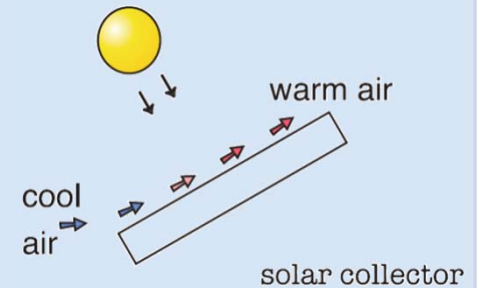

Wärme- und Stoffübertragung I

Natürliche Konvektion umströmter Körper

Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer
Dr.-Ing. Dr. rer. pol. Wilko Rohlfs

- Natürliche Konvektion umströmter Körper
 - Kenntnis der im Skript und in der Formelsammlung genannten Korrelationen für Fälle natürlicher Konvektion



Klassifikationen nach Strömungsbedingung

Erzwungene Konvektion

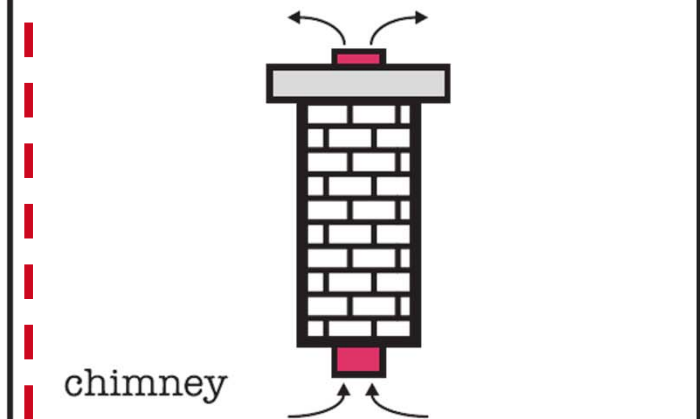
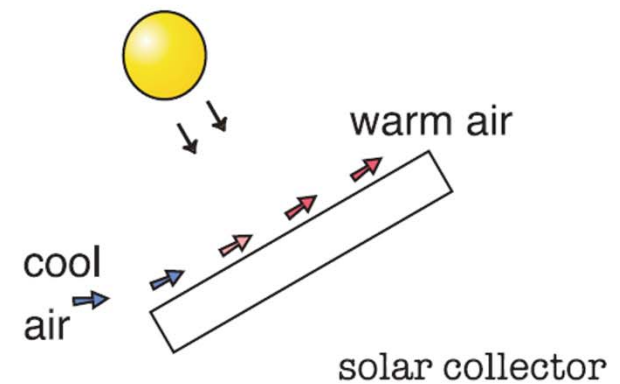
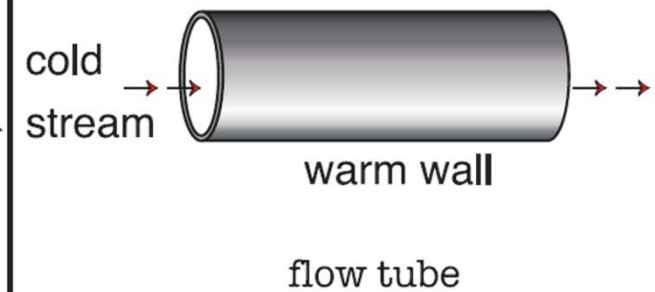
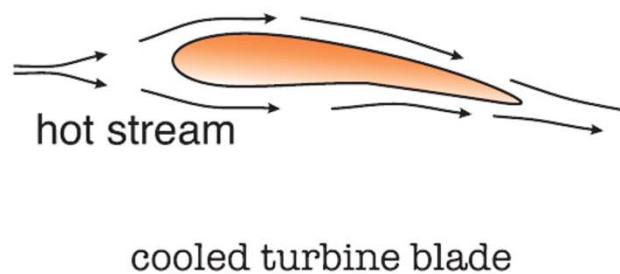
- Antrieb durch von außen erzeugte Bewegung des Fluides/Objekts

Freie Konvektion

- Inhärenter Antrieb aufgrund der Wärmeübertragung (Dichteunterschiede)

extern

intern



Wichtige dimensionslose Kennzahlen

Nusselt-Zahl: $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$

Die Nusselt-Zahl ist der dimensionslose Wärmeüberganskoeffizient

Prandtl-Zahl: $Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda}$

Die Prandtl-Zahl vergleicht den Impulstransport infolge von Reibung mit dem Wärmetransport infolge von Leitung

Reynolds-Zahl: $Re = \frac{\rho u_{\infty} L}{\lambda}$

Die Reynolds-Zahl gibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften an

Grashof-Zahl: $Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_W - T_{fl}) L^3}{\eta^2}$

Die Grashof-Zahl beschreibt das Verhältnis zwischen den Auftriebskräften eines Fluids und den wirkenden Viskositätskräften

Korrelationsfunktion für natürliche Konvektion

Allgemeine Form

Natürliche Konvektion: $Nu = Nu(Gr, Pr)$

Anwendbarkeitskriterien

- Geometrie
- Strömungsform
- Thermische Randbedingungen

Stoffeigenschaften

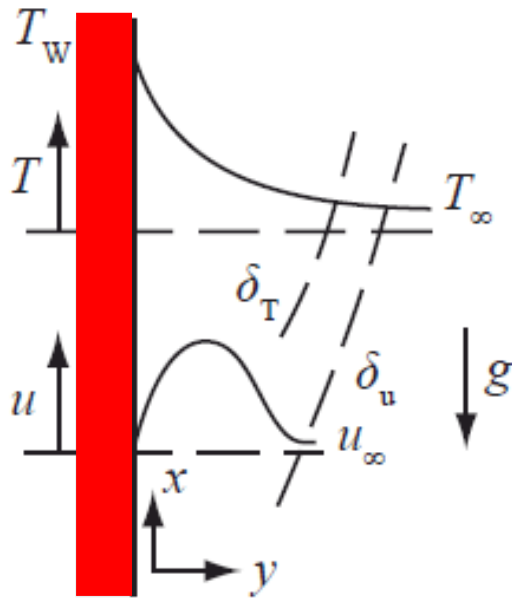
In Kennzahlen auftretende Stoffeigenschaften bei:

$$T_{\text{St}} = \frac{T_W + T_{\infty}}{2}$$

Ausnahme: Isobarer Ausdehnungskoeffizient β für ideale Gase:

$$\beta = \frac{1}{T_{\infty}}$$

Senkrechte, beheizte Platte mit laminarer Grenzschichtströmung und isothermer Oberfläche



Örtlicher Wärmeübergang:

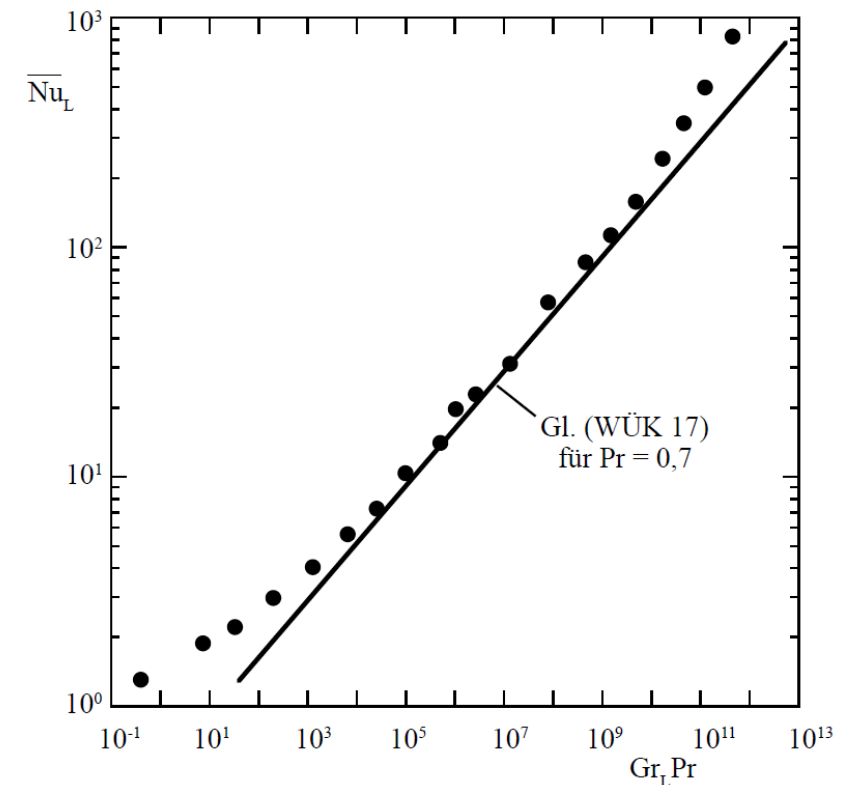
$$Nu_x = 0,508 \left(\frac{Pr}{0,952 + Pr} \right)^{\frac{1}{4}} (Gr_x Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (WÜK.16)$$

Senkrechte, beheizte Platte mit laminarer Grenzschichtströmung und isothermer Oberfläche

Mittlerer Wärmeübergang:

$$\overline{Nu}_L = C (Gr_L Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (WÜK.17)$$

$$\text{für } GrPr < Gr_{L,krit} Pr$$



mit folgenden Prandtl-Zahl abhängigen Konstanten C

Pr	0,003	0,01	0,03	0,72	1	2	10	100	1000	∞
C	0,182	0,242	0,305	0,516	0,535	0,568	0,620	0,653	0,665	0,670

Senkrechte, beheizte Platte mit laminarer Grenzschichtströmung und konstantem Wärmestrom

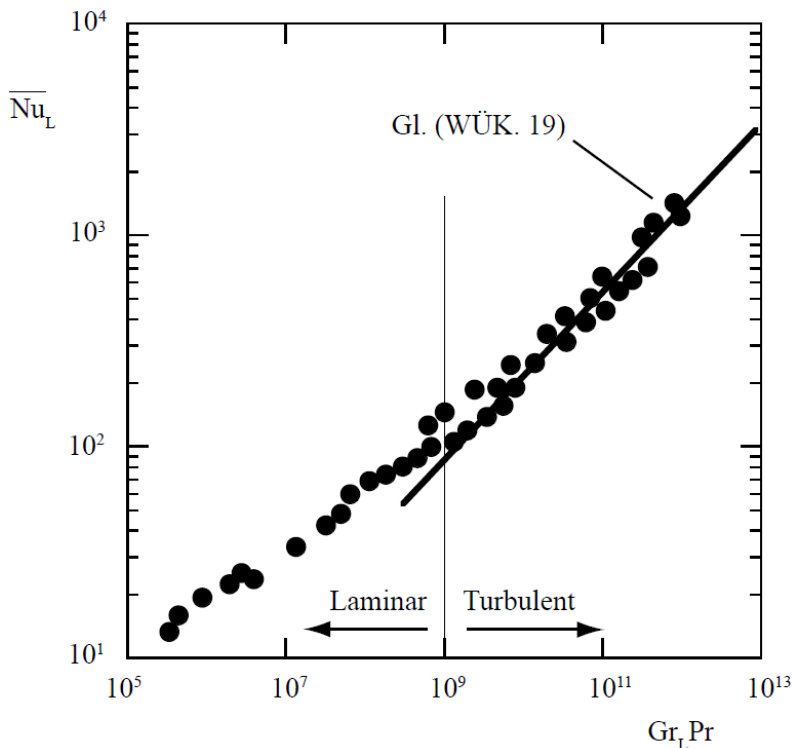
Konstanter Wärmestrom: $Nu_x = 0,60 (Gr_x^* Pr)^{\frac{1}{5}} \quad (W\ddot{U}K.18)$

$$\text{für } 10^5 < Gr_x^* < 10^{11}$$

(Bemerkung: Da als Randbedingungen der Wärmestrom vorgegeben ist, wird wegen der einfacheren Handhabung eine modifizierte Grashof-Zahl Gr_x^* definiert $Gr_x^* \equiv Gr_x Nu_x = \frac{\rho^2 g \beta \dot{q}_w'' x^4}{\lambda \eta^2}$ eingeführt.)

Konstante Wandtemperatur: $\overline{Nu_L} = C (Gr_L Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (W\ddot{U}K.17)$

Senkrechte, beheizte Platte mit **turbulenter** Grenzschichtströmung und **isothermer Oberfläche**

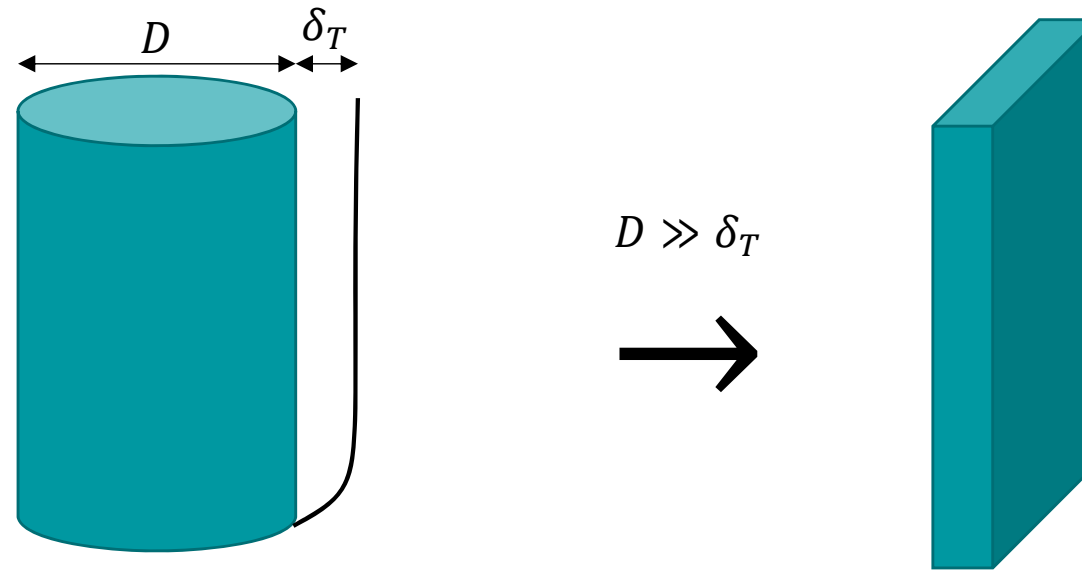


$$\overline{Nu}_L = 0,13 (Gr_L Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (WÜK.19)$$

für $10^9 < (Gr_L Pr) < 10^{12}$

(Bemerkung: Bei turbulenter Grenzschichtströmung wird durch den Exponent $\frac{1}{3}$ der Grashof-Zahl der Wärmeübergangskoeffizient unabhängig von der Plattenhöhe)

Senkrechte Zylinder unter dem Einfluss laminarer und turbulenter Grenzschichtströmungen

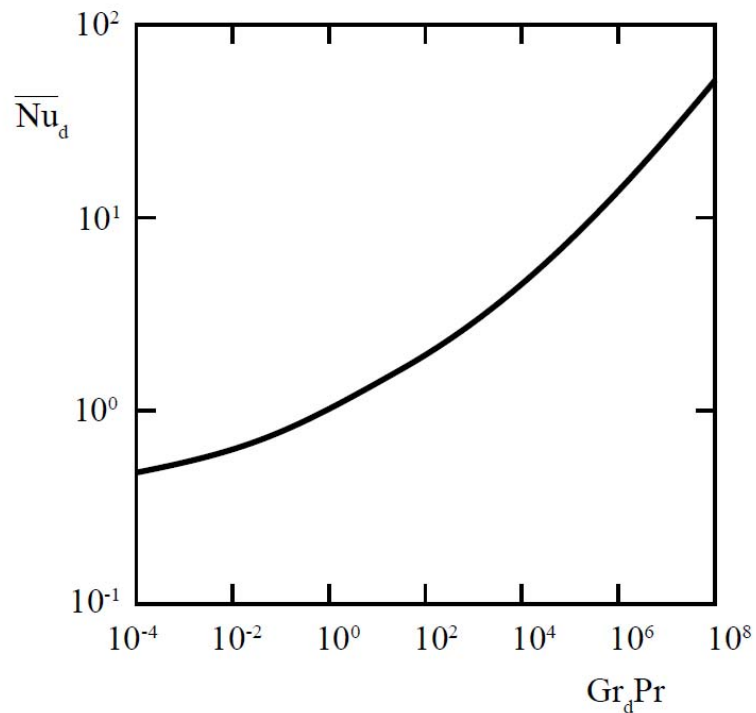


Solange der Durchmesser des Zylinders deutlich größer ist als die sich entwickelnde Grenzschichtdicke, gelten die für die senkrechte Platte angegebenen Beziehungen. Als Kriterium gilt näherungsweise $\frac{d}{L} > 35 \cdot \text{Gr}_L^{-\frac{1}{4}}$. Die das Strömungsbild charakterisierende geometrische Abmessung ist die Zylinderlänge.

Horizontale Zylinder mit isothermer Oberfläche unter dem Einfluss laminarer und turbulenter Strömungen



Laminarer Bereich



- für den **laminaren** Bereich $10^4 < Gr_d Pr < 10^9$

$$\overline{Nu}_d = 0,53 (Gr_d Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{WÜK.20})$$

- für den **turbulenten** Bereich $10^9 < Gr_d Pr < 10^{12}$

$$\overline{Nu}_d = 0,13 (Gr_d Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{WÜK.21})$$

Mit den Näherungsbeziehungen nach Bayley u. a. (1972)

Horizontale Platten bei laminarer und turbulenter Strömung mit **isothermer Oberfläche** (beheizte Oberseite oder gekühlte Unterseite)



Temperatur
vorgegeben

- laminarer Bereich $2 \cdot 10^4 < Gr_L Pr < 8 \cdot 10^6$

$$\overline{Nu_L} = 0,54 (Gr_L Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (W\ddot{U}K.22a)$$

- turbulenter Bereich $8 \cdot 10^6 < Gr_L Pr < 10^{11}$

$$\overline{Nu_L} = 0,15 (Gr_L Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (W\ddot{U}K.23a)$$

(Bemerkung: Die angegebenen Beziehungen sind aus Messungen an quadratischen Platten abgeleitet worden. Sie gelten näherungsweise auch für rechteckige und kreisförmige Flächen, wenn eine mittlere Seitenlänge bzw. $(0,9d)$ als kennzeichnende Länge eingesetzt wird).

nach Holman (1976)

Horizontale Platten bei laminarer und turbulenter Strömung mit **isothermer Oberfläche** (gekühlte Oberseite oder beheizte Unterseite)



Temperatur
vorgegeben

Isotherme Oberfläche, Plattenoberseite gekühlt oder Plattenunterseite geheizt

- laminarer Bereich $10^5 < Gr_L Pr < 10^{11}$

$$\overline{Nu}_L = 0,27 (Gr_L Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (WÜK.24a)$$

nach Holman (1976)

Horizontale Platten bei laminarer und turbulenter Strömung mit **konstantem Wärmestrom** und geheizter Plattenoberseite bzw. gekühlter Unterseite



Wärmestrom
vorgegeben

- laminarer Bereich $Gr_L^* Pr < 2 \cdot 10^8$

$$\overline{Nu}_L = 0,13 (Gr_L^* Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (WÜK.22b)$$

- turbulenter Bereich $2 \cdot 10^8 < Gr_L^* Pr < 10^{11}$

$$\overline{Nu}_L = 0,16 (Gr_L^* Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (WÜK.23b)$$

nach Holman (1976)

Horizontale Platten bei laminarer und turbulenter Strömung mit **konstantem Wärmestrom** und gekühlter Plattenoberseite bzw. geheizter Unterseite



Wärmestrom
vorgegeben

- laminarer Bereich $10^6 < Gr_L^* Pr < 10^{11}$

$$\overline{Nu}_L = 0,58 (Gr_L^* Pr)^{\frac{1}{5}} \quad (WÜK.24b)$$

nach Holman (1976)

Verständnisfragen

Welche Kennzahlen müssen bei der Anwendung der Wärmeübergangsgesetze berücksichtigt werden?

Was ist das treibende Potential bei der natürlichen Konvektion?

Welche Anwendungsfälle sind bei horizontalen Platten zu unterscheiden und inwiefern weichen diese von senkrechten Platten ab?