

# Inhalt der Vorlesung

## Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

1. Einführung / Übersicht über Verfahren / Simulation zur Wirtschaftlichkeitsanalyse
2. Grundlagen der Wärmelehre, Simulation von Temperaturfeldern  
Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung, Strömung, Finite Elemente Methode
3. Energieeffizienz / Konduktive Erwärmung (Praxis und Simulation)
4. Maxwell-Gleichungen / Leistungsumsetzung / Wirkungsgrad
5. Induktionserwärmung 1: Umrichter, Schmelzöfen, Schmieden
6. Induktionserwärmung 2: Querfeld, Härten, Schweißen
7. Induktionserwärmung 3: Simulation (Praxis und Übung)
8. Indirekte Erwärmung / Hybrid-Verfahren
9. Dielektrische Erwärmung (Praxis und Simulation)
10. Organisatorisches, Übungen, Fragen & Antworten



- Wärmeübertragung

Wärmeübertragung ist der Transport thermischer Energie als Folge einer Temperaturdifferenz.

- Thermisches Gleichgewicht

Zwei Systeme im thermischen Gleichgewicht haben dieselbe Temperatur.

→ 0. Hauptsatz der Thermodynamik

- Wärme

Wärme ist die Energie, die allein aufgrund eines Temperaturunterschiedes zwischen den Systemen über eine wärmedurchlässige Wand übertragen wird.

Die als Wärme übertragene Energie ist gleich der Änderung der inneren Energie eines geschlossenen Systems, vermindert um die als Arbeit übertragene Energie.



1. Hauptsatz der Thermodynamik  
(Energieerhaltung)

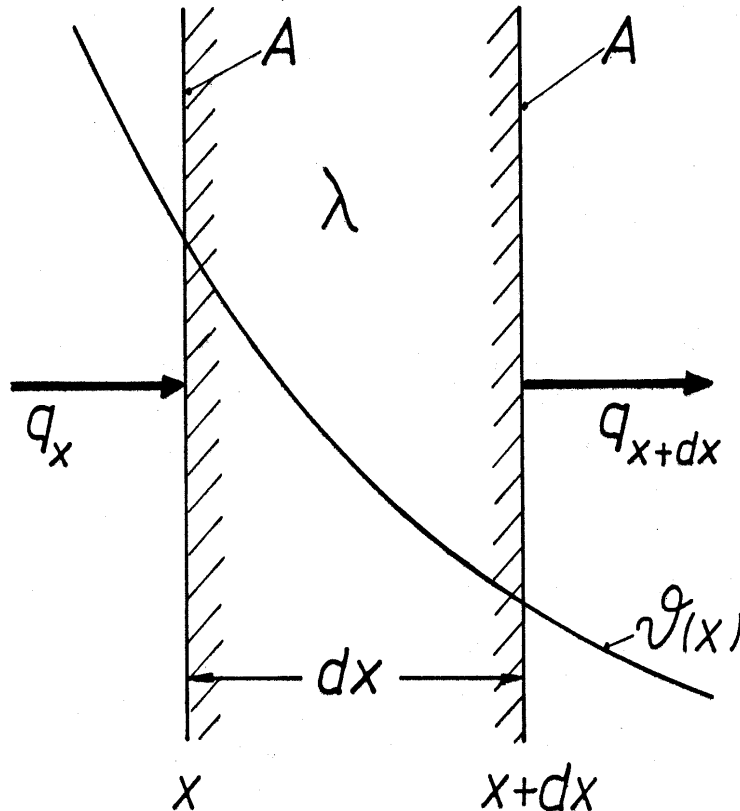
1. Wärmeleitung
  - Stoffliche Energieträger notwendig
  - Gilt für alle Aggregatzustände
  - *Fourier-Gesetz*
  
2. Konvektion
  - Stoffliche Energieträger notwendig (makroskopisch)
  - Nur in Fluiden (Gase, Flüssigkeiten)
  - *Newton-Gesetz*
  
3. Wärmestrahlung
  - Keine stofflichen Energieträger notwendig
  - Austausch elektromagnetischer Strahlung
  - Gesetz von *Stefan* und *Boltzmann*

# Wärmeleitung

- *Fourier-Gesetz*

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } \vartheta$$

- stationäre eindimensionale Wärmeleitung



$$q_x = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx}$$

Wärmestromdichte

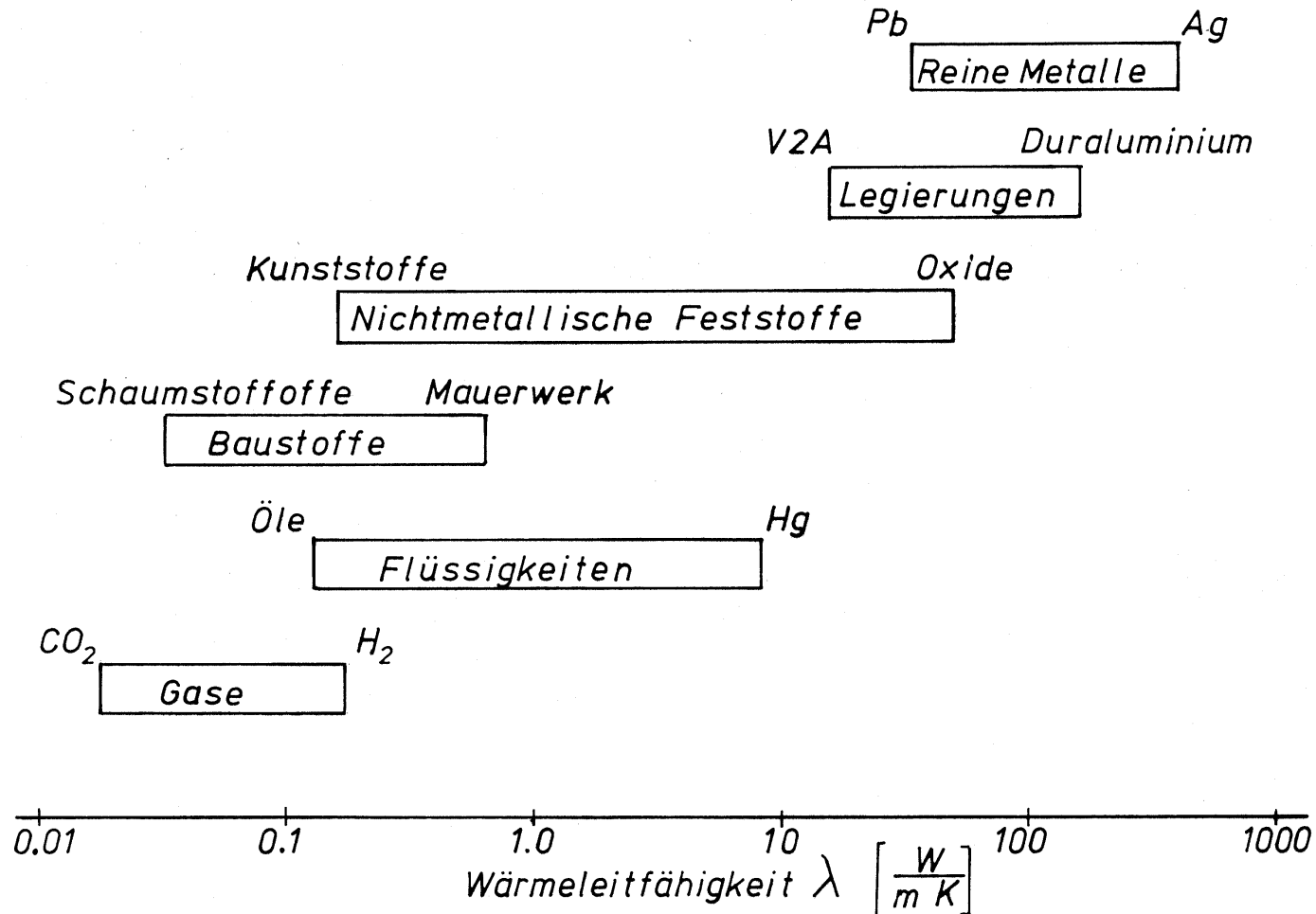
$$\Phi_x = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\vartheta}{dx}$$

Wärmestrom

$$R_W = \frac{\Delta x}{\lambda \cdot A}$$

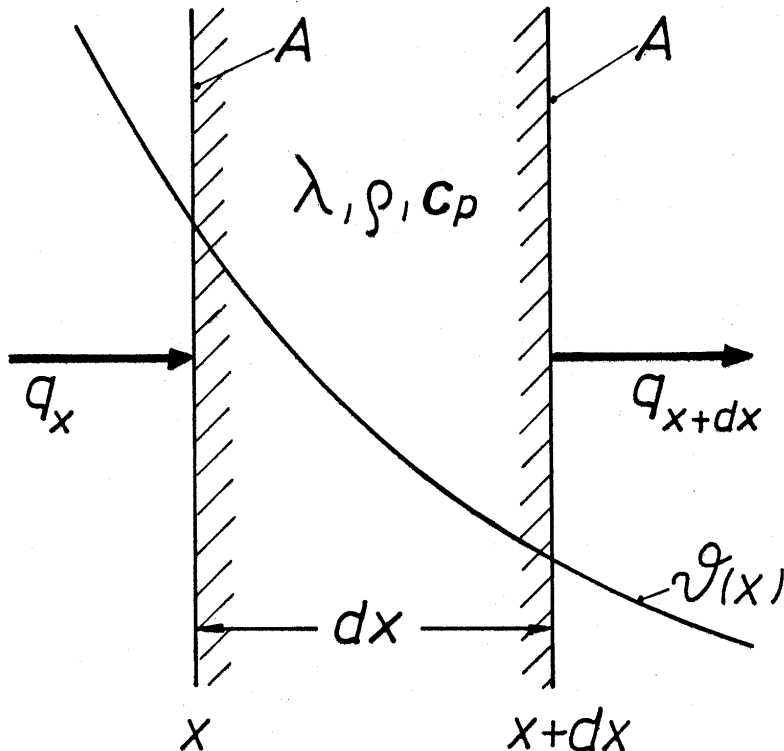
Wärmewiderstand

# Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Stoffgruppen



# Wärmeleitungsgleichung

## WLG für eindimensionalen Fall



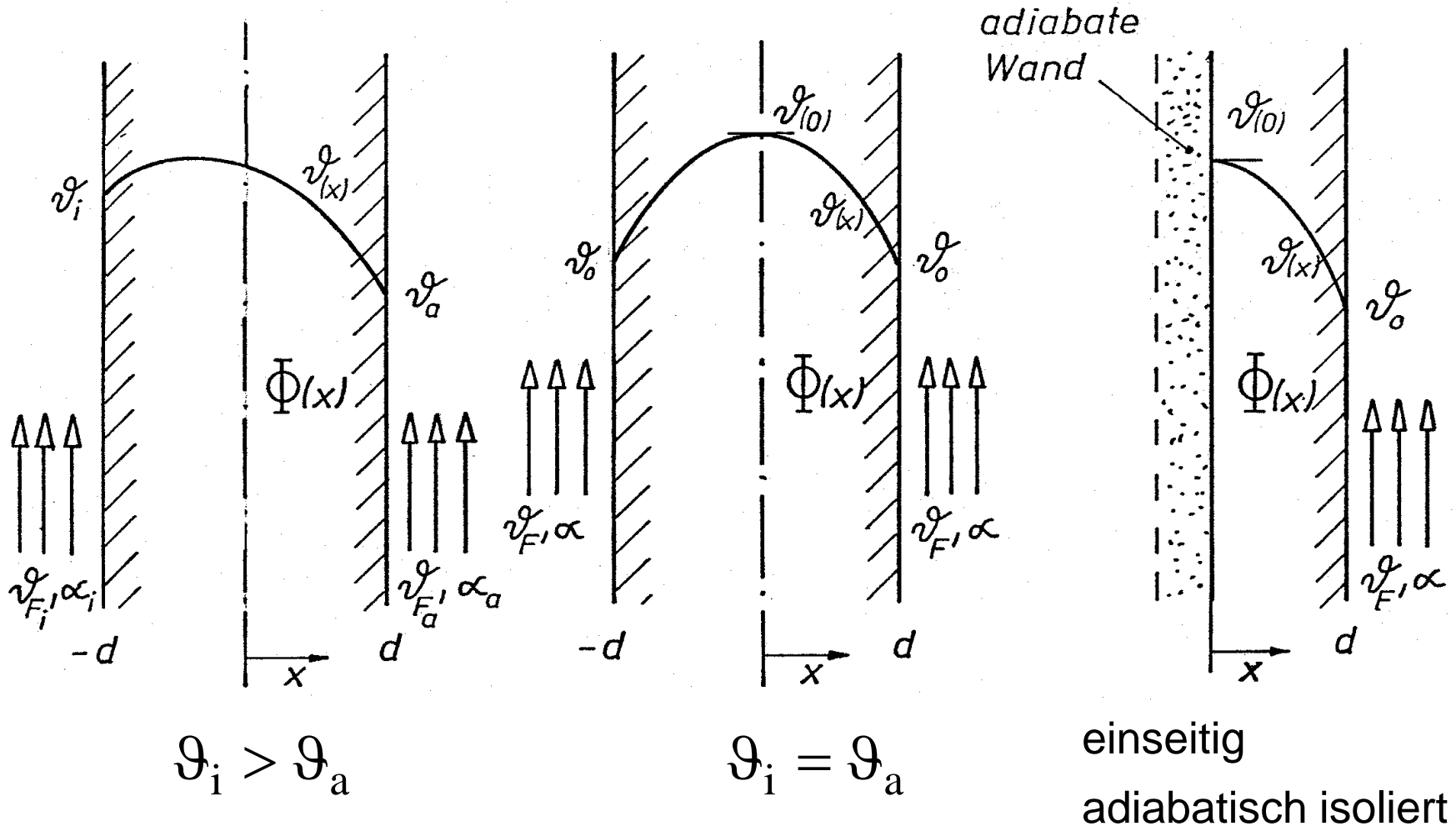
$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + p$$

zeitliche  
Änderung der  
inneren Energie

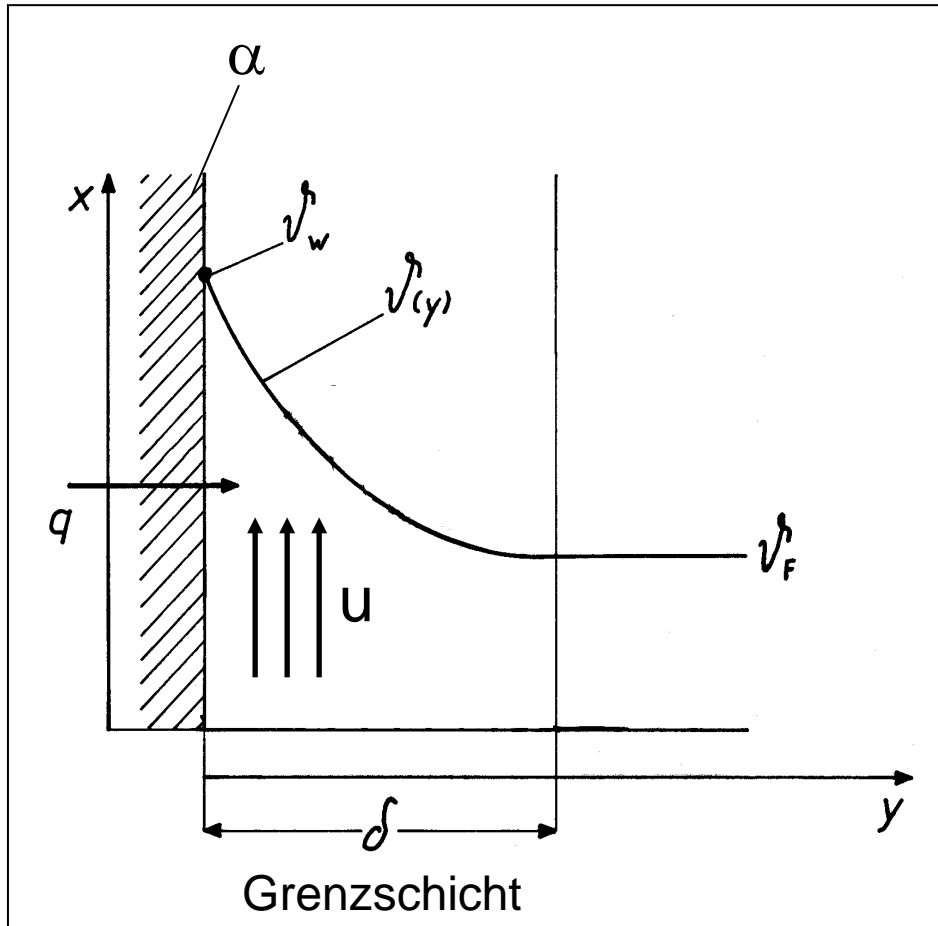
Wärmeleitung

Wärmequellen

# Beispiel (homogen verteilte Wärmequellen)



# Konvektion



- *Newton-Gesetz*

$$q_K = \alpha \cdot (\vartheta_W - \vartheta_F)$$

- Wärmeübergangskoeffizient

$$\alpha = \alpha(c_p, \rho, \lambda, \eta; p, \vartheta, u; \text{Form})$$

- Wärmestrom

$$\Phi_K = \alpha \cdot A \cdot (\vartheta_W - \vartheta_F)$$

- Konv. Wärmewiderstand

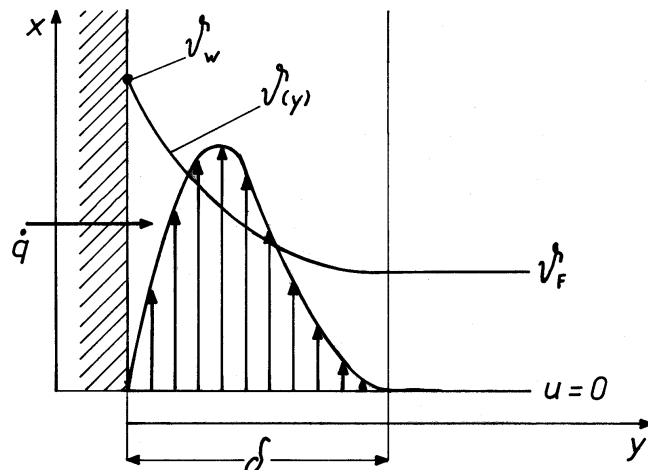
$$R_{WK} = \frac{1}{\alpha \cdot A}$$



## Freie Konvektion

- Teilchenbewegung durch innere Kräfte ➤  
**thermischer Auftrieb!**

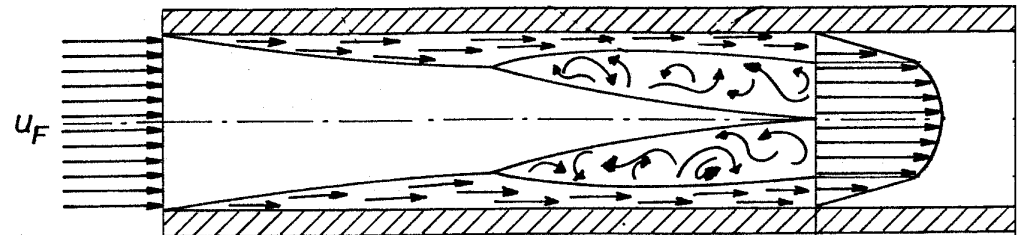
- Beispiel: senkrechte Wand



## Erzwungene Konvektion

- Teilchenbewegung durch äußere Kräfte ➤  
**Lüfter oder Pumpe!**

- Beispiel: Heizungsrohr



$$\alpha = \alpha(c_p, \rho, \lambda, \eta; p, \vartheta, u; \text{Form})$$

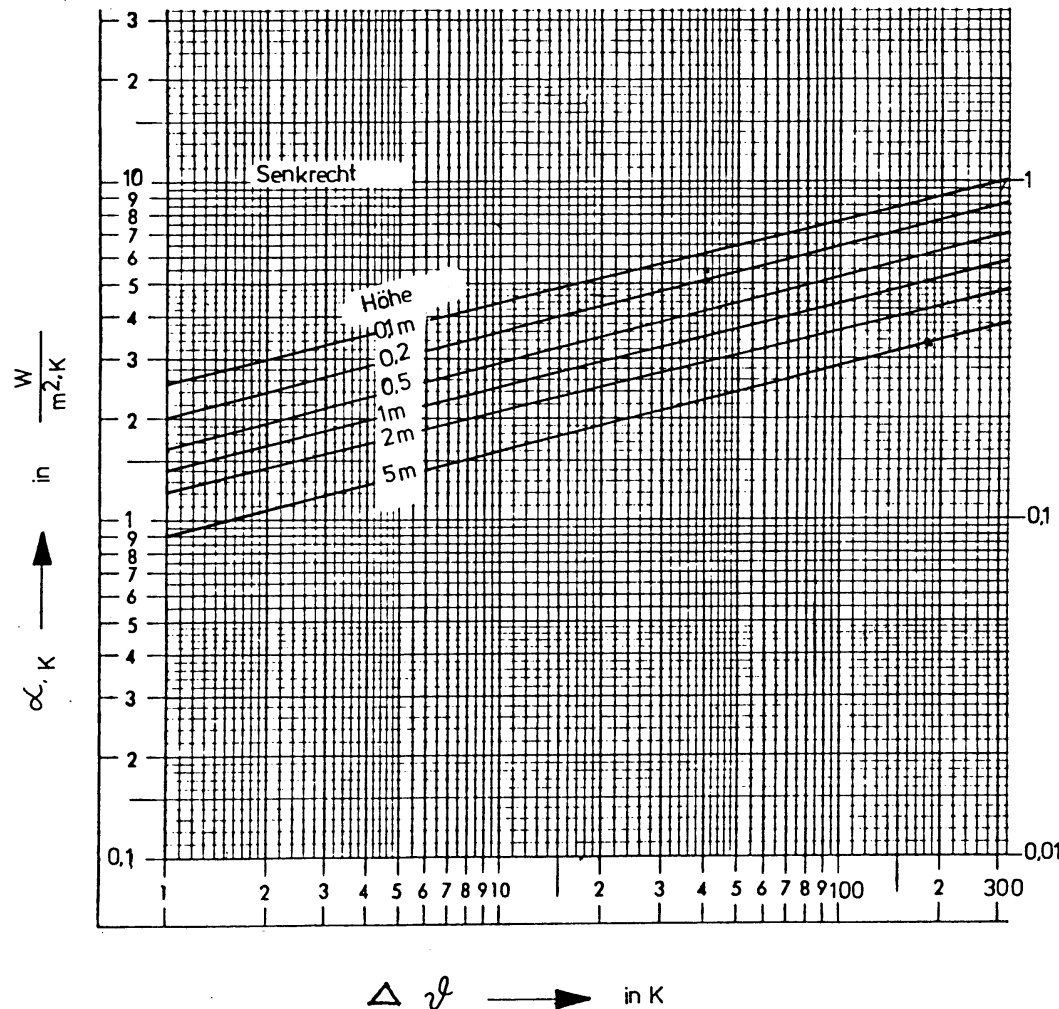
Stoffwerte

Zustandswerte

Oberflächen-  
geometrie

- Tabellen
- Diagramme, Kurven
- Kennzahlen

# $\alpha$ mit Hilfe von Diagrammen



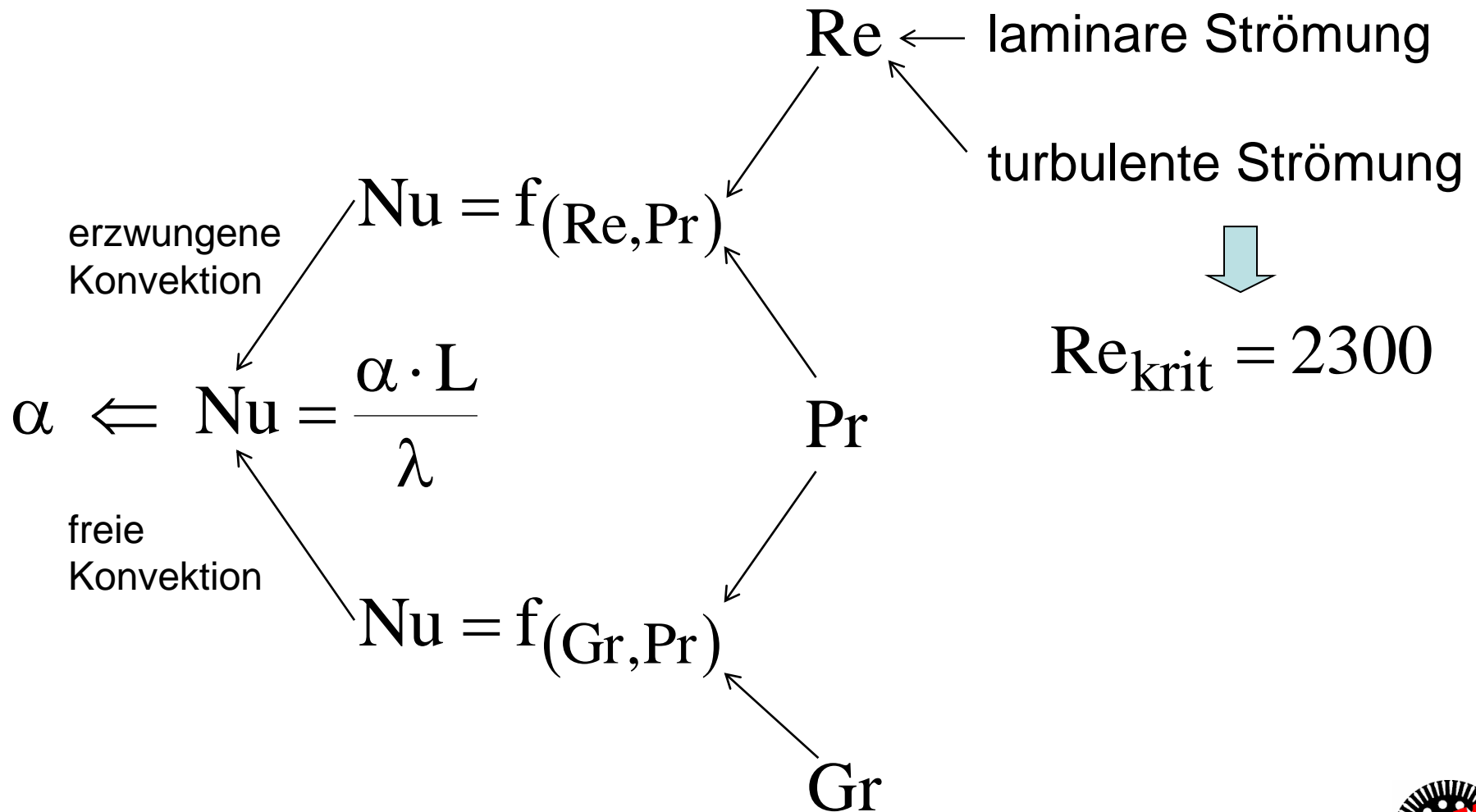
$\alpha_K$  = Wärmeübergangskoeffizient

durch freie Konvektion an  
ebenen senkrechten Flächen!

(Abhängigkeit von Gesamthöhe  
und Übertemperatur  $\Delta \vartheta_i$  ;

Umgebungstemperatur 20 °C)

# $\alpha$ mit Hilfe von Kennzahlen



# Definitionen der Kennzahlen



## ● Nusselt

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \frac{\text{konvektiver Wärmeübergang}}{\text{Wärmeleitung}}$$

## ● Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{v}{a} = \frac{\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit der Abbremsung der Strömung}}{\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturfront}}$$

## ● Reynolds

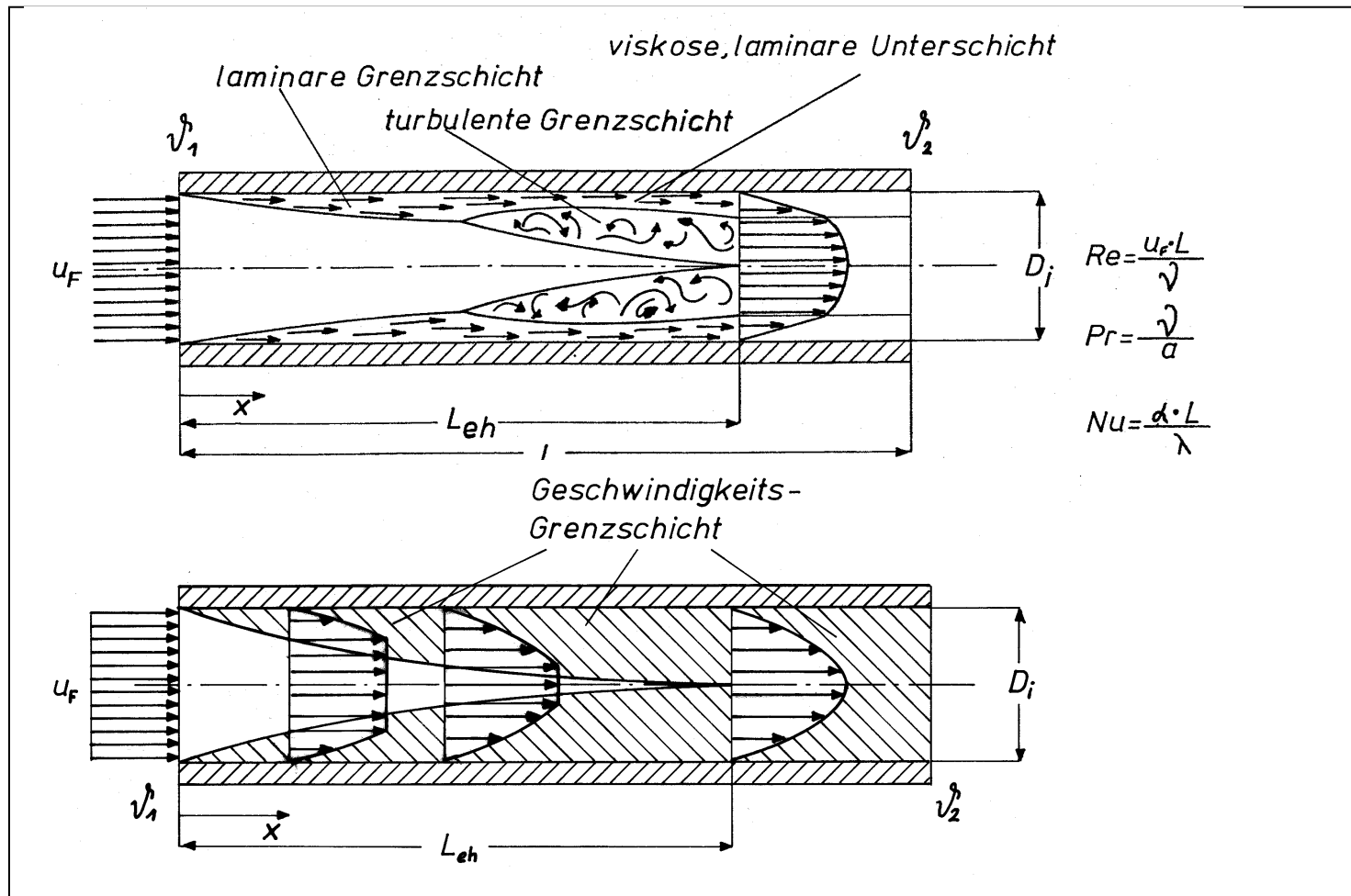
$$\text{Re} = \frac{u_F \cdot L}{\nu} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeitskraft}}$$

## ● Grashof

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot (\vartheta_W - \vartheta_F)}{\nu^2} = \frac{\text{Auftriebskraft}}{\text{Zähigkeitskraft}}$$



# Laminare und turbulente Rohrströmung



# Rechenbeispiel

Durch ein beheiztes Rohr der Länge  $L = 18 \text{ m}$  strömt Wasser mit einem Massenstrom von  $\dot{m} = 0,18 \text{ kg/s}$  bei einem Druck von  $p = 1 \text{ bar}$ . Das Rohr weist einen Innendurchmesser von  $d_i = 2 \text{ cm}$  auf. Die Eintrittstemperatur des Wassers beträgt  $\vartheta_e = 55^\circ\text{C}$ , die Austrittstemperatur  $\vartheta_a = 65^\circ\text{C}$ .



1. Freie oder erzwungene Konvektion?  $\rightarrow$  Rohrströmung  $\rightarrow$  **erzwungen!**

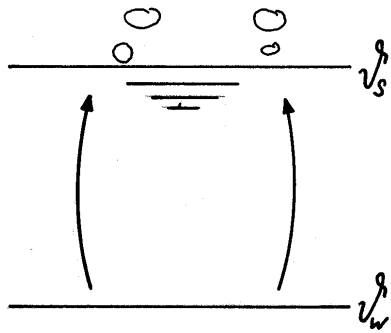
2. Laminare oder turbulente Strömung?  $\rightarrow Re = \frac{u_F \cdot d_i}{\nu} = \frac{\dot{m} \cdot d_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_i^2 / 4 \cdot \nu} = 24537$

**$Re > Re_{krit} = 2300 \Rightarrow$  turbulente Strömung!**

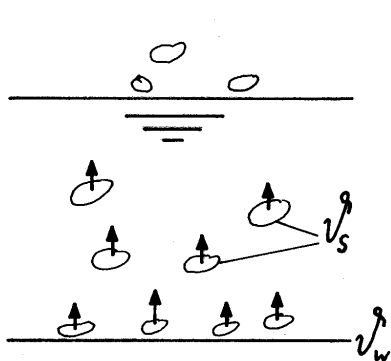
3. Wärmeübergangskoeffizient?  $\rightarrow \alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d_i}$

$$Nu = 0,0235 \cdot (Re^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot Pr^{0,3} - 0,8) \cdot \left(1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \cdot \left(\frac{\eta_F}{\eta_W}\right)^{0,14} \left. \vphantom{Nu} \right\} \alpha = 3943,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

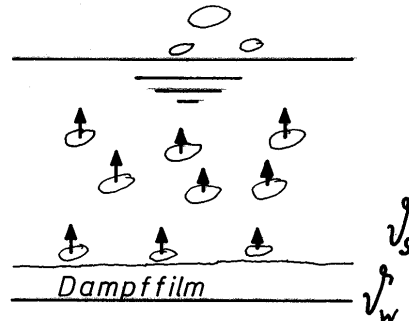
# Wärmeübergang bei Verdampfung



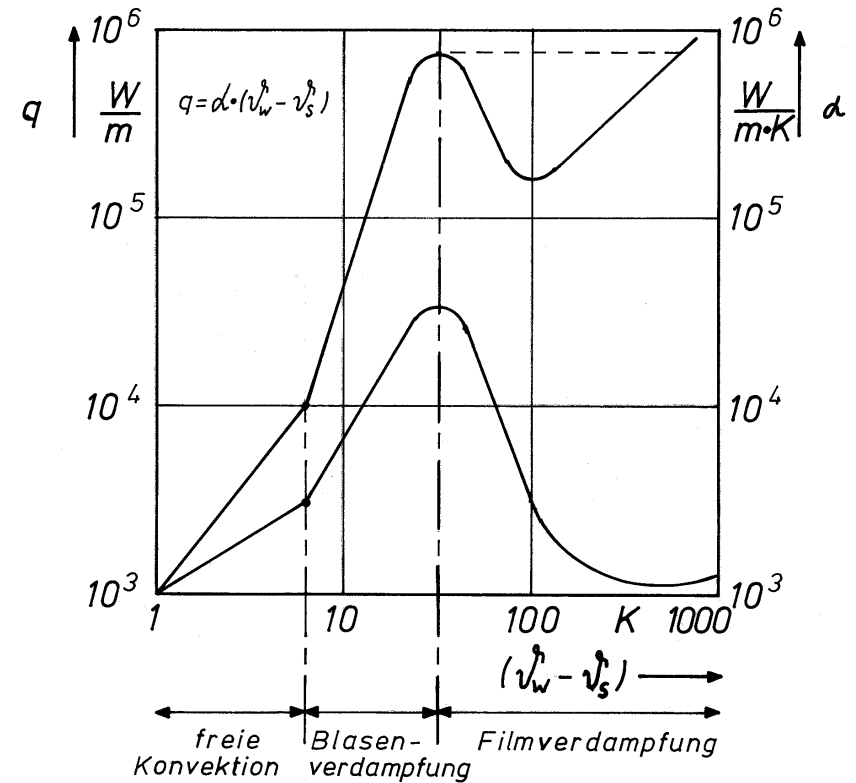
a)  $v_w - v_s = \text{gering}$



b)  $v_w - v_s = \text{erheblich}$

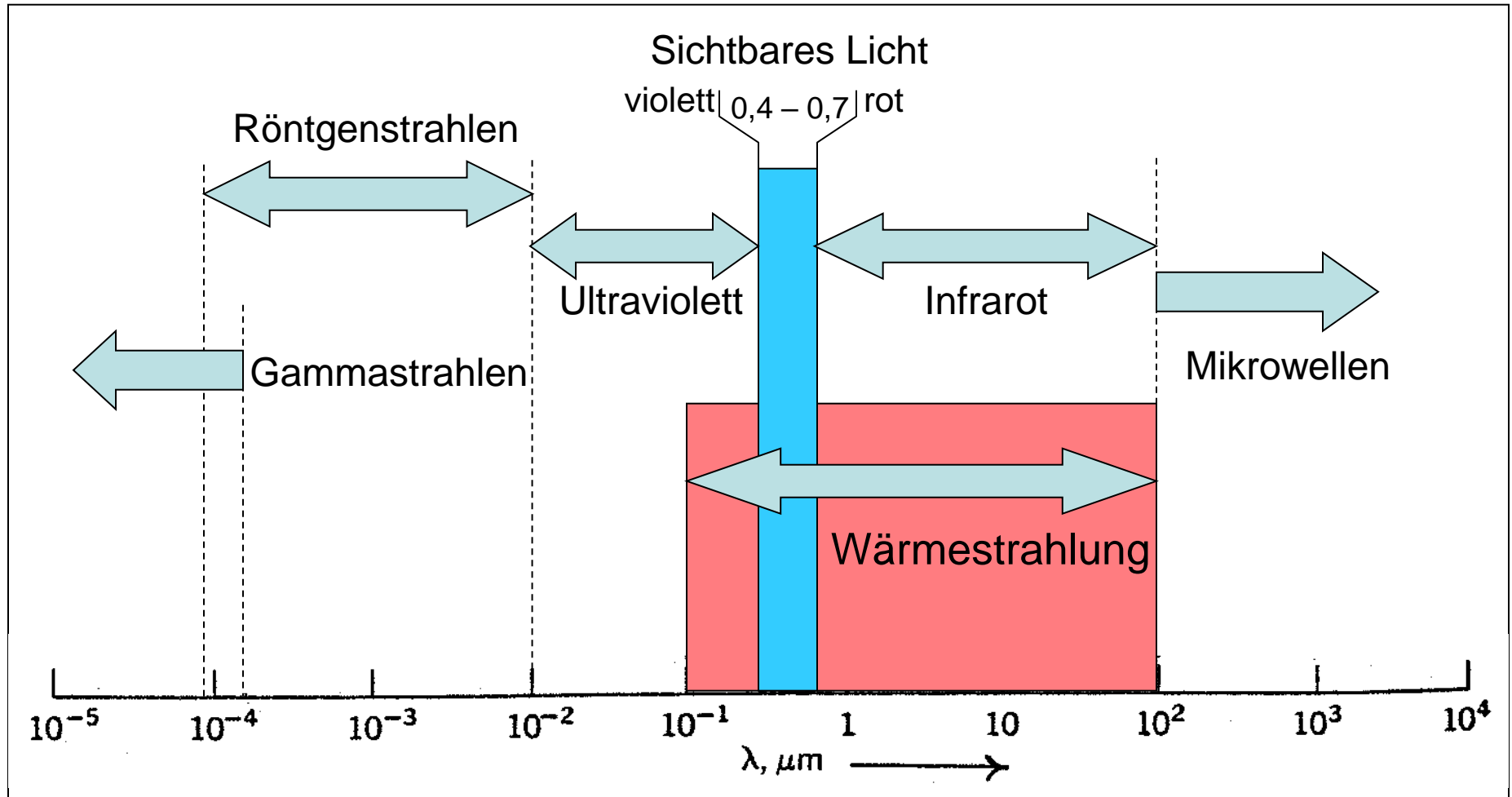


c)  $v_w - v_s = \text{sehr groß}$





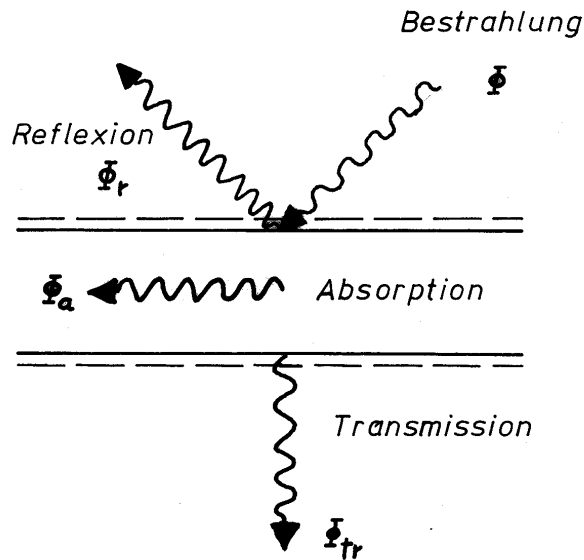
# Wärmestrahlung



# Absorption, Reflexion und Transmission



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



## Strahlungsbilanz

- Reflexionsgrad
- Absorptionsgrad
- Transmissionsgrad

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_{tr}$$

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi}$$

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi}$$

$$\tau = \frac{\Phi_{tr}}{\Phi}$$



$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

Idealer schwarzer Körper:  $\alpha = 1$ ;  $\rho = 0$ ;  $\tau = 0$  , z. B. Schnee

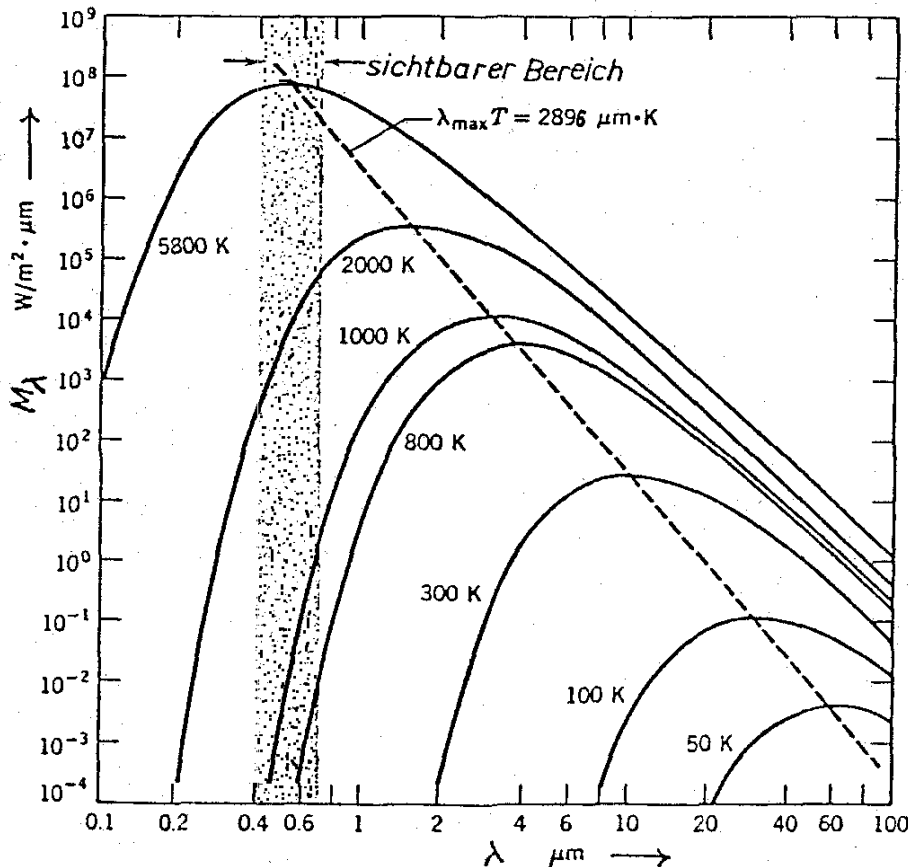
Idealer weißer Körper:  $\alpha = 0$ ;  $\rho = 1$ ;  $\tau = 0$  , z. B. blanke Metalle

Diathermer Körper:  $\alpha = 0$ ;  $\rho = 0$ ;  $\tau = 1$  , z. B. Luft

Grauer Körper:  $\alpha < 1$  , z. B. reale Körper



# Abstrahlung (Emission)



Planck'sche Verteilung für schwarze Körper

- Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2896 \mu\text{mK}$$

- Spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers:

Stefan-Boltzmann-Gesetz!

$$M_S = q = \sigma \cdot T^4 = C_S \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

$$\text{mit } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \text{ bzw. } C_S = 5,67 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

(Stefan-Boltzmann-Konstante)

(Strahlungskonstante des schwarzen Körpers)



# Ausstrahlung des grauen Körpers



- Spezifische Ausstrahlung des grauen Strahlers:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = \varepsilon \cdot C_S \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

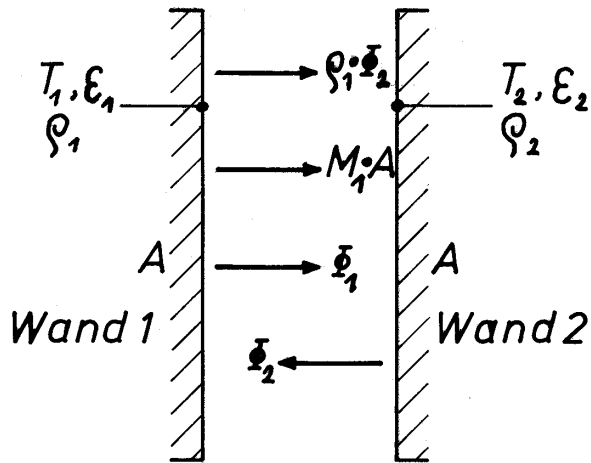
- Kirchhoff'sches Gesetz:

$$\varepsilon = \alpha$$

<b>Kupfer, poliert</b>	<b>20 °C</b>	<b>0,030</b>
<b>Aluminium, blank</b>	<b>20 °C (170 °C)</b>	<b>0,052 (0.099)</b>
<b>Eisen, blank</b>	<b>20 °C</b>	<b>0,240</b>
<b>Kupfer, oxidiert</b>	<b>20 °C</b>	<b>0,780</b>
<b>Eisen, verrostet</b>	<b>20 °C</b>	<b>0,850</b>
<b>Schwarzer Lack, matt</b>	<b>20 °C</b>	<b>0,970</b>
<b>Holz, Buche</b>	<b>20 °C</b>	<b>0,935</b>
<b>Eis, glatt; Wasser</b>	<b>20 °C</b>	<b>0,966</b>



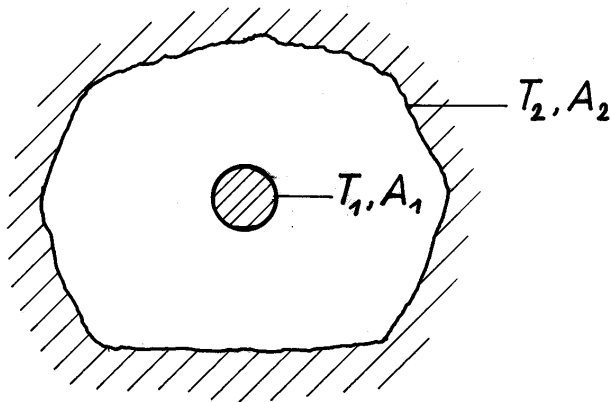
# Wärmeübertragung durch Strahlung



$$\Phi_{12} = A_1 \cdot C_{12} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\text{mit } C_{12} = \frac{C_S}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{Strahlungsaustauschkonstante})$$

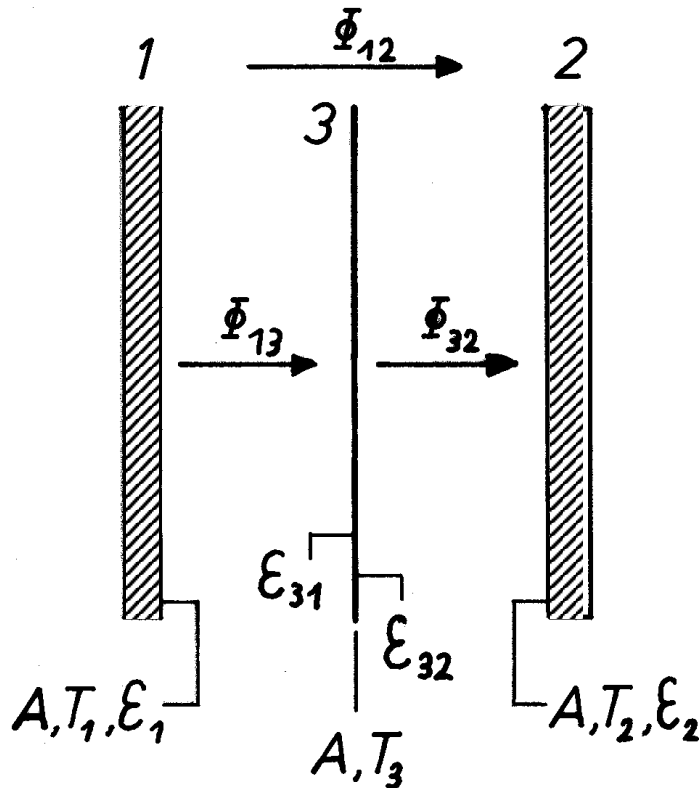
Grauer Strahler mit ihm vollständig umschließender Fläche:



$$\Phi_{12} = A_1 \cdot C_{12} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\text{mit } C_{12} = \frac{C_S}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

# Strahlungsschutzschirme



$$\Phi_{12} = A_1 \cdot C_{12} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\text{mit } C_{12} = \frac{C_S}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1-\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{31}} + \frac{1-\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{32}}}$$

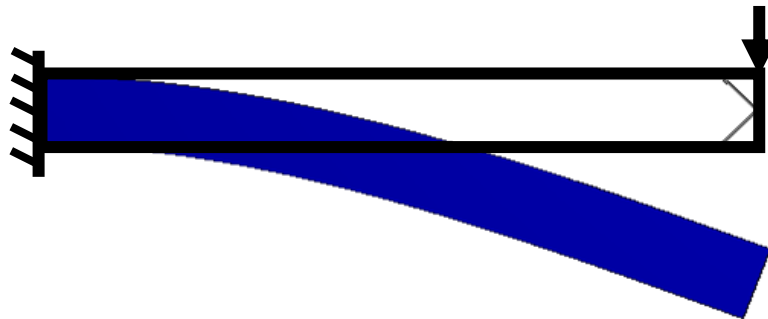
Falls  $\varepsilon \equiv \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{31} = \varepsilon_{32}$ :

- 1 Schirm:  $\Phi_{12_1} = \frac{1}{2} \Phi_{12_0}$
- n Schirme:  $\Phi_{12_n} = \frac{1}{n+1} \Phi_{12_0}$

# Grundlagen der numerischen Simulation

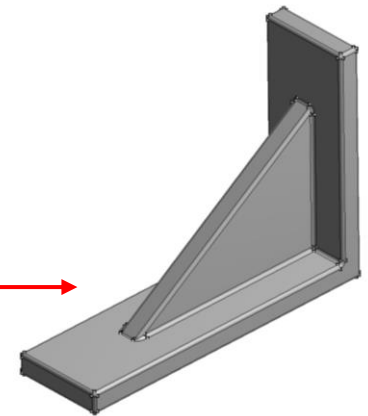


- Mechanische Verformungen, Dehnungen und Spannungen können für einfache Geometrien bereits mit einfachen Gleichungen beschrieben werden.
  - z.B. die Durchbiegung eines eingespannten Balkens:



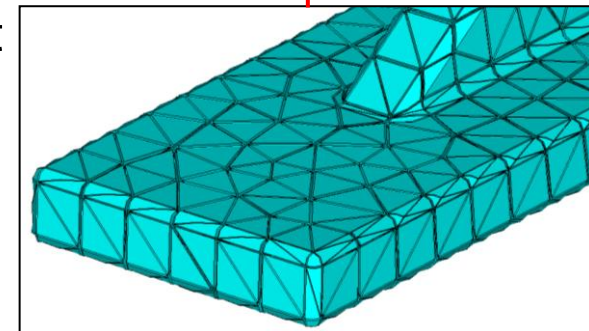
$$u = \frac{Fl^3}{3EI}$$

- Für die Berechnung von komplexeren Geometrien ist das nicht so einfach, da es dafür keine fertigen Gleichungen gibt!
- Hier wird die Finite Elemente Methode (FEM) verwendet um die gewünschten Größen zu berechnen.
- Der Ansatz kann für Temperaturfelder, Elektromagnetik und Strömungsmechanik übernommen werden



- Die Geometrie wird in eine endliche (finite) Anzahl von mathematisch „einfach“ zu berechnenden Bereichen (Elementen) aufgeteilt: Vernetzung/Diskretisierung.
- Diese Elemente sind typischerweise:
  - Linien, Dreiecke, Vierecke, Hexaeder, Prismen, Pyramiden sowie **Tetraeder**.
- Die Elemente selbst beschreiben jeweils die Steifigkeit des Teilbereiches mit einfachen Gleichungen.
- Verbunden sind die einzelnen Elemente durch Verbindungspunkte: Knoten
- Die Software setzt die durch die Elemente beschriebenen Einzelsteifigkeiten zu einer Gesamtsteifigkeit  $\underline{\underline{K}}$  der Struktur zusammen und löst das folgende Gleichungssystem:  
$$\vec{F} = \underline{\underline{K}} \cdot \vec{u}$$

F: Vektor der äußeren Kräfte  
K: Gesamtsteifigkeitsmatrix  
u: Vektor der Knotenverschiebungen







Randbedingungen allgemein:

Für jede simulierte Physik (Temperatur, Elektromagnetik, Mechanik, usw.) sind zwingend Randbedingungen nötig, um die Gleichungssysteme bestimmt zu lösen. Dagegen ist beispielsweise kein Setzen von Lasten (Wärmegeneration, Stromstärken, Kräfte, usw.) erforderlich. Falls keine Lasten implementiert sind, resultiert ein zulässiges Null-Ergebnis.

Randbedingungen im Elektromagnetischen:

- Grundsätzlich stehen hinter den Lösungsverfahren PDGL, die gelöst werden müssen (hier: Maxwell-Gleichungen). Um die Integrationskonstanten der gelösten Ansatzfunktionen letztlich bestimmen zu können, sind Randbedingungen nötig
- In der elektromagnetischen Analyse können Randbedingungen sein:
  - Spannung
  - Strom (Beachtung der Kirchhoffschen Knotensätze wichtig)
  - Magnetischer Fluss Parallel
  - Diverse Randbedingungen aus Symmetriegründen oder Gründen einer sich wiederholenden Struktur (Beispiel: E-Maschine)

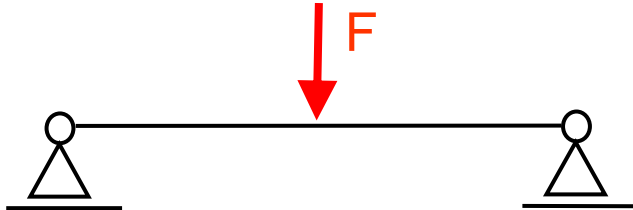


## Randbedingungen im Thermischen:

- Auch hier werden PDGL gelöst (Wärmeleitungsgleichung). Zur Lösung werden thermische Randbedingungen benötigt.
- Im Thermischen sind diese nötig, um die Grundsätze der Thermodynamik zu erfüllen
- Beispielsweise kann ein Körper mit innerer Wärmequelle, aber ohne Randbedingungen, die eine Wärmeabfuhr nach außen ermöglichen, nicht für den stationären Fall berechnet werden (Temperatur geht gegen unendlich, vgl. 1. Hauptsatz der Energieerhaltung)
- In der thermischen Analyse können Randbedingungen sein:
  - Konvektion
  - Strahlung
  - Leitung an einen angrenzenden Körper
- Eine zeitliche abhängige („transiente“) Analyse hat die Wärmekapazität als Randbedingung und kann theoretisch ohne Randbedingungen berechnet werden

Randbedingungen im Mechanischen:

- Bauteile sollten immer statisch bestimmt gelagert werden → keine Starrkörperbewegung
- Eine statisch unbestimmte Lagerung lässt Starrkörperbewegungen zu, die zu singulären Steifigkeitsmatrizen führen und deshalb nicht berechenbar sind:



$$\underline{\underline{K}}\underline{u} = \underline{F}$$

$$\underline{u} = \underline{\underline{K}}^{-1}\underline{F}$$

- Die Inverse der Steifigkeitsmatrix kann bei statisch unbestimmter Lagerung nicht bestimmt werden (Starrkörperbewegung). Damit ist die Aufgabe nicht lösbar.
- Auch wenn seitlich keine Belastung auftritt, muss diese Bewegung verhindert werden!

# Simulation von Temperaturfeldern

Mittels numerischer Simulationsmodelle lassen sich physikalische Prozesse analysieren und prognostizieren. Die Simulationsmodelle basieren dabei auf Differenzialgleichungen, die innerhalb der Berechnungssoftware aufgestellt, mit Last- und Randbedingungsdaten gefüttert und schließlich gelöst werden.

Für eine sehr vereinfachte Anordnung (DGL analytisch lösbar) soll ein stationäres Temperaturfeld per Simulation berechnet werden:

Ein Körper der Länge „b“ besitzt an einer Stirnseite (bei  $x=0$ ) eine feste Temperatur  $T_0$ . Nur an der Stirnseite bei  $x=b$  liegt ein Wärmeübergang vor (Konvektion, (Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$ , Umgebungstemperatur  $T_U$ )). Welche Temperatur  $T_x$  besitzt der Körper bei  $x= b/2$ ?

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + p$$

zeitliche  
Änderung der  
inneren Energie

Wärmeleitung

Wärmequellen

# Simulation von Temperaturfeldern



Analytische Lösung unter folgenden Vereinfachung:

Wärmetransport nur 1-dimensional

Stationär

Konstante Material- und Konvektionsparameter

Keine inneren Wärmequellen

Die allgemeine Wärmeleitungsgleichung:  $c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} \vartheta) + p$

Reduziert sich damit zu:  $0 = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + 0$

Durch zweimaliges Integrieren erhält man:

$$\vartheta(x) = \frac{c_1}{\lambda} x + c_2$$

Die Integrationskonstanten lassen sich durch Berücksichtigung der Randbedingungen bestimmen:

$$\text{RB1: } \vartheta(x = 0) = T_0 = c_2$$



Da es sich um einen stationären Zustand handelt, gelten weiterhin „Kirchhoffsche Knotensätze“; die Summe der Wärmeströme an jedem Ort muss Null ergeben. Außerdem gilt das Analogon zur Gleichstromtheorie („Ohmsches Gesetz“).

$$\text{RB2: } \phi(x = b)_{\text{Leitung}} = \phi(x = b)_{\text{Konvektion}}$$

$$A \cdot \lambda \cdot \frac{T_0 - \vartheta(x=b)}{b} = A \cdot \alpha \cdot [\vartheta(x = b) - T_U]$$

$$\rightarrow \vartheta(x = b) = \frac{\frac{\lambda}{b} \cdot T_0 + \alpha \cdot T_U}{\alpha + \frac{\lambda}{b}}$$

Damit ergibt sich der Integrationssummand  $c_1$  zu:

$$c_1 = \left\{ \frac{\frac{\lambda}{b} \cdot T_0 + \alpha \cdot T_U}{\alpha + \frac{\lambda}{b}} - T_0 \right\} \cdot \frac{\lambda}{b}$$

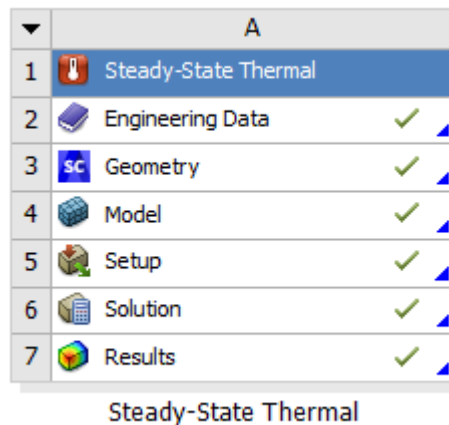
# Simulation von Temperaturfeldern

Daraus ergeben sich beispielsweise folgende Werte:

	$T_0$	Länge $b$	WL $\lambda$	WÜK $\alpha$	$T_U$	$T_x (x=b/2)$
Var. 1	100°C	40 mm	60 W/mK	300 W/m <sup>2</sup> K	22°C	93,5 °C
Var. 2	200°C	100 mm	120 W/mK	5 W/m <sup>2</sup> K	22°C	199,63 °C
Var. 3	100°C	200 mm	10 W/mK	4 kW/m <sup>2</sup> K	22°C	61,48 °C

Diese analytischen Ergebnisse sollen auch mit Simulationsmodellen errechnet werden.

Blick auf ein stationär  
thermisches System  
innerhalb der  
ANSYS Workbench



# Simulation von Temperaturfeldern

Eingabedaten für die Simulation:

Materialdaten (Wärmeleitfähigkeit, ggf. temperaturabhängig)

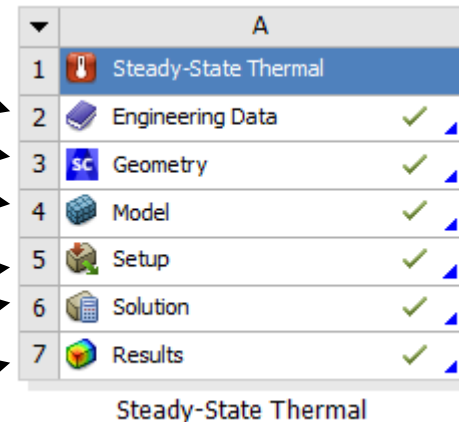
Geometrie

Örtliche Diskretisierung (Vernetzung)

Randbedingungen und ggf. Lasten

Lösungsprozedur

Ergebnisse

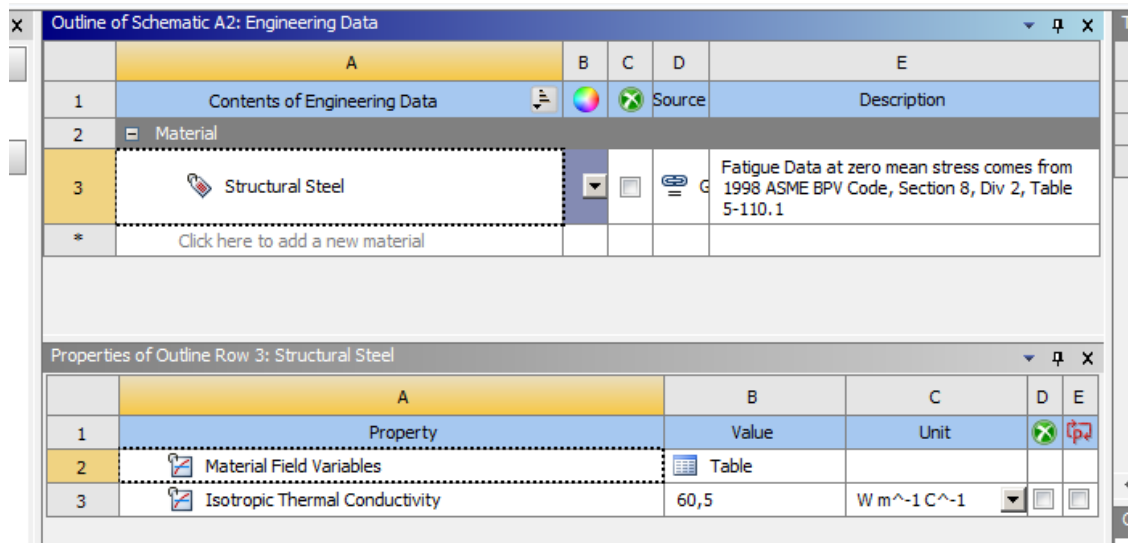




# Simulation von Temperaturfeldern

Eingabedaten für die Simulation:

Materialdaten (Wärmeleitfähigkeit, ggf. temperaturabhängig, orthotrop, usw.):



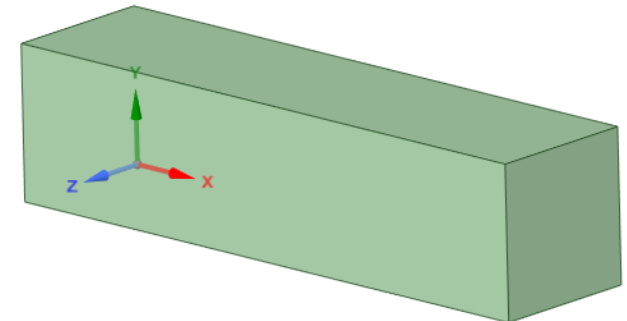
The screenshot shows the 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' window. It contains two tables. The top table lists the contents of the engineering data, and the bottom table shows the properties for the selected 'Structural Steel' material.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source		Description
2	Material				
3	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Isotropic Thermal Conductivity	60,5	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>		

Geometrie:



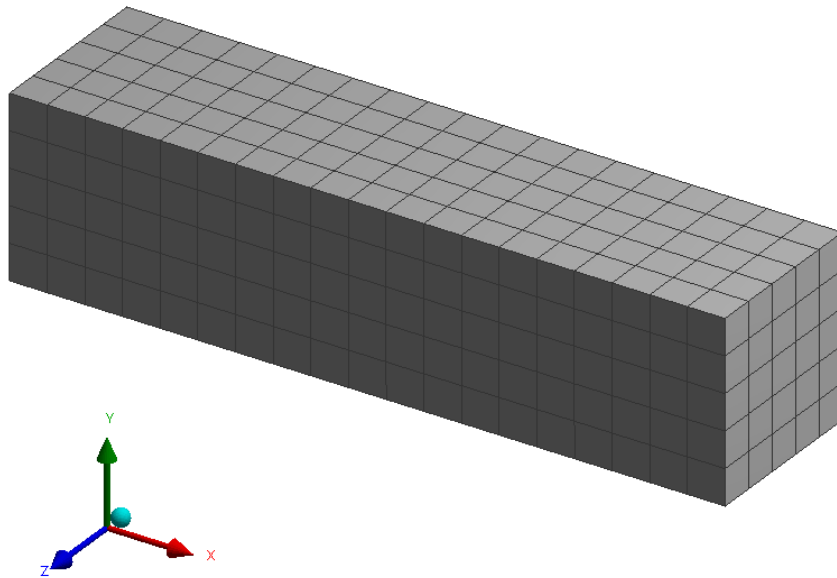
# Simulation von Temperaturfeldern

Eingabedaten für die Simulation:

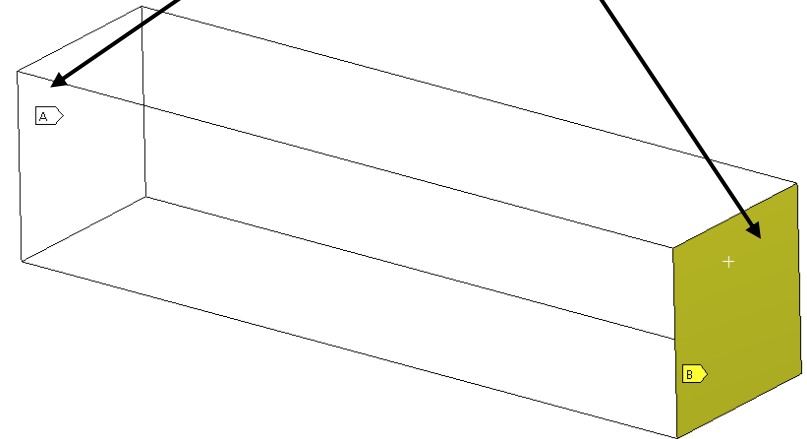
Vernetzung...

...und...

...Randbedingungen:



- Steady-State Thermal (A5)
- ✓ T=0 Initial Temperature
- ✓ Analysis Settings
- ✓ Convection
- ✓ Temperature

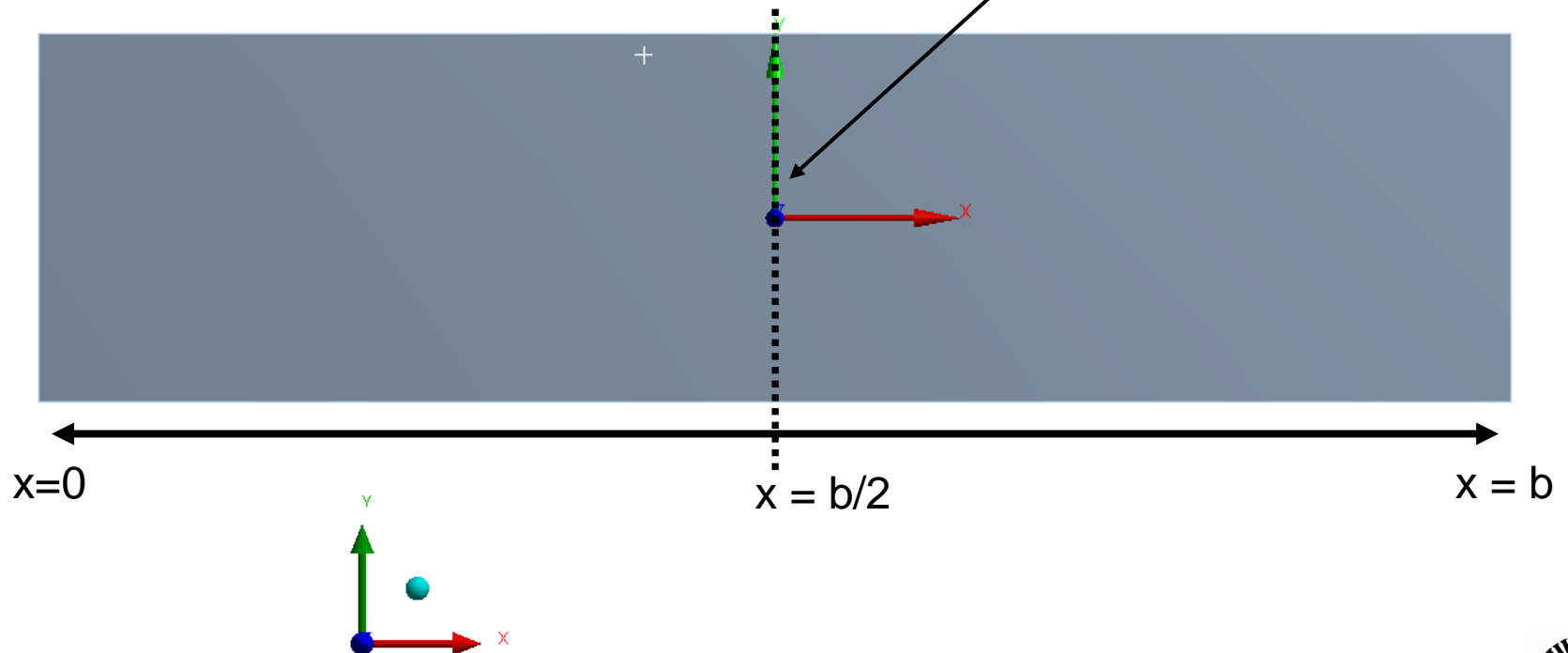


*Keine Randbedingung bedeutet „adiabat“*

# Simulation von Temperaturfeldern

Eingabedaten für die Simulation:

Zusätzliches Koordinatensystem zur Auswertung bei  $x=b/2$ :



# Simulation von Temperaturfeldern

Einpfelegen der Eingabeparameter und Abgleich mit Simulation

	Randbedingung	Geometriewert	Materialwert	Randbedingung	Randbedingung	
	$T_0$	Länge $b$	WL $\lambda$	WÜK $\alpha$	$T_U$	$T_x (x=b/2)$
Var. 1	100°C	40 mm	60 W/mK	300 W/m <sup>2</sup> K	22°C	93,5 °C
Var. 2	200°C	100 mm	120 W/mK	5 W/m <sup>2</sup> K	22°C	199,63 °C
Var. 3	100°C	200 mm	10 W/mK	4 kW/m <sup>2</sup> K	22°C	61,48 °C

	$T_x (x=b/2)$ - analytisch	$T_x (x=b/2)$ - numerisch						
Var. 1	93,5 °C	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Time [s]</td> <td><input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1.</td> <td>93,5</td> </tr> </table>		Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]	1	1.	93,5
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]						
1	1.	93,5						
Var. 2	199,63 °C	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Time [s]</td> <td><input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1.</td> <td>199,63</td> </tr> </table>		Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]	1	1.	199,63
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]						
1	1.	199,63						
Var. 3	61,48 °C	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Time [s]</td> <td><input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1.</td> <td>61,481</td> </tr> </table>		Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]	1	1.	61,481
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Temp_b/2 [°C]						
1	1.	61,481						



# Simulation von Temperaturfeldern

Ein weiteres Beispiel behandelt die Simulation vom thermisch stationären Zustand eines Würfels (Kantenlänge 20 mm) mit innerer Wärmequelle ( $p = 5e6 \text{ W/m}^3$ ) und Abstrahlung über einer Seitenfläche mit Emissionskoeffizient von 0,8 gegenüber Umgebungstemperatur von  $22^\circ\text{C}$

