

## 11 Schlussbetrachtung

Leserinnen und Leser, die systematisch und ohne Kapitel zu überschlagen bis hierhin vorgedrungen sind, sollten einiges über die verschiedenen Formen der Wärmeübertragung erfahren haben. Sie dürften jetzt in der Lage sein, die zu Anfang des Buches mit den Beispielen 1.1 und 1.2 vorgestellten Wärmeübertragungsphänomene aus dem Alltag zu verstehen.

Wir möchten zum Abschluss mit einigen Stichwörtern zur Erklärung der einzelnen Aspekte beitragen. Dazu führen wir beide Beispiele hier noch einmal auf und ergänzen sie in den Unterpunkten um eben diese Stichwörter. Dies mag dazu beitragen, die genaue Erklärung mit Hilfe des inzwischen vorhandenen Wissens bzgl. der Wärmeübertragung zu finden.

### Beispiel 1.1:

Der Wärmehaushalt des menschlichen Körpers ist ein hervorragendes Beispiel dafür, wie im Prinzip alle Wärmeübertragungsmechanismen zusammenspielen, um unter den unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen dafür zu sorgen, dass im Inneren unseres Körpers eine konstante Temperatur von etwa  $36,5^{\circ}\text{C}$  herrscht. Geringfügige Abweichungen von dieser Temperatur im Körperinneren sind möglich, Abweichungen um mehrere  $^{\circ}\text{C}$  aber gefährlich bis tödlich. Offensichtlich gelingt es dem menschlichen Körper deshalb, in extrem unterschiedlichen Umgebungsbedingungen von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  und bei relativen Luftfeuchten von nahezu 0% bis nahezu 100% (wenn auch mit Hilfe von Kleidung bei niedrigeren Temperaturen), die Temperatur im Körperinneren einzustellen und zu halten!

Das menschliche „Temperaturgefühl“ reagiert dabei sehr pauschal mit Empfindungen von (mehr oder weniger) „warm“ oder „kalt“, ohne dabei nach den sehr unterschiedlichen physikalischen Mechanismen unterscheiden zu können, die zu diesen Empfindungen führen. Erst bei genauerer Kenntnis der physikalischen Vorgänge ist zu verstehen,

- wieso die Körpertemperatur konstant gehalten werden kann, auch wenn die Umgebungstemperatur oberhalb der Körpertemperatur liegt,  
⇒ *Verdunstungskühlung, Zweiphasen-Wärmeübergang* (s. ILLUSTRIERENDES BEISPIEL 7.2)
- warum wir glauben, bei starkem Wind wäre es deutlich kälter als bei Windstille (was nicht der Fall ist),  
⇒ *gefühlte Temperatur* (s. ILLUSTRIERENDES BEISPIEL 6.4)
- wieso wir das Gefühl haben, in der Sauna wäre es nach einem Wasseraufguss nahezu unerträglich heiß (obwohl die Temperatur dabei gleich bleibt, oder sogar abnimmt),  
⇒ *verstärkte Kondensation von Wasserdampf auf der Haut, Zweiphasen-Wärmeübergang, menschliches „Temperaturempfinden“*
- warum wir einen Raum als kalt und einen anderen Raum als angenehm warm empfinden, obwohl in beiden Räumen dieselbe Lufttemperatur herrscht.  
⇒ *Strahlungsaustausch mit (kalten) Umgebungswänden*

### Beispiel 1.2:

Die Fußbodenheizung ist eine Möglichkeit, eine thermisch behagliche Situation in einem Wohnumfeld zu erzeugen. Dabei wird entweder warmes Wasser durch im Fußboden verlegte Rohrschlangen

geleitet, oder stromdurchflossene Heizkabel sorgen für hohe Temperaturen im Fußboden-Unterbau. Aus Sicht der Wärmeübertragung sind beide Varianten sehr verschieden, auch wenn bei entsprechender Auslegung auf beiden Wegen dieselbe mittlere Raumtemperatur erreicht werden kann. Auch hierbei ist erst bei genauerer Kenntnis der physikalischen Vorgänge verständlich, warum

- bei der Warmwasservariante an keiner Stelle im Fußbodenbereich (z. B. unter einem dicken Teppich) eine bestimmte Temperatur überschritten werden kann, bei der elektrischen Variante aber aus thermodynamischer Sicht keine obere, nicht überschreitbare Temperatur existiert,

⇒ *Warmwasservariante: am Rohr gilt  $T_{\text{W}}^* = \text{const}$*

⇒ *elektrische Variante: am Stromleiter gilt  $\dot{q}_{\text{W}}^* = \text{const}$*

- bei der Warmwasservariante im Vergleich zur elektrischen Variante unter der Voraussetzung gleicher (anfänglicher) Heizleistung und gleicher Wärmekapazitäten des Heizsystems die gewünschte Raumtemperatur langsamer erreicht wird, beide aber nach dem Abschalten den Raum gleich schnell abkühlen lassen.

⇒ *Aufheizung:*

*Warmwasservariante:  $\dot{q}_{\text{W}}^*$  wird mit der Zeit kleiner; elektrische Variante:  $\dot{q}_{\text{W}}^*$  bleibt konstant*

⇒ *Abkühlung:*

*der Abkühlungsvorgang erfolgt nicht über das (in beiden Fällen unterschiedliche) Heizsystem*

## A Arbeitsblätter

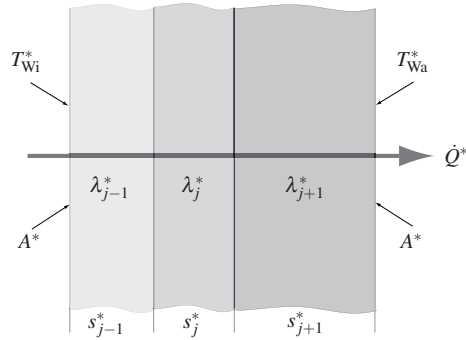
Die nachfolgend zusammengestellten Arbeitsblätter sollen eine Hilfestellung bei der Lösung von häufig auftretenden „Standardproblemen“ sein.

Zusätzlich zu den entscheidenden mathematischen Beziehungen werden jeweils alle Größen einzeln aufgeführt, benannt und mit der zugehörigen SI-Einheit belegt. Abschließend werden die Voraussetzungen aufgelistet, unter denen die jeweiligen Beziehungen zum Einsatz kommen dürfen.

Der Verweis auf die Kapitel, in denen die aufgeführten Beziehungen ausführlich behandelt werden, erlaubt es, den physikalischen Hintergrund der jeweils vorliegenden Situation zu vertiefen.

Diese Arbeitsblätter ersetzen nicht das Studium der jeweiligen Wärmeübergangssituation, sondern sind als Zusammenstellung wichtiger Beziehungen und damit als *zusätzliche* Hilfestellung gedacht.

### Arbeitsblatt 5.1: Wärmeleitung in einer mehrschichtigen, ebenen Wand (Kap. 5.3)



$$\dot{Q}^* = q^* A^* = \frac{(T_{Wi}^* - T_{Wa}^*)}{R_{\lambda,RS}^*} = \text{const} \quad \text{s. (5-7)}$$

$$R_{\lambda,ges}^* = R_{\lambda,RS}^* = \sum R_{\lambda,j}^* = \sum \frac{s_j^*}{\lambda_j^* A^*}; \quad \dot{q}^* = \frac{\dot{Q}^*}{A^*} = \text{const}$$

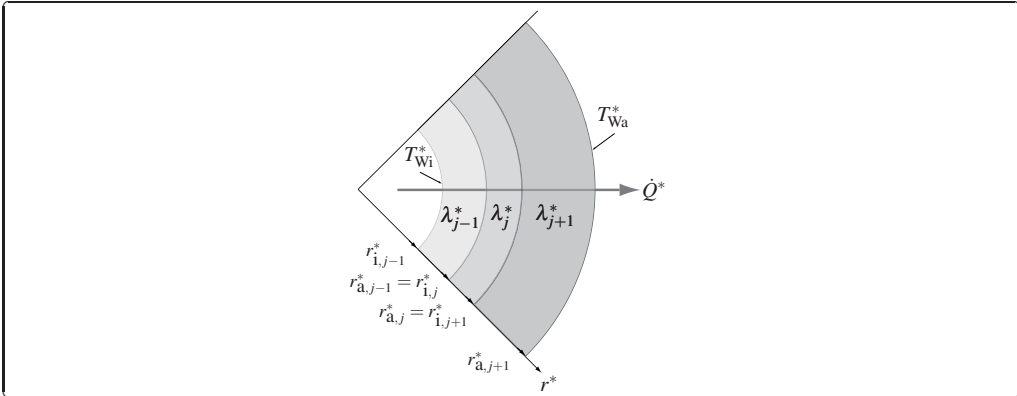
$\dot{Q}^*$ : Wärmestrom in W  
 $\dot{q}^*$ : Wärmestromdichte in W/m<sup>2</sup>  
 $A^*$ : wärmeübertragende Fläche in m<sup>2</sup>  
 $T_{Wi}^*$ : Innenwandtemperatur in K  
 $T_{Wa}^*$ : Außenwandtemperatur in K  
 $R_{\lambda,ges}^*$ : gesamter Wärmeleitwiderstand in K/W

$R_{\lambda,RS}^*$ : Wärmeleitwiderstand bei Reihenschaltung in K/W  
 $\lambda_j^*$ : Wärmeleitfähigkeit der Schicht  $j$  in W/mK  
 $s_j^*$ : Dicke der Schicht  $j$  in m

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- stationär und eindimensional
- keine Wärmesenken und -quellen
- konstante Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_j^*$

**Arbeitsblatt 5.2: Wärmeleitung in einer mehrschichtigen Hohlzylinder- und Hohlkugelwand (Kap. 5.3)**



$$\dot{Q}^* = \dot{q}^*(r^*) A^*(r^*) = \frac{(T_{Wi}^* - T_{Wa}^*)}{R_{\lambda,RS}^*} = \text{const} \quad \text{s. (5-7)}$$

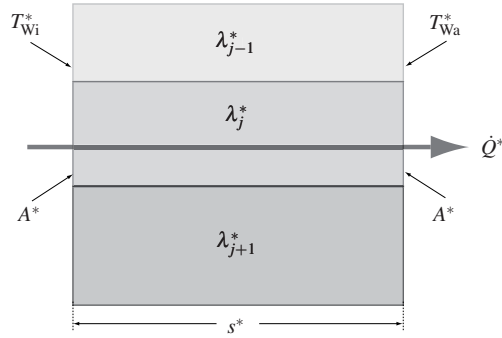
Hohlzylinderwand (HZ):  $R_{\lambda,ges}^* = R_{\lambda,RS}^* = \sum R_{\lambda,j}^* = \sum \frac{1}{2\pi L^* \lambda_j^*} \ln \frac{r_{a,j}^*}{r_{i,j}^*}; \quad \dot{q}^*(r^*) = \frac{\dot{Q}^*}{2\pi L^* r^*}$

Hohlkugelwand (HK):  $R_{\lambda,ges}^* = R_{\lambda,RS}^* = \sum R_{\lambda,j}^* = \sum \frac{1}{4\pi \lambda_j^*} \left( \frac{1}{r_{i,j}^*} - \frac{1}{r_{a,j}^*} \right); \quad \dot{q}^*(r^*) = \frac{\dot{Q}^*}{4\pi r^{*2}}$

$\dot{Q}^*$ : Wärmestrom in W	$\lambda_j^*$ : Wärmeleitfähigkeit der Schicht $j$ in W/mK
$\dot{q}^*(r^*)$ : Wärmestromdichte in W/m <sup>2</sup>	$L^*$ : Länge des Zylinders in m
$A^*(r^*)$ : wärmeübertragende Fläche in m <sup>2</sup>	$r^*$ : Radius in m
$T_{Wi}^*$ : Innenwandtemperatur in K	$r_{i,j}^*$ : Innenradius der Schicht $j$ in m
$T_{Wa}^*$ : Außenwandtemperatur in K	$r_{a,j}^*$ : Außenradius der Schicht $j$ in m
$R_{\lambda,ges}^*$ : gesamter Wärmeleitwiderstand in K/W	
$R_{\lambda,RS}^*$ : Wärmeleitwiderstand bei Reihenschaltung in K/W	

- Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:
- stationär und eindimensional
  - keine Wärmesenken und -quellen
  - konstante Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_j^*$

### Arbeitsblatt 5.3: Wärmeleitung in einer parallelschichtigen, ebenen Wand (Kap. 5.3)



$$\dot{Q}^* = q^* A^* = \frac{(T_{Wi}^* - T_{Wa}^*)}{R_{\lambda,PS}^*} = \text{const} \quad \text{s. (5-7)}$$

$$R_{\lambda,ges}^* = R_{\lambda,PS}^* = \frac{1}{\sum \frac{1}{R_{\lambda,j}^*}} = \frac{1}{\sum \frac{\lambda_j^*}{s^*}}; \quad \dot{q}^* = \frac{\dot{Q}^*}{A^*} = \text{const}$$

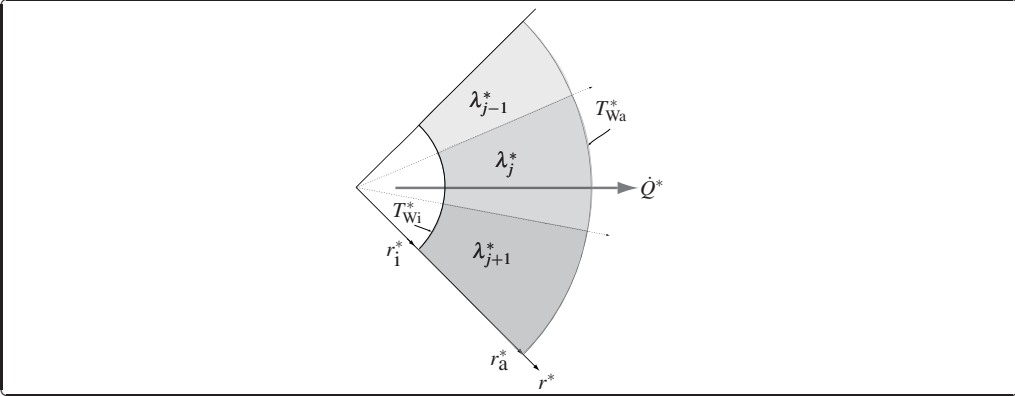
$\dot{Q}^*$ : Wandwärmestrom in W  
 $\dot{q}^*$ : Wandwärmestromdichte in W/m<sup>2</sup>  
 $A^*$ : wärmeübertragende fläche in m<sup>2</sup>  
 $T_{Wi}^*$ : Innenwandtemperatur in K  
 $T_{Wa}^*$ : Außenwandtemperatur in K  
 $R_{\lambda,ges}^*$ : gesamter wärmeleitwiderstand in K/W

$R_{\lambda,PS}^*$ : wärmeleitwiderstand bei Parallelschaltung in K/W  
 $\lambda_j^*$ : wärmeleitfähigkeit der schicht  $j$  in W/mK  
 $s^*$ : Dicke der schichten in m

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- stationär und eindimensional
- keine wärmesenken und -quellen
- konstante wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_j^*$

**Arbeitsblatt 5.4: Wärmeleitung in einer parallelschichtigen Hohlzylinder- und Hohlkugelwand (Kap. 5.3)**



$$\dot{Q}^* = q^* A^* = \frac{(T_{Wi}^* - T_{Wa}^*)}{R_{\lambda,PS}^*} = \text{const} \quad \text{s. (5-7)}$$

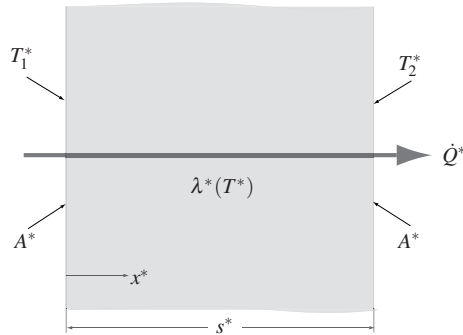
Hohlzylinderwand (HZ):  $R_{\lambda,ges}^* = R_{\lambda,PS}^* = \frac{1}{\sum \frac{1}{R_{\lambda,j}^*}} = \frac{1}{\sum \frac{1}{2\pi L^* \lambda_j^* \ln \frac{r_i^*}{r_a^*}}}$ ;  $\dot{q}^* = \frac{\dot{Q}^*}{2\pi L^* r^*} = \dot{q}^*(r^*)$

Hohlkugelwand (HK):  $R_{\lambda,ges}^* = R_{\lambda,PS}^* = \frac{1}{\sum \frac{1}{R_{\lambda,j}^*}} = \frac{1}{\sum \frac{1}{4\pi \lambda_j^* (\frac{1}{r_i^*} - \frac{1}{r_a^*})}}$ ;  $\dot{q}^* = \frac{\dot{Q}^*}{4\pi r^{*2}} = \dot{q}^*(r^*)$

$\dot{Q}^*$ : Wandwärmestrom in W	$\lambda_j^*$ : Wärmeleitfähigkeit der Schicht $j$ in W/mK
$\dot{q}^*$ : Wandwärmestromdichte in W/m <sup>2</sup>	$L^*$ : Länge des Zylinders in m
$A^*$ : wärmeübertragende Fläche in m <sup>2</sup>	$r^*$ : Radius in m
$T_{Wi}^*$ : Innenwandtemperatur in K	$r_i^*$ : Innenradius der Schicht $j$ in m
$T_{Wa}^*$ : Außenwandtemperatur in K	$r_a^*$ : Außenradius der Schicht $j$ in m
$R_{\lambda,ges}^*$ : gesamter Wärmeleitwiderstand in K/W	
$R_{\lambda,PS}^*$ : Wärmeleitwiderstand bei Parallelschaltung in K/W	

- Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:
- stationär und eindimensional
  - keine Wärmesenken und -quellen
  - konstante Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_j^*$

### Arbeitsblatt 5.5: Wärmeleitung in einer ebenen Wand mit linear temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeit (Kap. 5.3)



$$\lambda^*(T^*) = C_1^* \left( \frac{T^*}{T_{\text{Ref}}^*} \right)$$

$$\dot{Q}^* = \frac{C_1^* A^* (T_1^{*2} - T_2^{*2})}{2 T_{\text{Ref}}^* s^*}$$

$$T^*(x^*) = \sqrt{T_1^{*2} - 2 \frac{\dot{Q}^* T_{\text{Ref}}^* x^*}{C_1^* A^*}}$$

$$\frac{dT^*}{dx^*} = \frac{-\dot{Q}^* T_{\text{Ref}}^*}{C_1^* A^* T^*} = \frac{-\dot{Q}^* T_{\text{Ref}}^*}{C_1^* A^* \sqrt{T_1^{*2} - 2 \frac{\dot{Q}^* T_{\text{Ref}}^* x^*}{C_1^* A^*}}}$$

$\lambda^*(T^*)$ : temperaturabhängige  
Wärmeleitfähigkeit in W/mK  
 $C_1^*$ : Konstante in W/mK  
 $T_{\text{Ref}}^*$ : Referenztemperatur in K  
 $\dot{Q}^*$ : Wärmestrom in W  
 $A^*$ : wärmeübertragende Fläche in m<sup>2</sup>  
 $x^*$ : Koordinate in Richtung des  
Temperaturgefälles in m  
 $s^*$ : Dicke der Schicht in m

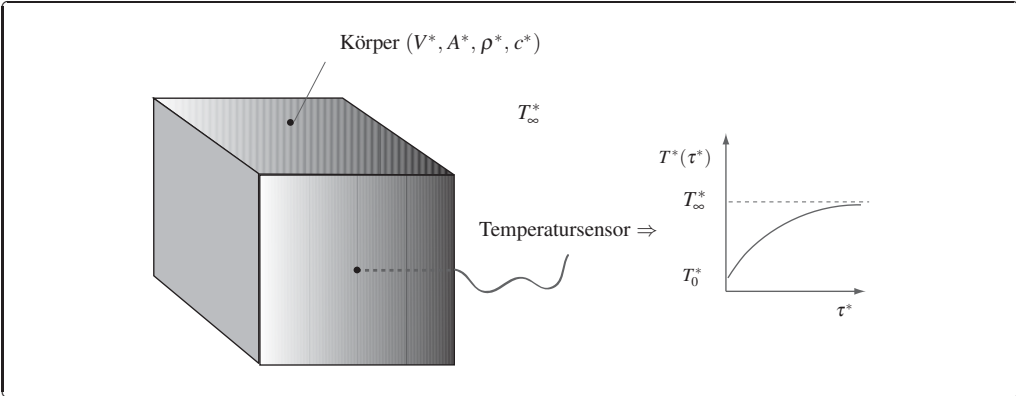
$T_1^*$ : Temperatur an der Oberfläche 1 in K  
 $T_2^*$ : Temperatur an der Oberfläche 2 in K  
 $T^*(x^*)$ : Temperatur als Funktion der  
Koordinate  $x^*$  in K  
 $\frac{dT^*}{dx^*}$ : Temperaturgradient als Funktion der  
Koordinate  $x^*$  in K/m

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- stationär und eindimensional
- keine Wärmesenken und -quellen



**Arbeitsblatt 5.6: Instationäre eindimensionale Wärmeleitung in einem Körper (Kap. 5.4)**



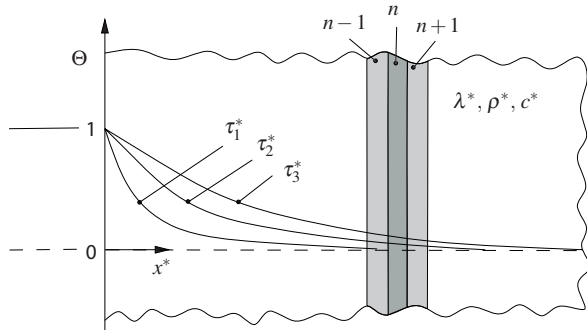
$$T^*(\tau^*) = T_0^* + (T_\infty^* - T_0^*) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\alpha_m^* A^* \tau^*}{c^* \rho^* V^*}\right) \right] \quad \text{s. (5-17)}$$

$$\alpha_m^* = \ln\left(\frac{T_0^* - T_\infty^*}{T^*(\tau^*) - T_\infty^*}\right) \left(\frac{c^* \rho^* V^*}{A^* \tau^*}\right)$$

<p><math>T^*(\tau^*)</math>: Körpertemperatur zur Zeit <math>\tau^*</math> in K</p> <p><math>T_\infty^*</math>: (konstante) Temperatur der Körperumgebung in K</p> <p><math>T_0^*</math>: Körpertemperatur zur Zeit <math>\tau_0^*=0</math> in K</p> <p><math>\tau^*</math>: Zeit in s</p> <p><math>\alpha_m^*</math>: mittlerer Wärmeübergangskoeffizient in <math>W/m^2K</math></p>	<p><math>A^*</math>: Körperoberfläche in <math>m^2</math></p> <p><math>V^*</math>: Körpervolumen in <math>m^3</math></p> <p><math>c^*</math>: Wärmekapazität des Körpers in <math>J/kg K</math></p> <p><math>\rho^*</math>: Dichte des Körpers in <math>kg/m^3</math></p>
---	---

- Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:
- $Bi = \frac{\alpha_m^* L^*}{\lambda^*} \leq 0,1$ , wobei  $L^*$  eine charakteristische Körperabmessung (z. B. Kantenlänge eines Würfels oder Durchmesser einer Kugel) und  $\lambda^*$  die Wärmeleitfähigkeit des Körpers darstellt
  - keine Wärmesenken und -quellen
  - konstante Stoffwerte

### Arbeitsblatt 5.7: Instationäre, eindimensionale Wärmeleitung in einer halbumendlichen Wand (Kap. 5.5)



$$\Theta = \frac{T^* - T_0^*}{T_\infty^* - T_0^*} = \operatorname{erfc} \left( \frac{x^*}{2\sqrt{a^* \tau^*}} \right) \quad \text{s. (5-22)}$$

$$a^* = \frac{\lambda^*}{\rho^* c^*}$$

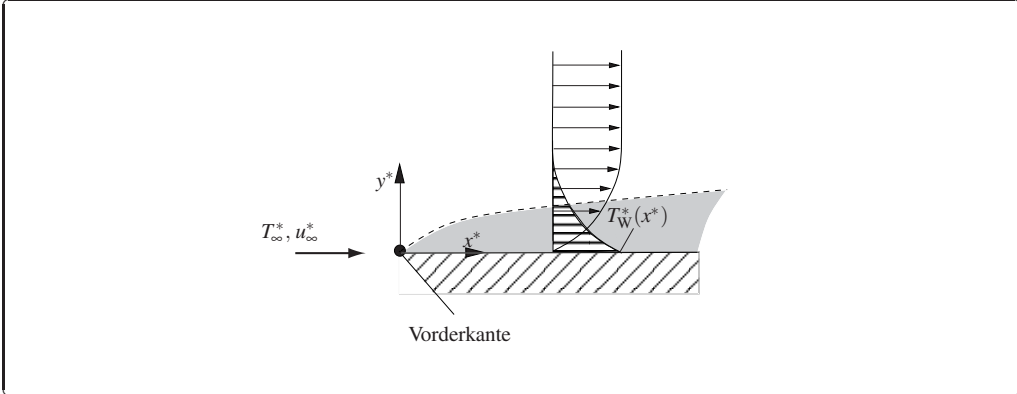
$T^*$ : Wandtemperatur in K  
 $T_\infty^*$ : Temperatur an der Stirnfläche der halbumendlichen Wand zur Zeit  $\tau_0^* = 0$  in K  
 $T_0^*$ : Wandtemperatur zur Zeit  $\tau_0^* = 0$  in K  
 erfc: komplementäre Fehlerfunktion, siehe Tab. 5.7

$\tau^*$ : Zeit in s  
 $x^*$ : Koordinate in m  
 $a^*$ : Temperaturleitfähigkeit in  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\lambda^*$ : Wärmeleitfähigkeit in  $\text{W}/\text{mK}$   
 $\rho^*$ : Dichte in  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $c^*$ : spezifische Wärmekapazität in  $\text{J}/\text{kg K}$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- keine Wärmesenken und -quellen
- konstante Stoffwerte

**Arbeitsblatt 6.1: Laminare Plattenströmung (Kap. 6.3.1)**



$$\frac{Nu_L}{\sqrt{Re_L}} = \frac{A_j - B_j Pr Ec / x^r}{\sqrt{2x}} \quad \text{s. (6-14)}$$

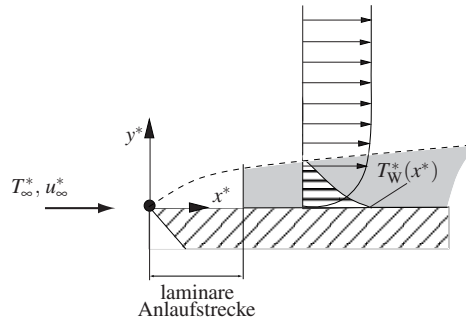
$$Nu_L = \frac{\dot{q}_W^*(x^*) L^*}{\lambda^* (T_W^*(x^*) - T_\infty^*)} \quad Re_L = \frac{\rho^* u_\infty^* L^*}{\eta^*} \quad Pr = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*} \quad Ec = \frac{u_\infty^{*2}}{c_p^* (T_W^*(L^*) - T_\infty^*)} \quad x = \frac{x^*}{L^*}$$

Konstanten  $A_j, B_j$  und  $r$  je nach Randbedingung aus Tab. 6.3

<p><math>Nu_L</math>: Nußelt-Zahl bei der Koordinate <math>x^*</math>  <math>\dot{q}_W^*(x^*)</math>: Wandwärmestromdichte in <math>W/m^2</math>  <math>L^*</math>: Bezugslänge in m  <math>x^*</math>: Koordinate in m  <math>\lambda^*</math>: Wärmeleitfähigkeit in <math>W/mK</math>  <math>T_W^*(x^*)</math>: Temperatur an der Wand bei der Koordinate <math>x^*</math> in K</p>	<p><math>T_\infty^*</math>: Temperatur des ungestörten Fluides in K  <math>u_\infty^*</math>: Geschwindigkeit des ungestörten Fluides in m/s  <math>\rho^*</math>: Dichte des Fluides in <math>kg/m^3</math>  <math>\eta^*</math>: dynamische Viskosität des Fluides in <math>kg/ms</math>  <math>c_p^*</math>: spezifische Wärmekapazität des Fluides in <math>J/kgK</math></p>
--	--

- Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:
- $Re_L \leq Re_{krit} = 5 \cdot 10^5$
  - Stoffwerte bei der Anströmtemperatur des ungestörten Fluides,  $T_\infty^*$ , s. Kap. 6.2.2

## Arbeitsblatt 6.2: Turbulente Plattenströmung (Kap. 6.4.1)



$$\text{Nu}_x = 0,0296 \text{Re}_x^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \quad \text{s. (6-32)}$$

$$\text{Nu}_m = 0,037 \text{Re}_L^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \quad \text{s. (6-33)}$$

$$\text{Nu}_x = \frac{\dot{q}_W^*(x^*) x^*}{\lambda^* (T_W^*(x^*) - T_\infty^*)} \quad \text{Nu}_m = \frac{1}{L^*} \int_0^{L^*} \text{Nu}_x dx^*$$

$$\text{Re}_x = \frac{\rho^* u_\infty^* x^*}{\eta^*} \quad \text{Re}_L = \frac{\rho^* u_\infty^* L^*}{\eta^*} \quad \text{Pr} = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*}$$

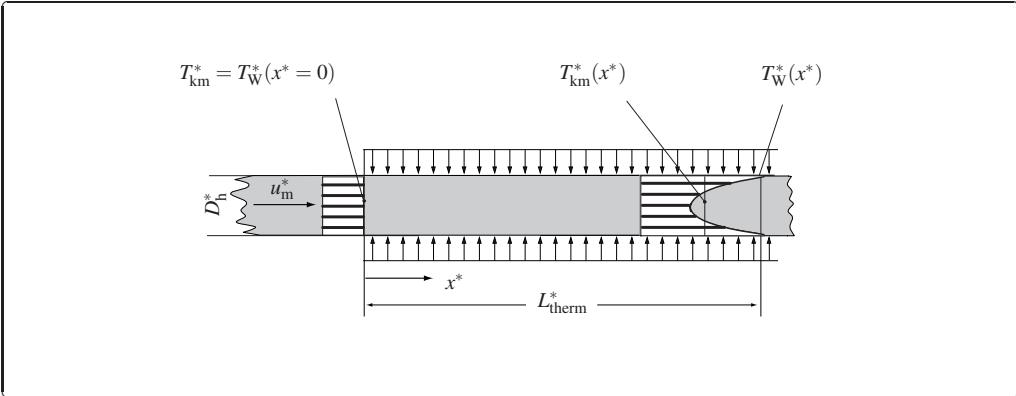
$\text{Nu}_x$ : lokale Nußelt-Zahl bei  $x^*$   
 $\text{Nu}_m$ : mittlere Nußelt-Zahl zwischen  $x^*=0$  und  $x^*=L^*$   
 $\dot{q}_W^*(x^*)$ : Wandwärmestromdichte in  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $L^*$ : Bezugslänge in m  
 $x^*$ : Koordinate in m  
 $\lambda^*$ : Wärmeleitfähigkeit in  $\text{W}/\text{mK}$   
 $T_W^*(x^*)$ : Temperatur an der Wand bei der Koordinate  $x^*$  in K

$T_\infty^*$ : Temperatur des ungestörten Fluides in K  
 $u_\infty^*$ : Geschwindigkeit des ungestörten Fluides in m/s  
 $\rho^*$ : Dichte des Fluides in  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $\eta^*$ : dynamische Viskosität des Fluides in  $\text{kg}/\text{m s}$   
 $c_p^*$ : spezifische Wärmekapazität des Fluides in  $\text{J}/\text{kgK}$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- Vernachlässigung der laminaren Anlaufstrecke
- nicht-rationale Näherung für  $\text{Re}_L > \text{Re}_{\text{krit}} = 5 \cdot 10^5$  sowie  $0,6 < \text{Pr} < 60$
- turbulente Strömung ohne Berücksichtigung eines laminaren Anlaufes
- Stoffwerte bei der Anströmtemperatur des ungestörten Fluides,  $T_\infty^*$ , s. Kap. 6.2.2

**Arbeitsblatt 6.3: Laminare Rohr-/Kanaleinlaufströmung (Kap. 6.3.2)**



$$Nu_D = C_1 \tilde{x}^{-1/3} = C_1 \left( \frac{x^*}{D_h^* Re_D Pr} \right)^{-1/3} \quad \text{für } \tilde{x} \rightarrow 0 \quad \text{s. (6-29)}$$

$$C_1 = 2,0668/4^{1/3} \quad \text{für } \dot{q}_W^* = \text{const}$$

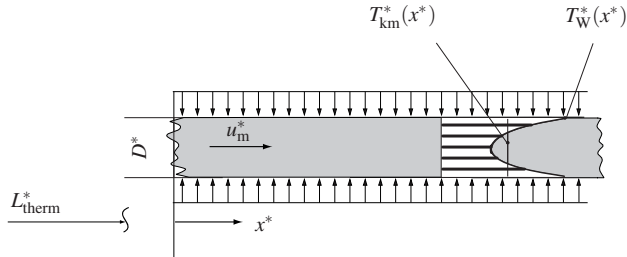
$$C_1 = 1,7092/4^{1/3} \quad \text{für } T_W^* = \text{const}$$

$$Nu_D = \frac{\dot{q}_W^*(x^*) D_h^*}{\lambda^* (T_W^*(x^*) - T_{km}^*(x^*))} \quad \tilde{x} = \frac{x^*}{D_h^* Re_D Pr} \quad Re_D = \frac{\rho^* u_m^* D_h^*}{\eta^*} \quad Pr = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*} \quad D_h^* = \frac{4A^*}{U^*}$$

<p><math>Nu_D</math>: lokale Nuelt-Zahl gebildet mit dem hydraulischen Durchmesser <math>D_h^*</math></p> <p><math>\dot{q}_W^*(x^*)</math>: Wandwärmestromdichte in <math>W/m^2</math></p> <p><math>T_W^*(x^*)</math>: Temperatur an der Wand bei der Koordinate <math>x^*</math> in K</p> <p><math>T_{km}^*(x^*)</math>: kalorische Mitteltemperatur bei der Koordinate <math>x^*</math> in K</p> <p><math>D_h^*</math>: hydraulischer Durchmesser in m</p> <p><math>A^*</math>: Rohr-/Kanalquerschnittsfläche in <math>m^2</math></p>	<p><math>L_{therm}^*</math>: thermischen Einlaufänge in m</p> <p><math>U^*</math>: Rohr-/Kanalumfang in m</p> <p><math>u_m^*</math>: mittlere Geschwindigkeit in m/s</p> <p><math>\lambda^*</math>: Wärmeleitfähigkeit in <math>W/mK</math></p> <p><math>\rho^*</math>: Dichte des Fluides in <math>kg/m^3</math></p> <p><math>\eta^*</math>: dynamische Viskosität des Fluides in <math>kg/m s</math></p> <p><math>c_p^*</math>: spezifische Wärmekapazität des Fluides in <math>J/kgK</math></p>
---	--

- Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:
- $Re_D \leq Re_{krit} \approx 2300$  (Rohr)
  - Koordinate  $x^* < L_{therm}^* \approx 0,04 D^* Re_D Pr$ , s. (6-21)
  - hydraulisch ausgebildete Strömung
  - Stoffwerte bei der kalorischen Mitteltemperatur des Fluides zu Beginn der Wärmeübertragung  $T_0^* = T_{km}^*(x^* = 0)$ , s. Kap. 6.2.2

### Arbeitsblatt 6.4: Laminare ausgebildete Rohrströmung (Kap. 6.3.2)



$$Nu_D = 4,36 \quad \text{für} \quad \dot{q}_W^* = \text{const} \quad \text{s. (6-24)}$$

$$Nu_D = 3,66 \quad \text{für} \quad T_W^* = \text{const} \quad \text{s. (6-24)}$$

$$Nu_D = \frac{\dot{q}_W^*(x^*) D^*}{\lambda^* (T_W^*(x^*) - T_{km}^*(x^*))}$$

Weitere Geometrien in Tab. 6.5

$Nu_D$ : Nußelt-Zahl gebildet mit dem Durchmesser  $D^*$

$\dot{q}_W^*(x^*)$ : Wandwärmestromdichte in  $W/m^2$

$T_W^*(x^*)$ : Temperatur an der Wand bei der Koordinate  $x^*$  in K

$T_{km}^*(x^*)$ : kalorische Mitteltemperatur bei der Koordinate  $x^*$  in K

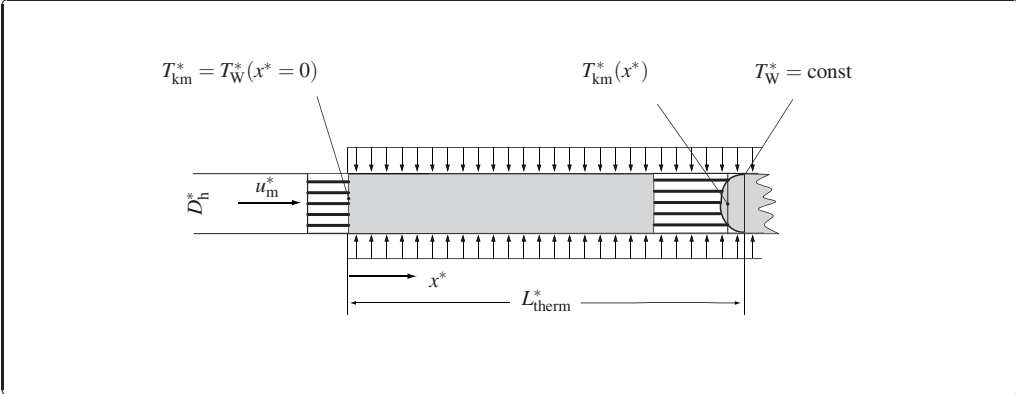
$D^*$ : Rohrdurchmesser in m

$\lambda^*$ : Wärmeleitfähigkeit in  $W/mK$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- $Re_D \leq Re_{krit}$
- Lauflänge  $x^* \geq L_{therm}^* \approx 0,04 D_h^* Re_D Pr$ , s. (6-21) mit der thermischen Einlaufänge  $L_{therm}^*$
- hydraulisch und thermisch ausgebildete Strömung
- Stoffwerte bei der kalorischen Mitteltemperatur des Fluides an der Stelle  $x^*$ , s. Kap. 6.2.2

**Arbeitsblatt 6.5: Turbulente Rohr-/Kanaleinlaufströmung (Kap. 6.4.2)**



$$\frac{Nu_m}{Nu_D} = 1 + \frac{C}{x^*/D_h^*} \quad \text{s. (6-40)}$$

$$Nu_m = \frac{1}{L_{therm}^*} \int_0^{L_{therm}^*} Nu_D dx^* \quad (Nu_m = Nu_D \quad \text{für } x^*/D_h^* \rightarrow \infty)$$

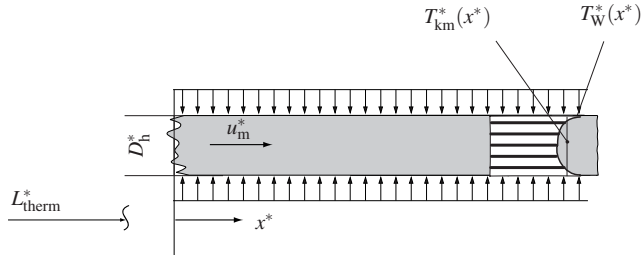
$$Nu_m = \frac{\dot{q}_{Wm}^* D_h^*}{\lambda^* \Delta T^*} \quad \dot{q}_{Wm}^* = \frac{1}{L_{therm}^*} \int_0^{L_{therm}^*} \dot{q}_W^* dx^*$$

Pr	0,01	0,7	10
C	9	2	0,7

<p><math>Nu_m</math>: mittlere Nußelt-Zahl im Einlaufbereich</p> <p><math>Nu_D</math>: Nußelt-Zahl bei <math>x^*</math></p> <p><math>T_W^*(x^*)</math>: Temperatur an der Wand bei der Koordinate <math>x^*</math> in K</p> <p><math>T_{km}^*(x^*)</math>: kalorische Mitteltemperatur bei der Koordinate <math>x^*</math> in K</p>	<p><math>\Delta T^*</math>: mittlere Temperaturdifferenz bei der Einlauflänge in K</p> <p><math>L_{therm}^*</math>: thermische Einlauflänge <math>\approx 30D_h^*</math> in m</p> <p><math>D_h^*</math>: hydraulischer Durchmesser des Rohres/Kanals in m</p> <p><math>x^*</math>: Koordinate in m</p> <p><math>\lambda^*</math>: Wärmeleitfähigkeit in W/mK</p>
---	--

- Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:
- $T_W^* = const$
  - $Re_D > Re_{krit}$
  - hydraulisch ausgebildete Strömung
  - Stoffwerte bei der kalorischen Mitteltemperatur des Fluides zu Beginn der Wärmeübertragung,  $T_0^* = T_{km}^*(x^* = 0)$ , s. Kap. 6.2.2

## Arbeitsblatt 6.6: Turbulente ausgebildete Rohr-/Kanalströmung (Kap. 6.4.2)



$$0,6 \leq \text{Pr} \leq 1000 \quad 10^4 \leq \text{Re}_D \leq 10^6 : \\ \text{Nu}_D = \frac{(\zeta/8) \text{Re}_D \text{Pr}}{1 + 12,7 \sqrt{\zeta/8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad \text{mit} \quad \zeta = (1,8 \log_{10} \text{Re}_D - 1,5)^{-2} \quad \text{s. (6-38)}$$

$$\text{Pr} \approx 1 \quad \text{Re}_D < 10^5 : \\ \text{Nu}_D = 0,022 \text{Re}_D^{4/5} \text{Pr}^{1/2} \quad \text{für} \quad \dot{q}_W^* = \text{const} \quad \text{s. (6-39)}$$

$$\text{Nu}_D = 0,021 \text{Re}_D^{4/5} \text{Pr}^{1/2} \quad \text{für} \quad T_W^* = \text{const} \quad \text{s. (6-39)}$$

$$\text{Nu}_D = \frac{\dot{q}_W^*(x^*) D_h^*}{\lambda^* (T_W^*(x^*) - T_{km}^*(x^*))} \quad \text{Re}_D = \frac{\rho^* u_m^* D_h^*}{\eta^*} \quad \text{Pr} = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*} \quad D_h^* = \frac{4A^*}{U^*}$$

$\text{Nu}_D$ : Nußelt-Zahl gebildet mit dem hydraulischen Durchmesser  $D_h^*$   
 $\dot{q}_W^*(x^*)$ : Wandwärmestromdichte in  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $T_W^*(x^*)$ : Temperatur an der Wand bei der Koordinate  $x^*$  in K  
 $T_{km}^*(x^*)$ : kalorische Mitteltemperatur bei der Koordinate  $x^*$  in K  
 $D_h^*$ : hydraulischer Durchmesser des Rohres/Kanales in m

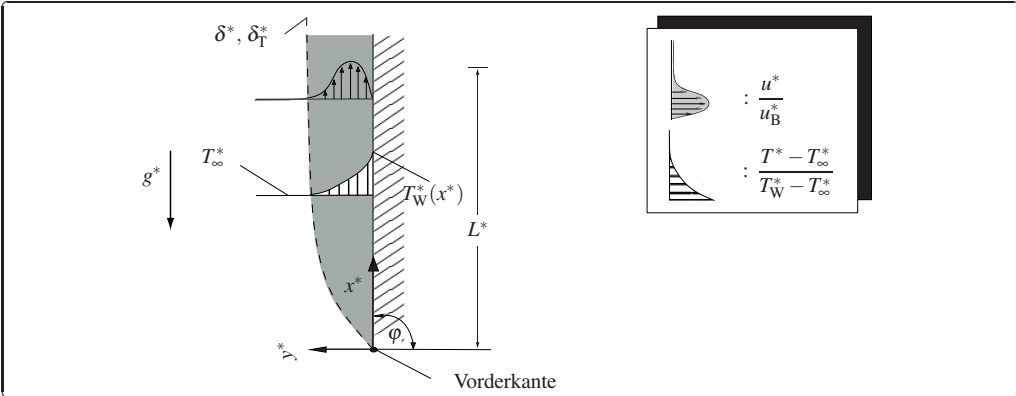
$A^*$ : Rohr-/Kanalquerschnittsfläche in  $\text{m}^2$   
 $U^*$ : Rohr-/Kanalumfang in m  
 $u_m^*$ : mittlere Geschwindigkeit in m/s  
 $\lambda^*$ : Wärmeleitfähigkeit in  $\text{W}/\text{mK}$   
 $\rho^*$ : Dichte des Fluides in  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $\eta^*$ : dynamische Viskosität des Fluides in  $\text{kg}/\text{m s}$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- $\text{Re}_D \geq \text{Re}_{\text{krit}}$
- Lauflänge  $x^* > L_{\text{therm}}^* \approx 30 D_h^*$
- hydraulisch und thermisch ausgebildete Strömung
- Stoffwerte bei der kalorischen Mitteltemperatur des Fluides zu Beginn der Wärmeübertragung,  $T_0^* = T_{km}^*(x^* = 0)$ , s. Kap. 6.2.2



**Arbeitsblatt 6.7: Wärmeübergang bei natürlicher Konvektion an einer senkrechten Wand (Kap. 6.5)**



$$\frac{Nu_L}{Gr_L^{1/4}} = \frac{A}{\sqrt{2}} x^{\frac{r-1}{4}} \quad \text{s. (6-43)}$$

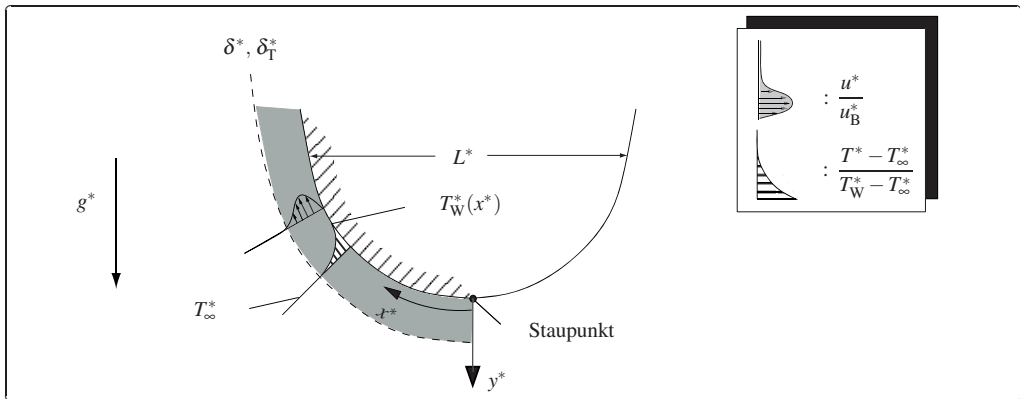
$$Nu_L = \frac{\dot{q}_W^*(x^*) L^*}{\lambda^* (T_W^*(x^*) - T_\infty^*)} \quad Gr_L = \frac{\rho^{*2} g^* \beta_\infty^* \Delta T_B^* L^{*3}}{\eta^{*2}} \quad Pr = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*} \quad x = \frac{x^*}{L^*}$$

Konstanten A und r je nach Randbedingung aus Tab. 6.10

<p><math>Nu_L</math>: lokale Nußelt-Zahl bei <math>x^*</math></p> <p><math>L^*</math>: Bezugslänge in m</p> <p><math>x^*</math>: Koordinate in m</p> <p><math>\dot{q}_W^*(x^*)</math>: Wandwärmestromdichte bei <math>x^*</math> in <math>W/m^2</math></p> <p><math>\Delta T_B^*</math>: Bezugstemperaturdifferenz in K</p> <p><math>T_W^*(x^*)</math>: Temperatur an der Wand bei <math>x^*</math> in K</p> <p><math>T_W^*(L^*)</math>: Temperatur an der Wand bei <math>L^*</math> in K</p>	<p><math>T_\infty^*</math>: Temperatur des umgebenden Fluides in K</p> <p><math>\lambda^*</math>: Wärmeleitfähigkeit des Fluides in <math>W/mK</math></p> <p><math>\rho^*</math>: Dichte des Fluides in <math>kg/m^3</math></p> <p><math>\eta^*</math>: Viskosität des Fluides in <math>kg/ms</math></p> <p><math>\beta_\infty^*</math>: isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient in <math>1/K</math></p> <p><math>c_p^*</math>: Wärmekapazität des Fluides in <math>kJ/kg K</math></p>
---	--

- Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:
- laminare Strömung
  - stationär und zweidimensional
  - keine Wärmesenken und -quellen
  - konstante Wärmeleitfähigkeit
  - Stoffwerte bei der Temperatur des umgebenden Fluides,  $T_\infty^*$ , s. Kap. 6.2.2

### Arbeitsblatt 6.8: Wärmeübergang bei natürlicher Konvektion im Staupunktbereich eines ebenen Körpers (Kap. 6.5)



$$\frac{\text{Nu}_L}{\text{Gr}_L^{1/4}} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad \text{s. (6-45)}$$

$$\text{Nu}_L = \frac{\dot{q}_W^*(x^*) L^*}{\lambda^* (T_W^*(x^*) - T_\infty^*)} \quad \text{Gr}_L = \frac{\rho^{*2} g^* \beta_\infty^* \Delta T_B^* L^3}{\eta^{*2}} \quad \text{Pr} = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*}$$

$$\Delta T_B^* = (T_W^*(L^*) - T_\infty^*) \quad \text{Konstante } A \text{ aus Tab. 6.11}$$

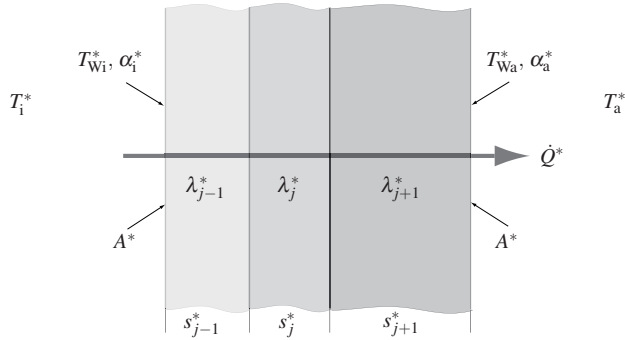
$\text{Nu}_L$ : Nußelt-Zahl bei  $x^*$   
 $L^*$ : charakteristische Länge in m  
 $\dot{q}_W^*(x^*)$ : Wandwärmestromdichte bei  $x^*$  in  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $\Delta T_B^*$ : Bezugstemperaturdifferenz in K  
 $T_W^*(x^*)$ : Temperatur an der Wand bei  $x^*$  in K  
 $T_W^*(L^*)$ : Temperatur an der Wand bei  $L^*$  in K  
 $T_\infty^*$ : Temperatur des umgebenden Fluides in K

$\lambda^*$ : Wärmeleitfähigkeit des Fluides in  $\text{W}/\text{mK}$   
 $\rho^*$ : Dichte des Fluides in  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $\eta^*$ : Viskosität des Fluides in  $\text{kg}/\text{ms}$   
 $\beta_\infty^*$ : isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient in  $1/\text{K}$   
 $c_p^*$ : Wärmekapazität des Fluides in  $\text{kJ}/\text{kg K}$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- laminare Strömung
- stationär und zweidimensional
- keine Wärmesenken und -quellen
- konstante Wärmeleitfähigkeit
- Stoffwerte bei der Temperatur des umgebenden Fluides,  $T_\infty^*$ , s. Kap. 6.2.2

### Arbeitsblatt 6.9: Wärmedurchgang an einer mehrschichtigen, ebenen Wand (Kap. 6.6)



$$\dot{Q}^* = q^* A^* = \frac{1}{R_k^*} (T_i^* - T_a^*) = \text{const} \quad \text{s. (6-47)}$$

$$R_k^* = \frac{1}{\alpha_i^* A^*} + \sum \frac{s_j^*}{\lambda_j^* A^*} + \frac{1}{\alpha_a^* A^*}; \quad q^* = \frac{\dot{Q}^*}{A^*} = \text{const}$$

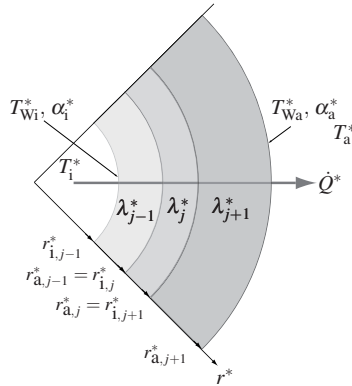
$\dot{Q}^*$ : Wärmestrom in W  
 $q^*$ : Wärmestromdichte in W/m<sup>2</sup>  
 $A^*$ : Wärmeübertragende Fläche in m<sup>2</sup>  
 $T_i^*$ : Innentemperatur in K  
 $T_a^*$ : Außentemperatur in K  
 $T_{Wi}^*$ : Innenwandtemperatur in K  
 $T_{Wa}^*$ : Außenwandtemperatur in K  
 $R_k^*$ : Wärmedurchgangswiderstand in K/W

$\alpha_i^*$ : Wärmeübergangskoeffizient innen in W/m<sup>2</sup>K (=  $q^*/(T_i^* - T_{Wi}^*)$ )  
 $\alpha_a^*$ : Wärmeübergangskoeffizient außen in W/m<sup>2</sup>K (=  $q^*/(T_{Wa}^* - T_a^*)$ )  
 $\lambda_j^*$ : Wärmeleitfähigkeit der Schicht  $j$  in W/mK  
 $s_j^*$ : Dicke der Schicht  $j$  in m

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- stationär und eindimensional
- keine Wärmesenken und -quellen
- konstante Wärmeleitfähigkeit

## Arbeitsblatt 6.10: Wärmedurchgang in einer mehrschichtigen Hohlzylinder- und Hohlkugelwand (Kap. 6.6)



$$\dot{Q}^* = \dot{q}^*(r^*) A^*(r^*) = \frac{(T_i^* - T_a^*)}{R_k^*} = \text{const} \quad \text{s. (6-47)}$$

Hohlzylinderwand (HZ):  $R_k^* = \frac{1}{\alpha_i^* 2\pi L^* r_i^*} + \sum \frac{1}{2\pi L^* \lambda_j^*} \ln \frac{r_{a,j}^*}{r_{i,j}^*} + \frac{1}{\alpha_a^* 2\pi L^* r_a^*}; \quad \dot{q}^*(r^*) = \frac{\dot{Q}^*}{2\pi L^* r^*}$

Hohlkugelwand (HK):  $R_k^* = \frac{1}{\alpha_i^* 4\pi r_i^{*2}} + \sum \frac{1}{4\pi \lambda_j^*} \left( -\frac{1}{r_{a,j}^*} + \frac{1}{r_{i,j}^*} \right) + \frac{1}{\alpha_a^* 4\pi r_a^{*2}}; \quad \dot{q}^*(r^*) = \frac{\dot{Q}^*}{4\pi r^{*2}}$

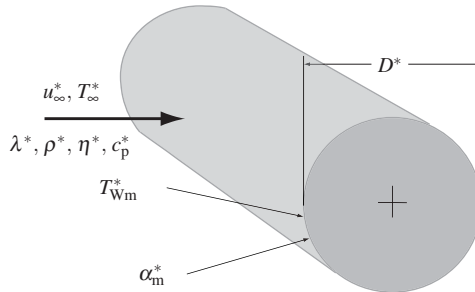
$\dot{Q}^*$ : Wärmestrom in W  
 $\dot{q}^*(r^*)$ : Wärmestromdichte in W/m<sup>2</sup>  
 $A^*(r^*)$ : Wärmeübertragende Fläche in m<sup>2</sup>  
 $T_i^*$ : Innentemperatur in K  
 $T_a^*$ : Außentemperatur in K  
 $T_{Wi}^*$ : Innenwandtemperatur in K  
 $T_{Wa}^*$ : Außenwandtemperatur in K  
 $R_k^*$ : Wärmedurchgangswiderstand in K/W  
 $\alpha_i^*$ : Wärmeübergangskoeffizient innen in W/m<sup>2</sup>K (=  $\dot{q}^*/(T_i^* - T_{Wi}^*)$ )

$\alpha_a^*$ : Wärmeübergangskoeffizient außen in W/m<sup>2</sup>K (=  $\dot{q}^*/(T_{Wa}^* - T_a^*)$ )  
 $\lambda_j^*$ : Wärmeleitfähigkeit der Schicht  $j$  in W/mK  
 $L^*$ : Länge des Zylinders in m  
 $r^*$ : Radius in m  
 $r_i^*$ : Innenradius (min. Radius) in m  
 $r_a^*$ : Außenradius (max. Radius) in m  
 $r_{i,j}^*$ : Innenradius der Schicht  $j$  in m  
 $r_{a,j}^*$ : Außenradius der Schicht  $j$  in m

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- stationär und eindimensional
- keine Wärmesenken und -quellen
- konstante Wärmeleitfähigkeit

### Arbeitsblatt 6.11: Querangeströmter Kreiszyylinder (Kap. 6.7.1)



$$\text{Nu}_m = 0,3 + \frac{0,62 \text{Re}_D^{1/2} \text{Pr}^{1/3}}{[1 + (0,4/\text{Pr})^{2/3}]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{\text{Re}_D}{280000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad \text{s. (6-49)}$$

$$\text{Nu}_m = \frac{\dot{q}_{Wm}^* D^*}{\lambda^* \Delta T_m^*} = \frac{\alpha_m^* D^*}{\lambda^*} \quad \text{Re}_D = \frac{\rho^* u_\infty^* D^*}{\eta^*} \quad \text{Pr} = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*}$$

$$\Delta T_m^* = T_\infty^* - T_{Wm}^*$$

$\text{Nu}_m$ : mittlere Nußelt-Zahl

$\dot{q}_{Wm}^*$ : mittlere Wandwärmestromdichte in  $\text{W}/\text{m}^2$

$\alpha_m^*$ : mittlerer Wärmeübergangskoeffizient in  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

$D^*$ : Durchmesser des Kreiszyinders in m

$\Delta T_m^*$ : mittlere Temperaturdifferenz zwischen Anströmung und Wand in K

$T_{Wm}^*$ : mittlere Temperatur an der Wand in K

$T_\infty^*$ : Anströmtemperatur in K

$u_\infty^*$ : Anströmgeschwindigkeit in m/s

$\lambda^*$ : Wärmeleitfähigkeit des Fluides in  $\text{W}/\text{mK}$

$\rho^*$ : Dichte des Fluides in  $\text{kg}/\text{m}^3$

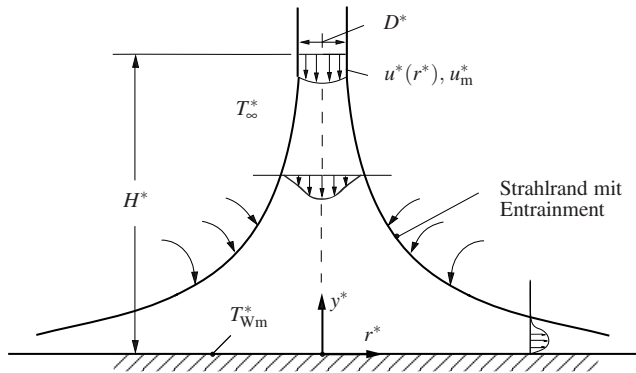
$\eta^*$ : Viskosität des Fluides in  $\text{kg}/\text{ms}$

$c_p^*$ : Wärmekapazität des Fluides in  $\text{kJ}/\text{kg K}$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- Gültigkeitsbereich:  $0,7 \leq \text{Pr} \leq 300$  und  $10 \leq \text{Re}_D \leq 10^5$
- stationär und zweidimensional
- keine Wärmesenken und -quellen
- konstante Wärmeleitfähigkeit
- Stoffwerte bei Anströmtemperatur,  $T_\infty^*$ , s. Kap. 6.2.2

### Arbeitsblatt 6.12: Rotationssymmetrischer Prallstrahl (Kap. 6.7.3)



$$\text{Nu}_m = \text{Pr}^{0,4} \frac{1 - \frac{1,1}{R}}{R + 0,1(H-6)} f(\text{Re}_D) \quad \text{s. (6-56)}$$

$$\text{Nu}_m = \frac{\dot{q}_{Wm}^* D^*}{\lambda^* (T_{Wm}^* - T_{\infty}^*)} = \frac{\alpha_m^* D^*}{\lambda^*} \quad \text{Re}_D = \frac{\rho^* u_m^* D^*}{\eta^*} \quad \text{Pr} = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*} \quad H = \frac{H^*}{D^*} \quad R = \frac{r^*}{D^*}$$

$$f(\text{Re}_D) = 2 [\text{Re}_D (1 + 0,005 \text{Re}_D^{0,55})]^{0,5}$$

$\text{Nu}_m$ : mittlere Nußelt-Zahl

$\dot{q}_{Wm}^*$ : mittlere Wandwärmestromdichte in  $\text{W}/\text{m}^2$

$\alpha_m^*$ : mittlerer Wärmeübergangskoeffizient in  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

$T_{Wm}^*$ : mittlere Temperatur an der Wand in K

$T_{\infty}^*$ : Düsenaustrittstemperatur in K

$u_m^*$ : mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit in m/s

$D^*$ : Düsendurchmesser in m

$H^*$ : Abstand Düsenaustritt/Platte in m

$r^*$ : Koordinate in radialer Richtung in m

$\lambda^*$ : Wärmeleitfähigkeit des Fluides in  $\text{W}/\text{mK}$

$\rho^*$ : Dichte des Fluides in  $\text{kg}/\text{m}^3$

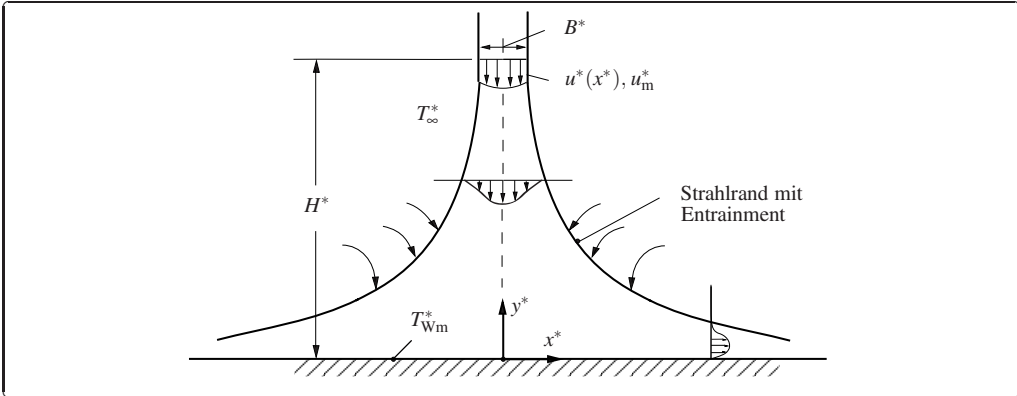
$\eta^*$ : Viskosität des Fluides in  $\text{kg}/\text{ms}$

$c_p^*$ : Wärmekapazität des Fluides in  $\text{kJ}/\text{kg K}$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- Gültigkeitsbereich:  $2,5 \leq R \leq 7,5$ ;  $2 \leq H \leq 12$  und  $2000 \leq \text{Re}_D \leq 400000$
- stationär und zweidimensional (rotationssymmetrisch)
- keine Wärmesenken und -quellen
- konstante Wärmeleitfähigkeit
- Stoffwerte bei  $T_m^* = (T_W^* + T_{\infty}^*)/2$

**Arbeitsblatt 6.13: Prallstrahl aus einer Schlitzdüse (Kap. 6.7.3)**



$$Nu_m = \frac{1,53 Re_{2B}^m}{x + H + 1,39} Pr^{0,42} \quad \text{s. (6-57)}$$

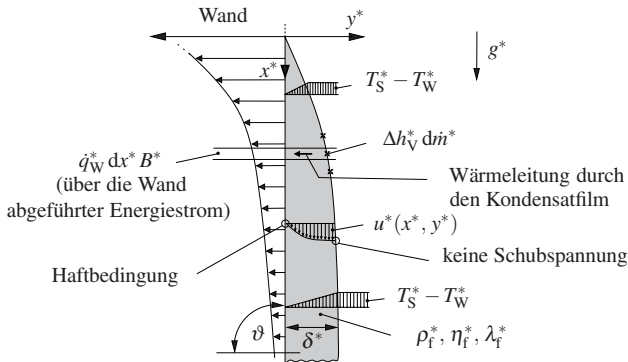
$$Nu_m = \frac{\dot{q}_{Wm}^* D^*}{\lambda^* (T_{Wm}^* - T_{\infty}^*)} = \frac{\alpha_m^* D^*}{\lambda^*} \quad Re_{2B} = \frac{\rho^* u_m^* 2B^*}{\eta^*} \quad Pr = \frac{\eta^* c_p^*}{\lambda^*} \quad H = \frac{H^*}{2B^*} \quad x = \frac{x^*}{2B^*}$$

$$m = 0,695 - \frac{1}{x + H^{1,33} + 3,06}$$

<p><math>Nu_m</math>: mittlere Nußelt-Zahl</p> <p><math>\dot{q}_{Wm}^*</math>: mittlere Wandwärmestromdichte in <math>W/m^2</math></p> <p><math>\alpha_m^*</math>: mittlerer Wärmeübergangskoeffizient in <math>W/m^2K</math></p> <p><math>T_{Wm}^*</math>: mittlere Temperatur an der Wand in K</p> <p><math>T_{\infty}^*</math>: Düsenaustrittstemperatur in K</p> <p><math>u_m^*</math>: mittlere Düsenaustrittsgeschwindigkeit in m/s</p>	<p><math>B^*</math>: Schlitzdüsenbreite in m</p> <p><math>H^*</math>: Abstand Düsenaustritt/Platte in m</p> <p><math>x^*</math>: Koordinate in Richtung der Schlitzdüsenbreite in m</p> <p><math>\lambda^*</math>: Wärmeleitfähigkeit des Fluides in <math>W/mK</math></p> <p><math>\rho^*</math>: Dichte des Fluides in <math>kg/m^3</math></p> <p><math>\eta^*</math>: Viskosität des Fluides in <math>kg/m s</math></p> <p><math>c_p^*</math>: Wärmekapazität des Fluides in <math>kJ/kg K</math></p>
---	--

- Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:
- Gültigkeitsbereich:  $2 \leq x \leq 25$ ;  $2 \leq H \leq 10$  und  $3000 \leq Re_{2B} \leq 90000$
  - stationär und zweidimensional
  - keine Wärmesenken und -quellen
  - konstante Wärmeleitfähigkeit
  - Stoffwerte bei  $T_m^* = (T_W^* + T_{\infty}^*)/2$

### Arbeitsblatt 7.1: Laminare Filmkondensation (Kap. 7.3.1)



$$Nu_x = \frac{\dot{q}_W^* x^*}{\lambda_f^* (T_S^* - T_W^*)} = 0,707 \left[ \frac{\rho_f^* (\rho_f^* - \rho_g^*) g^* \sin \vartheta \Delta h_V^* x^{*3}}{\eta_f^* \lambda_f^* (T_S^* - T_W^*)} \right]^{1/4} \quad \text{s. (7-3)}$$

$$90^\circ \geq \vartheta > 30^\circ$$

$$Nu_m = \frac{\dot{q}_{Wm}^* L^*}{\lambda_f^* (T_S^* - T_W^*)} = \frac{4}{3} Nu_L \quad \text{s. (7-4)}$$

$$\dot{q}_{Wm}^* = 1/L^* \int_0^{L^*} \dot{q}_W^* dx^* \quad Nu_L \text{ nach (7-3) bei } x^* = L^*$$

$Nu_x$ : lokale Nußelt-Zahl bei  $x^*$   
 $Nu_m$ : mittlere Nußelt-Zahl zwischen  $x^* = 0$   
 (Kondensationsbeginn) und  $x^* = L^*$   
 $Nu_L$ : Nußelt-Zahl bei  $x^* = L^*$   
 $\dot{q}_W^*$ : Wandwärmestromdichte bei  $x^*$  in  
 $W/m^2$   
 $\dot{q}_{Wm}^*$ : mittlere Wandwärmestromdichte  
 zwischen  $x^* = 0$  und  $x^* = L^*$  in  $W/m^2$   
 $x^*$ : Koordinate in m  
 $B^*$ : Plattenbreite in m  
 $L^*$ : Plattenlänge in m  
 $T_S^*$ : Siedetemperatur des Dampfes in K

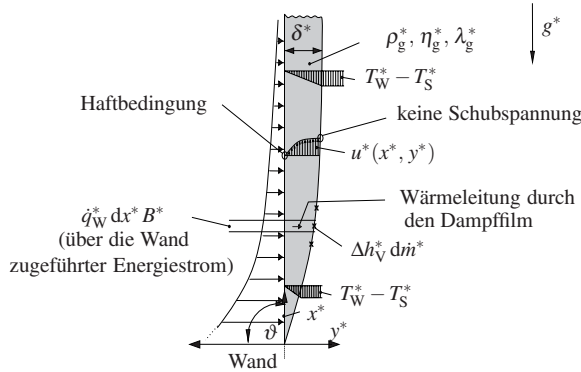
$T_W^*$ : Wandtemperatur in K  
 $g^*$ : Erdbeschleunigung in  $m/s^2$   
 $\vartheta$ : Winkel gegenüber der Horizontalen  
 $\lambda_f^*$ : Wärmeleitfähigkeit der flüssigen Phase  
 (Kondensat) in  $W/mK$   
 $\rho_f^*$ : Dichte der flüssigen Phase (Kondensat)  
 in  $kg/m^3$   
 $\rho_g^*$ : Dichte der gasförmigen Phase in  $kg/m^3$   
 $\Delta h_V^*$ : spezifische Verdampfungsenthalpie in  
 $J/kgK$   
 $\eta_f^*$ : dynamische Viskosität der flüssigen  
 Phase in  $kg/ms$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- laminare Filmkondensation
- gegenüber der Horizontalen um den Winkel  $90^\circ \geq \vartheta > 30^\circ$  geneigte Wand
- Stoffwerte bei Siedetemperatur  $T_S^*$



**Arbeitsblatt 7.2: Laminare Filmsieden (Kap. 7.4.1)**



$$Nu_x = \frac{\dot{q}_w^* x^*}{\lambda_g^* (T_W^* - T_S^*)} = 0,85 \cdot 0,707 \left[ \frac{\rho_g^* (\rho_f^* - \rho_g^*) g^* \sin \vartheta \Delta h_v^* x^{*3}}{\eta_g^* \lambda_g^* (T_W^* - T_S^*)} \right]^{1/4} \quad \text{s. (7-11)}$$

$$90^\circ \geq \vartheta > 30^\circ$$

$$Nu_m = \frac{\dot{q}_{Wm}^* L^*}{\lambda_g^* (T_W^* - T_S^*)} = \frac{4}{3} Nu_L \quad \text{s. (7-12)}$$

$$\dot{q}_{Wm}^* = 1/L^* \int_0^{L^*} \dot{q}_w^* dx^* \quad Nu_L \text{ nach (7-11) bei } x^* = L^*$$

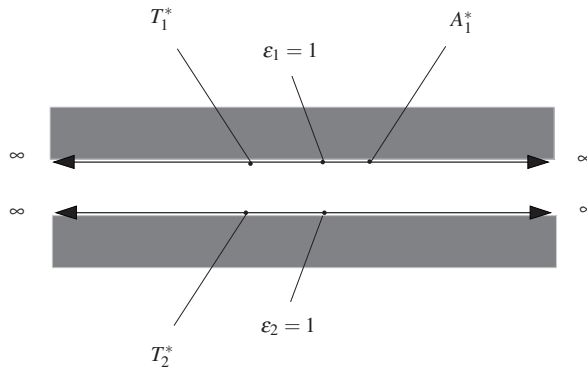
$Nu_x$ : lokale Nußelt-Zahl bei  $x^*$   
 $Nu_m$ : mittlere Nußelt-Zahl zwischen  $x^* = 0$  (Kondensationsbeginn) und  $x^* = L^*$   
 $Nu_L$ : Nußelt-Zahl bei  $x^* = L^*$   
 $\dot{q}_w^*$ : Wandwärmestromdichte bei der Laufkoordinate  $x^*$  in  $W/m^2$   
 $\dot{q}_{Wm}^*$ : mittlerer Wandwärmestromdichte zwischen  $x^* = 0$  und  $x^* = L^*$  in  $W/m^2$   
 $x^*$ : Koordinate in m  
 $B^*$ : Plattenbreite in m  
 $L^*$ : Plattenlänge in m  
 $T_S^*$ : Siedetemperatur des Dampfes in K

$T_W^*$ : Wandtemperatur in K  
 $g^*$ : Erdbeschleunigung in  $m/s^2$   
 $\vartheta$ : Winkel gegenüber der Horizontalen  
 $\lambda_g^*$ : Wärmeleitfähigkeit der gasförmigen Phase in  $W/mK$   
 $\rho_f^*$ : Dichte der flüssigen Phase (Kondensat) in  $kg/m^3$   
 $\rho_g^*$ : Dichte der gasförmigen Phase in  $kg/m^3$   
 $\Delta h_v^*$ : spezifische Verdampfungsenthalpie in  $J/kgK$   
 $\eta_g^*$ : dynamische Viskosität der gasförmigen Phase in  $kg/m s$

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- laminares Filmsieden
- gegenüber der Horizontalen um den Winkel  $90^\circ \geq \vartheta > 30^\circ$  geneigte Wand
- Stoffwerte bei Siedetemperatur  $T_S^*$

### Arbeitsblatt 8.1: Strahlungsaustausch zwischen zwei Schwarzen Körpern (Kap. 8.5.2)



$$\dot{Q}_{12}^* = A_1^* F_{12} \sigma^* (T_2^{*4} - T_1^{*4}) \quad \text{s. (8-30)}$$

$$\sigma^* = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

andere Flächenanordnungen mit zugehörigen Sichtfaktoren befinden sich in Tab. 8.6

$\dot{Q}_{12}^*$ : Wärmestrom zwischen den beteiligten Flächen in W

$F_{12}$ : Sichtfaktor nach Tab. 8.6

$A_1^*$ : Wärmeübertragende Fläche in  $\text{m}^2$

$\sigma^*$ : Stefan-Boltzmann-Konstante in  $\text{W/m}^2 \text{K}^4$

$\epsilon_1$ : Emissionsgrad der Oberfläche 1

$\epsilon_2$ : Emissionsgrad der Oberfläche 2

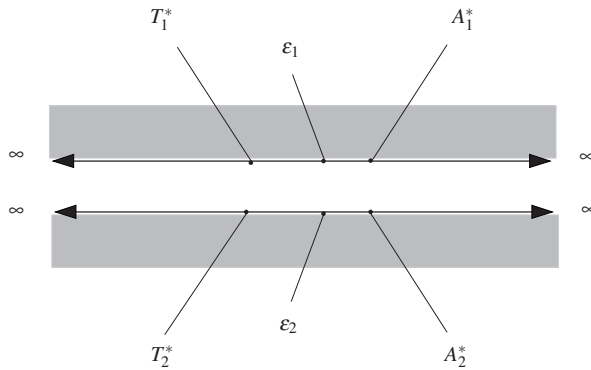
$T_1^*$ : Oberflächentemperatur 1 in K

$T_2^*$ : Oberflächentemperatur 2 in K

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- stationär
- zwei schwarze Flächen mit  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$

## Arbeitsblatt 8.2: Strahlungsaustausch zwischen zwei Grauen Körpern (Kap. 8.5.3)



$$\dot{Q}_{12}^* = \varepsilon_{12} A_1^* \sigma^* (T_2^{*4} - T_1^{*4}) \quad \text{s. (8-32)}$$

$$\sigma^* = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1^*}{A_2^*} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)$$

$\dot{Q}_{12}^*$ : Wärmestrom zwischen den beteiligten Flächen in W

$A_1^*$ : Wärmeübertragende Fläche 1 in  $\text{m}^2$

$A_2^*$ : Wärmeübertragende Fläche 2 in  $\text{m}^2$

$\sigma^*$ : Stefan-Boltzmann-Konstante in  $\text{W/m}^2\text{K}^4$

$\varepsilon_{12}$ : Strahlungsaustauschzahl

$\varepsilon_1$ : Emissionsgrad der Oberfläche 1

$\varepsilon_2$ : Emissionsgrad der Oberfläche 2

$T_1^*$ : Oberflächentemperatur 1 in K

$T_2^*$ : Oberflächentemperatur 2 in K

Voraussetzungen / Besondere Bedingungen:

- stationär
- gültig für zwei ebene parallele Platten mit den Flächen  $A_1^* = A_2^*$  oder einen Hohlraum mit der Innenfläche  $A_2^*$ , der einen Körper der Oberfläche  $A_1^*$  umschließt

## **B Stoffwerte**

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Stoffwerte für Luft und Wasser zur Berechnung der Übungsaufgaben zusammengestellt.

**Tabelle B.1:** Stoffwerte von Luft bei  $p = 1$  bar

Daten aus Verein Deutscher Ingenieure (2002): *VDI-Wärmeatlas*, 9. Auflage, Springer-Verlag, Berlin / Kap. Dbb1

$t^*$ °C	$\rho^*$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$h^*$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$s^*$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$c_p^*$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\beta^*$ $10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$	$\lambda^*$ $10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$\eta^*$ $10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$	$\nu^*$ $10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$a^*$ $10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr -
-200	5,106	68,20	5,407	1,186	17,24	6,886	4,997	9,786	11,37	0,8606
-180	3,851	90,52	5,678	1,071	11,83	8,775	6,623	17,20	21,27	0,8086
-160	3,126	111,5	5,882	1,036	9,293	10,64	7,994	25,58	32,86	0,7784
-140	2,639	132,1	6,050	1,020	7,726	12,47	9,294	35,22	46,77	0,7602
-120	2,287	152,4	6,192	1,014	6,657	14,26	10,55	46,14	61,50	0,7502
-100	2,019	172,7	6,316	1,011	5,852	16,02	11,77	58,29	78,51	0,7423
-80	1,807	192,9	6,427	1,009	5,227	17,74	12,94	71,59	97,30	0,7357
-60	1,636	213,0	6,526	1,007	4,725	19,41	14,07	85,98	117,8	0,7301
-40	1,495	233,1	6,618	1,007	4,313	21,04	15,16	101,4	139,7	0,7258
-30	1,433	243,2	6,660	1,007	4,133	21,84	15,70	109,5	151,3	0,7236
-20	1,377	253,3	6,701	1,007	3,968	22,63	16,22	117,8	163,3	0,7215
-10	1,324	263,3	6,740	1,006	3,815	23,41	16,74	126,4	175,7	0,7196
0	1,275	273,4	6,778	1,006	3,674	24,18	17,24	135,2	188,3	0,7179
10	1,230	283,5	6,814	1,007	3,543	24,94	17,74	144,2	201,4	0,7163
20	1,188	293,5	6,849	1,007	3,421	25,69	18,24	153,5	214,7	0,7148
30	1,149	303,6	6,882	1,007	3,307	26,43	18,72	163,0	228,4	0,7134
40	1,112	313,7	6,915	1,007	3,200	27,16	19,20	172,6	242,4	0,7122
60	1,045	333,8	6,978	1,009	3,007	28,60	20,14	192,7	271,3	0,7100
80	0,9859	354,0	7,036	1,010	2,836	30,01	21,05	213,5	301,4	0,7083
100	0,9329	374,2	7,092	1,012	2,683	31,39	21,94	235,1	332,6	0,7070
120	0,8854	394,5	7,145	1,014	2,546	32,75	22,80	257,5	364,8	0,7060
140	0,8425	414,8	7,195	1,016	2,422	34,08	23,65	280,7	398,0	0,7054
160	0,8036	435,1	7,243	1,019	2,310	35,39	24,48	304,6	432,1	0,7050
180	0,7681	455,6	7,289	1,022	2,208	36,68	25,29	329,3	467,1	0,7049
200	0,7356	476,0	7,334	1,026	2,115	37,95	26,09	354,7	503,0	0,7051
250	0,6653	527,5	7,437	1,035	1,912	41,06	28,02	421,1	596,2	0,7063
300	0,6072	579,6	7,532	1,046	1,745	44,09	29,86	491,8	694,3	0,7083
350	0,5585	632,1	7,620	1,057	1,605	47,05	31,64	566,5	796,8	0,7109
400	0,5170	685,3	7,702	1,069	1,486	49,96	33,35	645,1	903,8	0,7137
450	0,4813	739,0	7,779	1,081	1,383	52,82	35,01	727,4	1015	0,7166
500	0,4502	793,4	7,852	1,093	1,293	55,64	36,62	813,5	1131	0,7194
550	0,4228	848,3	7,921	1,105	1,215	58,41	38,19	903,1	1251	0,7221
600	0,3986	903,9	7,986	1,116	1,145	61,14	39,71	996,3	1375	0,7247
650	0,3770	959,9	8,049	1,126	1,083	63,83	41,20	1093	1503	0,7271
700	0,3576	1016	8,108	1,137	1,027	66,46	42,66	1193	1635	0,7295
750	0,3402	1074	8,165	1,146	0,9772	69,03	44,08	1296	1771	0,7318
800	0,3243	1131	8,220	1,155	0,9317	71,54	45,48	1402	1910	0,7342
850	0,3099	1189	8,273	1,163	0,8902	73,98	46,85	1512	2052	0,7368
900	0,2967	1247	8,324	1,171	0,8523	76,33	48,19	1624	2197	0,7395
1000	0,2734	1365	8,420	1,185	0,7853	80,77	50,82	1859	2492	0,7458

**Tabelle B.2:** Stoffwerte von Wasser bei  $p = 1$  bar

Daten aus Verein Deutscher Ingenieure (2002): *VDI-Wärmeatlas*, 9. Auflage, Springer-Verlag, Berlin / Kap. Dba2

$t^*$ °C	$\rho^*$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p^*$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\beta^*$ $10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$	$\lambda^*$ $10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$\eta^*$ $10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$	$\nu^*$ $10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$\alpha^*$ $10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr -
-30	983,83	4,801	-1,4078	495,7	8653,0	8,795	0,1050	83,80
-25	989,60	4,542	-0,9607	511,5	5961,3	6,024	0,1138	52,94
-20	993,57	4,401	-0,6604	523,0	4361,9	4,390	0,1196	36,70
-15	996,33	4,321	-0,4488	532,9	3338,0	3,350	0,1238	27,06
-10	998,13	4,272	-0,2911	542,3	2644,2	2,649	0,1272	20,83
-9	998,40	4,265	-0,2641	544,2	2532,6	2,537	0,1278	19,85
-8	998,66	4,258	-0,2384	546,0	2428,2	2,432	0,1284	18,94
-7	998,88	4,252	-0,2139	547,9	2330,5	2,333	0,1290	18,08
-6	999,08	4,246	-0,1904	549,8	2238,8	2,241	0,1296	17,29
-5	999,26	4,241	-0,1679	551,6	2152,7	2,154	0,1302	16,55
-4	999,42	4,236	-0,1463	553,5	2071,7	2,073	0,1308	15,85
-3	999,55	4,231	-0,1255	555,4	1995,4	1,996	0,1313	15,20
-2	999,67	4,227	-0,1055	557,3	1923,5	1,924	0,1319	14,59
-1	999,77	4,223	-0,0863	559,2	1855,7	1,856	0,1324	14,01
0	999,84	4,219	-0,0677	561,1	1791,5	1,792	0,1330	13,47
1	999,90	4,216	-0,0497	563,0	1730,9	1,731	0,1335	12,96
2	999,94	4,213	-0,0324	564,9	1673,4	1,673	0,1341	12,48
3	999,97	4,210	-0,0156	566,8	1618,9	1,619	0,1346	12,03
4	999,97	4,207	0,0006	568,7	1567,2	1,567	0,1352	11,60
5	999,97	4,205	0,0163	570,6	1518,1	1,518	0,1357	11,19
6	999,94	4,203	0,0315	572,5	1471,4	1,472	0,1362	10,80
7	999,90	4,201	0,0463	574,4	1427,0	1,427	0,1367	10,44
8	999,85	4,199	0,0606	576,3	1384,7	1,385	0,1373	10,09
9	999,78	4,197	0,0746	578,2	1344,4	1,345	0,1378	9,759
10	999,70	4,195	0,0881	580,0	1305,9	1,306	0,1383	9,445
15	999,10	4,189	0,1509	589,4	1137,6	1,139	0,1408	8,085
20	998,21	4,185	0,2066	598,5	1001,6	1,003	0,1433	7,004
25	997,05	4,182	0,2569	607,2	890,08	0,893	0,1456	6,130
30	995,65	4,180	0,3029	615,5	797,35	0,801	0,1479	5,415
35	994,04	4,179	0,3453	623,3	719,32	0,724	0,1501	4,822
40	992,22	4,179	0,3849	630,6	652,98	0,658	0,1521	4,327
45	990,22	4,179	0,4222	637,4	596,07	0,602	0,1540	3,908
50	988,05	4,180	0,4574	643,6	546,85	0,553	0,1559	3,551
55	985,71	4,181	0,4910	649,3	503,98	0,511	0,1575	3,245
60	983,21	4,183	0,5231	654,4	466,40	0,474	0,1591	2,981
65	980,57	4,185	0,5541	659,0	433,27	0,442	0,1606	2,752
70	977,78	4,188	0,5841	663,1	403,90	0,413	0,1619	2,551
75	974,86	4,192	0,6132	666,8	377,75	0,387	0,1632	2,375
80	971,80	4,196	0,6417	670,0	354,35	0,365	0,1643	2,219
85	968,62	4,200	0,6695	672,8	333,35	0,344	0,1654	2,081
90	965,32	4,205	0,6970	675,3	314,41	0,326	0,1664	1,958
95	961,89	4,211	0,7241	677,4	297,29	0,309	0,1672	1,848
99,61	958,64	4,216	0,7489	679,0	282,92	0,295	0,1680	1,757

## C Standard-Werke zur Wärmeübertragung

Fettdruck: von den Autoren dieses Buches besonders empfohlen

- **Baehr, H. D.; Stephan, K. (2004): *Wärme- und Stoffübertragung*, 4. Aufl., Springer-Verlag, Berlin**
- Bejan, A. (1995): *Convection Heat Transfer*, 2. Aufl., John Wiley & Sons, Inc., New York
- Elsner, N.; Fischer, S.; Huhn, J. (1993): *Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Band 2: Wärmeübertragung*, 8. Aufl., Akademie-Verlag, Berlin
- Gersten, K.; Herwig, H. (1992): *Strömungsmechanik*, Vieweg-Verlag, Braunschweig
- Herwig, H. (2000): *Wärmeübertragung A - Z*, Springer-Verlag, Berlin
- Holman, J. P. (1997): *Heat Transfer*, 8. Aufl., Mc Graw-Hill, Inc., New York
- **Incropera, F. P.; De Witt, D. P. (1996): *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4. Aufl., John Wiley & Sons, New York**
- Kays, W. M.; Crawford, M. E. (1993): *Convective Heat and Mass Transfer*, 3. Aufl., Mc Graw-Hill, Inc., New York
- Merker, G. P. (1987): *Konvektive Wärmeübertragung*, Springer-Verlag, Berlin
- Özisik, M. N. (1985): *Heat Transfer – A Basic Approach*, Mc Graw-Hill, New York
- Polifke, W.; Kopitz, J. (2005): *Wärmeübertragung*, Pearson Studium, München
- Verein Deutscher Ingenieure (2002): *VDI-Wärmeatlas*, 9. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- Wagner, W. (2004): *Wärmeübertragung*, 6. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg
- **White, F. M. (1988): *Heat and Mass Transfer*, Addison-Wesley Publ. Comp., Reading (Mass.)**

## Index

- Absorptionsgrad, 160  
 adiabate Wand, 17  
 Ausstrahlung, 150
- Beersches Gesetz, 170  
 Behaeltersieden, 128  
 Bewertungskriterien, 95  
 Bezugstemperatur, 66  
 Biot-Zahl, 28  
 Blasensieden, 130, 134  
 Blockkapazität, 30  
 Bond-Zahl, 121
- Dampfdruckkurve, 118  
 diffuse Strahlung, 155  
 Dimensionsanalyse, 9, 120
- Eckert-Zahl, 12, 121  
 Einstrahlung, 150  
 Einstrahlzahl, 165  
 Elektromagnetische Spektrum, 148  
 Emissionsgrad, 158  
 Entropie, 19  
 Entropieproduktion, 19, 98, 100  
 Exergetische Analyse, 98
- Fehlerfunktion, 33  
 Filmkondensation, 122  
     mit Inertgas, 125  
 Filmsieden, 131  
 Fouling, 191  
 Fourier-Ansatz, 23  
 Froude-Zahl, 12
- Gasstrahlung, 169  
 Gefühlte Temperatur, 104  
 gerichteter Gesamt-Absorptionsgrad, 160  
 gerichteter Gesamt-Emissionsgrad, 158  
 gerichteter Gesamt-Reflexionsgrad, 162  
 gerichteter spektraler Absorptionsgrad, 160  
 gerichteter spektraler Emissionsgrad, 158  
 gerichteter spektraler Reflexionsgrad, 162  
 gleichwertige Schichtdicke, 170  
 Globalstrahlung, 174  
 Grashof-Zahl, 12, 66, 87, 121  
 Grauer Lambert-Strahler, 161  
 Grauer Strahler, 161  
 Grenzschichten, 69
- hemisphärischer Gesamt-Absorptionsgrad, 160  
 hemisphärischer Gesamt-Emissionsgrad, 158  
 hemisphärischer spektraler Absorptionsgrad, 160  
 hemisphärischer spektraler Emissionsgrad, 158  
 hemisphärischer spektraler Reflexionsgrad, 162  
 Hohlraumstrahlung, 156  
 Hybridwärmespeicher, 199  
 hydraulischer Durchmesser, 75
- Inertgas-Zusatz, 132  
 Infrarot-Thermografie, 207
- Jacobs-Zahl, 121
- kalorische Mitteltemperatur, 54  
 Karman-Konstante, 80  
 Kennzahlen, 10  
 Kirchhoffsche Gesetze, 160  
 Kondensation, 117, 122  
 Kondensator, 192  
 konjugierte Probleme, 17  
 konstitutive Gleichung, 23  
 Kopplungseffekt, 24, 205  
 kritische Wärmestromdichte, 132  
 kritischer Durchmesser, 102  
 Kühlgrenztemperatur, 142
- Lambert-Strahler, 161



- Lambertsches Cosinusgesetz, 155  
Lévêque-Lösung, 78
- Mach-Zahl, 12
- natürliche Konvektion, 61  
  direkte, 62  
  indirekte, 63
- normal-spezifische spektrale Ausstrahlungsdichte, 154
- Nußelt-Zahl, 12, 13, 121  
  für Rohre und Kanäle, 76
- Nukiyama-Experiment, 139
- Ökonomische Analyse, 97  
opake Oberfläche, 148, 157  
optische Dicke, 170
- Prandtl-Zahl, 12, 121
- Randbedingungen, 17, 63  
Raumwinkel, 153  
Rayleigh-Streuung, 169, 174  
Referenztemperatur, 68  
Referenztemperatur-Methode, 68  
Reflexionsgrad, 162  
Relevanzliste, 28  
  für instationäre Wärmeleitung, 33  
  für konvektive Wärmeübergänge, 12
- Reynolds-Zahl, 12, 69, 121  
  kritische, 68
- Schwarzer Körper, 151  
Schwarzkörperstrahlung, 156  
Seebeck-Effekt, 205  
Sichtfaktor, 164  
Siedekrise (1. Art), 132  
Siedekrise (2. Art), 138  
Sieden, 117, 128  
Solarkonstante, 171  
Solarstrahlung, 171  
spektraler Absorptionskoeffizient, 169  
spektraler Transmissionsgrad, 163  
spezifische Ausstrahlung, 153  
spezifische spektrale Ausstrahlung, 151  
spezifische spektrale Ausstrahlungsdichte, 154  
Stanton-Zahl, 82  
Stefan-Boltzmann-Gesetz, 153  
Stefan-Boltzmann-Konstante, 153  
Stilles Sieden, 129  
Stoffwerte  
  konstante, 66  
  quasi-konstante, 67  
  variable, 67  
Stoffwertverhältnis-Methode, 67  
Strahlungsaustausch, 167  
Strahlungsaustauschzahl, 168  
Stroemungskondensation, 127
- Temperaturgrenzschicht, 58, 69  
Temperaturleitfähigkeit, 24  
Temperaturmessung, 203  
thermische Einlaufänge, 74, 82  
thermische Energiegleichung, 65  
Thermoelement, 204  
Thermosyphon, 200  
Treibhaus, 175  
Treibhauseffekt, 174  
Tropfenkondensation, 125  
Turbulenz, 58
- unterkühltes Sieden, 134
- Verdampfer, 194  
Verdunstungskühlung, 135, 141
- Wärme, 3  
Wärmedämmung, 101  
Wärmedurchgang, 88  
Wärmedurchgangskoeffizient, 88  
Wärmedurchgangswiderstand, 89  
Wärmeleitfähigkeit, 23, 60  
Wärmeleitung, 15, 16, 21  
  eindimensional, 25  
  instationäre, 28  
Wärmeleitungsgeschwindigkeit, 35  
Wärmeleitungsgleichung, 24  
Wärmeleitwiderstand, 26  
Wärmerohr, 199  
Wärmespeicher, 195  
Wärmestrahlung, 15, 147  
Wärmestromdichte, 5  
Wärmeübergang  
  am Kreiszylinder, 90  
  an der ebenen Platte, 71  
  an Kreiszylinder-Bündeln, 92

- bei Durchströmungen, laminar, 74
- bei Durchströmungen, turbulent, 82
- bei natürlicher Konvektion, 85
- bei Prallstrahlen, 93
- bei Umströmungen, laminar, 69
- bei Umströmungen, turbulent, 78
- im Staupunkt, 72
- konvektiver, 15, 16, 53
- Zweiphasen-, 15, 16
- Wärmeübergangskoeffizient, 5
  - für Strahlung, 168
  - Messung, 34
- Wärmeübergangswiderstand, 6
- Wärmeübertrager, 189
- Wärmeübertragung, 4
  - reversible, 20
- Wandüberhitzung, 117, 129
- Wandunterkühlung, 118
- Widerstandsthermometer, 204
- Wiensches Verschiebungsgesetz, 152
  
- Zweiphasen-Wärmeübergang, 117
- Zweischichtenstruktur, 59