

1. Arten der Wärme- und Stoffübertragung

1.1 Mechanismen

Der Wärmetransport in Materie wird als Wärmeleitung und der Stofftransport in Materie als Diffusion bezeichnet. Wärme kann auch von Materie ungebunden transportiert werden. Dies wird als Strahlung bezeichnet.

Der Mechanismus der Wärmeleitung richtet sich nach der Art der Materie. In Fluiden wird die Wärme auf Grund der Bewegung der Moleküle auf Mikroebene transportiert. In Festkörpern wird die Wärme durch Gitterschwingungen weitergeleitet. In elektrisch leitenden Festkörpern, wie Metalle, wird Wärme auch durch den Strom freier Elektronen transportiert. Dieser Mechanismus ist analog zur Leitung von elektrischem Strom. Daher besitzen die Metalle mit den höchsten elektrischen Leitfähigkeiten auch die höchsten Wärmeleitfähigkeiten.

Stofftransport wird in Fluiden ebenfalls durch die mikroskopische Bewegung von Molekülen hervorgerufen. Dieser Transport ist analog zu dem Transport von Wärme. Daher sind die Gleichungen für den Wärme- und Stofftransport weitgehend analog aufgebaut. Bei Gasen besitzen (zusätzlich) die Transportkoeffizienten nahezu die gleichen Werte. Beim Transport in festen Körpern müssen die Moleküle in der Regel aus der Gitterstruktur herausgelöst und in Fehlstellen anderer Gitter wieder eingebaut werden. Daher ist der Stofftransport in Festkörpern im Vergleich zum Wärmetransport erheblich langsamer und in viel stärkerem Maße temperaturabhängig.

Wärme wird auch durch elektromagnetische Wellen transportiert. Diese Wärmestrahlung (z. B. Sonnenstrahlung) ist nicht an Materie gebunden und kann somit auch im Vakuum transportiert werden. Da dieser Mechanismus unabhängig von dem der Leitung ist, überlagern sich die Wärmeströme dieser beiden Mechanismen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass neben den zuvor beschriebenen noch weitere Transportformen existieren. So wird z. B. aufgrund eines Konzentrationsgradienten immer ein Energiestrom (Diffusionsthermik) und aufgrund eines Temperaturgradienten stets ein Stoffstrom (Thermodiffusion) hervorgerufen. Bei der überwiegenden Zahl der technisch bedeutsamen Prozesse sind diese jedoch für die Wärme- und Stoffübertragung unbedeutend.

Wärme- und Stoffströme sind thermodynamische Prozessgrößen. Zur Verknüpfung dieser Prozessgrößen mit den Zustandsgrößen benötigt man sogenannte „phänomenologische Transportansätze“, die sich nach der physikalischen Art des Transportes richten. Diese Beziehungen werden auch als konstitutive Gleichungen oder Materialgleichungen bezeichnet.

1.2 Transportansätze für Leitung und Diffusion

Aus der Erfahrung ist bekannt, dass aufgrund eines

- Temperaturgradienten ein Wärmestrom,
- Konzentrationsgradienten ein Stoffstrom,
- Geschwindigkeitsgradienten ein Impulsstrom,
- Spannungsgradienten ein elektrischer Strom

fließt, und zwar jeweils vom höheren zum tieferen Niveau (sogenannter 2. Hauptsatz der Thermodynamik), und dass der auf die Fläche bezogene Strom dem Gradienten seiner treibenden Größe direkt proportional ist:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{FOURIERScher}^1 \text{ Wärmeleitansatz,} \quad (1-1)$$

$$\dot{m}_i = -D \cdot \frac{\partial \rho_i}{\partial x} \quad \text{FICKScher}^2 \text{ Diffusionsansatz,} \quad (1-2)$$

$$\tau = -\mu \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{NEWTONScher}^3 \text{ Spannungsansatz,} \quad (1-3)$$

$$i = -\kappa \cdot \frac{\partial U_{\text{el}}}{\partial x} \quad \text{OHMScher}^4 \text{ Ansatz.} \quad (1-4)$$

Die negativen Vorzeichen besagen, dass die Ströme entgegengesetzt zum jeweiligen Gradienten fließen (siehe Bild 1-1). Hierin bedeuten

- Zustandsgrößen

T	Temperatur in °C oder K
ρ_i	Partialdichte des Stoffes i in kg_i/m^3
w	Geschwindigkeit in m/s
U_{el}	elektrische Spannung in V
x	Ortskoordinate in m

- Prozessgrößen

\dot{q}	Wärmestromdichte in $\text{W}/\text{m}^2 = \text{J}/\text{m}^2/\text{s}$
\dot{m}_i	Stoffstromdichte der Spezies i in $\text{kg}_i/\text{m}^2/\text{s}$
τ	Impulsstromdichte oder Schubspannung in N/m^2
i	elektrische Stromdichte in A/m^2

- Transportkoeffizienten (Stoffwerte)

λ	Wärmeleitkoeffizient in $\text{W}/\text{m}/\text{K}$
D	Diffusionskoeffizient in m^2/s
μ	dynamische Viskosität in $\text{kg}/\text{m}/\text{s}$
χ	elektrischer Leitkoeffizient in $\text{A}/\text{m}/\text{V}$.

¹ Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), Professor für Mathematik und Physik in Paris

² Adolf Fick (1829-1901), Professor für Chemie, Physik und Physiologie in Zürich und Würzburg

³ Sir Isaac Newton (1643-1727), Professor für Mathematik und Physik in Cambridge

⁴ Georg Simon Ohm (1789-1854), Professor für Mathematik und Physik in Erlangen, Köln, Berlin, Nürnberg und München

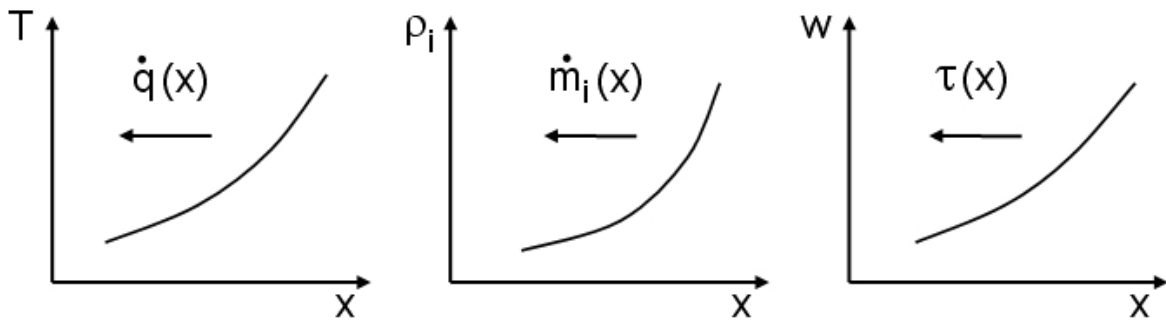


Bild 1-1: Gradienten mit Stromrichtung

Die Ströme sind jeweils auf deren Durchflussfläche bezogen und damit richtungsabhängig. Daher steht in den Gleichungen (1-1) bis (1-4) das partielle Differential. Für die anderen beiden Koordinatenrichtungen gelten die Gleichungen entsprechend. Im Folgenden werden hauptsächlich nur die eindimensionalen Transportvorgänge betrachtet, da sich die meisten technischen Prozesse eindimensional hinreichend beschreiben lassen. Für die Transportströme gilt dann folglich

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A \quad (1-5)$$

$$\dot{M}_i = \dot{m}_i \cdot A \quad (1-6)$$

$$\dot{I} = \tau \cdot A \quad (1-7)$$

$$I = i \cdot A, \quad (1-8)$$

wobei A die Querschnittsfläche, \dot{Q} der Wärmestrom in $\text{J/s} = \text{W}$, \dot{M}_i der Stoffstrom der Spezies i in kg/s , \dot{I} der Impulsstrom in N und I der elektrische Strom in A bedeuten.

Die Transportkoeffizienten hängen von der Art des Materials ab und müssen experimentell bestimmt werden. In [Bild 1-2](#) sind beispielhaft die Wärmeleitkoeffizienten einiger typischer Materialien in Abhängigkeit von der Temperatur angegeben. Man erkennt, dass Kupfer, Gold und Silber mit 200 bis 300 W/m/K die höchsten Werte besitzen. Diese Metalle leiten auch den elektrischen Strom am besten. Stähle liegen je nach Legierungsanteil im Bereich 20 bis 60 W/m/K . Je höher der Legierungsanteil ist, desto mehr wird der Transport behindert und je niedriger sind entsprechend die Wärmeleitkoeffizienten. Mineralische Stoffe liegen im Bereich von 1 bis 3 W/m/K , Flüssigkeiten im Bereich von 0,1 bis 0,6 W/m/K und die meisten Gase im Bereich 0,02 bis 0,1 W/m/K jeweils bei Umgebungstemperatur. Luft hat mit den niedrigsten Wärmeleitkoeffizienten. Daher müssen Isoliermaterialien aus einem hohen Volumenanteil an Luft bestehen. Die Abhängigkeit des Wärmeleitkoeffizienten von der Temperatur ist relativ gering. Diffusionskoeffizienten hängen viel stärker von der Temperatur ab und zusätzlich noch von dem Material, in dem die Spezies i diffundiert. Daher wird auf die Werte von Diffusionskoeffizienten erst an späterer Stelle eingegangen.

Es fällt auf, dass diese phänomenologischen Transportansätze analoges Aussehen haben. Bei vielen physikalischen Vorgängen entsprechen sich auch die übrigen Terme in den verschiedenen Erhaltungssätzen, so dass dann die Felder von Temperatur, Konzentration, Geschwindigkeit und Spannung analog sind.

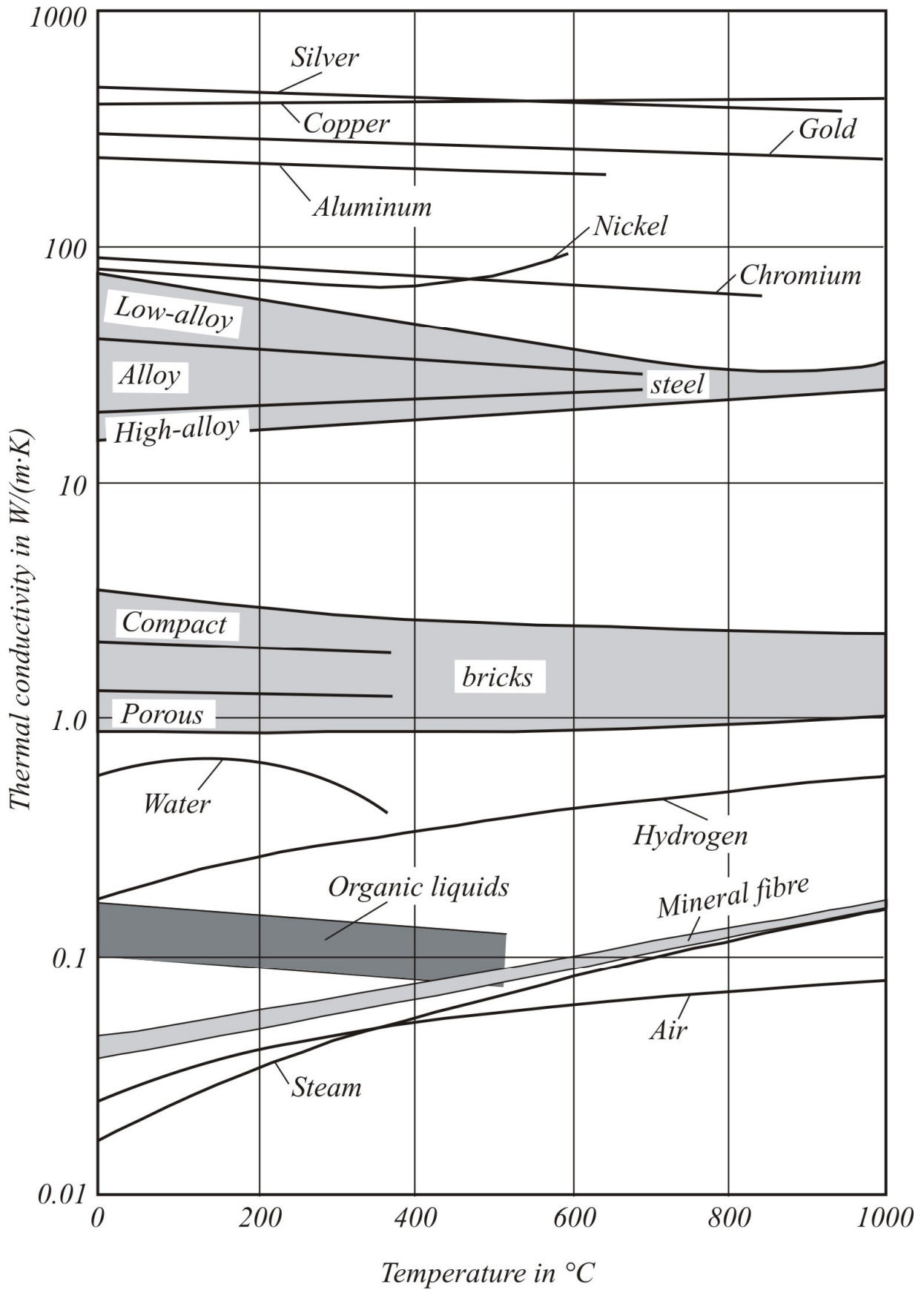


Bild 1-2: Anhaltswerte für Wärmeleitkoeffizienten

1.3 Wärmeübergang zwischen Wand und Fluid

In vielen technischen Anwendungsfällen wird Wärme, Stoff und Impuls von einer Wand an ein Fluid oder umgekehrt übertragen. In Bild 1-3 sind die Profile der Temperatur, der Partialdichte und der Geschwindigkeit eines Fluids in Wandnähe schematisch dargestellt, und zwar für den Fall, dass die Ströme vom Fluid an die Wand übertragen werden. Für diese gilt dann

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (1-9)$$

$$\dot{m}_i = -D \cdot \left. \frac{\partial \rho_i}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (1-10)$$

$$\tau = -\mu \cdot \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (1-11)$$

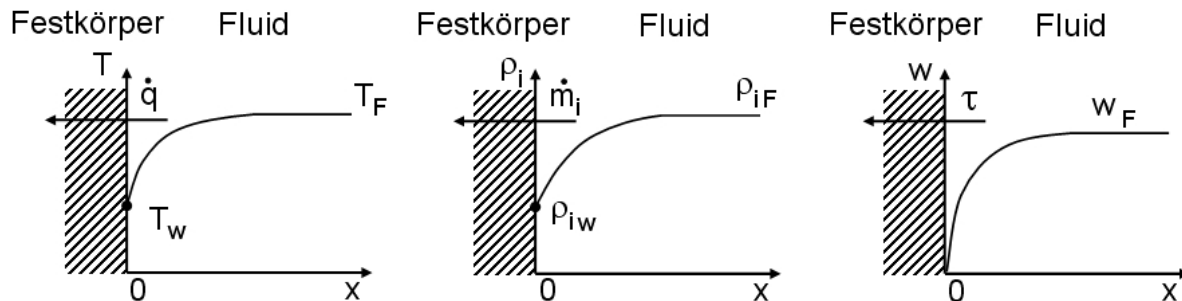


Bild 1-3: Zur Wärme-, Stoff- und Impulsübertragung zwischen einem Fluid und einem Festkörper

Die Gradienten an der Wand ($x = 0$) hängen sowohl vom Strömungszustand und der Art des Fluids als auch von der Geometrie des Festkörpers ab. Die Änderungen der Zustandsgrößen liegen im Millimeterbereich und sind insbesondere bei turbulenten Strömungen so gut wie nicht messbar. Daher eignen sich die folgenden Transportansätze für den Übergang zwischen dem Fluid und einer Wand besser:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_F - T_W) \quad (1-12)$$

$$\dot{m}_i = \beta \cdot (\rho_{iF} - \rho_{iW}) \quad (1-13)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot w_F^2 \quad (1-14)$$

Hierin werden die Wärme-, Stoff- und Impulsstromdichte proportional gesetzt zur Differenz der Temperaturen, Partialdichten bzw. Geschwindigkeiten im Fluid (Index F) und an der Wand (Index W), wobei die Geschwindigkeit an der Wand auf Grund der Haftbedingung stets null ist. Die Proportionalitätskoeffizienten heißen

- Wärmeübergangskoeffizient α in $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$
- Stoffübergangskoeffizient β in m/s
- Widerstandsbeiwert c_w (dimensionslos).

Die drei Transportansätze sind wiederum analog, was jedoch nicht direkt ersichtlich ist, da die drei Ansätze historisch zu verschiedenen Zeiten aufgestellt wurden. Die drei Koeffizienten α , β und c_w hängen von der Strömungsgeschwindigkeit ab. Aus Erfahrung ist bekannt, dass der Wärmeübergang umso intensiver ist, je höher die Anströmgeschwindigkeit ist. Die Abhängigkeit von dieser Anströmgeschwindigkeit ist für die beiden Koeffizienten α und β sowie für das Produkt $c_w \cdot w_F$ gleich, wie später in dem Kapitel „Konvektion“ erläutert werden wird. Die Wärmeleitung und die Stoffdiffusion zwischen einem Festkörper und einem Fluid hängt also in starkem Maße von dessen Bewegung ab und wird deshalb als „Konvektion“ bezeichnet.

Eine Strömung kann entweder hervorgerufen werden durch Gebläse, Pumpen, usw., was erzwungene Konvektion heißt, oder durch Dichteunterschiede, was natürliche Konvektion heißt. Heizungskörper sind typische Anwendungsbeispiele für natürlich oder sogenannte freie Konvektion. Die Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten bei freier Konvektion sind deutlich niedriger als die für erzwungene Konvektion.

Wärmeübertragungsmechanismus	Wärmeübergangskoeffizient $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
<u>freie Konvektion</u> Gase Wasser	3 bis 10 100 bis 500
<u>erzwungene Konvektion</u> Gase zähe Flüssigkeiten Wasser flüssige Metalle	10 bis 500 50 bis 1000 500 bis 10000 5000 bis 30000
<u>schwarze Strahlung</u> (in Umgebung von 15 °C) 15 °C (~ Umgebungstemperatur) 80 °C (~ Heizkörpertemperatur) 800 °C (~ dunkelrot glühende Oberfläche) 1200 °C (~ flüssige Mineralien) 1500 °C (~ flüssiger Stahl)	5 8 70 180 320
<u>Kondensation</u> Filmkondensation Tropfenkondensation	1 000 bis 10 000 10 000 bis 10 0000
<u>Verdampfung</u> Filmverdampfung Blasenverdampfung	200 bis 5 000 5 000 bis 50 000

Tabelle 1-1: Anhaltswerte für Wärmeübergangskoeffizienten

In Tabelle 1-1 sind Anhaltswerte für Wärmeübergangskoeffizienten angegeben. Hieraus ist ersichtlich, dass diese sich um Zehnerpotenzen unterscheiden. Flüssigkeiten weisen demnach erheblich höhere Wärmeübergangskoeffizienten auf als Gase. Dies ist aus der Erfahrung her auch bekannt. In einer Sauna mit 90 °C hält man sich durchaus mehrere Minuten auf, während man eine Badewanne mit 90 °C Wassertemperatur wohlweislich meidet.

Die erzwungene Strömung wird durch die Reynoldszahl

$$Re = \frac{w_F \cdot L_{ch}}{\nu} \quad (1-15)$$

gekennzeichnet. Darin sind $\nu = \mu/\rho$ die kinematische Viskosität und L eine die Geometrie beschreibende charakteristische Abmessung, z. B. der Durchmesser bei Rohren und Düsen oder die Überströmlänge bei Wänden.

Der Wärmeübergangskoeffizient wird durch die Nusseltzahl⁵

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_{ch}}{\lambda} \quad (1-16)$$

und der Stoffübergangskoeffizient durch die Sherwoodzahl⁶

$$Sh = \frac{\beta \cdot L_{ch}}{D} \quad (1-17)$$

beschrieben. Der Einfluss der Stoffwerte wird durch die Prandtl- und Schmidtzahl dargestellt

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}, \quad (1-18)$$

wobei $a = \lambda/\rho/c_p$ als Temperaturleitkoeffizient bezeichnet wird. Die Nusselt- und Sherwoodzahl hängen nur von der Reynoldszahl, der Prandtl- bzw. Schmidtzahl und gegebenenfalls von den Geometrieverhältnissen ab. Diese Abhängigkeiten lassen sich in vielen technischen Anwendungsfällen durch die Potenzfunktion

$$Nu = m \cdot Re^a \cdot Pr^b$$

$$Sh = m \cdot Re^a \cdot Sc^b$$

annähern. Die Funktion ist also für beide Kennzahlen gleich. Ist der Festkörper durch mehrere Geometrieabmessungen gekennzeichnet (z. B. Durchmesser und Länge bei Rohren, Durchmesser und Abstand bei Rohbündeln, Durchmesser, Wandabstand und Teilung bei Düsenfeldern), so kommen noch Terme mit Geometrieverhältnissen hinzu, worauf ausführlicher noch in Kapitel 3 eingegangen werden wird.

Strömung	erzwungene Konvektion		freie Konvektion	
	a	b	c	d
laminar	1/2	0,33	1/4	0,25 – 0,50
turbulent	4/5	0,42	1/3	0,33

Tabelle 1-2: Exponenten für Re und Pr bzw. Sc

⁵ Wilhelm Nusselt (1882-1957), Ingenieur und Professor für Thermodynamik in Dresden, Karlsruhe und München

⁶ Thomas Kilgore Sherwood (1903-1976), Chemieingenieur in Berkeley

Die Exponenten a und b hängen vom Strömungszustand ab. Diese sind in der Tabelle zusammengefasst. Für laminar überströmte Körper gilt

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{laminar}) \quad (1-19)$$

für turbulent überströmte Körper näherungsweise

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,42} \quad (\text{turbulent}). \quad (1-20)$$

Die sich hieraus ergebenden Wärmeübergangskoeffizienten sind in Bild 1-4 für Luft und Wasser als Fluid in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit gezeigt. Je niedriger die Länge, desto höher ist der Wärmeübergangskoeffizient. Dieser ist also vom Ort abhängig. Die beiden obigen Nusseltfunktionen gelten für den mittleren Wärmeübergang eines Körpers der Länge L.

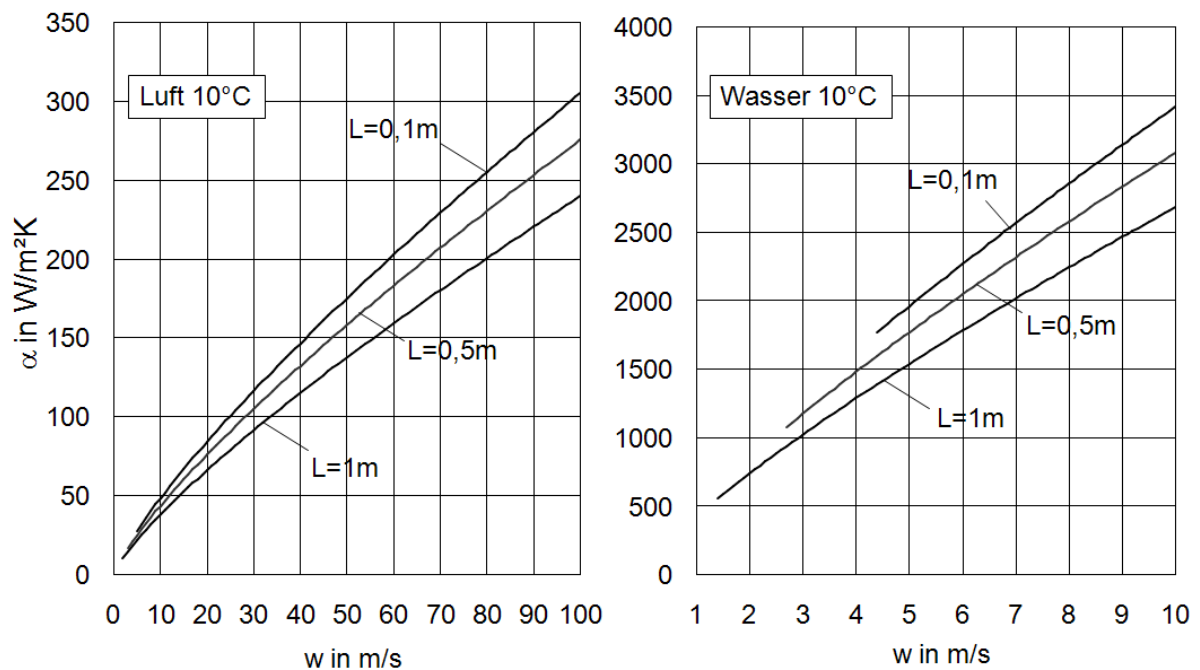


Bild 1-4: Anhaltswerte für Wärmeübergangskoeffizienten turbulent überströmter Körper (L Überströmlänge)

Bei turbulent durchströmten Rohren gilt als Näherung

$$Nu_d \approx 0,0235 \cdot Re_d^{0,8} \cdot Pr^{0,48} \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{0,67} \right]. \quad (1-21)$$

Hierin ist die charakteristische Länge der Durchmesser, da dieser die Strömung maßgeblich beeinflusst. Die Nusselt- und Reynoldszahl werden folglich mit dem Durchmesser gebildet

$$Nu_d = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad Re_d = \frac{w \cdot d}{\nu}, \quad (1-22)$$

was durch den Index gekennzeichnet ist. Die Rohrlänge L übt nur einen relativ geringen Einfluss aus. Der Wärmeübergangskoeffizient ist hierbei mit der mittleren Fluidtemperatur bei der Rohrlänge L definiert

$$\dot{q} = \alpha \cdot [T_w - T(L)]. \quad (1-23)$$

In Bild 1-5 sind die sich hieraus ergebenden Wärmeübergangskoeffizienten wiederum für Luft und Wasser als Fluid dargestellt.

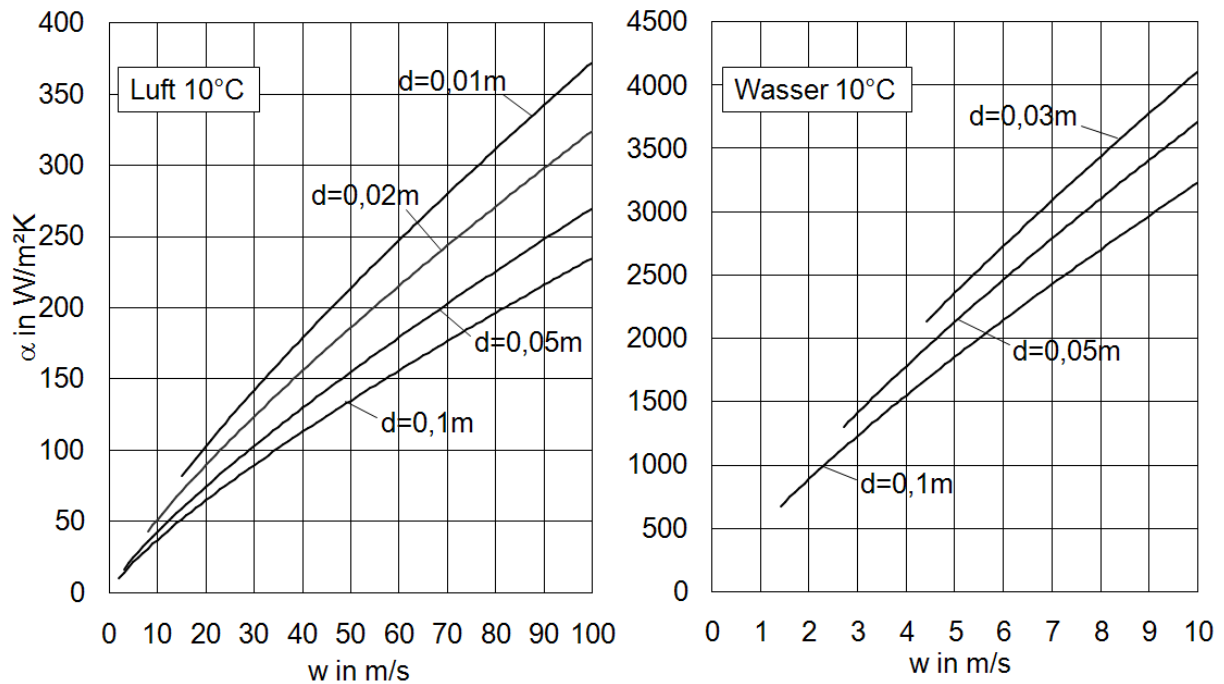


Bild 1-5: Anhaltswerte für turbulent durchströmte lange Rohre (d Durchmesser) bei $d/L \rightarrow 0$

Die freie Konvektion entsteht auf Grund der Unterschiede der Dichte des Fluids an der Wand ρ_w und in der Umgebung ρ_u . Diese Strömung wird daher durch die Grashofzahl

$$Gr = \frac{g \cdot L_{ch}^3 \cdot \rho_w - \rho_u}{\nu^2 \cdot \rho_u} \quad (1-24)$$

gekennzeichnet, wobei g die Erdbeschleunigung ist. Die Nusselt- und Sherwoodfunktionen lassen sich für viele Anwendungsfälle hier durch die Potenzfunktion

$$Nu = n \cdot Gr^c \cdot Pr^d$$

$$Sh = n \cdot Gr^c \cdot Sc^d$$

annähern. Der Einfluss der Pr - bzw. Sc -Zahl benötigt bei Flüssigkeiten allerdings öfters kompliziertere Funktionen.

Für die laminare freie Konvektion an senkrechten Wänden gilt für Gase

$$\text{Nu} \approx 0,57 \cdot \text{Gr}^{1/4} \cdot \text{Pr}^{1/4} \quad (\text{Gr} \cdot \text{Pr} < 10^9). \quad (1-25)$$

Für die turbulente freie Konvektion an senkrechten Wänden gilt beispielsweise

$$\text{Nu} = 0,13 \cdot \text{Gr}^{1/3} \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (\text{Gr} \cdot \text{Pr} > 10^9). \quad (1-26)$$

Die sich hieraus ergebenden Wärmeübergangskoeffizienten sind in Bild 1-6 wiederum für Luft und Wasser dargestellt, und zwar in Abhängigkeit der Differenz zwischen der Wand- und der Umgebungstemperatur, die die Dichteunterschiede bewirkt. Die Punkte auf der Kurve geben die Längen an, ab der die Strömung turbulent ist.

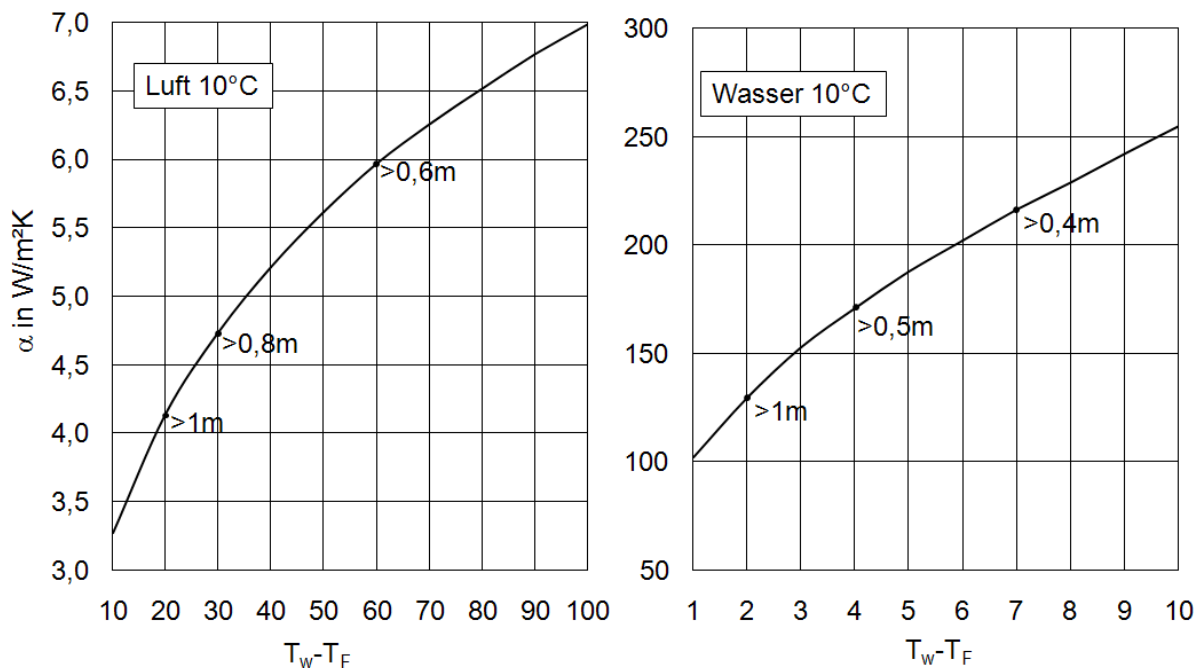


Bild 1-6: Anhaltswerte für den Wärmeübergangskoeffizienten bei freier turbulenter Konvektion

Beispiel 1-1: Einfluss der Stoffwerte auf den konvektiven Wärmeübergang

Ein Körper wird alternativ mit Luft und Wasser mit jeweils gleicher Geschwindigkeit überströmt. Die Temperaturen sollen ebenfalls jeweils gleich sein.

- In welchem Verhältnis stehen die Wärmeübergangskoeffizienten?
- Um welchen Faktor ist der Wärmeübergangskoeffizient von Wasser höher?
- Welcher Stoffwert übt den höchsten und welcher den niedrigsten Einfluss aus?

Lösung:

Für den Wärmeübergang turbulent überströmter Körper gilt die Nusseltfunktion (1-19)

$$\text{Nu} = 0,037 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,42}.$$

Hierin jeweils die Stoffwerte von Wasser und Luft eingesetzt ergibt

$$\frac{\alpha_w \cdot L}{\lambda_w} = 0,037 \cdot \left(\frac{w \cdot L}{v_w} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{v_w \cdot \rho_w \cdot c_{pw}}{\lambda_w} \right)^{0,42}$$

bzw.

$$\frac{\alpha_L \cdot L}{\lambda_L} = 0,037 \cdot \left(\frac{w \cdot L}{v_L} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{v_L \cdot \rho_L \cdot c_{pL}}{\lambda_L} \right)^{0,42} .$$

Daraus folgt als Verhältnis der Wärmeübergangskoeffizienten

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_L} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_L} \right)^{0,42} \cdot \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_L} \right)^{0,58} \cdot \left(\frac{c_{pw}}{c_{pL}} \right)^{0,42} \cdot \left(\frac{v_L}{v_w} \right)^{0,38} .$$

Mit den entsprechenden Stoffwerten folgt

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_w}{\alpha_L} &= \left(\frac{1000}{1,29} \right)^{0,42} \cdot \left(\frac{0,6}{0,026} \right)^{0,58} \cdot \left(\frac{4,18}{1,0} \right)^{0,42} \cdot \left(\frac{20 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,38} \\ &= 16,4 \cdot 6,2 \cdot 1,8 \cdot 3,1 = 570 . \end{aligned}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient von Wasser ist also etwa 570 Mal größer als der von Luft. Den mit Abstand stärksten Einfluss übt die Dichte aus, gefolgt von der Wärmeleitfähigkeit, die Viskosität und der spezifischen Wärmekapazität.

1.4 Wärmetransport durch Strahlung

In der Wärmeübertragung tritt eine Besonderheit auf: Wärme kann auch durch Strahlung, d. h. elektromagnetische Wellen, übertragen werden. Der Wärmetransport ist hierbei nicht mehr an Masse gebunden (z. B. Sonnenstrahlung durch den Weltraum). Als Transportansatz für den Wärmeübergang infolge Strahlung wird in Anlehnung an das STEFAN-BOLTZMANNsche⁷ Strahlungsgesetz

$$\dot{q} = \varepsilon_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-27)$$

verwendet. Dabei sind T_1 und T_2 die absoluten Temperaturen der beiden im Strahlungsaustausch stehenden Medien, σ die STEFAN-BOLTZMANN-Konstante (eine Naturkonstante) und ε_{12} der Strahlungsaustauschgrad.

Der Wert für σ ist $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ (leicht zu merken: 5, 6, 7, 8). Der Strahlungsaustauschgrad hängt von der Art der Materialien und von der geometrischen Anord-

⁷ Josef Stefan (1835-1893), Professor für Physik in Wien

Ludwig Boltzmann (1844-1906), Professor für Physik in Graz, München, Leipzig und Wien

nung ab, wie in Kapitel „Strahlung“ ausführlicher beschrieben wird. Dieser wir hier nur für zwei typische Grundfälle angegeben. Für zwei parallele Wände, deren Ausdehnung viel größer als der Abstand ist, gilt

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (1-28)$$

und für zwei sich umhüllende Körper gilt

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (1-29)$$

wobei ε_1 und ε_2 die Emissionsgrade der beiden Wände bedeuten. Für die beiden ebenen Wände geht Gleichung (1-28) mit $A_1 = A_2$ in Gleichung (1-27) über. Ist die Wand 2 dagegen sehr viel größer als die Wand 1 folgt $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1$. Der Strahlungsaustauschgrad hängt dann nur vom Emissionsgrad des kleineren Körpers ab. Ein solcher kleiner Körper ist z. B. der Mensch in seiner Umgebung und ein Thermometer.

Der Wert des Emissionsgrades liegt nach Definition stets zwischen 0 und 1. Ein niedriger Wert bedeutet, dass ein Körper schlecht Strahlung emittiert und absorbiert. Körper mit dem Wert 1 emittieren bzw. absorbieren die maximal mögliche Strahlung. Der schwarze Körper kann durch ein kleines, tiefes Loch realisiert werden. Dieses sieht für das menschliche Auge schwarz aus, da alle in das Loch treffende Strahlung absorbiert wird und dadurch keine Strahlung reflektiert werden kann. Folglich ist das Innere des Lochs nicht sichtbar. Da $0 < \varepsilon < 1$ gilt, muss auch $0 < \varepsilon_{12} < 1$ gelten.

Blanke Metalle		Nichtblanke Metalle		Nicht-Metalle	
Gold	0,02	Aluminiumbronzeanstrich	0,3	Ziegel, Porzellan	0,93
Silber	0,02	Kupfer oxidiert	0,76	Glas	0,94
Kupfer	0,03	Eisen geschmiregelt	0,24	Papier	0,92
Aluminium	0,04	Eisen angerostet	0,61	Holz	0,94
Chrom	0,06	Eisen stark verrostet	0,85	Eis	0,97
Eisen	0,13			Heizkörperlack	0,93

Tabelle 1-3: Anhaltswerte für Emissionsgrade bei Umgebungstemperatur

In Tabelle 1-3 sind typische Werte für Emissionsgrade zusammengestellt, die bis etwa 600 °C annähernd konstant sind. Danach tritt eine leichte Temperaturabhängigkeit auf, wie in Kapitel „Strahlung“ erläutert wird. Blanke Metalle reflektieren den überwiegenden Anteil der auftreffenden Strahlung und treten daher spiegelnd auf. Da diese dadurch wenig Strahlung absorbieren können, emittieren sie folglich auch nur einen sehr geringen Anteil der maximal möglichen Strahlung. Beispielsweise eignen sich daher Aluminiumbehälter und Aluminiumfolien sehr gut als Isoliermaterial heißer Speisen, da die Wärmeabstrahlung in starkem Maße unterdrückt wird. Ist die Oberfläche von Metallen nicht blank, z. B. oxidiert, angerostet usw., steigt der Emissionsgrad erheblich an. Die Oberflächenbeschaffenheit übt also einen starken Einfluss auf die Strahlungseigenschaften aus. Nicht-Metalle haben Emissionsgrade zwischen 0,92

und 0,99. Metallene Heizkörper geben somit auf Grund ihrer Lackierung nahezu die maximal möglich Strahlung ab.

Zum Vergleich und für die Überlagerung mit der Konvektion wird für die Strahlung ein Wärmeübergangskoeffizient α_ε gemäß

$$\dot{q} = \alpha_\varepsilon (T_1 - T_2) \quad (1-30)$$

eingeführt. Mit Gleichung (1-26) folgt für den Wärmeübergangskoeffizienten ($T_1 > T_2$)

$$\alpha_\varepsilon = \varepsilon_{12} \cdot \sigma \cdot T_1^3 \left[1 + \frac{T_2}{T_1} + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^3 \right]. \quad (1-31)$$

Unterscheiden sich die absoluten Temperaturen relativ wenig voneinander, so gilt näherungsweise

$$\alpha_\varepsilon \approx 4 \cdot \varepsilon_{12} \cdot \sigma \cdot T_1^3 \quad \text{für} \quad T_1 \approx T_2. \quad (1-32)$$

Unterscheiden sich die beiden Temperaturen T_1 und T_2 nicht extrem, so kann in guter Näherung für den Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung angesetzt werden

$$\alpha_\varepsilon \approx 4 \cdot \varepsilon_{12} \cdot \sigma \cdot \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3. \quad (1-33)$$

In Bild 1-7 sind Anhaltswerte für den Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung angegeben. Dieser hängt demnach sehr stark von der Temperatur ab. Bei nicht erzwungener Strömung (freie Konvektion) und Temperaturen nicht wesentlich höher als die der Umgebung liegen die Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung in der gleichen Größenordnung. Heizungskörper und Menschen obliegen in etwa gleichem Maße der Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung. Hierauf wird in Beispielen noch eingegangen werden.

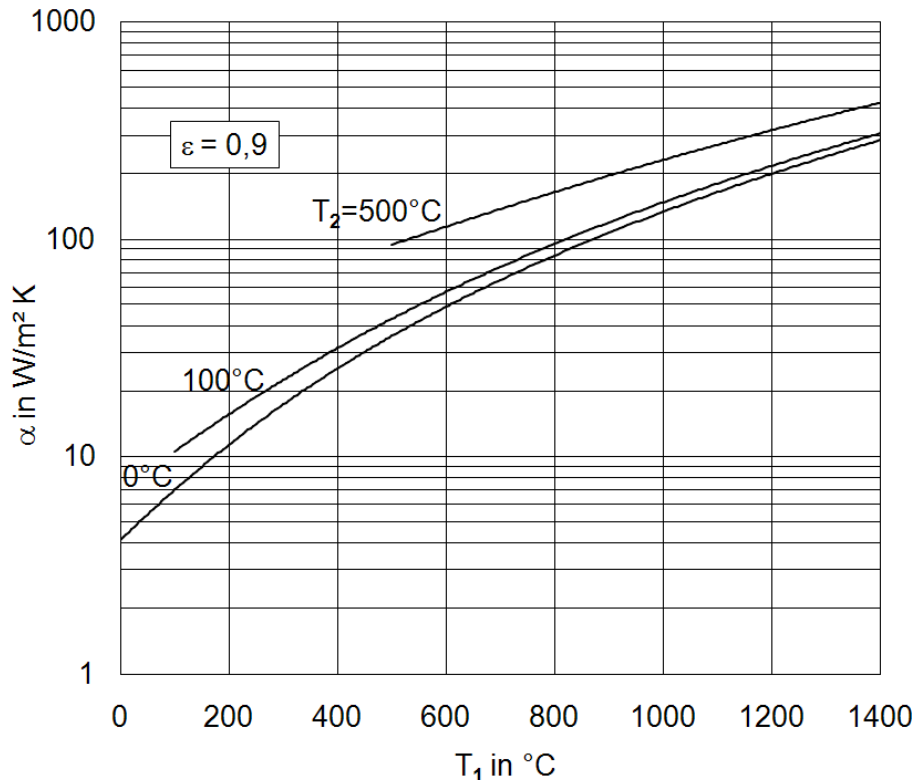


Bild 1-7: Anhaltswerte für Wärmeübergangskoeffizienten bei Strahlung

1.5 Bedeutung

Wärmeübertragungsprozesse treten bei der Herstellung fast aller Materialien auf. Zur Erzeugung von Metallen müssen die Erze zur Reduktion (Sauerstoffabspaltung) auf hohe Temperaturen erwärmt werden. Schrotte müssen geschmolzen werden, um Legierungen einstellen zu können und definierte Formen gießen zu können. Mineralische Rohstoffe müssen auf Temperaturen höher als 900°C erwärmt werden, damit diese sintern wie zur Erzeugung von Keramiken (Ziegel, Steinzeug, Porzellan, usw.), oder schmelzen wie zur Erzeugung von Gläsern, oder miteinander reagieren, wie zur Erzeugung von Zement, Kalk und anderen Baustoffen. Rohöl muss bis zu 600°C erwärmt werden, um daraus Kunststoffe, Kraftstoffe, Chemikalien, usw. zu erzeugen. In der Energietechnik werden fossile Brennstoffe verbrannt, um die Wärme dann über Turbinen und Motoren in mechanische Energie umwandeln zu können oder nur um unsere Häuser zu heizen. Viele Produkte müssen zur Veredelung getrocknet werden, wie Papier, Lebensmittel, Genussmittel, Hölzer, usw. Zur Deckung der Verdampfungsenthalpie muss Wärme zugeführt werden. Der Mensch mit einer inneren Temperatur von 37°C gibt permanent Wärme an die Umgebung ab. Das Wohlbefinden von Menschen wird daher in starkem Maße von der Wärmeübertragung beeinflusst. Diese wird in etwa gleichem Maße sowohl von der Konvektion als auch von der Strahlung bestimmt.

Stoffumwandlungsprozesse werden darüber hinaus selbstverständlich noch von der Stoffübertragung bestimmt. Der Wärmetransport und der Stofftransport sind dann stets gekoppelt. Auf diese Kopplung kann hier nur an wenigen Beispielen eingegangen werden. Stoffumwandlungsprozesse werden in einigen Fällen zusätzlich noch von

der chemischen Reaktionskinetik beeinflusst, die in der Regel stark temperaturabhängig ist. Solche Fälle werden hier nicht betrachtet, sondern auf andere Lehrbücher verwiesen.