 24 Diskretisierung von Differentialgleichungen

Einleitung

Die Finite-Differenzen-Methode

Diskretisierung des Berechnungsgebiets

Bestimmung der Gradienten durch Reihenentwicklung

Das FTCS-Schema

Explizit -- Implizit

Die Finite-Volumen-Methode

Diskretisierung des Berechnungsgebiets

Bilanzierung der Flüsse

Implementierung der Randbedingungen

Explizite und Implizite Berechnungsvorschrift

Implementierung einer Randbedingung der dritten Art

Zusammenfassung

Übungsaufgaben

## 25 Nichtlineare Gleichungssysteme

Einleitung

Linearisieren des Gleichungssystems

Iterative Lösung

Unterrelaxation

Zusammenfassung

## 26 Die Finite-Elemente-Methode

Einleitung

Einführung in die Finite-Elemente-Methode

Mathematische Grundlagen

Schwache Form der Differentialgleichung

Vereinfachung des Gleichungssystems

Interpolation

# Inhaltsverzeichnis

Integrationsgrenzen

Elementmatrizen

Die Gesamtmatrizen

Übungsaufgaben

Literaturverzeichnis

Anhang

A Nomenklatur

B Kennzahlen

Index

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

Z

Ins Internet: Weitere Infos zum Buch, Downloads, etc.

Copyright



### **Copyright**

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion, der Weitergabe, des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs

und der Veröffentlichung bedarf der schriftlichen Genehmigung des Verlags.

*Inbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwortschutzes ausdrücklich untersagt!*

Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: [info@pearson.de](mailto:info@pearson.de)

### **Zusatzdaten**

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

### **Hinweis**

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website

**informat.de**  
<http://www.informat.de>

herunter laden.