



Modellierung des Wärmeaustauschs Maschine-Umgebung

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

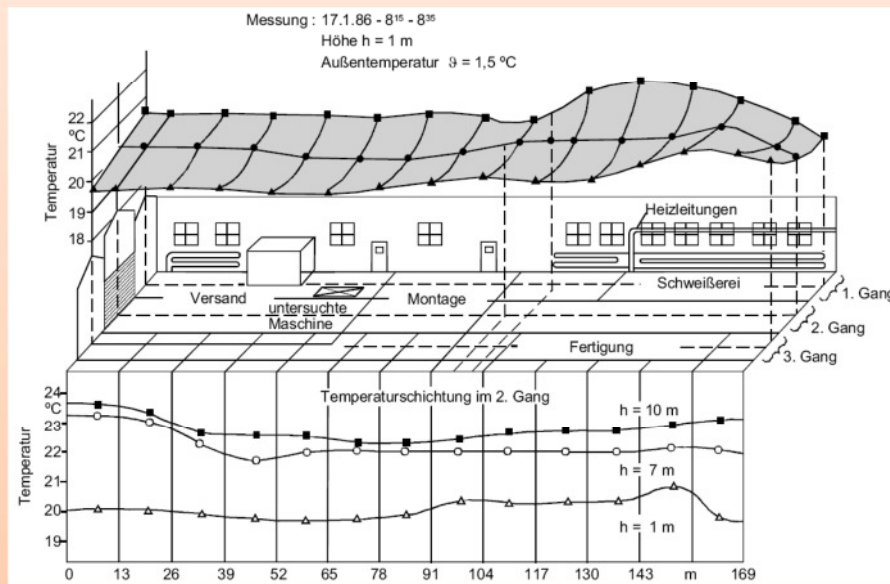
K. Großmann; St. Schroeder IWM
TU Dresden

Inhalt

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

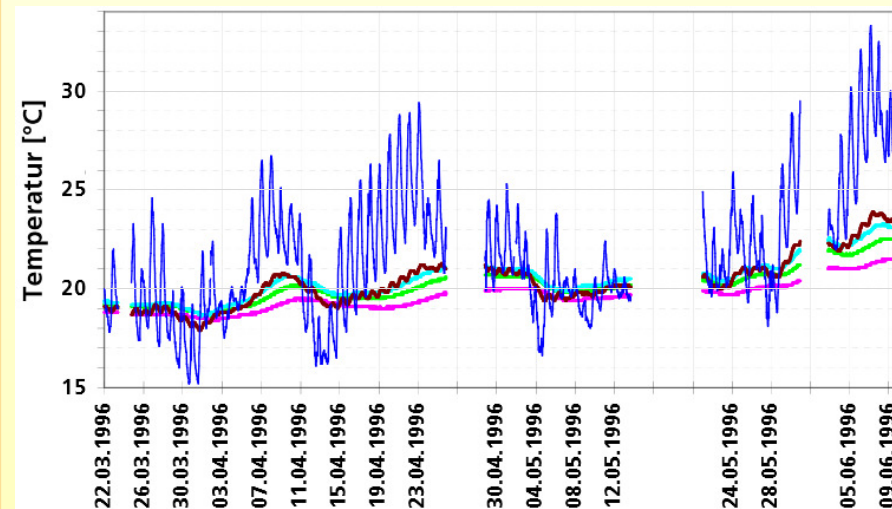
Thermisches Verhalten der Maschinenumgebung

Verteilung Lufttemperaturen



[Wec06]

Tages- und jahreszeitlicher Temperaturverlauf

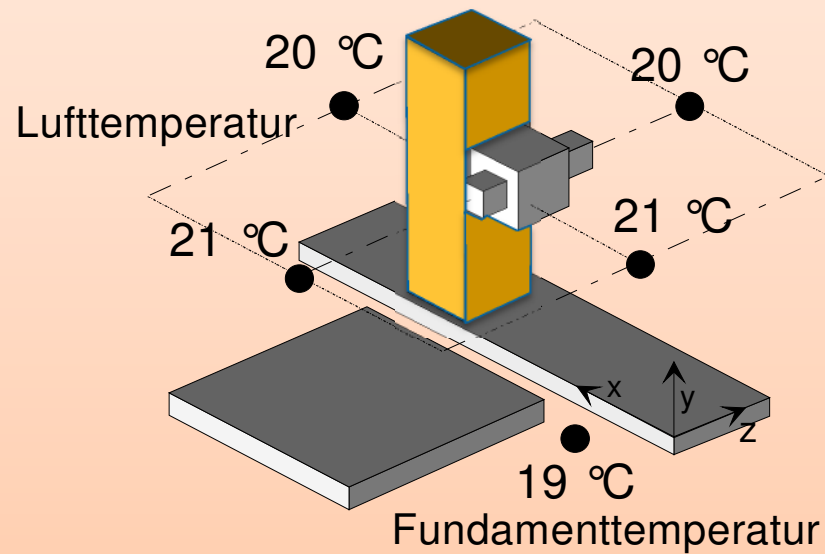


- Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,5 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,75 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,2 m Tiefe
- Werkhallentemperatur

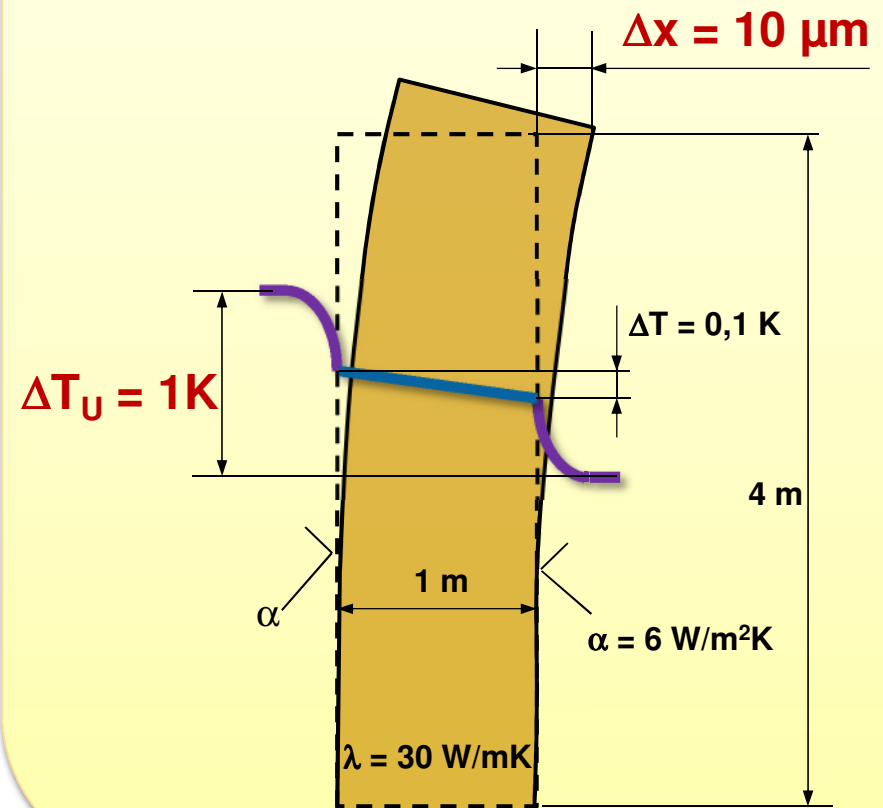
[Nes11]

Beispiel Maschinenständer bei Umgebungslast

Umgebungstemperaturfeld
Werkzeugmaschine $\Delta T_U = 1K$

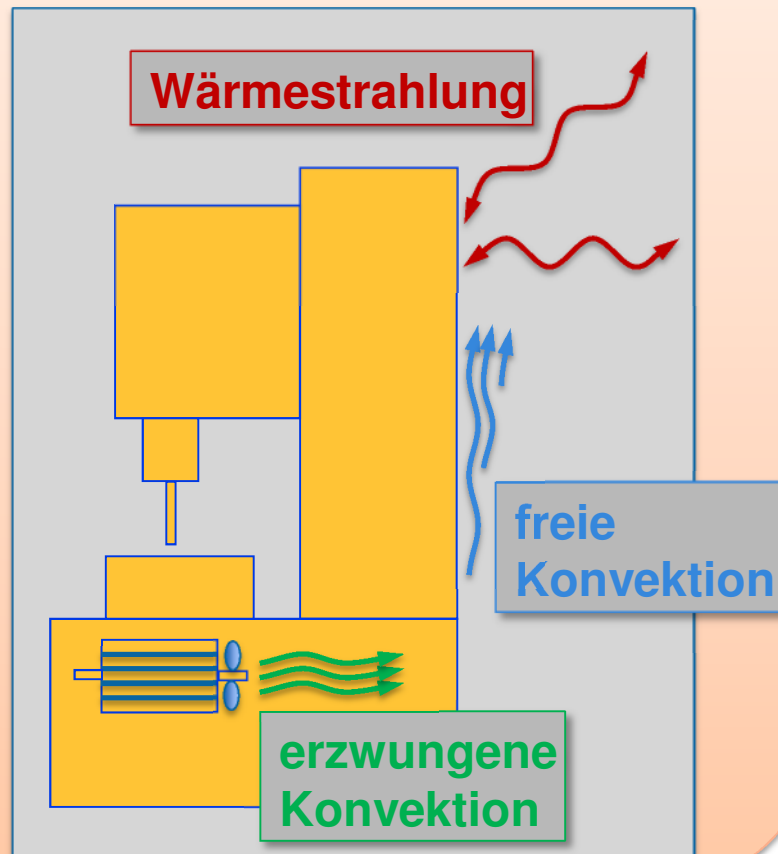


Resultierende Verformung



Wärmeübertragungsmechanismen zur Umgebung

Wärmeübertragungsmechanismen



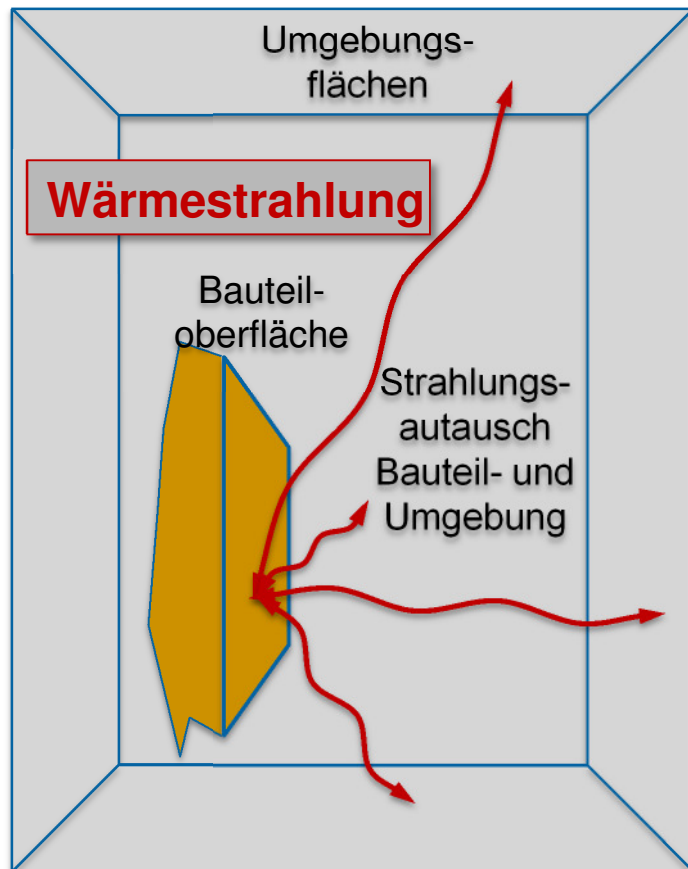
Größenordnung anhand Wärmeübergangskoeffizient:

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

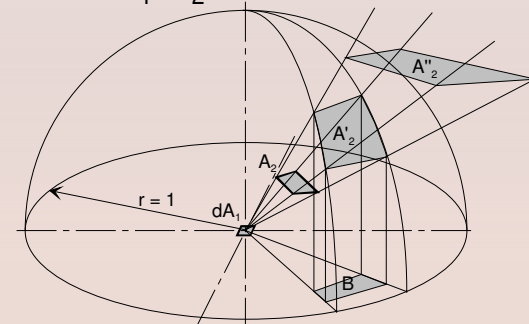


Modellierung nach Stefan-Boltzmann-Gesetz

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

- C_s - Strahlungszahl des Schwarzen Strahlers
- mittleres Winkelverhältnis

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

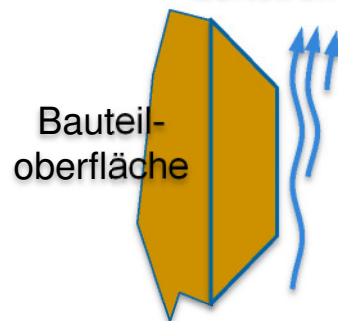


- ε_{1-2} – resultierendes Emissionsverhältnis
- $\vartheta = \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$ Temperaturfunktion mit absoluten Temperaturen der Oberflächen

Ähnlichkeitsmodelle für Konvektion

freie Konvektion

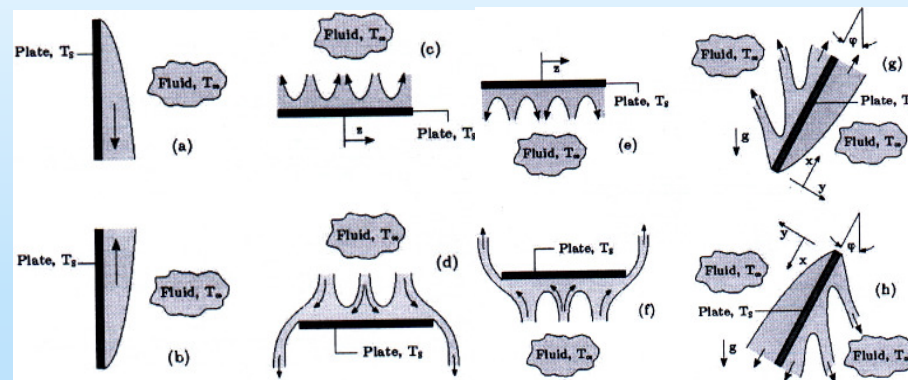
gravitationsge-
triebener
Luftstrom



Modellierung mit Ähnlichkeitszahlen in der Form:

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

- Ansatz je nach geometrischer Anordnung

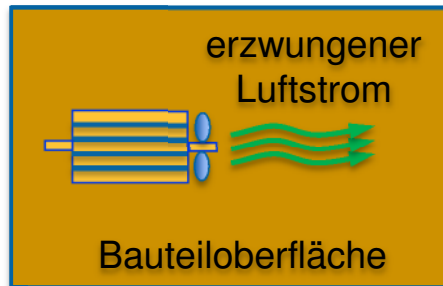


[Inc06]

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

Ähnlichkeitsmodelle für Konvektion

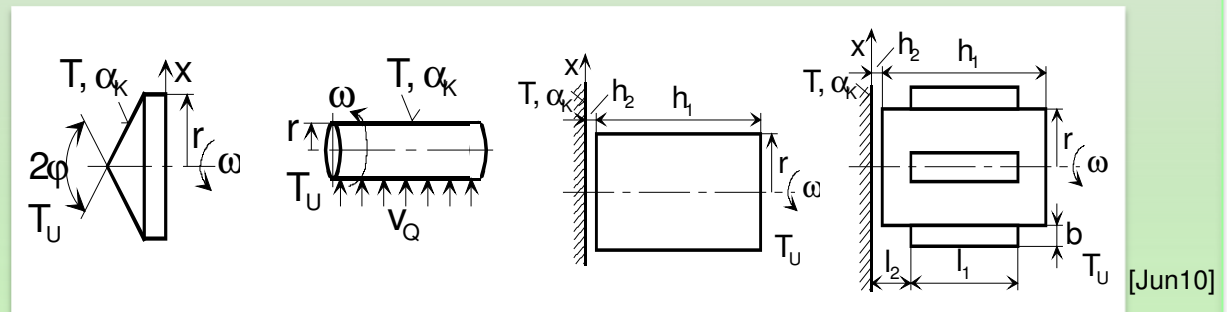
erzwungene Konvektion



Modellierung mit Ähnlichkeitszahlen in der Form:

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

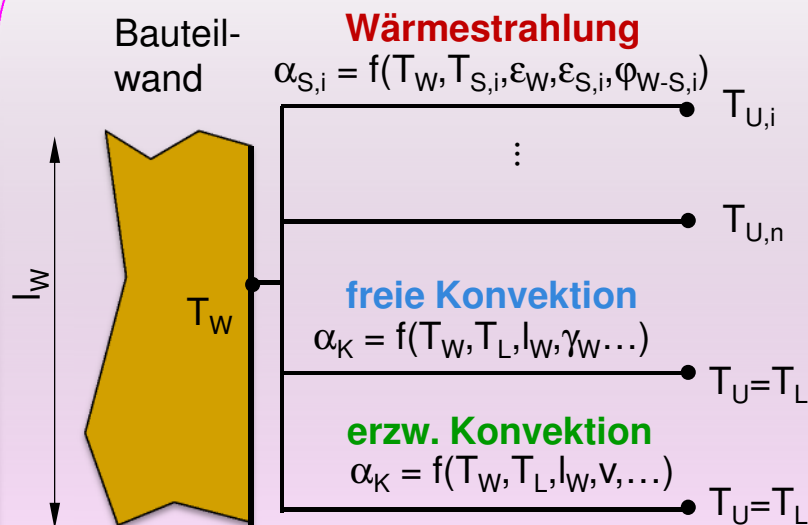
- Ansatz je nach geometrischer Anordnung



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

Ausführlicher Ansatz der Umgebungsbeschreibung

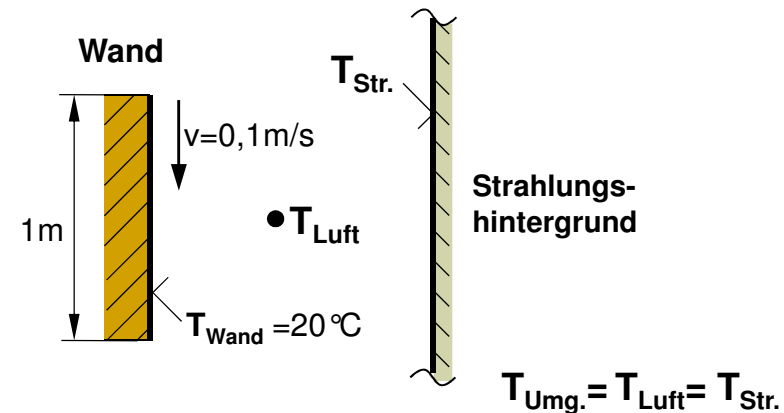
Vorgehen Modellierung:



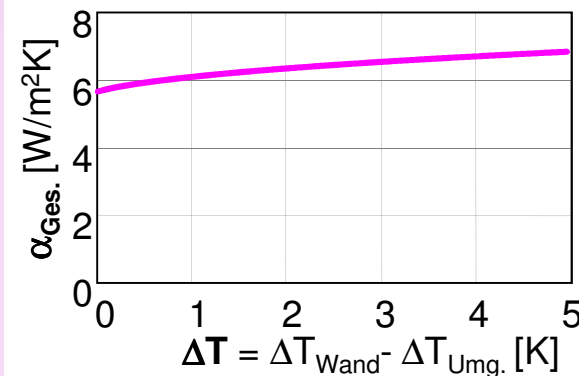
Veränderliche Eingangsgrößen:

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

Beispiel senkrechte Platte:



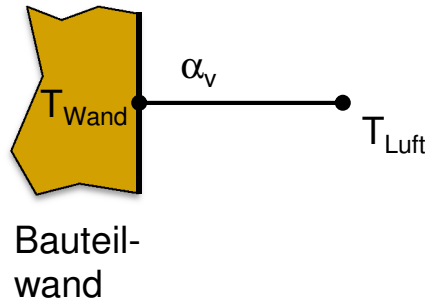
Gesamtwärmeübergang



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



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

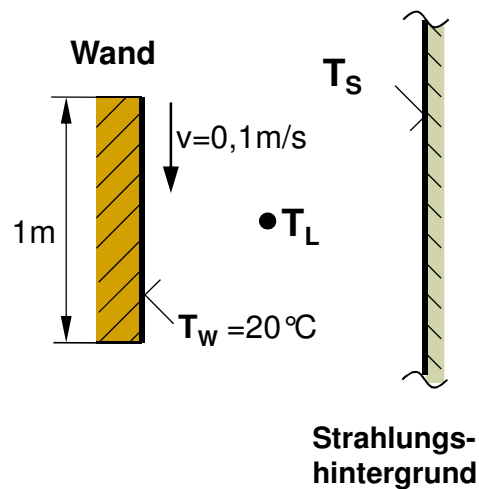
Vereinfachter Ansatz

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

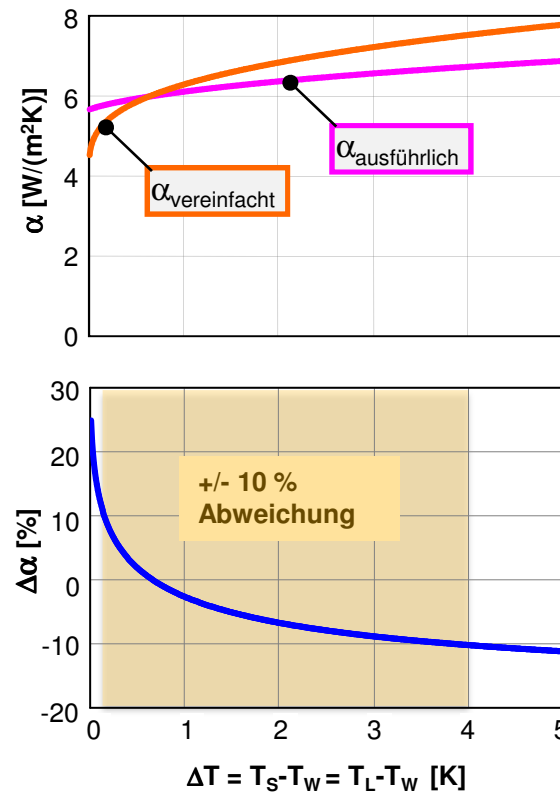
[Jun10]

Abschätzung des Fehlers der vereinfachten Beschreibung

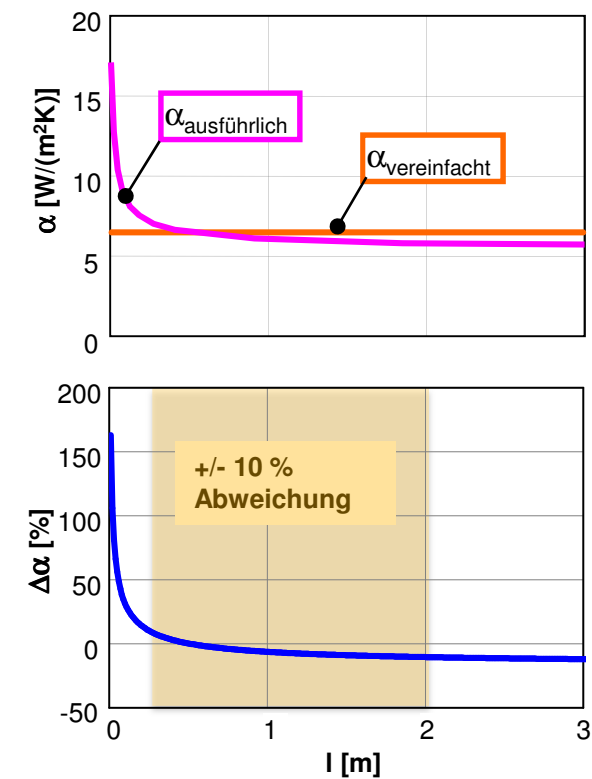
Fehlerabschätzung anhand Modell vertikaler Wand



Veränderung Temperaturdifferenz

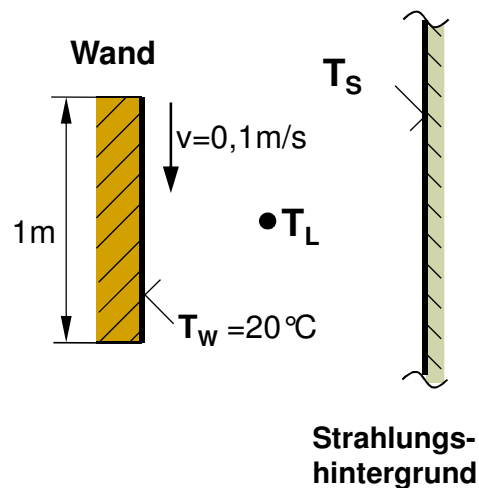


Veränderung Wandhöhe

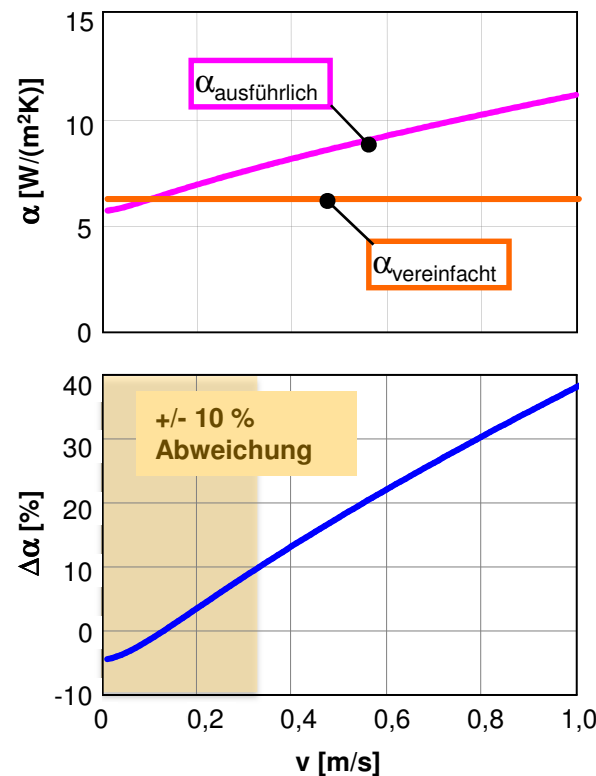


Abschätzung des Fehlers der vereinfachten Beschreibung

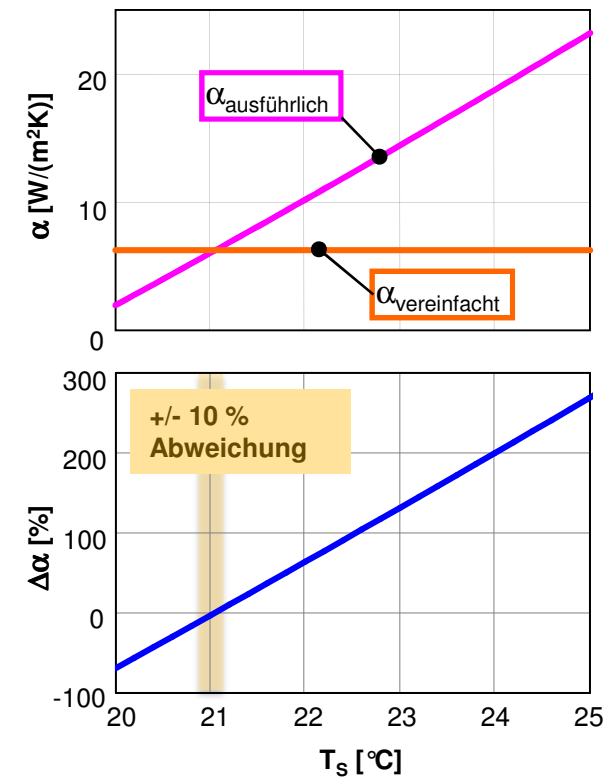
Fehlerabschätzung anhand Modell vertikaler Wand



Variation der Luftgeschwindigkeit



Variation der Temperatur der Strahlungsumgebung



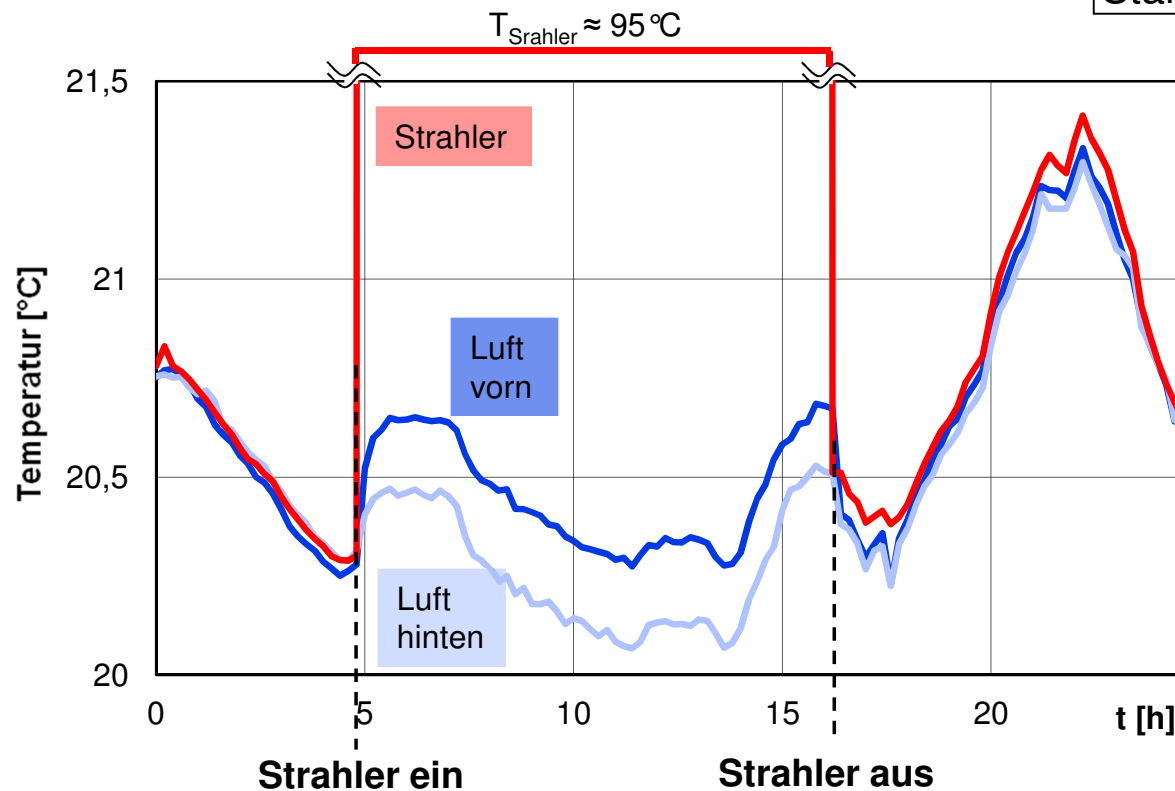
Inhalt

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

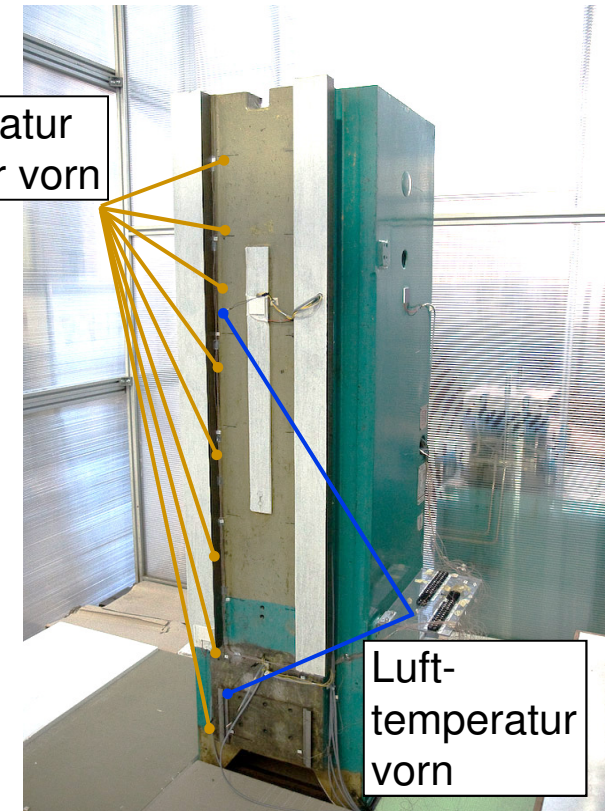
Versuch zur Validierung der Umgebungsmodelle

Temperaturverläufe Umgebungsluft und Wärmestrahler

Sensoren
Ständervorderseite



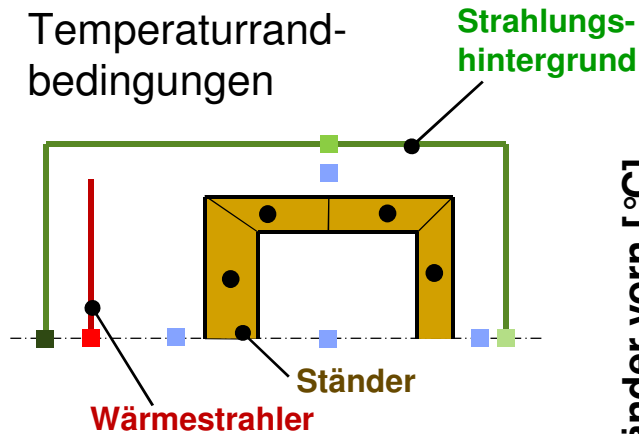
Temperatur
Ständer vorn



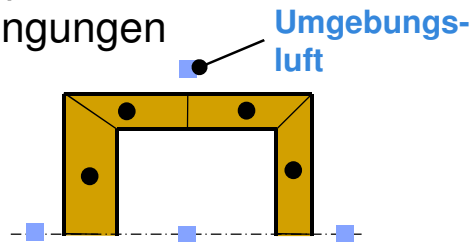
Luft-
temperatur
vorn

Vergleich Messung mit Modellen

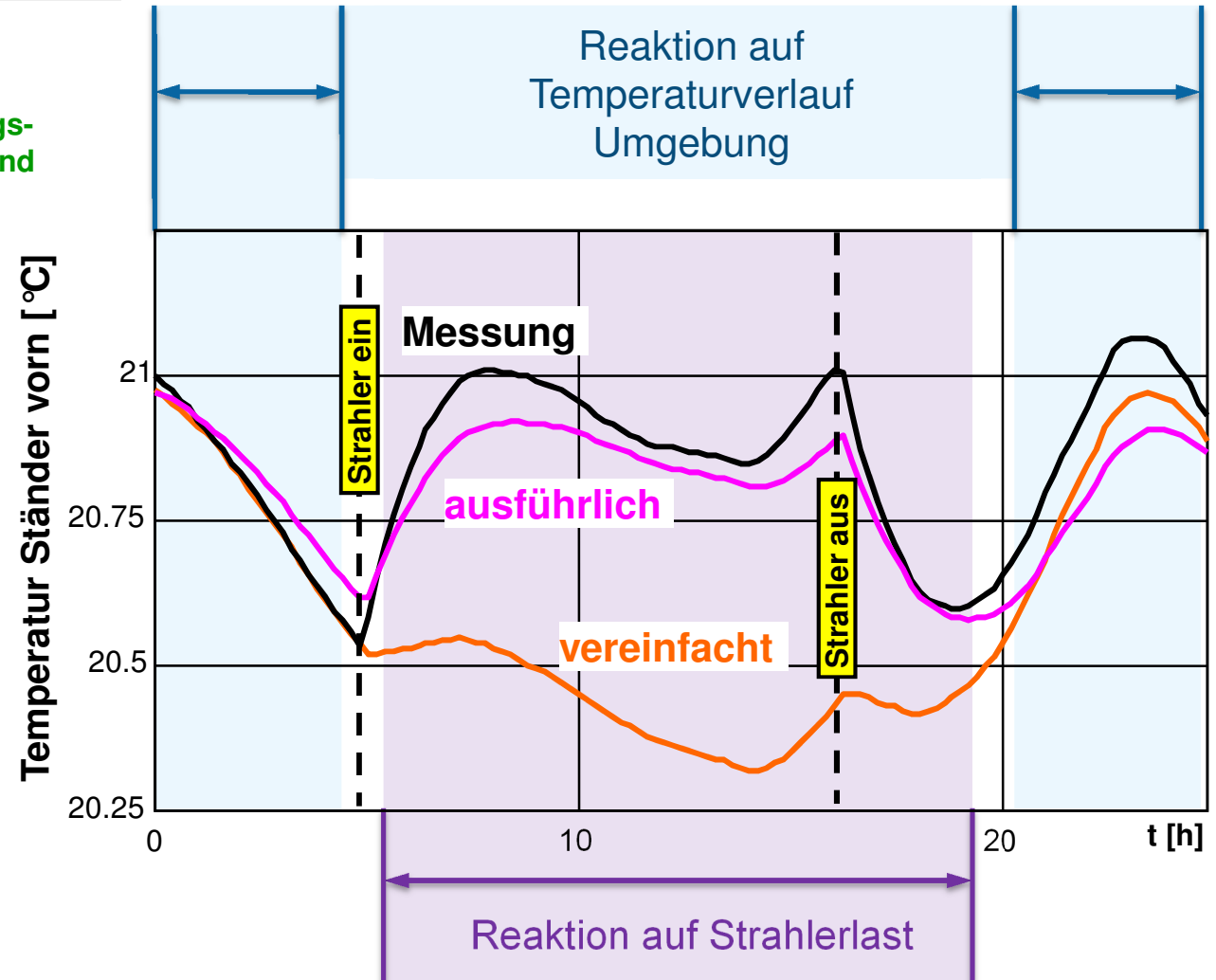
ausführlich mit
Temperaturrand-
bedingungen



vereinfacht mit
Temperaturrand-
bedingungen




■ 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

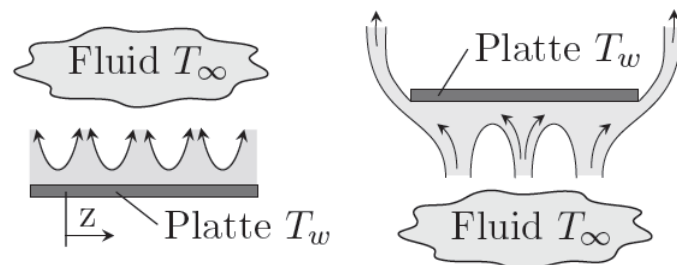
CFD-Simulation – freie Konvektion an horizontaler Platte

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

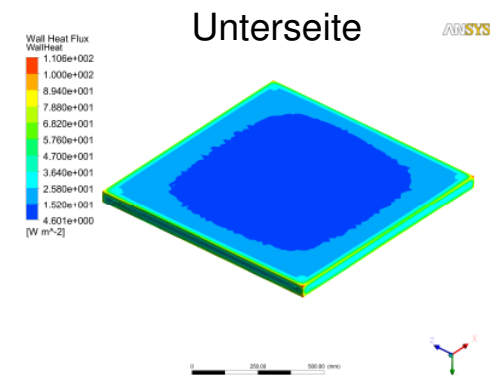
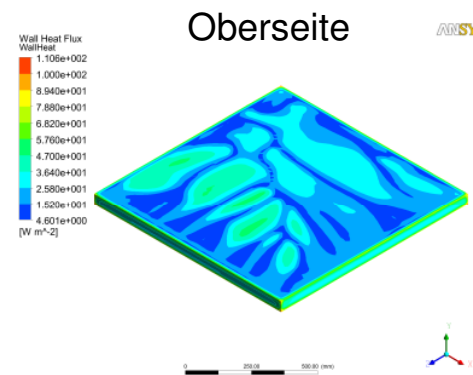
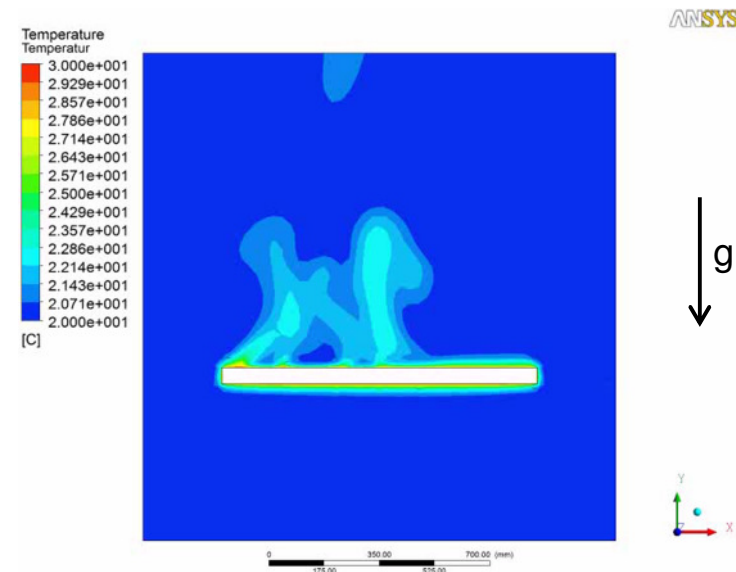
$$T_W = 30^\circ \text{C} \quad T_\infty = 20^\circ \text{C}$$

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

Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)

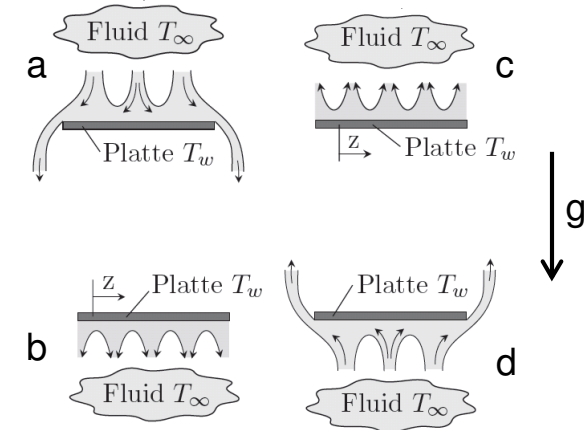


nach [Inc06]



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 \times 1m

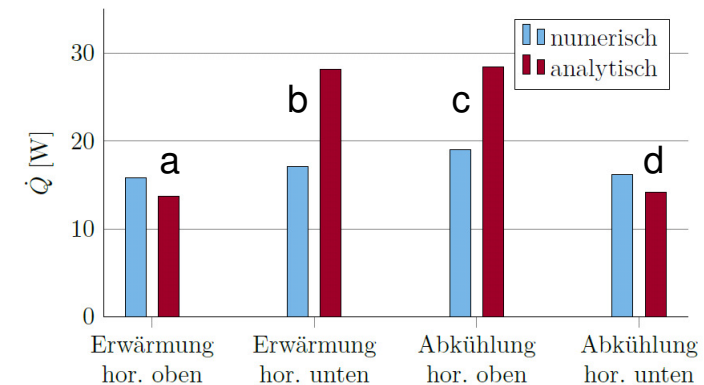
Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)

Randbedingungen bei Erwärmung:

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

Plattenabmessungen: 1m \times 1m

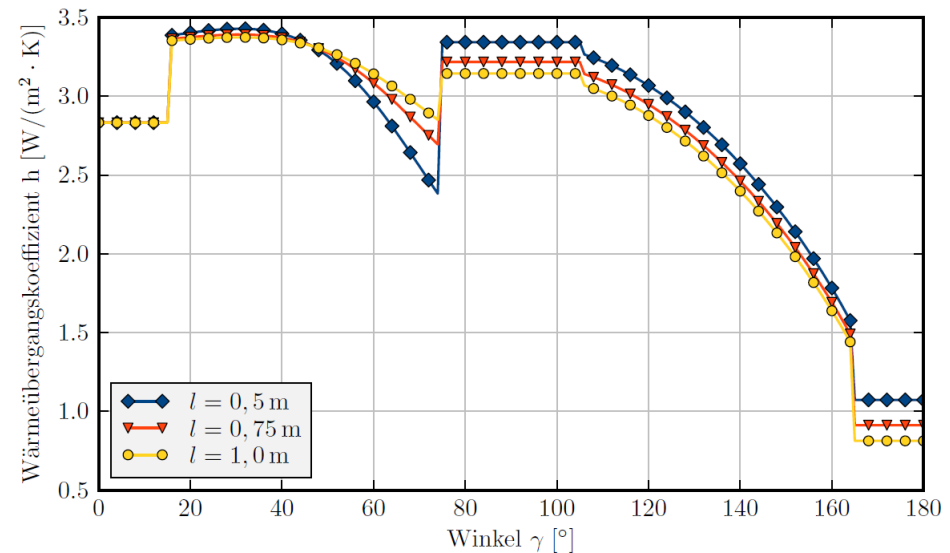
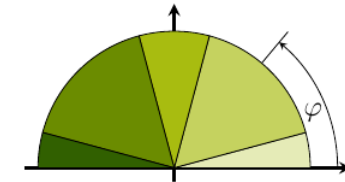
Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)



Vereinfachungen der Ähnlichkeitsmodelle

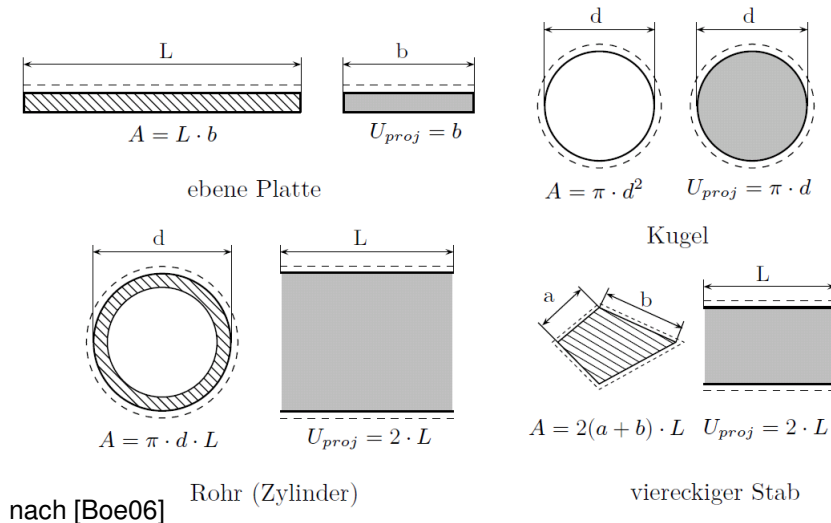
- Fallunterscheidung nach Ausrichtung der Oberflächen zur Gravitation
- Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Orientierungen ermittelbar auf Grundlage empirisch bestimmter Berechnungsvorschriften
- Bereichsweise Gültigkeit → führt zu Unstetigkeiten (Wechsel von winkelabhängigen und winkelunabhängigen 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 $\varphi = 165^\circ - 180^\circ$



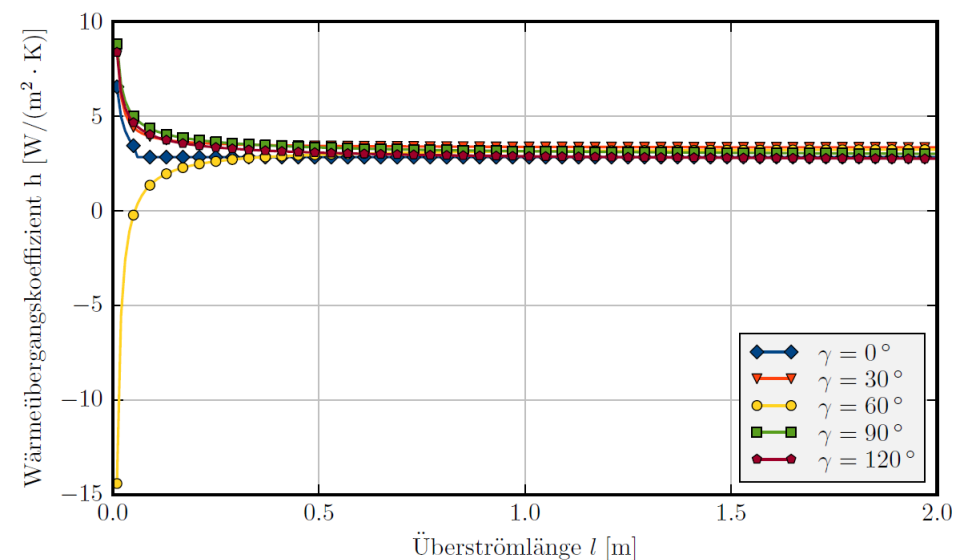
Vereinfachungen der Ähnlichkeitsmodelle

- 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



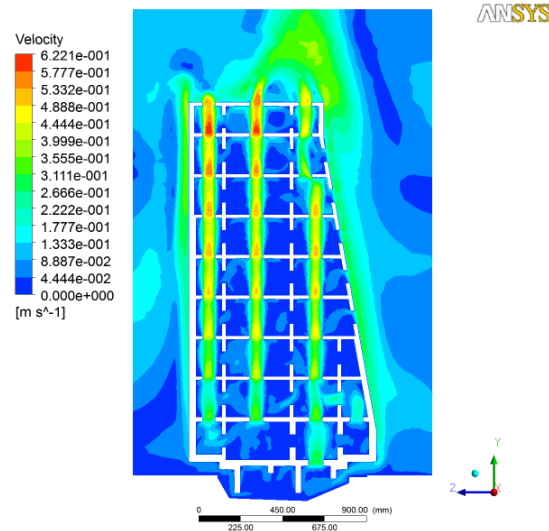
CFD-Simulation freier Konvektion

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

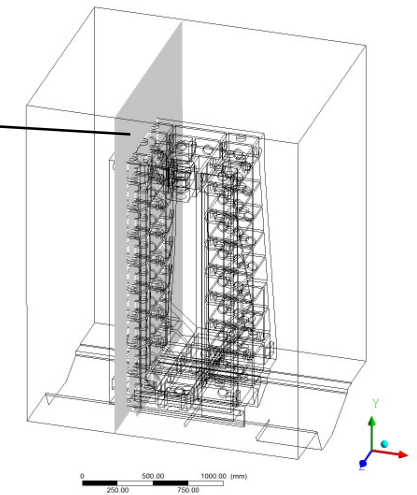
$$T_W = 30^\circ \text{C} \quad T_\infty = 20^\circ \text{C}$$

Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)

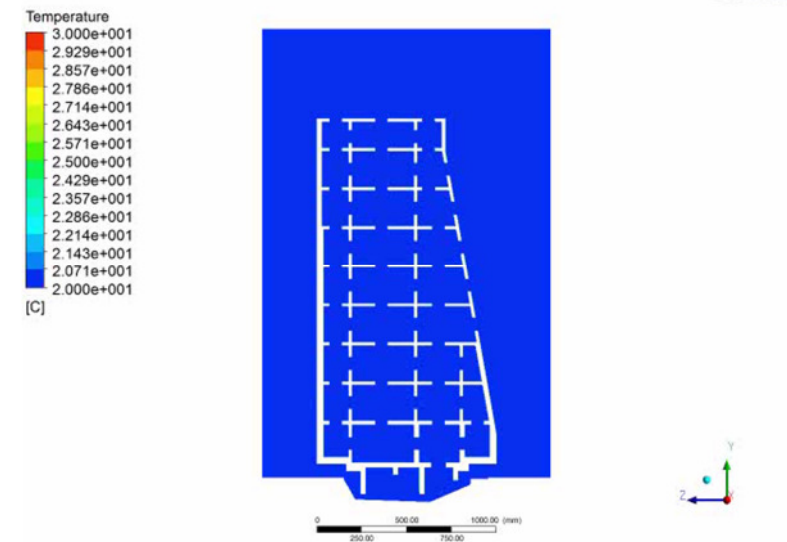
Transiente Simulation - Strömungsgeschwindigkeiten



Schnittebene der
Auswertung

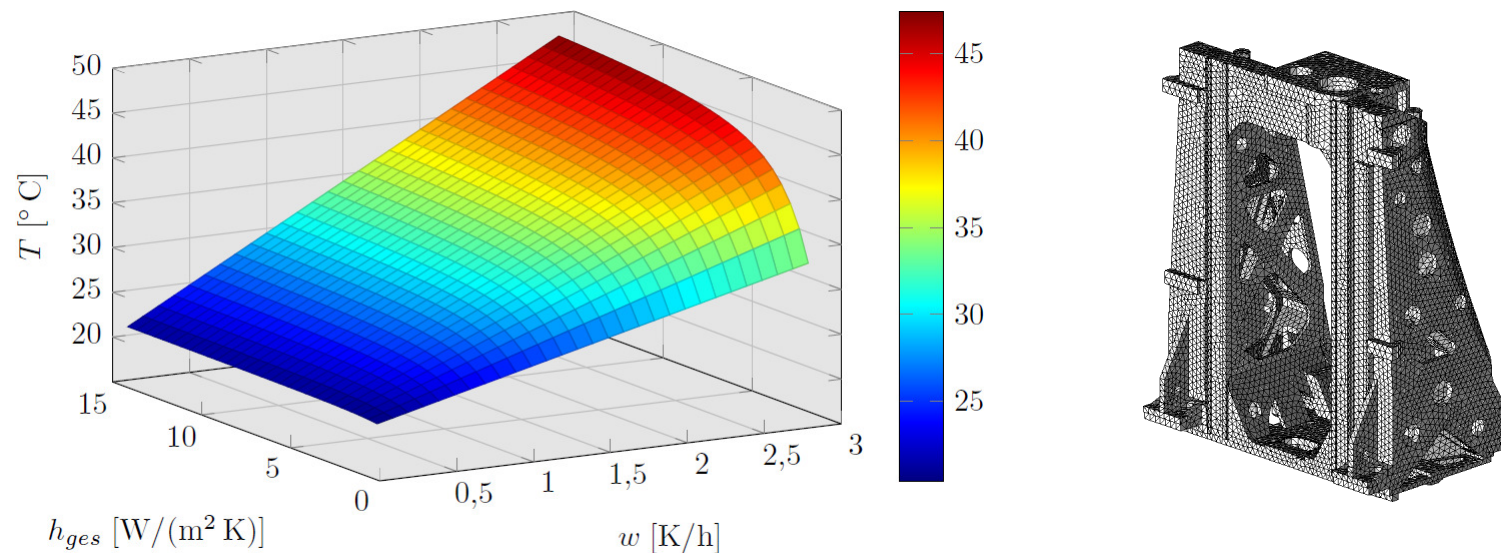


Transiente Simulation – Temperaturverteilung (8min)



Einfluss der Intensität thermischer Umgebungslasten

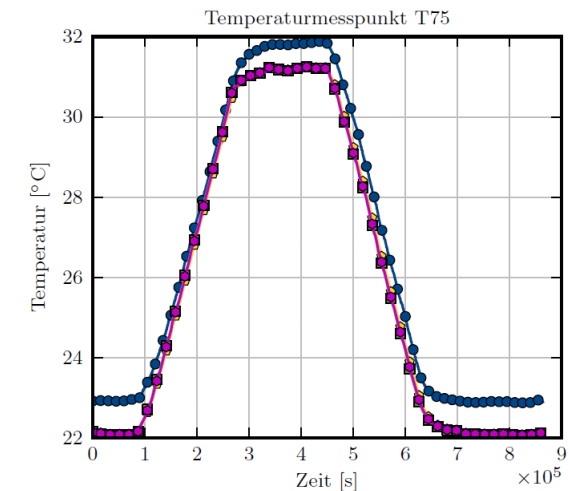
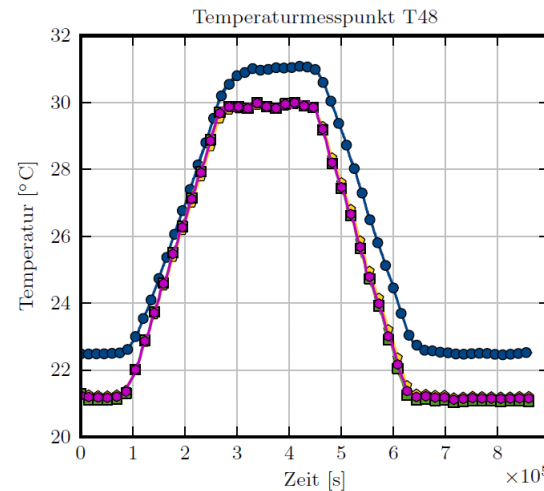
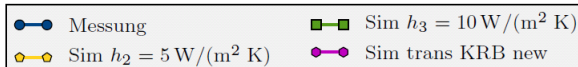
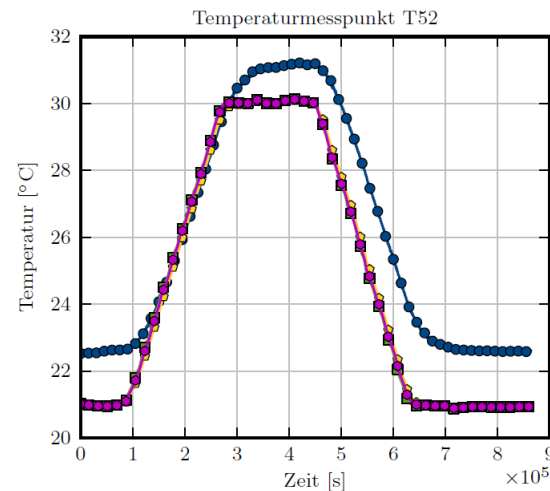
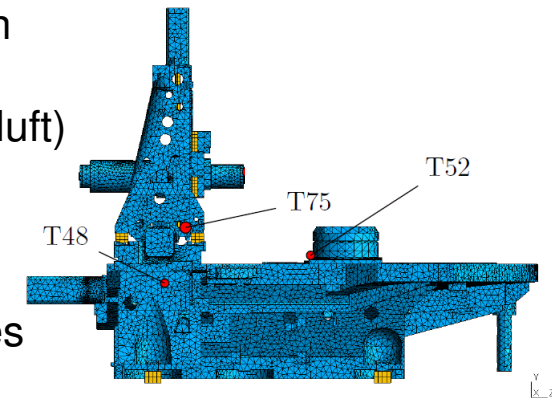
- Einfluss der Genauigkeit von Randbedingungen zur Definition des Wärmeaustausch mit der Umgebung steigt mit der Intensität der thermischen Umgebungslasten
- Zeitlich geringe Änderungen der Umgebungsbedingungen führen zu Steigerung der Fehlertoleranz (Beachtung Biot-Zahl)



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] Wiele, 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.