

# Modellierung des Wärmeaustauschs Maschine-Umgebung

W.-G. Drossel; St. Ihlenfeldt; C. Zwingenberger  
Fraunhofer IWU Chemnitz

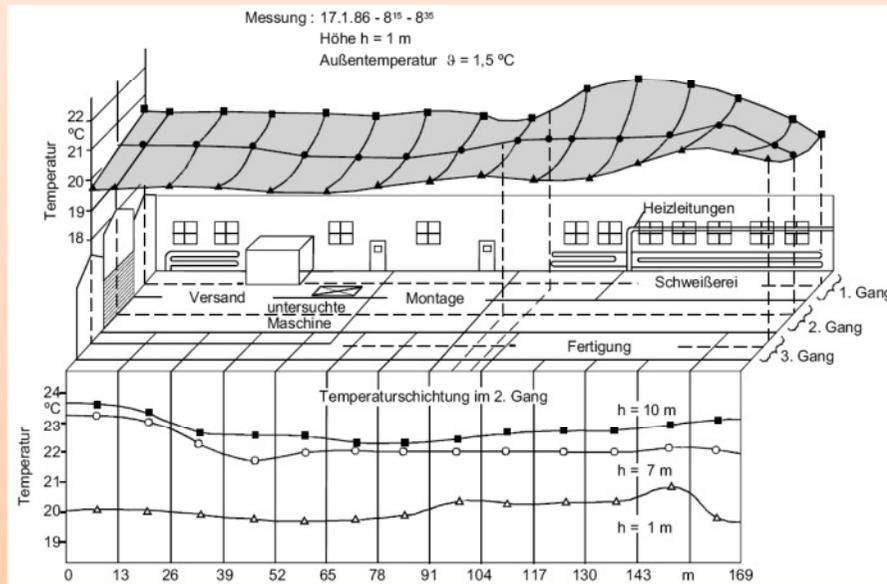
K. Großmann; St. Schroeder IWM  
TU Dresden

## Inhalt

1. Einführung
2. Klassische Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
3. Vereinfachte Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
4. Messtechnischer Nachweis
5. Wärmeübergangsbeschreibung mittels CFD

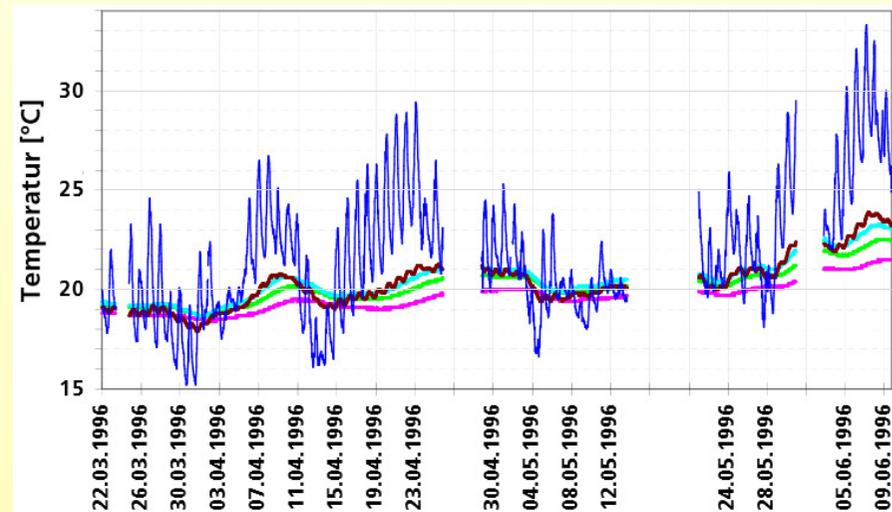
# Thermisches Verhalten der Maschinenumgebung

## Verteilung Lufttemperaturen



[Wec06]

## Tages- und jahreszeitlicher Temperaturverlauf

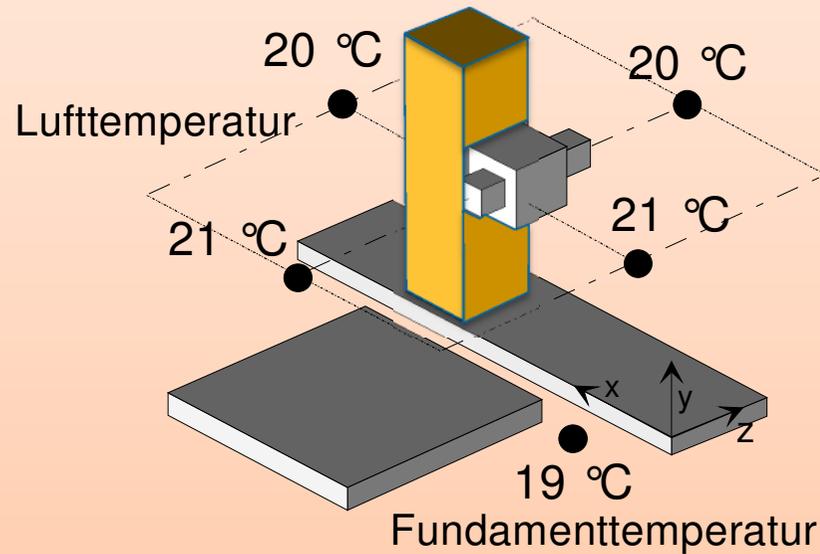


- Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,5 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,75 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,2 m Tiefe
- Werkhallentemperatur

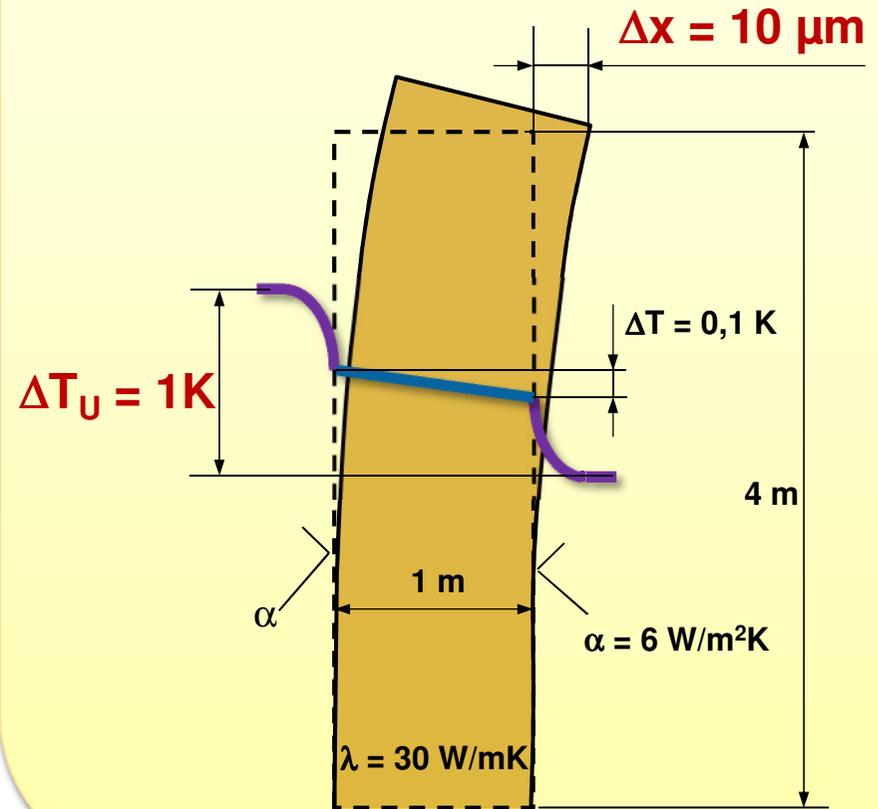
[Nes11]

Beispiel Maschinenständer bei Umgebungslast

Umgebungstemperaturfeld  
Werkzeugmaschine  $\Delta T_U = 1K$

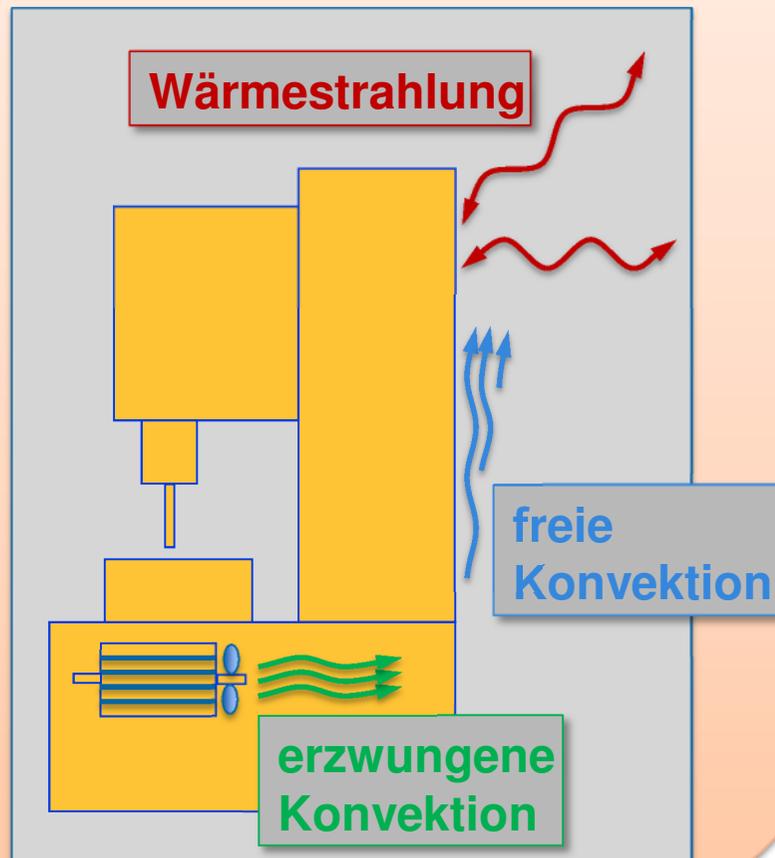


Resultierende Verformung



## Wärmeübertragungsmechanismen zur Umgebung

### Wärmeübertragungsmechanismen



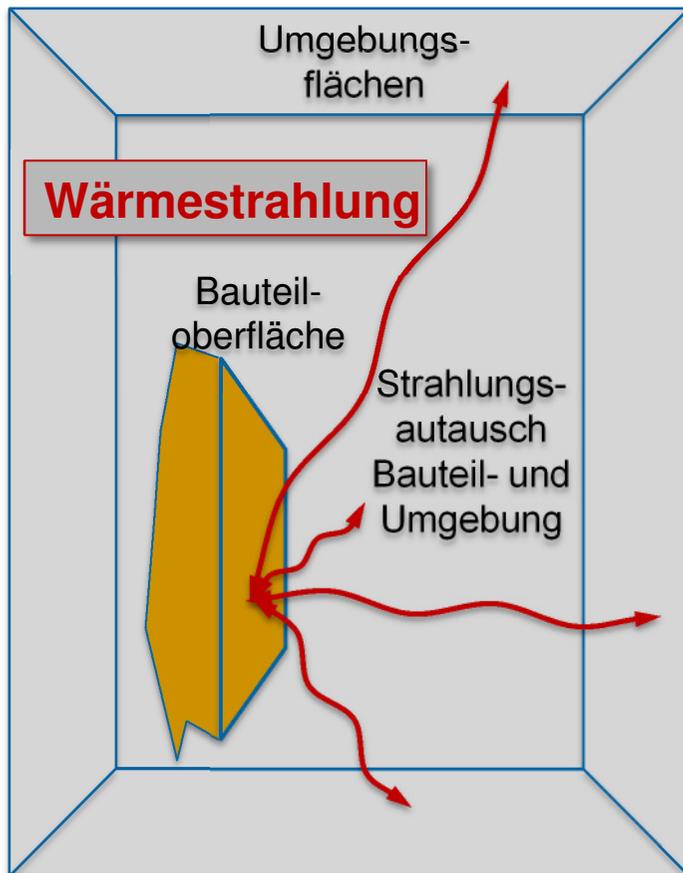
### Größenordnung anhand Wärmeübergangskoeffizient:

- **Wärmestrahlung**  
 $\alpha \approx 4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (für  $\Delta T=1 \text{ K}$ )
- **freie Konvektion**  
 $\alpha \approx 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (für  $\Delta T=1 \text{ K}$ ,  $l = 1 \text{ m}$ )
- **erzwungene Konvektion**  
 $\alpha \approx 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (für  $\Delta T=1 \text{ K}$ ,  $v = 0,1 \text{ m/s}$ )

## Inhalt

1. Einführung
2. Klassische Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
3. Vereinfachte Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
4. Messtechnischer Nachweis
5. Wärmeübergangsbeschreibung mittels CFD

## Wärmestrahlung

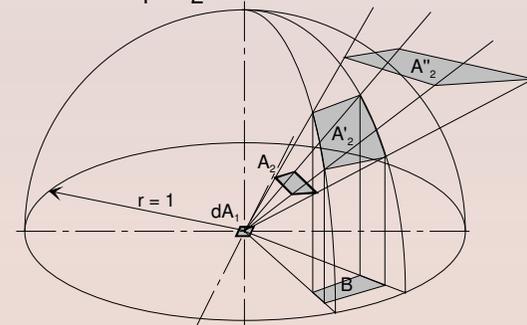


## Modellierung nach Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$\alpha_{S,1-2} = \varphi_{1-2} \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot C_S \cdot \vartheta$$

- $C_S$  - Strahlungszahl des Schwarzen Strahlers
- mittleres Winkelverhältnis

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2)}{r^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2$$

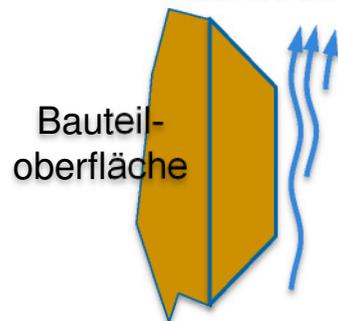


- $\varepsilon_{1-2}$  – resultierendes Emissionsverhältnis
- $\vartheta = \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$  Temperaturfunktion mit absoluten Temperaturen der Oberflächen

## Ähnlichkeitsmodelle für Konvektion

### freie Konvektion

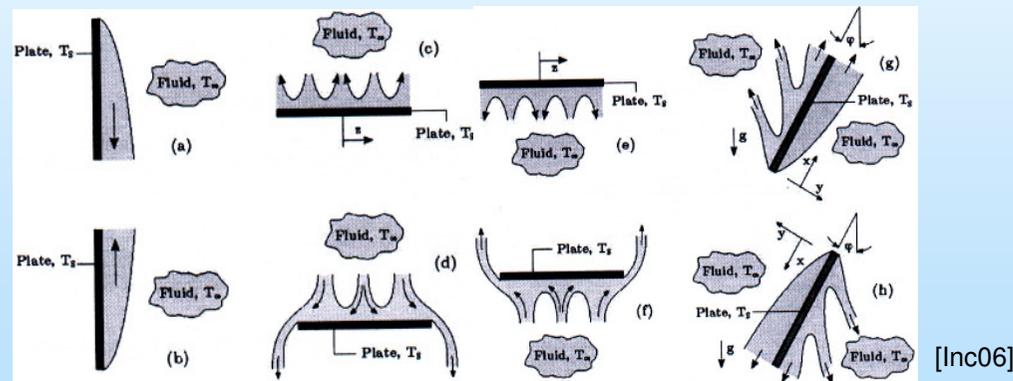
gravitationsge-  
triebener  
Luftstrom



Modellierung mit Ähnlichkeitszahlen in der Form:

$$\alpha_{\text{frei}} = f \{ \text{Nu}(\text{ geom. Anordnung, Gr, Pr }), l, \lambda \}$$

- Ansatz je nach geometrischer Anordnung

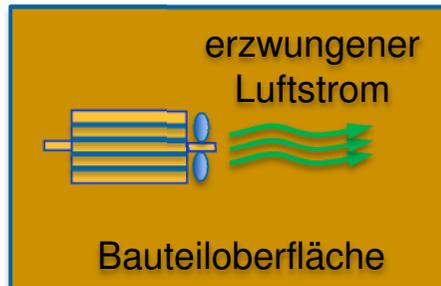


[Inc06]

- Nu - Verhältnis Wärmeübertragung/Wärmeleitung
- Gr - Verhältnis Auftriebskraft/Viskositätskraft
- Re - Verhältnis Trägheitskraft/Zähigkeitskraft
- l – Charakteristische Größe wie Überströmlänge
- $\lambda$  - Wärmeleitfähigkeit

## Ähnlichkeitsmodelle für Konvektion

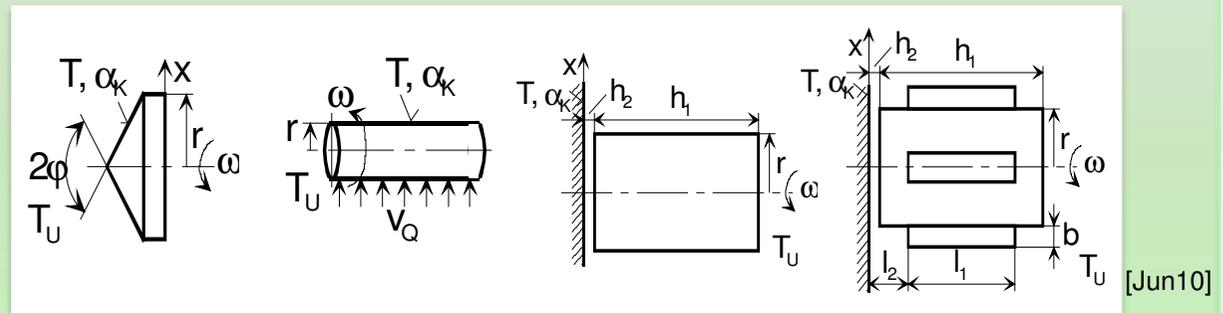
### erzwungene Konvektion



### Modellierung mit Ähnlichkeitszahlen in der Form:

$$\alpha_{\text{erzw}} = f \{ \text{Nu}(\text{geom. Anordnung}, \text{Re}(v), \text{Pr}), l, \lambda \}$$

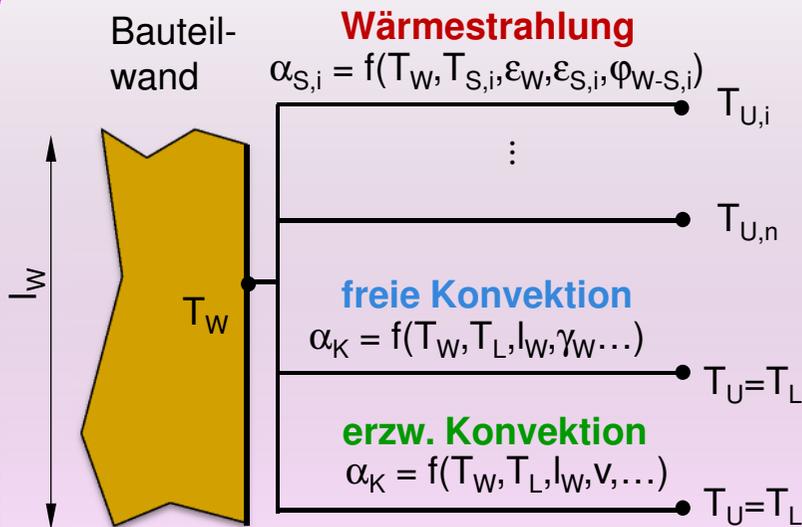
- Ansatz je nach geometrischer Anordnung



- Nu - Verhältnis Wärmeübertragung/Wärmeleitung
- Re - Verhältnis Trägheitskraft/Zähigkeitskraft
- Pr - Viskosität/Temperaturleitfähigkeit des Fluids
- l – Charakteristische Größe wie Überströmlänge
- $\lambda$  - Wärmeleitfähigkeit

# Ausführlicher Ansatz der Umgebungsbeschreibung

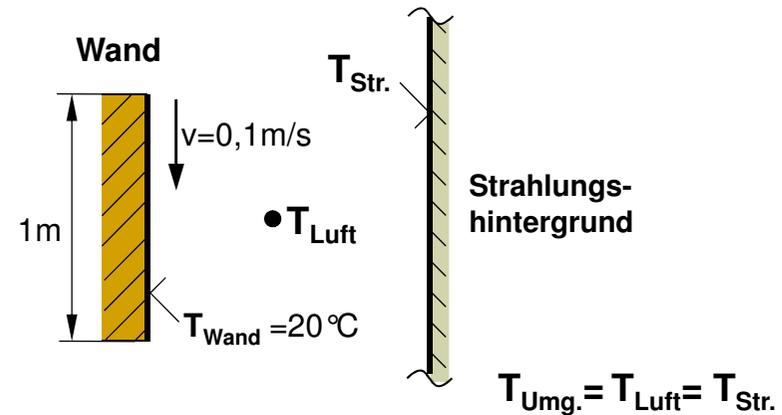
Vorgehen Modellierung:



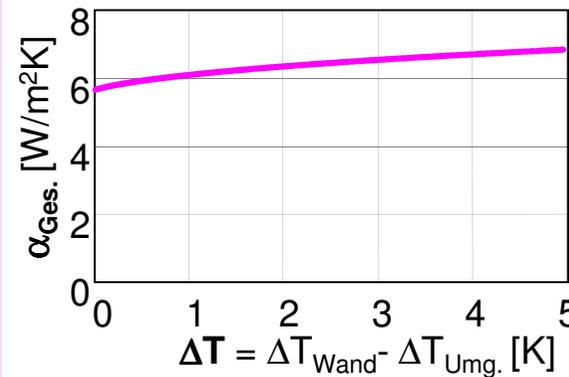
Veränderliche Eingangsgrößen:

- $T_W$  – Wandtemperatur
- $T_{U,i}$  – Temperatur Umgebungsoberflächen
- $T_L$  – Lufttemperatur
- $v_{Luft}$  – Strömungsgeschw. Luft

Beispiel senkrechte Platte:



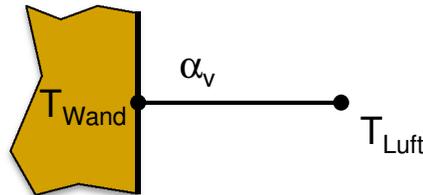
Gesamtwärmeübergang



## Inhalt

1. Einführung
2. Klassische Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
3. Vereinfachte Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
4. Messtechnischer Nachweis
5. Wärmeübergangsbeschreibung mittels CFD

## Vereinfachte Beschreibung des thermischen Umgebungseinflusses



Bauteilwand

### typische Maschinenflächen und Umgebungslast:

- Flächenabmessung > 25cm
- Geringe Temperaturdifferenzen zur Umgebung
- Temperatur Umgebungsluft gleicht Temp. Strahlungsumgebung
- Leichte erzwungene Luftströmung < 0,2 m/s

#### Wärmestrahlung

- Temperaturfunktion konstant  $\vartheta = 10^8 \text{ K}^3$  gültig für geringe Temperaturunterschiede
- Emissionskoeffizient der Umgebung  $\epsilon_U = 0,8$
- mittleres Winkelverhältnis  $\varphi = 1$

$$\alpha = 4,5 \cdot \epsilon_W \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

#### Freie und erzwungene Konvektion

- Ansatz freie Konvektion im turbulenten Bereich  $\alpha = 1,7 \cdot |T_W - T_L|^{0,33}$  gültig für größere Flächen
- erzwungenen Konvektion: Erhöhung der freien Konvektion um 30%

$$\alpha = 2,2 \cdot |T_W - T_L|^{0,33} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

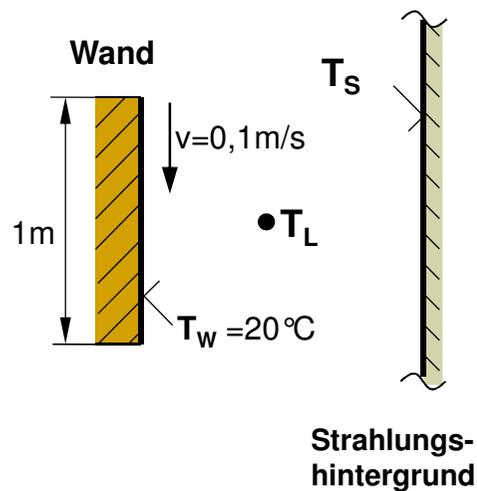
Lufttemperatur = Temperatur Strahlungsumgebung

#### Vereinfachter Ansatz

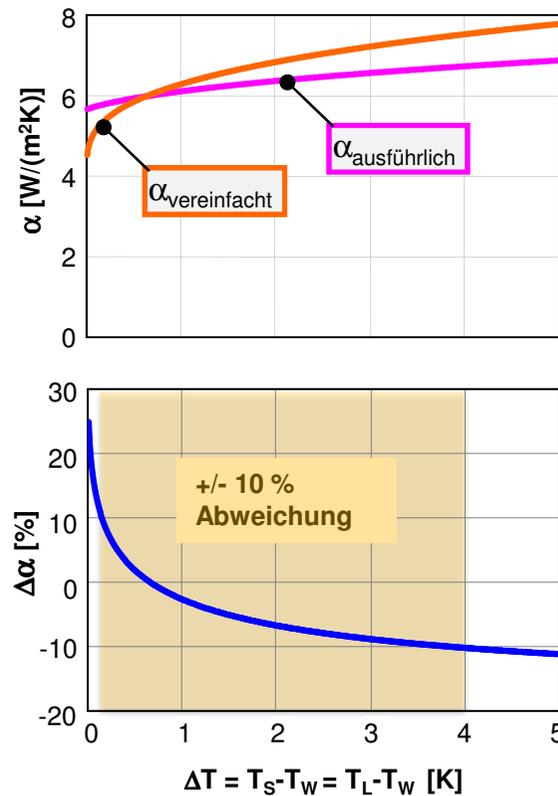
$$\alpha_v = 4,5 \cdot \epsilon_W + 2,2 \cdot |T_W - T_L|^{0,33} \text{ [W/m}^2\text{K}] \quad \text{[Jun10]}$$

# Abschätzung des Fehlers der vereinfachten Beschreibung

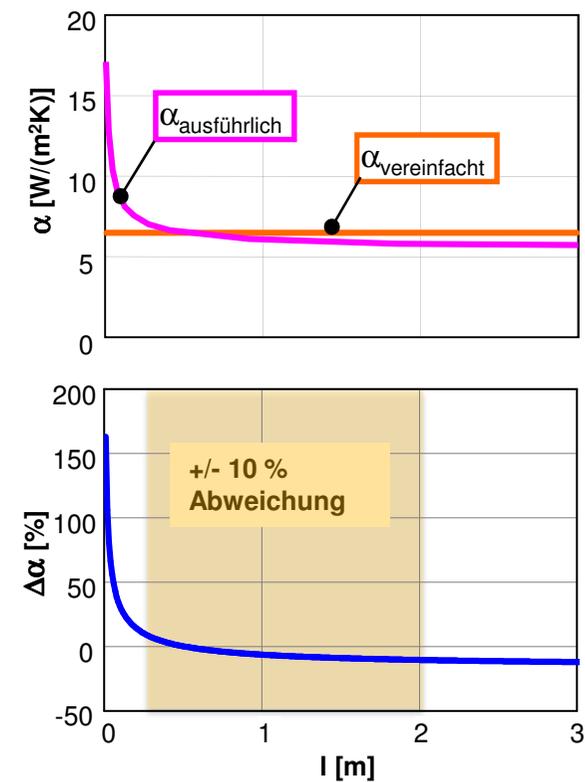
## Fehlerabschätzung anhand Modell vertikaler Wand



### Veränderung Temperaturdifferenz

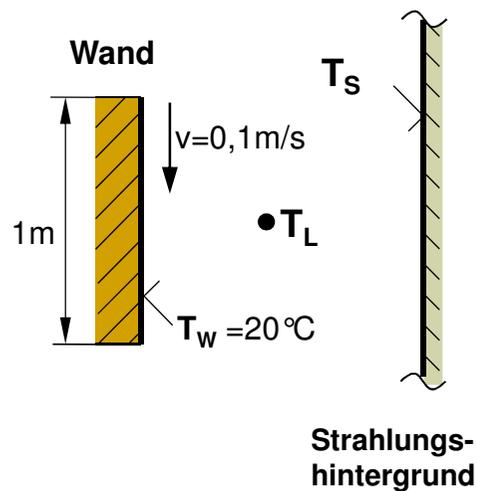


### Veränderung Wandhöhe

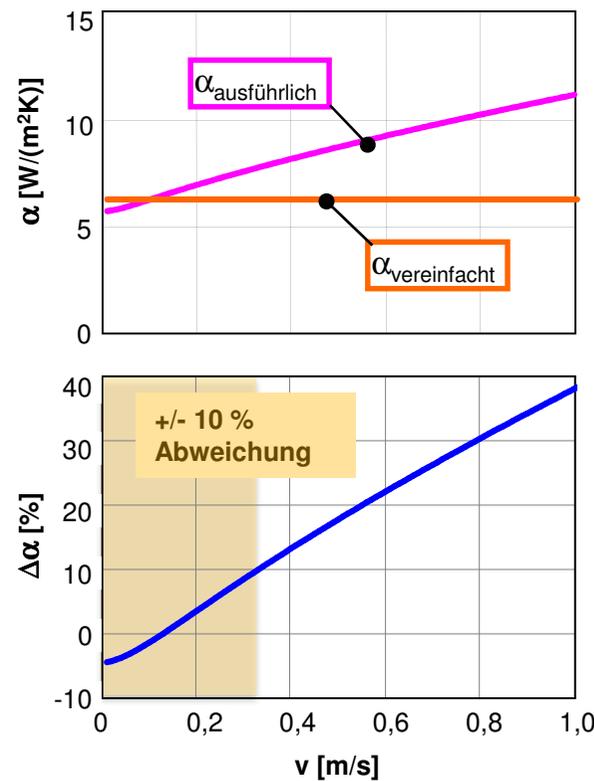


# Abschätzung des Fehlers der vereinfachten Beschreibung

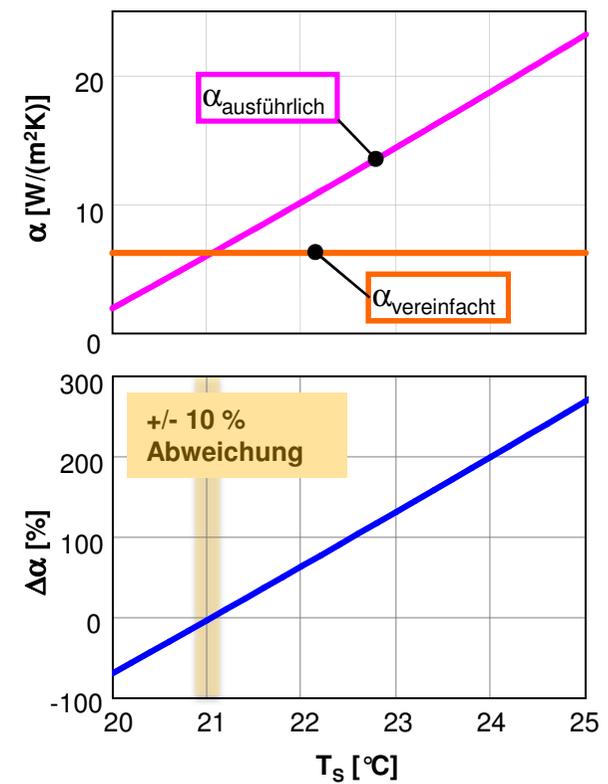
## Fehlerabschätzung anhand Modell vertikaler Wand



## Variation der Luftgeschwindigkeit



## Variation der Temperatur der Strahlungsumgebung



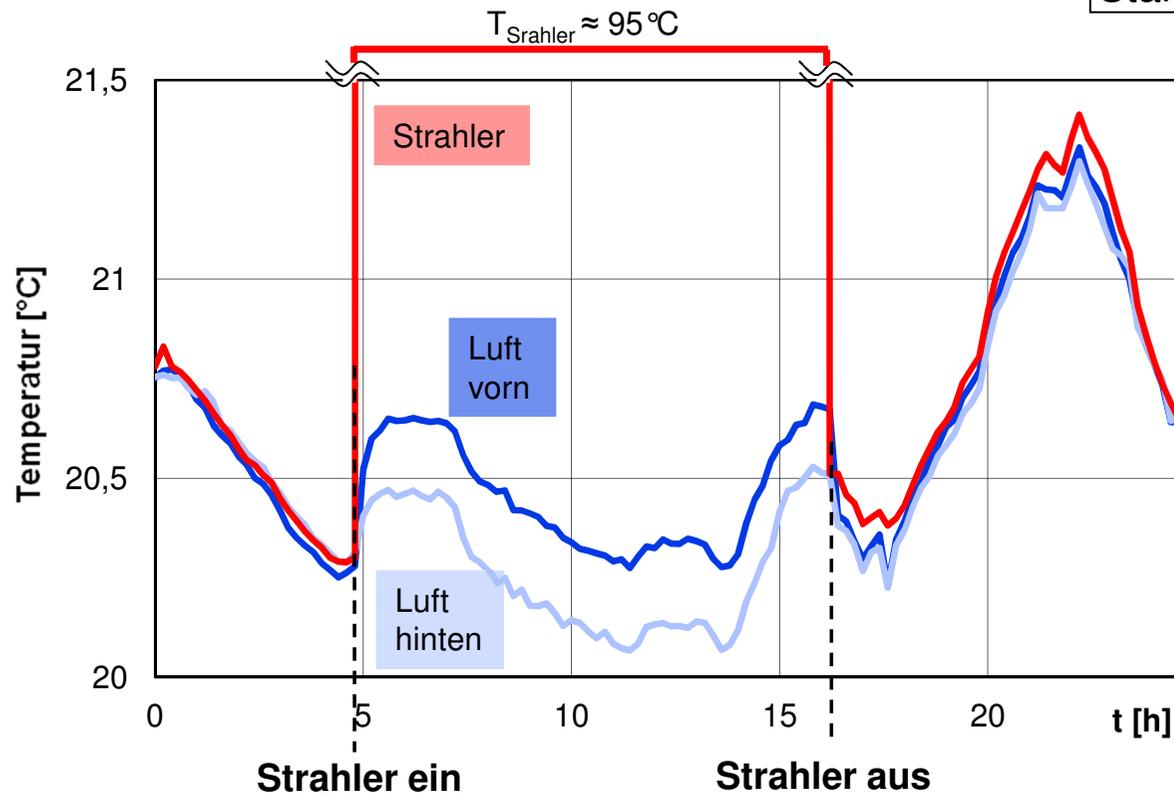
## Inhalt

1. Einführung
2. Klassische Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
3. Vereinfachte Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
4. Messtechnischer Nachweis
5. Wärmeübergangsbeschreibung mittels CFD

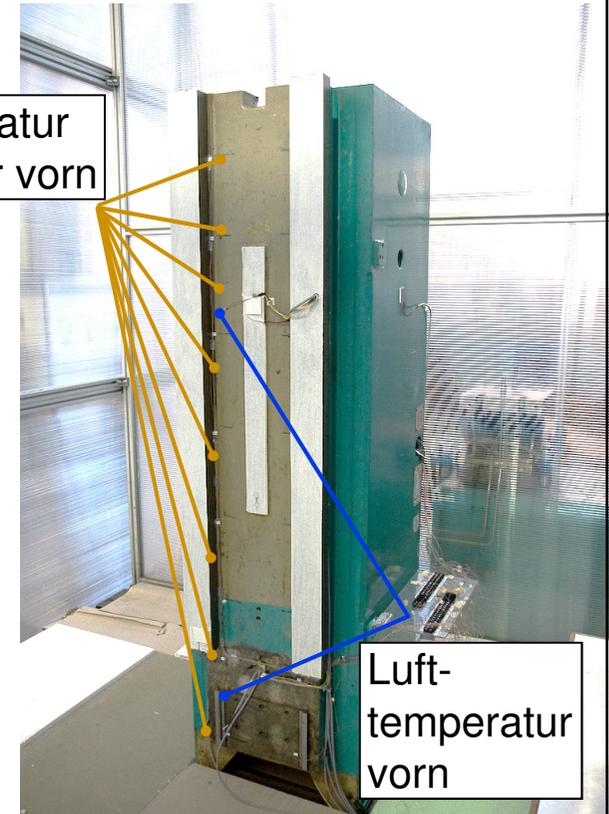
# Versuch zur Validierung der Umgebungsmodelle

Temperaturverläufe Umgebungsluft und Wärmestrahler

Sensoren  
Ständervorderseite

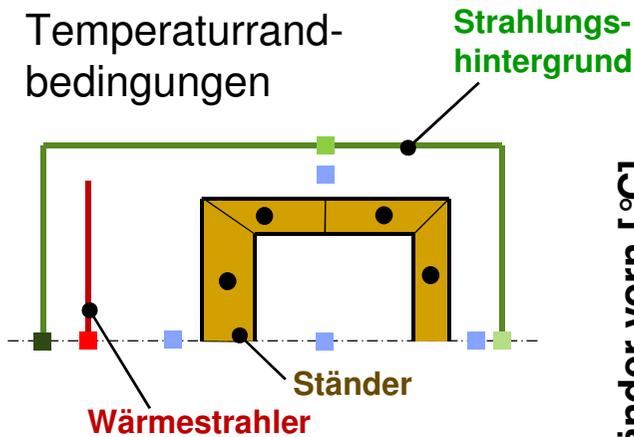


Temperatur  
Ständer vorn

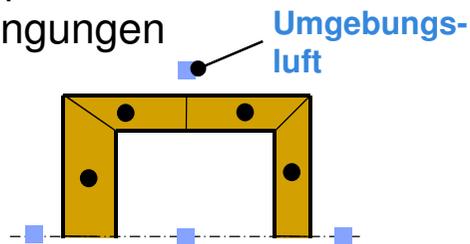


# Vergleich Messung mit Modellen

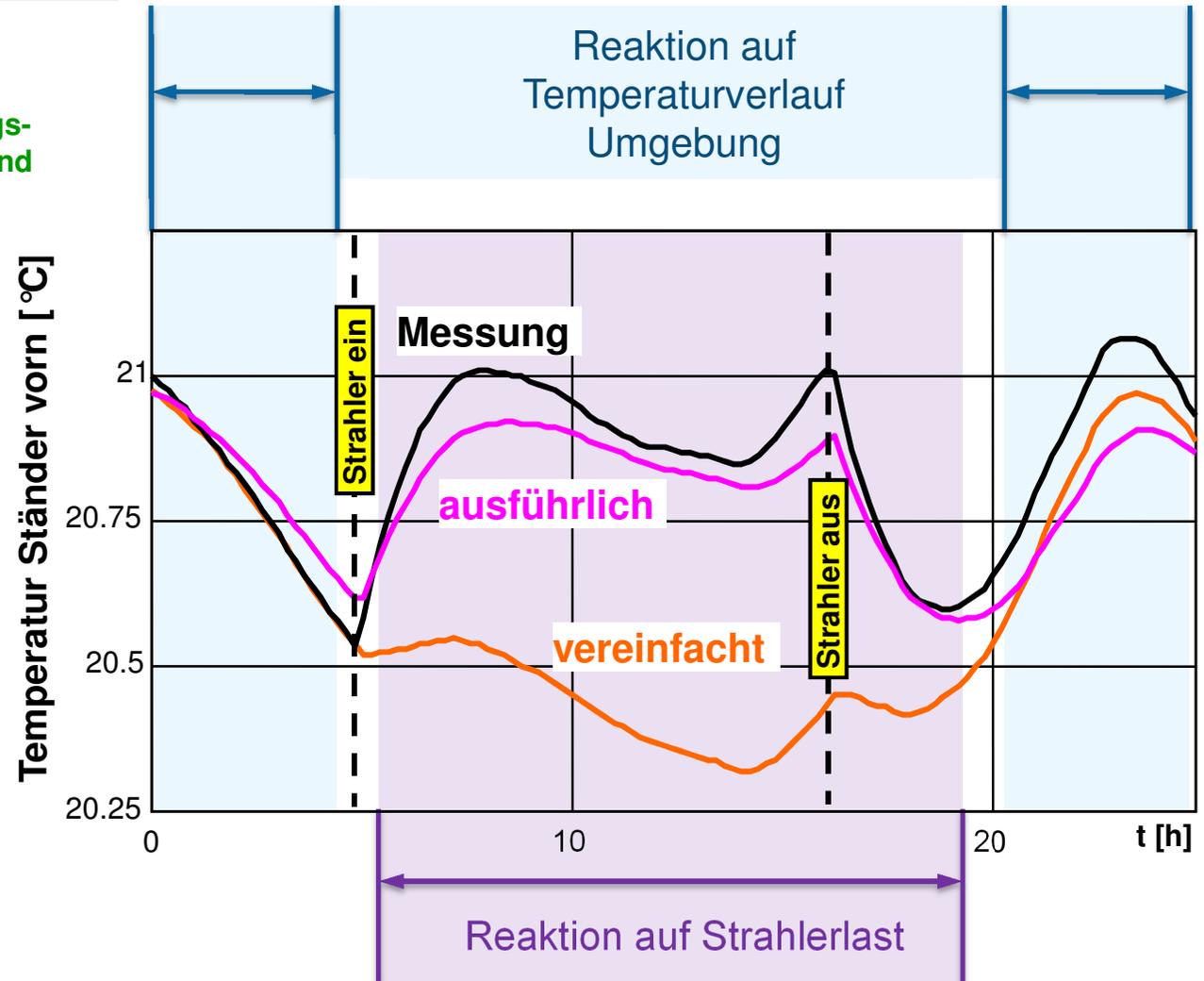
**ausführlich** mit Temperaturrandbedingungen



**vereinfacht** mit Temperaturrandbedingungen



■ Temperaturrandbedingung



## Grenzen der Ähnlichkeitsmodelle

Begrenzte Gültigkeitsbereiche der konvektiven Ähnlichkeitsmodelle insbesondere bei:

- Flächengeometrien, Randflächen
- Flächenneigung bezüglich Gravitationskraft
- Temperaturverteilung der Flächen
- Strömungsrichtung bei erzwungener Konvektion

Messtechnische  
Untersuchung

Numerische  
Strömungsberechnung

## Inhalt

1. Einführung
2. Klassische Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
3. Vereinfachte Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
4. Messtechnischer Nachweis
5. Wärmeübergangsbeschreibung mittels CFD

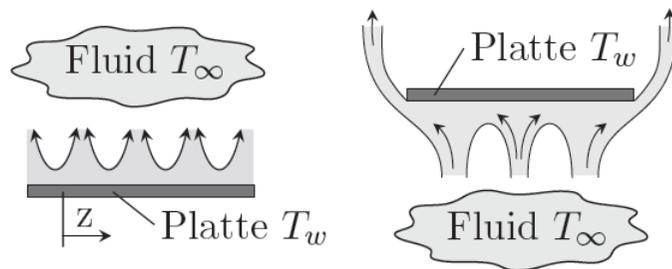
# CFD-Simulation – freie Konvektion an horizontaler Platte

- Unterscheidung der Orientierung von Oberflächen zur Gravitation erforderlich
- Ablöseerscheinungen beeinflussen den Wärmestrom (Erhöhung des Wärmestroms)
- Ähnlichkeitsmodelle beinhalten ebenfalls Fallunterscheidung mit bereichsweise gültigen Berechnungsvorschriften

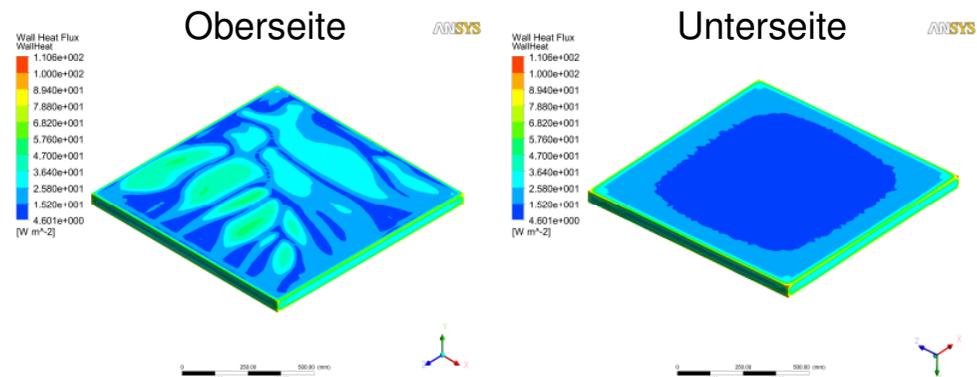
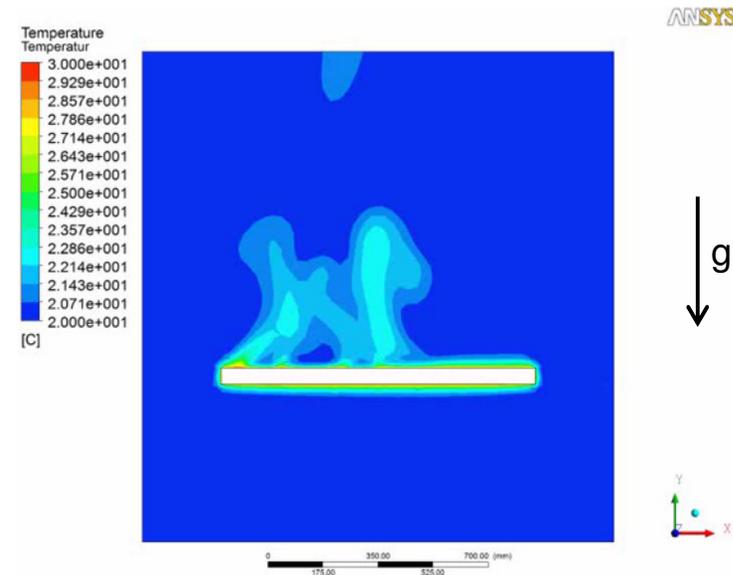
$$T_W = 30^\circ \text{C} \quad T_\infty = 20^\circ \text{C}$$

Plattenabmessungen:  $1\text{m} \times 1\text{m}$

Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)

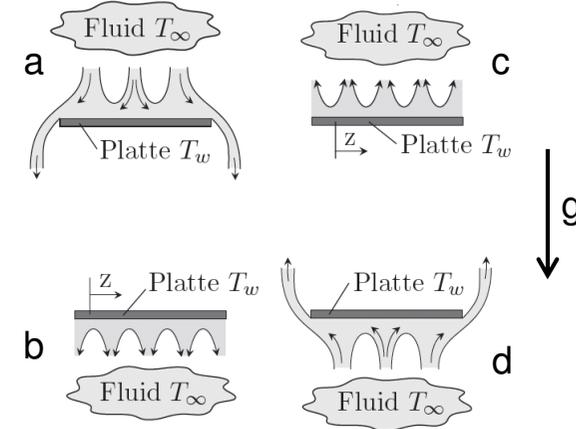


nach [Inc06]



Vergleich CFD-Simulation  $\leftrightarrow$  analytische Berechnung (horizontale Platte)

- Abweichungen zwischen analytischer Berechnung und CFD-Simulation bis zu 40% für horizontale, ebene Platte (bezogen auf Gesamtwärmestrom einer Platte von 1m x 1m)
- Randbereiche werden bei analytischer Betrachtung nicht adäquat berücksichtigt
- Strömungssimulation beinhaltet Turbulenzmodell SST („Shear Stress Transport“)



nach [Inc06]

Randbedingungen bei Abkühlung:

$$T_w = 30^\circ \text{ C} \quad T_\infty = 20^\circ \text{ C}$$

Plattenabmessungen: 1m x 1m

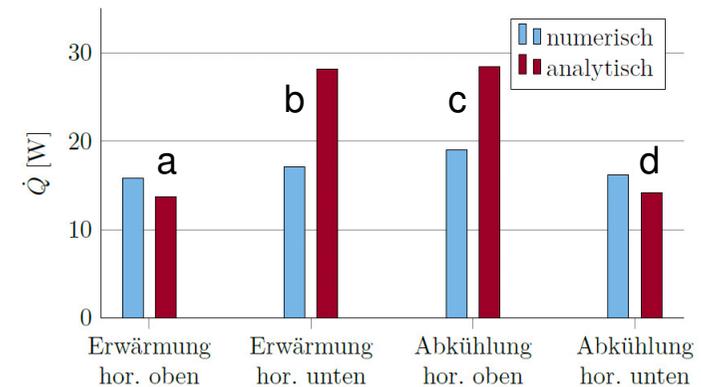
Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)

Randbedingungen bei Erwärmung:

$$T_w = 20^\circ \text{ C} \quad T_\infty = 30^\circ \text{ C}$$

Plattenabmessungen: 1m x 1m

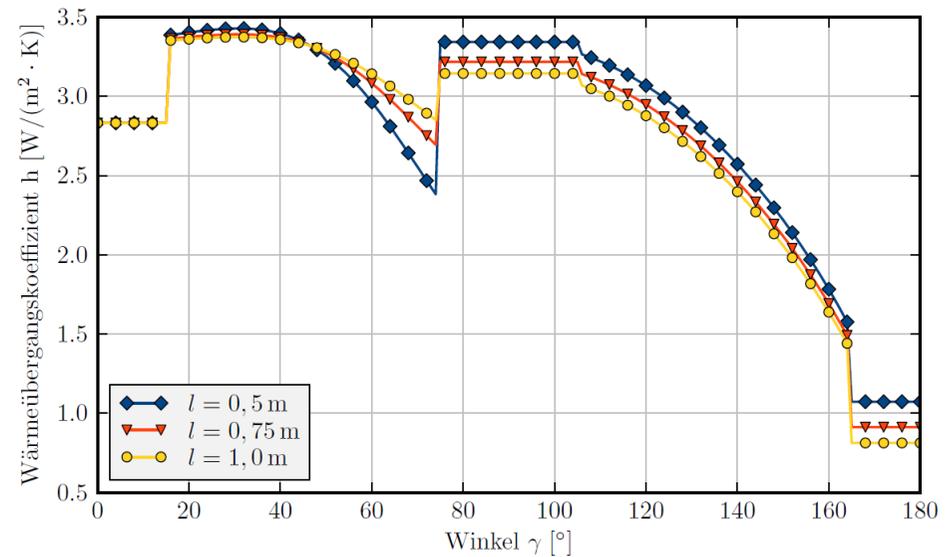
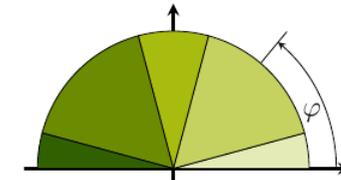
Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)



## Vereinfachungen der Ähnlichkeitsmodelle

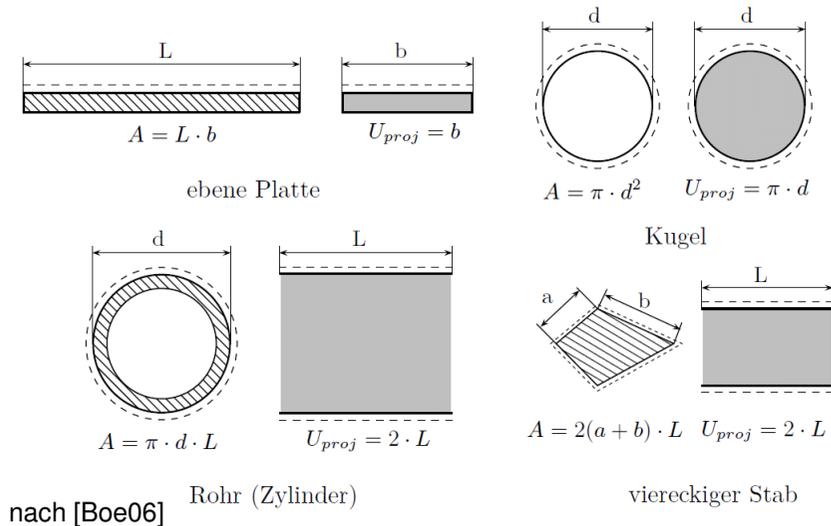
- Fallunterscheidung nach Ausrichtung der Oberflächen zur Gravitation
- Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Orientierungen ermittelbar auf Grundlage empirisch bestimmter Berechnungsvorschriften
- Bereichsweise Gültigkeit → führt zu Unstetigkeiten (Wechsel von winkelabhängigen und winkelunabhängigen Berechnungsgleichungen)
- Größe der sprunghaften Änderungen sind von der Überströmlänge abhängig
- In der Realität sind sprunghafte Änderungen des Wärmestroms von der Wand zum Fluid ebenfalls feststellbar → Übergang von laminarer in turbulente Strömung

- horizontale Oberseite  $\varphi = 0^\circ - 15^\circ$
- geneigte Oberseite  $\varphi = 15^\circ - 75^\circ$
- senkrechte Fläche  $\varphi = 75^\circ - 105^\circ$
- geneigte Unterseite  $\varphi = 105^\circ - 165^\circ$
- horizontale Unterseite  $\varphi = 165^\circ - 180^\circ$



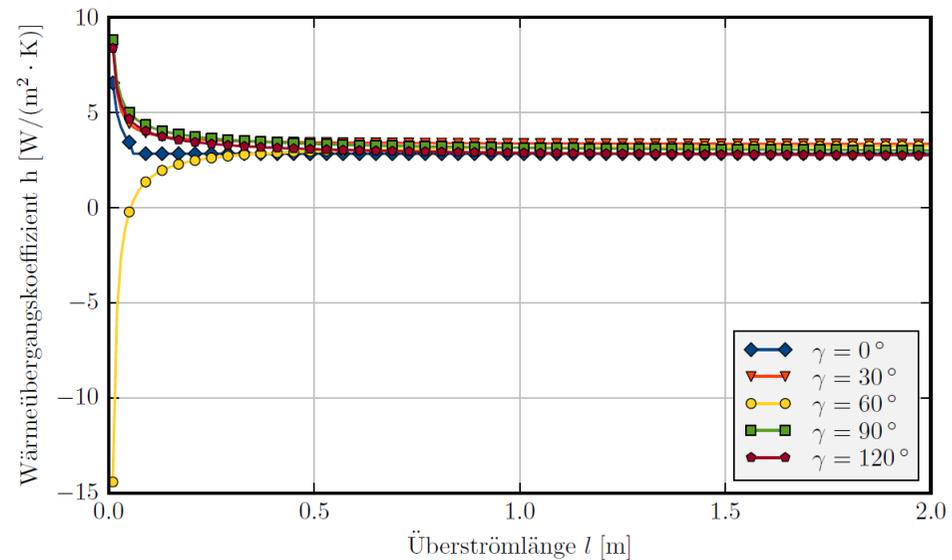
## Vereinfachungen der Ähnlichkeitsmodelle

- Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Überströmlängen und Neigungswinkel zur Gravitation (Diagramm)
- Anwendbarkeit für kleine Werte nicht bzw. nur eingeschränkt gegeben
- Empirische Berechnungsgleichungen für große Flächen ermittelt



$$l = \frac{A}{U_{proj}}$$

l – Überströmlänge  
 A – Wärmeübertragungsfläche  
 $U_{proj}$  – Umfang der Projektionsfläche in Strömungsrichtung



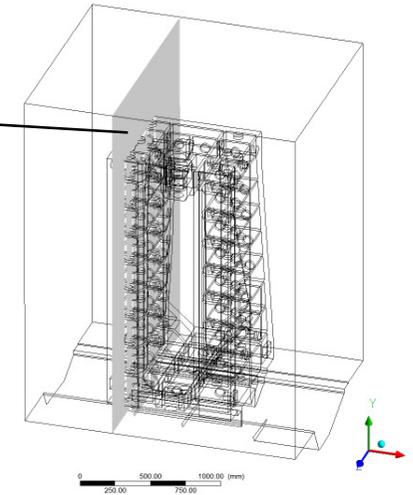
## CFD-Simulation freier Konvektion

- Auswirkung der Geometrie auf die Strömungsgeschwindigkeiten
- Beeinflussung des Wärmeaustauschs durch Konvektion in Gestellinnenräumen
- Beispiel: Übereinanderliegende Bohrungen → Kamineffekt

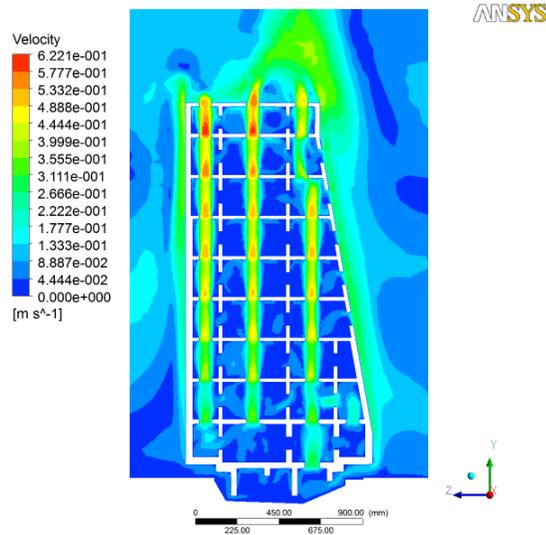
$$T_W = 30^\circ \text{C} \quad T_\infty = 20^\circ \text{C}$$

Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)

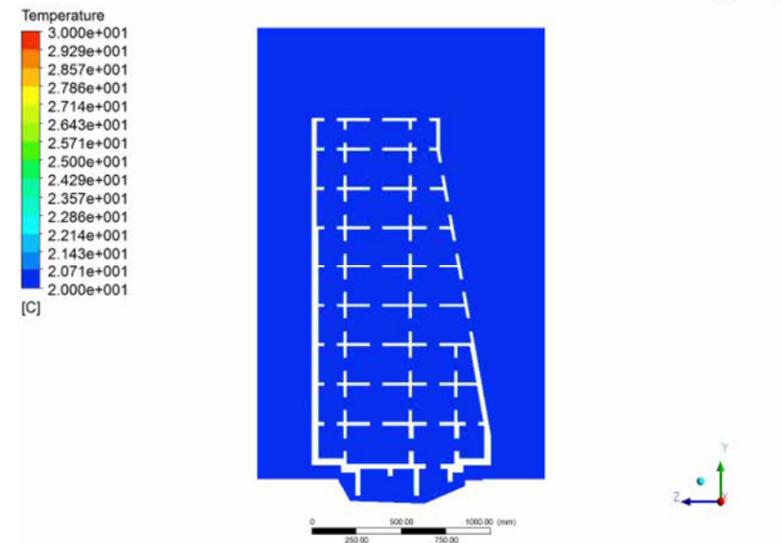
Schnittebene der Auswertung



Transiente Simulation - Strömungsgeschwindigkeiten

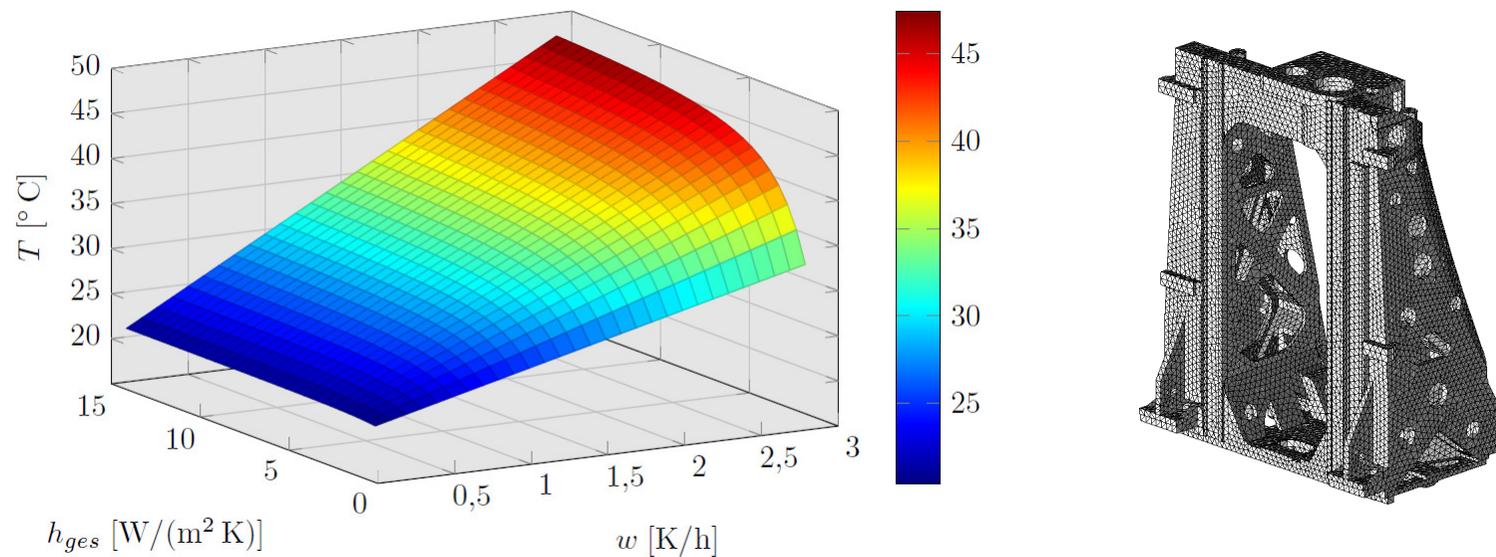


Transiente Simulation – Temperaturverteilung (8min)



## Einfluss der Intensität thermischer Umgebungslasten

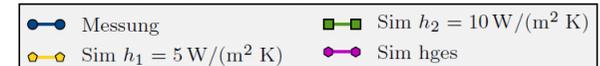
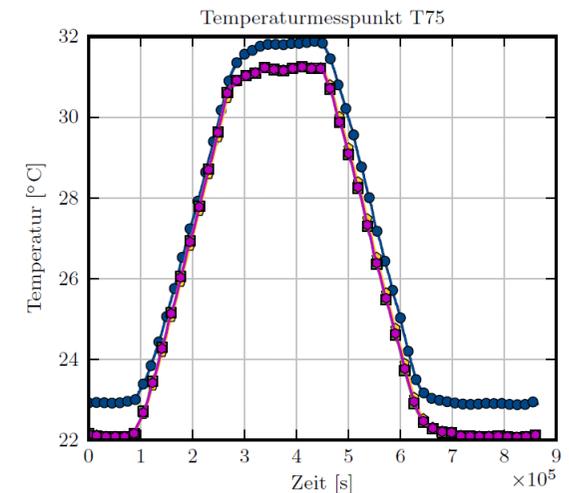
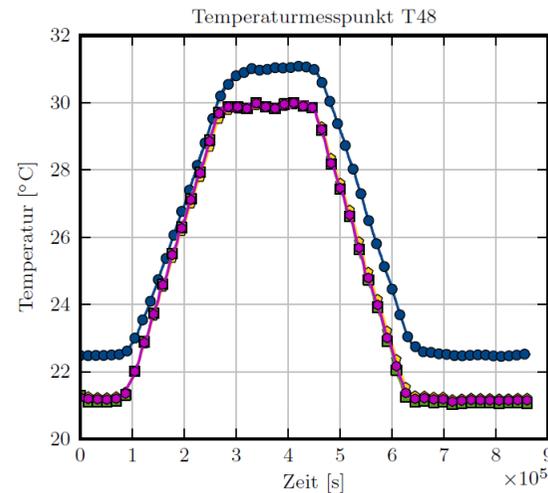
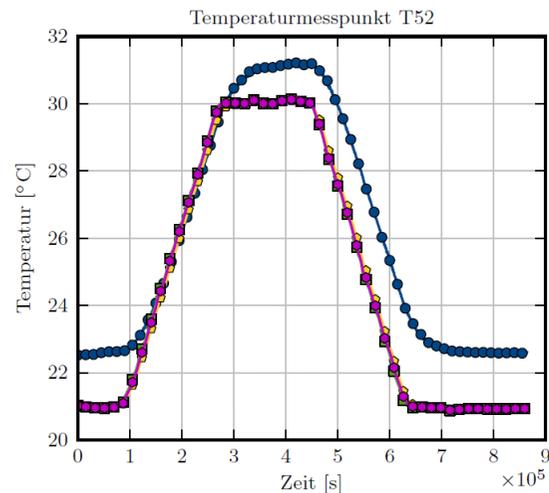
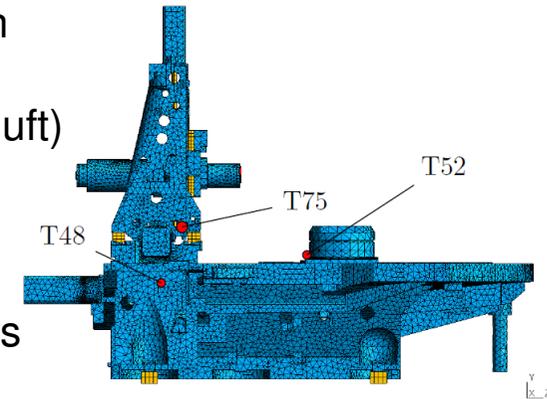
- Einfluss der Genauigkeit von Randbedingungen zur Definition des Wärmeaustausch mit der Umgebung steigt mit der Intensität der thermischen Umgebungslasten
- Zeitlich geringe Änderungen der Umgebungsbedingungen führen zu Steigerung der Fehlertoleranz (Beachtung Biot-Zahl)



Abhängigkeit der Endtemperatur (nach 10 Stunden) von Erwärmungsgeschwindigkeit und Wärmeübergangskoeffizient bei instationärer Wärmeleitung mit linearem Temperaturanstieg für einen Maschinenständer

## Einfluss der Intensität thermischer Umgebungslasten

- Variation der Wärmeübergangskoeffizienten ohne signifikanten Einfluss auf den Temperaturverlauf bei geringer Umgebungslast (0,2K/h Temperaturänderung der Umgebungsluft)
- Fehlende Maschinenverkleidung im Simulationsmodell ist ursächlich für Abweichungen beim Temperaturniveau und zeitliche Abweichungen der Simulation gegenüber Messung (Basis der thermischen Simulation ist ein strukturmechanisches FEM-Modell)



## Zusammenfassung

- Beschreibung des Wärmeaustauschs zwischen Maschinenstruktur und Umgebung durch verschiedene Modellierungsansätze möglich
- Analytische Beschreibung basiert auf experimentellen Untersuchungen mit Hilfe von dimensionslosen Proportionalitätsfaktoren nach der Ähnlichkeitstheorie → an Vereinfachungen geknüpft, die im Einzelfall nicht oder unzureichend erfüllt sind
- CFD-Simulationen bieten die Möglichkeit der Analysen beliebiger Geometrien, sind jedoch an eine Vielzahl weiterer Parameter gebunden (Strömungsgeschwindigkeiten, Materialparameter, Turbulenzmodelle usw.)
- Vereinfachte Modellierungsansätze liefern bei Einhaltung der Gültigkeitsbedingungen hinreichend genaue Ergebnisse bei vertretbarem Berechnungsaufwand
- Für Werkzeugmaschinen erforderliche Vorhersagegenauigkeit erfordert eine Erweiterung der vorhandenen, allgemeinen Beschreibungsmöglichkeiten des Wärmeaustauschs zwischen Umgebung und Maschinenstruktur
- Einsatz von Strömungssimulationen in Verbindung mit Messungen zur Verifizierung stellt sinnvollen Ansatz zur Erweiterung bekannter empirischer Modelle dar

## Literatur

- [Boe06] Böckh, P.v.: Wärmeübertragung Grundlagen und Praxis. Springer-Verlag 2006
- [Inc06] Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T. L.; Adrienne, S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons 2006
- [Jun10] Jungnickel, G.: Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. Modellierung und Parametrierung. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, TU Dresden 2010
- [Nes11] Nestmann, S.; Richter, C.; Schädlich, K.: Thermische Untersuchung von Werkzeugmaschinen unter definierten Belastungs- und Umgebungsbedingungen. Tagungsband zum 1. Kolloquium zum SFB/TR-96 Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen 28./29.11.2011 in Dresden
- [VDI06] VDI-Wärmeatlas. 10. bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer –Verlag, Berlin, Heidelberg 2006
- [Wec06] Weck, M., Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006
- [Wie67] Viele, H.; Klaeger, S.: Untersuchung der thermischen bedingten Verformung eines Großwälzfräsmaschinenständers. Maschinenbautechnik 16 (1967) 11, S. 569-574

Dank

Diese Arbeiten werden mit Mitteln der  
Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert,  
wofür gedankt wird.

SFB/TR 96, Teilprojekt B01, A05 und B07



**DFG**

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.**