Verbesserte Modellierung von Wandreibung und Wärmeübergang bei hochviskosen Ölen

Moritz Schenker
TU Berlin
Straße des 17. Juni 135
10623 Berlin

Co-Autor:
Dr. Andreas Spille-Kohoff
CFX Berlin Software GmbH
Karl-Marx-Allee 90 A
10243 Berlin

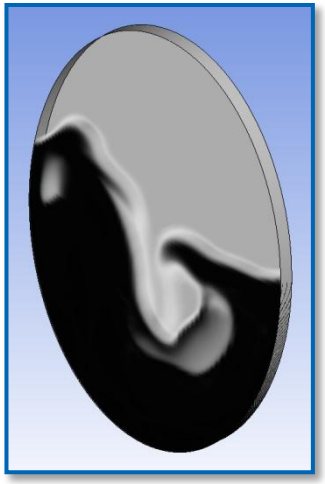
Gliederung

1. Grundlagen
   - Eigenschaften von Ölen
   - Grenzschichten, Wandgesetze
2. Ausgebildete Grenzschichten im 2D-Kanal
   - Veränderte Wandgesetze
   - Verwendung gröberer Netze
   - Modellanpassung
3. Instationäre 2D-Schüttelströmung
   - Wärmetransport mit Wandgesetz
   - Modellanpassung
4. Fazit

Einleitung

CFX BERLIN

Motivation



- Einsatz von Schmierölen zur Kühlung
- Beispiele:
  - Kolbenkühlung in Motoren
  - Turbinenkühlung in der Luftfahrt
  - Öltransformatoren
- Vor- und Nachteile der Ölkühlung:
  - – Geringe Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität
  - – Hohe Viskosität
  - + Einfache, günstige Umsetzung (kein Sekundärkreislauf)
  - + keine zusätzlichen Zulassungsverfahren für Kühlmittel

Einleitung

Eigenschaften Öle

- Hohe Prandtl-Zahlen zwischen 100 und 10 000

$$Pr = \frac{\mu\, c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$$

Verhältnis zwischen Dicke der Geschwindigkeits- und Temperaturgrenzschicht

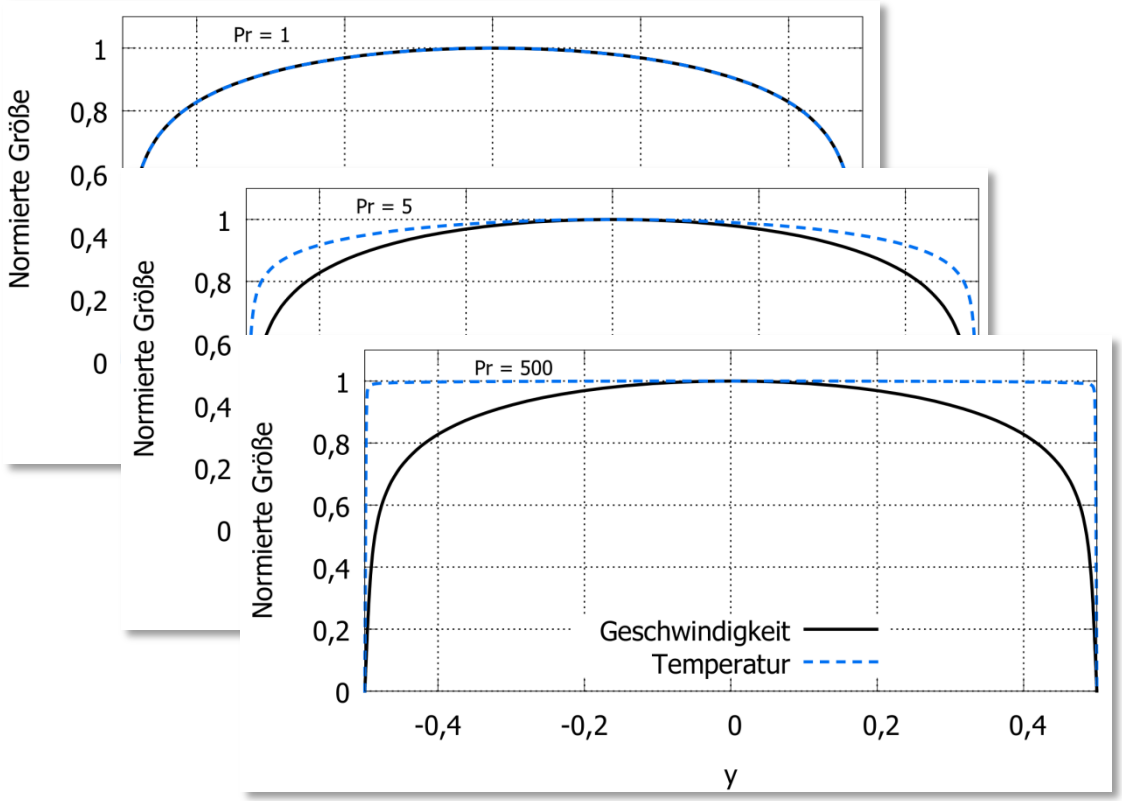


Abb. 1: *Verläufe der Geschwindigkeit und der Temperatur über einen Kanalquerschnitt bei verschiedenen Prandtl-Zahlen*

Einleitung

Eigenschaften Öle

- Hohe Prandtl-Zahlen zwischen 100 und 10 000

$$Pr = \frac{\mu\, c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$$

Verhältnis zwischen Dicke der Geschwindigkeits- und Temperaturgrenzschicht

- Starke Temperatur-abhängigkeit der Viskosität

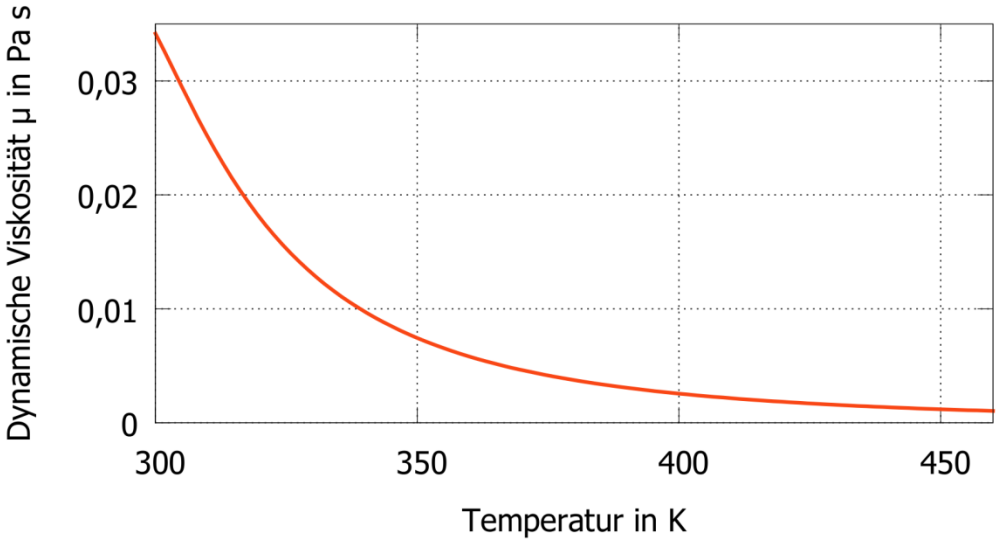


Abb. 2: *Verlauf der dynamischen Viskosität des Öls „MIL 7808“ über die Temperatur [2]*

Einleitung

CFX BERLIN

Numerische Simulation

- Essentiell für zuverlässige Ergebnisse: Bestimmung von Wärmestrom und Reibung an der Wand
- Möglichkeiten:
  - Volle Auflösung der Grenzschicht (sehr feine Netze, verbunden mit hoher Rechenzeit)
  - Modellierung der Verläufe von Geschwindigkeit und Temperatur mit Wandgesetzen (Industriepraxis für 3D-Simulationen)

$$\tau_w = \rho \left(\frac{\overline{U}}{\boldsymbol{u}^+} \right)^2$$

$$q_w = \frac{\rho\, c_p\, \overline{U}}{\boldsymbol{u}^+\, \boldsymbol{T}^+} \left(\overline{T}_w - \overline{T} \right)$$

- Durch Verwendung von dimensionslosen Größen sollen die Wandgesetze auf alle Strömungen übertragbar sein

→ Normierung von: Wandabstand (y^+), Geschwindigkeit (u^+), Temperatur (T^+)

Grundlagen - Wandgesetze

konstanten Stoffeigenschaften

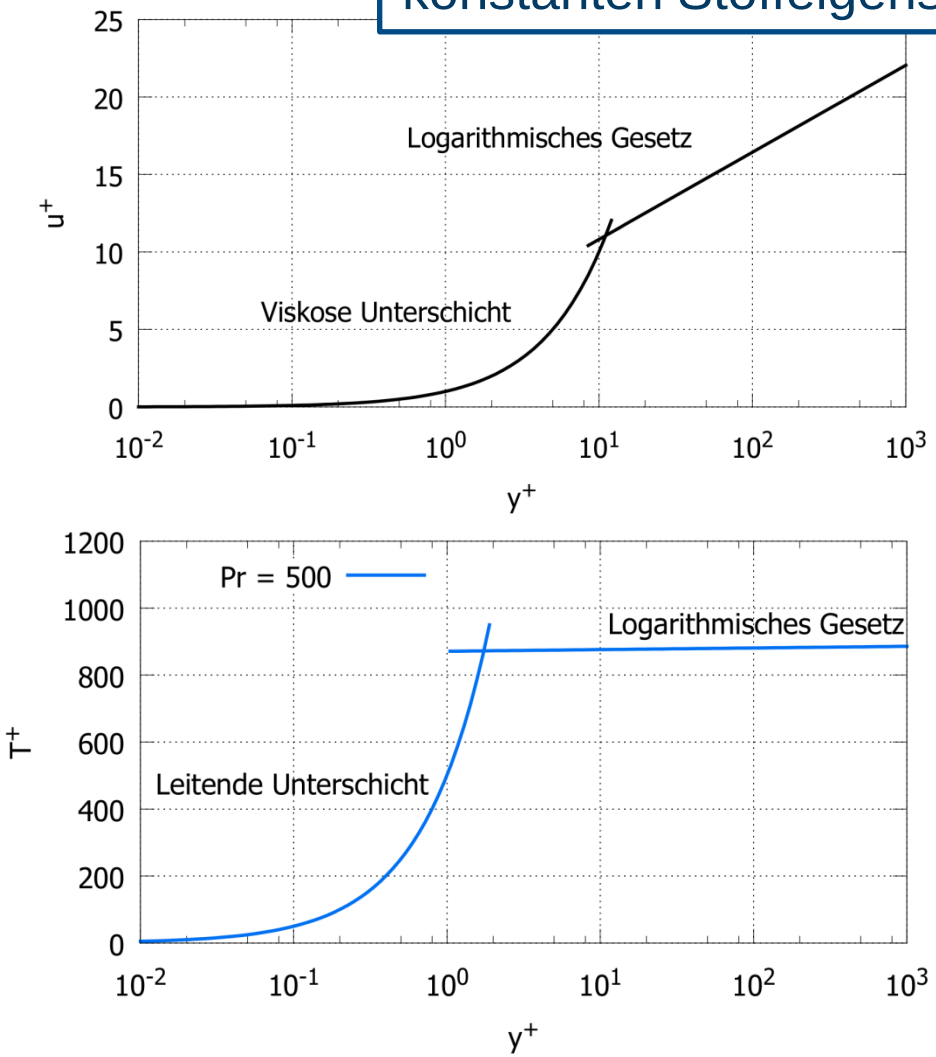


Abb. 3: *Verlauf der dimensionslosen Geschwindigkeit (oben), der dimensionslosen Temperatur (unten) an der Wand und Darstellung der Korrelation nach Kader [2]*

Viskose Unterschicht:

$$u^+ = y^+$$

Logarithmisches Gesetz:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C$$

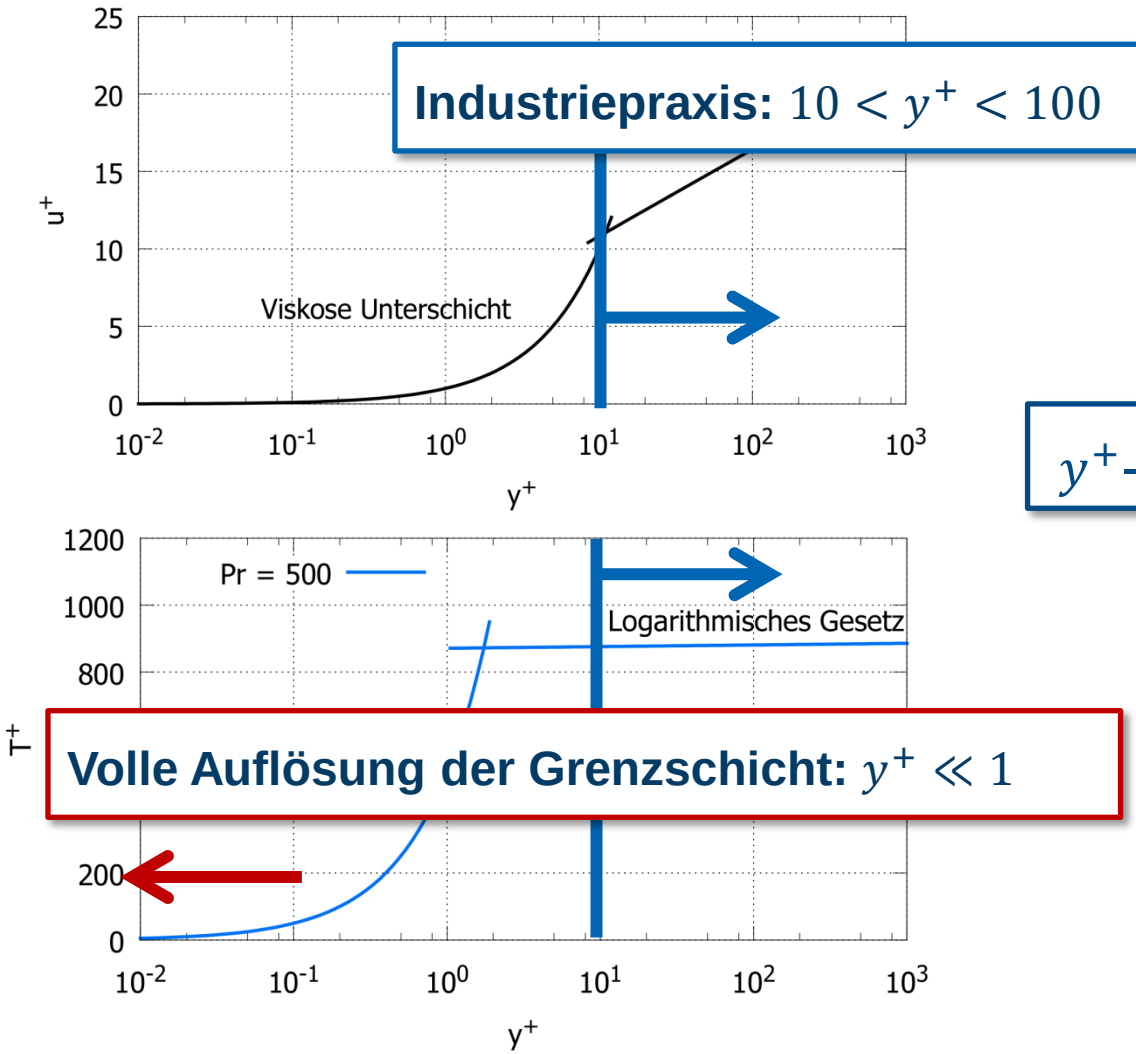
Leitende Unterschicht:

$$T^+ = Pr\, y^+$$

Logarithmisches Gesetz:

$$T^+ = \frac{Pr_t}{\kappa} \ln(y^+) + \beta(Pr)$$

Grundlagen - Wandgesetze



Nutzung von Modellierung

y^+-Wert des ersten Knotens

Berechnung der Größen innerhalb der gesamten Grenzschicht

Abb. 3: *Verlauf der dimensionslosen Geschwindigkeit (oben), der dimensionslosen Temperatur (unten) an der Wand und Darstellung der Korrelation nach Kader [2]*

Einleitung

CFX BERLIN

Fragen

- Wie zuverlässig sind die in ANSYS CFD verwendeten Wandgesetze bei sehr hohen Prandtl-Zahlen?
- Wird der Einfluss der temperaturabhängigen Viskosität berücksichtigt?

Zielstellung

- Untersuchung der Fragen im Rahmen meiner Bachelorarbeit [1] mit Hilfe der Software ANSYS CFX
- Vergleich zwischen den Ergebnissen mit aufgelöster Grenzschicht und modellierten Verläufen anhand von 2D-Beispielen
- Vorschläge zur Modellverbesserung

Simulationsmodell: 2D-Kanal

CFX BERLIN

Setup:

- Stationäre Simulation mit k-ω-SST-Modell
- Einströmung bei $300\ \mathrm{K}$
- 3 verschiedene Wandtemperaturen $(350, 380, 410\ \mathrm{K})$ und eine Vergleichssimulation mit konst. Viskosität $(380\ \mathrm{K})$

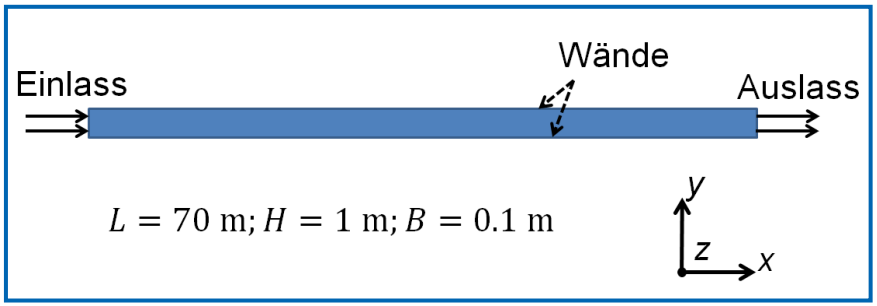


Abb. 4: *Schematische Darstellung des simulierten Kanals*

Strömungsmedium

- „MIL 7808“, Schmieröl für Turbinen
- Temperaturabhängige Viskosität
  - Max. Verhältnis der Viskosität: ca. 12
  - Bereich der Prandtl-Zahl: 40 - 500
- Sonstige Stoffeigenschaften konstant

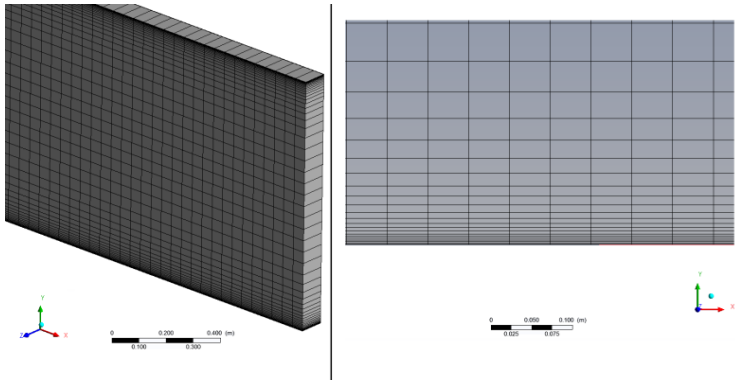


Abb. 5: *Vernetzung des Kanals: 3D-Ansicht (links), 2D-Ansicht in Wandnähe (rechts)*

Ergebnisse – Dimensionslose Profile

CFX BERLIN

Geschwindigkeit:

- Verschiebung des logarithmischen Bereichs
- Abweichung vom linearen Verlauf in der viskosen Unterschicht
- Verringerte Wandreibung gegenüber konstanter Viskosität ($\tau_w \downarrow$)

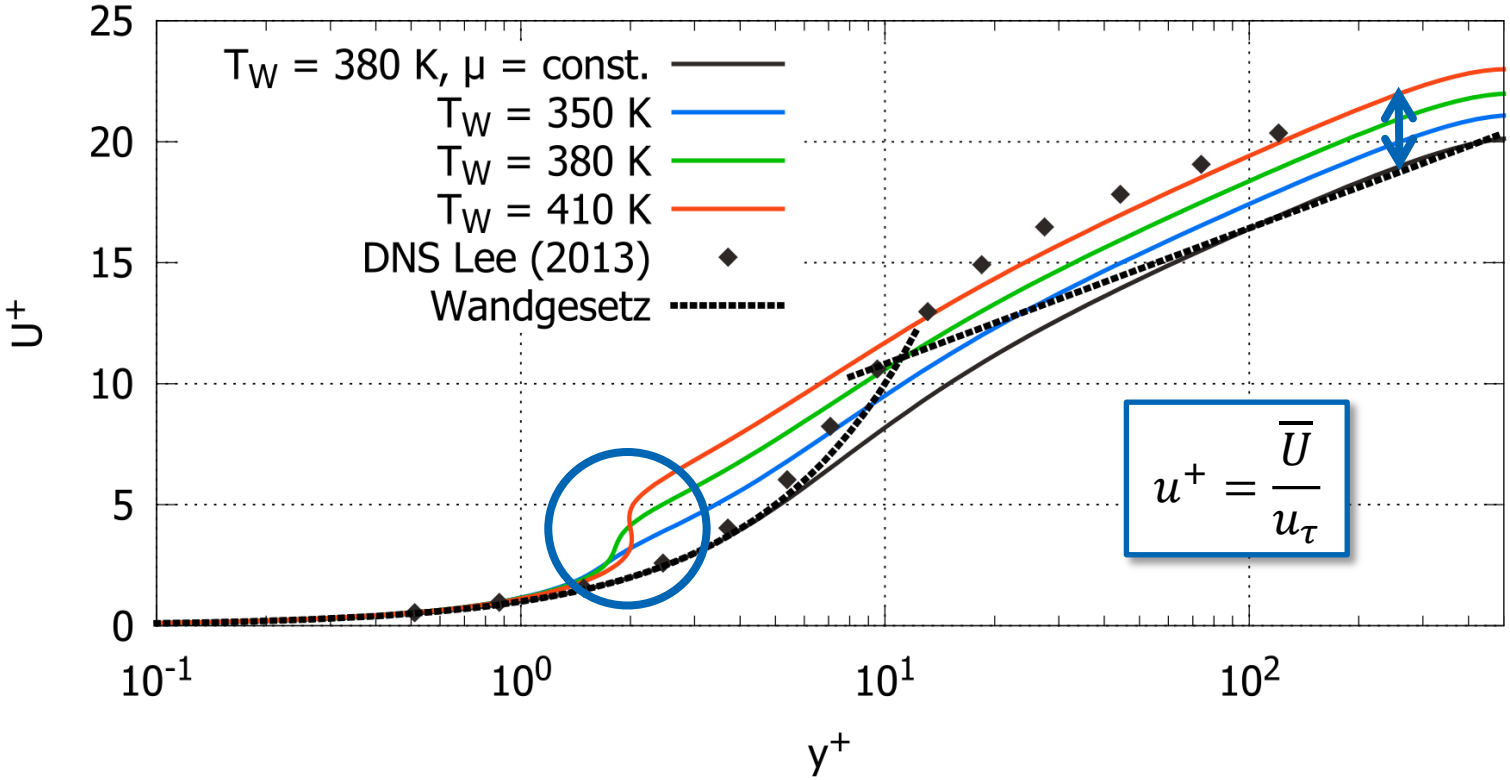


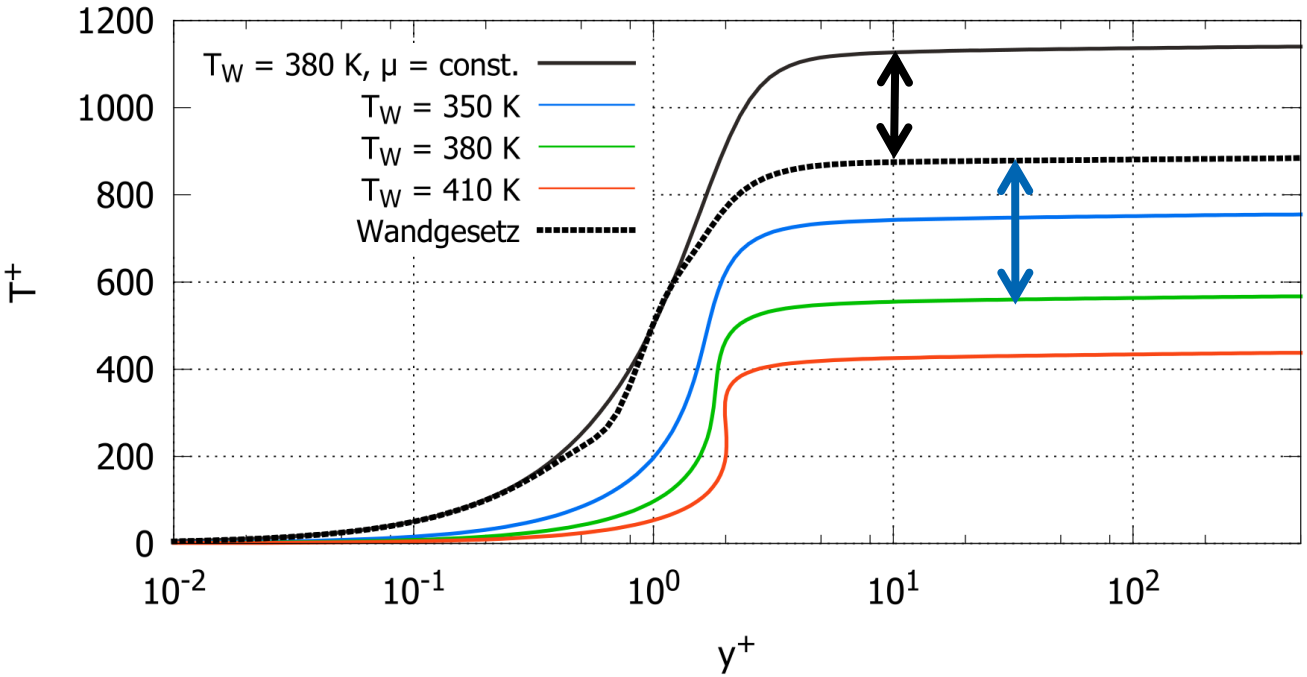
Abb. 7: *Dimensionsloser Geschwindigkeitsverlauf bei verschiedenen Wandtemperaturen*

Ergebnisse – Dimensionslose Profile

CFX BERLIN

Temperatur:

- Abweichung von der Korrelation im logarithmischen Bereich
  - Aufgrund hoher Prandtl-Zahl
  - Aufgrund temperaturabhängiger Viskosität
- Erhöhter Wärmeübergang gegenüber konstanter Viskosität (q_w ↑)



$$T^+ = \frac{(\overline{T}_w - \overline{T})\,\rho\, u_\tau}{q_w}$$

Abb. 8: *Dimensionsloser Temperaturverlauf bei verschiedenen Wandtemperaturen im Vergleich mit der Korrelation von Kader [2]*

Ergebnisse – Verwendung gröberer Netze

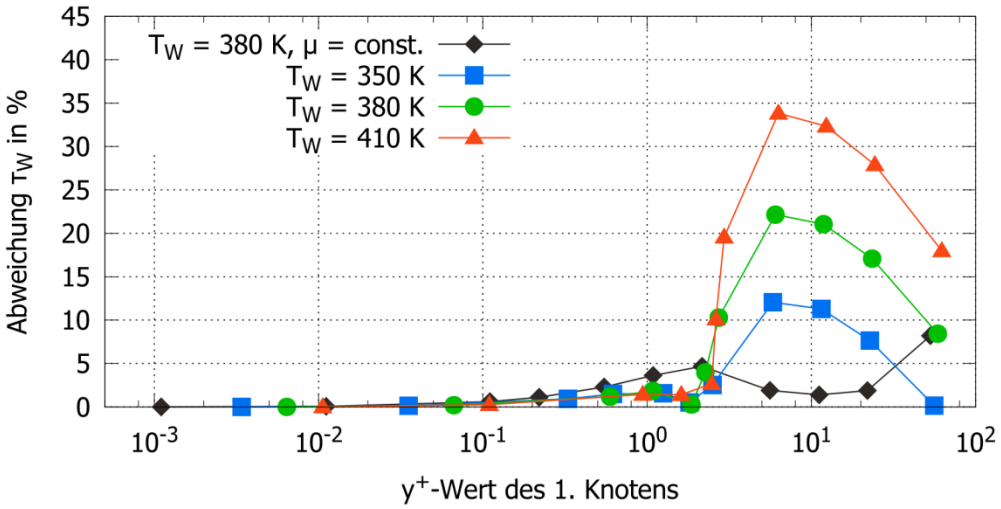
CFX BERLIN

- Berechnung der Wandschubspannung und der Wärmestromdichte als Randbedingung für die Transportgleichungen:

$$\tau_w = \rho \left(\frac{\overline{U}}{\boldsymbol{u}^+} \right)^2$$

$$q_w = \frac{\rho \, c_p \, \overline{U}}{\boldsymbol{u}^+ \, \boldsymbol{T}^+} \left(\overline{T}_w - \overline{T} \right)$$

- Vergleich mit den Ergebnissen bei höchster Auflösung (aus Gitterstudie)



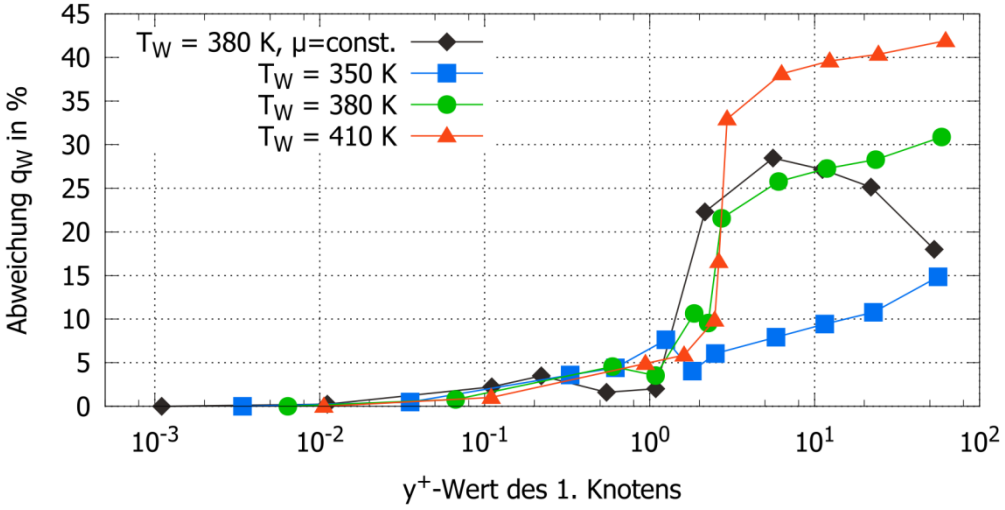


Abb. 9: *Abweichungen der Wandschubspannung (links) und des Wandwärmestroms (rechts) im Vergleich zur Lösung des feinsten Gitters*

Ergebnisse – Fazit

Verlässliche Ergebnisse nur im Bereich $y^+ < 1$

→ **Modellanpassung**

Primäre Fehlerquellen

1. Verschiebung der logarithmischen Bereiche
2. Abweichung vom linearen Verlauf in der viskosen Unterschicht der Geschwindigkeit

Modellanpassung

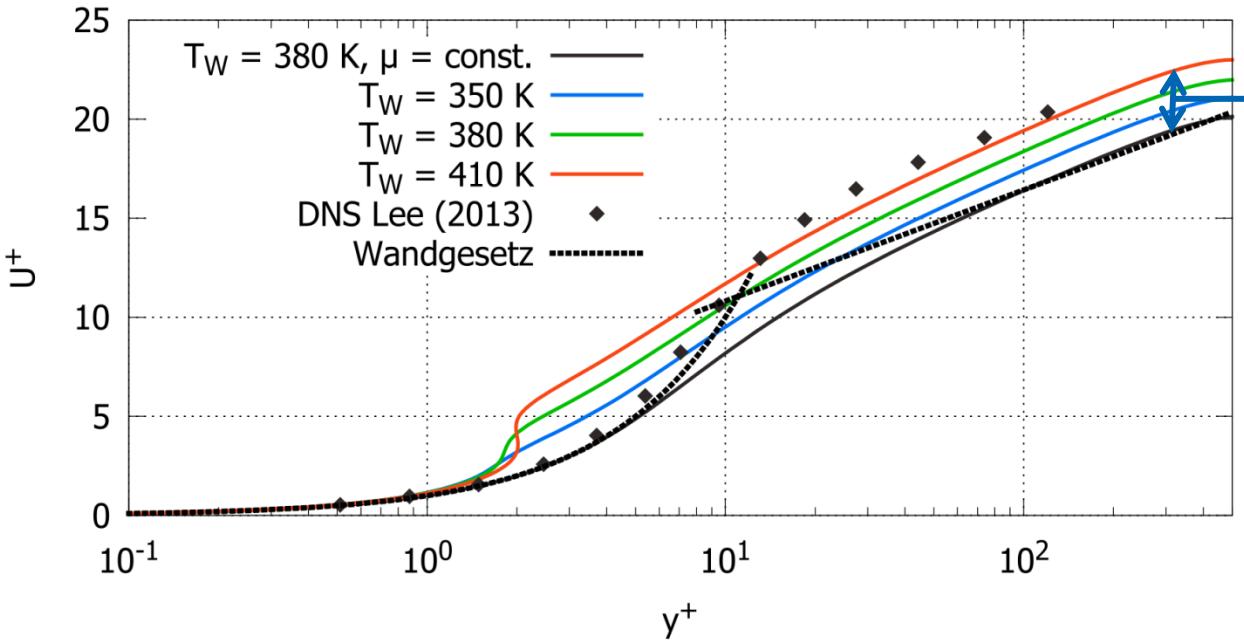


Abb. 10: *Dimensionsloser Geschwindigkeitsverlauf bei verschiedenen Wandtemperaturen*

$$u^+{}_{\log} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+(\mu_{\mathrm{lok}})) + \boldsymbol{C}$$

$\boldsymbol{C}$:

- Abhängig von Temperaturdifferenz
- Lässt sich automatisiert für ein spezifisches Fluid kalibrieren

Modellanpassung

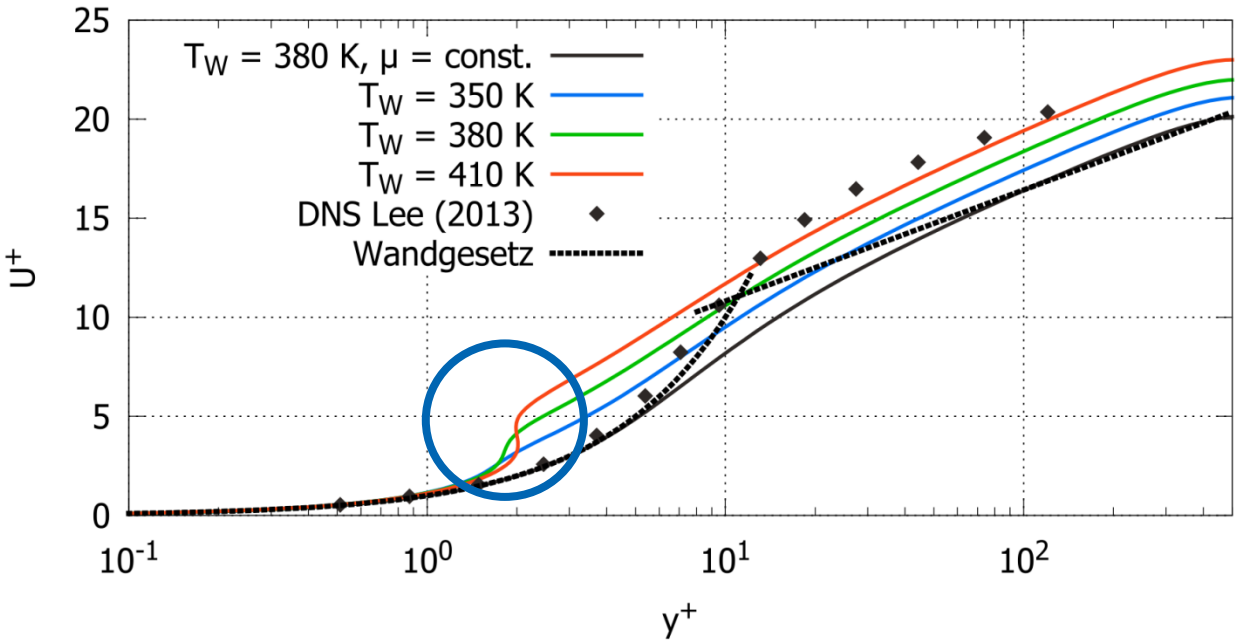


Abb. 10: *Dimensionsloser Geschwindigkeitsverlauf bei verschiedenen Wandtemperaturen*

Konstante Viskosität:

$$u^+{}_{\mathrm{lin}} = y^+$$

Temperaturabhängige Viskosität:

$$u^+{}_{\mathrm{lin}} = u_\tau \, \rho \int_0^y \frac{1}{\mu(y)} \mathrm{d}y$$

Approximieren des Integrals über Riemannsche Summe

Modellanpassung

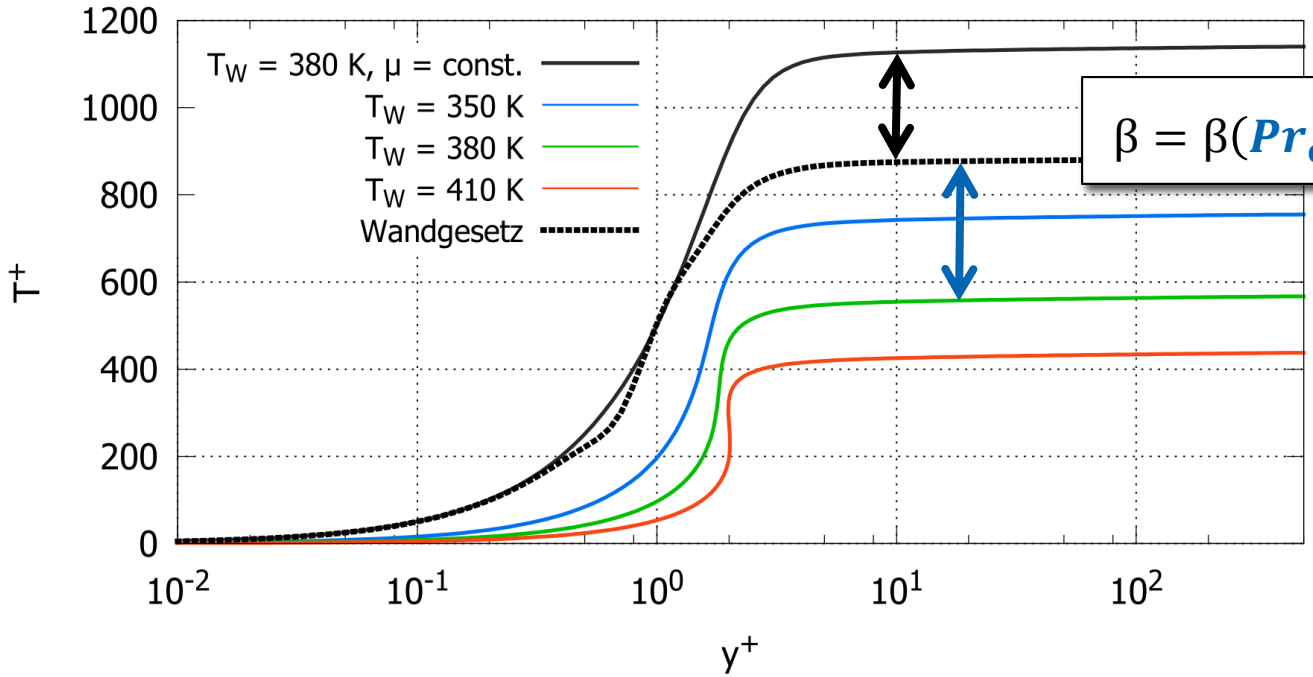


Abb. 11: *Dimensionsloser Temperaturverlauf bei verschiedenen Wandtemperaturen im Vergleich mit der Korrelation von Kader [2]*

$$\beta = \beta(\boldsymbol{Pr}_{\mathbf{crit}}) + \text{Korrekturpolynom}(\boldsymbol{Pr}_{\mathbf{crit}})$$

$\boldsymbol{Pr}_{\mathbf{crit}}$:

- Abhängig von Temperaturdifferenz
- Lässt sich automatisiert für ein spezifisches Fluid kalibrieren

Modellanpassung - Ergebnisse

CFX BERLIN

- Geringere Abweichung bei Berechnung von τ_w und q_w
- Einzelne Anpassungen führen zu Verbesserung in den gewünschten Bereichen
- Werte bei hoher Auflösung bleiben konstant

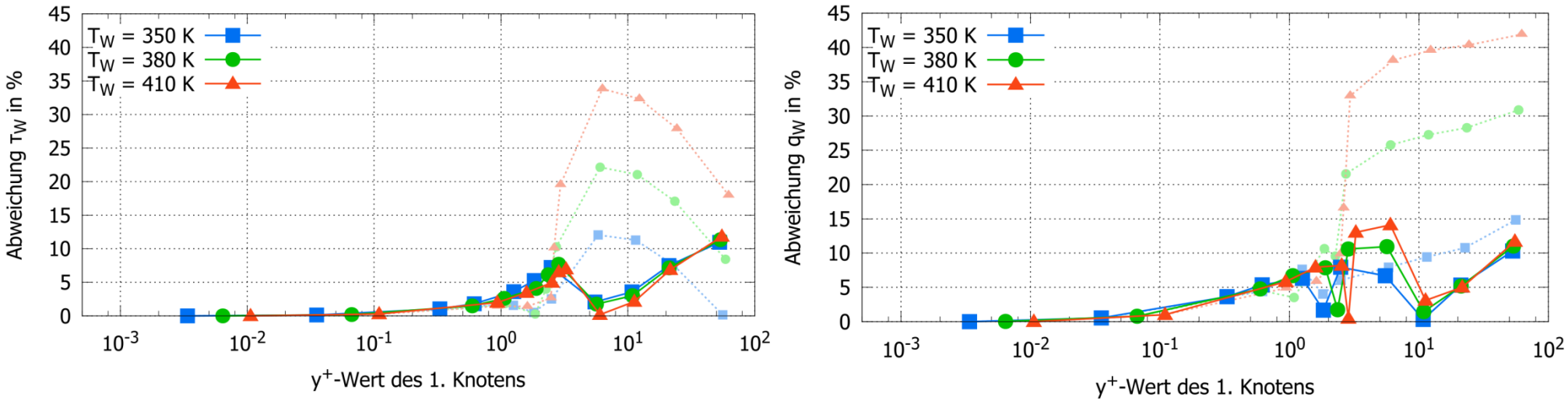
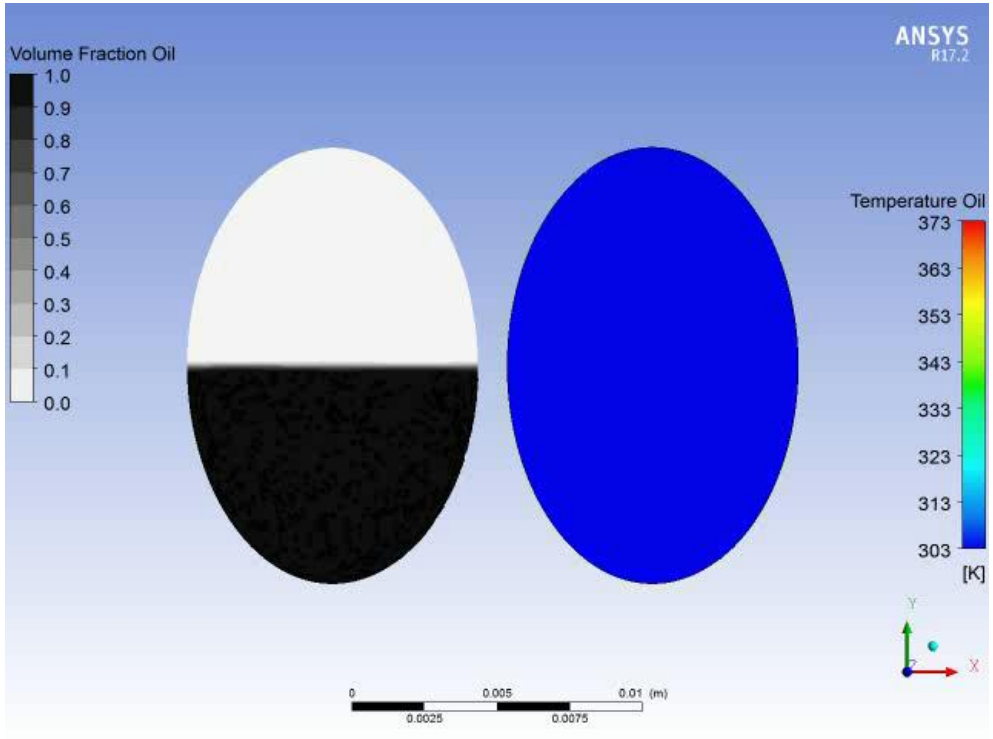


Abb. 12: *Abweichungen der Wandschubspannung (links) und des Wandwärmestroms (rechts) im Vergleich zur Lösung des feinsten Gitters nach Anpassung der Wandfunktionen, Vergleich zur Abweichung ohne Anpassung (schattiert)*

Simulationsmodell: 2D-Schüttelströmung



Video 1: *Simulation der Schüttelbewegung mit einer Gesamtzeit von 0,12 s; links: Volumenanteil des Öls; rechts: Temperaturverteilung des Öls*

Setup:

- ellipsenförmige Geometrie
- Volumenanteil Öl von 50 %
- 4 harmonische Schwingungszyklen (0,12 s)
- Anfangstemperatur: $T_{\mathrm{ini}} = 30\ °\mathrm{C}$; Wandtemperatur: $T_{\mathrm{W}} = 100\ °\mathrm{C}$

Beobachtung:

- Keine ausgebildeten Grenzschichten

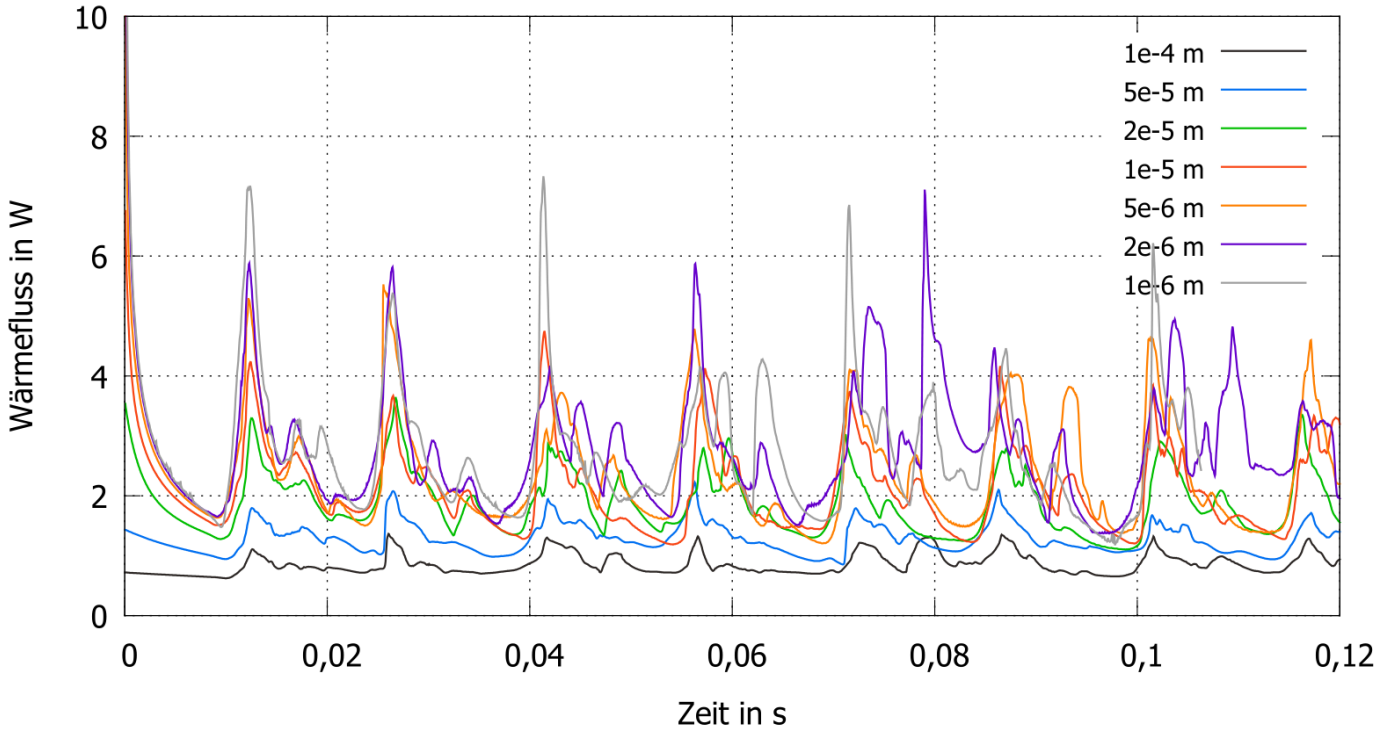
➢ Temperatur: kurz linearer Verlauf, dann Übergang in Blockprofil

Ergebnisse

CFX BERLIN

Wärmetransport

- Beginn: stehendes Fluid, Peaks nach jedem halben Zyklus
- Stark erhöhter Wärmetransport aufgrund des Schüttelns
- Höherer Wandabstand des ersten Knotens resultiert in zu niedrigem Wärmefluss



$$q_w = \frac{\rho\, c_p\, u^*}{T^+} (T_w - T_f)$$

$$T^+ \uparrow \quad \Rightarrow \quad q_w \downarrow$$

Abb. 13: *Vergleich der Wärmeströme in jedem Zeitschritt bei unterschiedlicher Auflösung (Abstand des ersten Knotens)*

Modellanpassung - Alternative zur Wandfunktion

- **<u>Annahme:</u>** Temperaturgrenzschicht besteht nur aus linearem Bereich + Blockprofil
- Wärmestrom für lineares Temperaturprofil:

$$q_W \approx \lambda \frac{T_W - T_f}{\delta_T}$$

- Mittleres Temperaturniveau $\boldsymbol{T_f}$ des Öls berechnen
- Dicke der Grenzschicht $\boldsymbol{\delta_T}$ abschätzen, Herleitung aus vereinfachtem Szenario [6]

$$\delta_T \approx \sqrt{\pi\, a\, t}$$

- Zeitvariable $\boldsymbol{t}$: Dauer, in der eine Wandzelle kontinuierlich mit Öl gefüllt ist

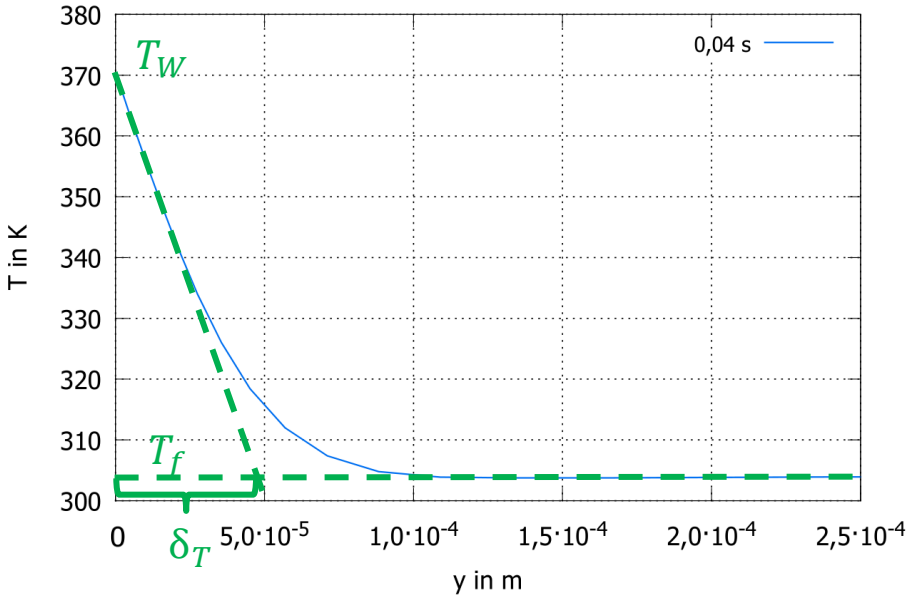


Abb. 14: *Darstellung der für den Wärmestrom relevanten Größen am Temperaturverlauf über den Wandabstand im unteren Punkt der Geometrie*

Modellanpassung - Ergebnisse

- Wärmefluss nach Anpassung für alle Netze etwa auf dem Niveau der Referenznetze
- Peaks des Wärmetransports auch durch Netze mit niedrigerer Auflösung darstellbar
- Maximale Abweichung der insgesamt übertragenen Wärmemenge sinkt von ca. 70 % auf unter 20 % ab.

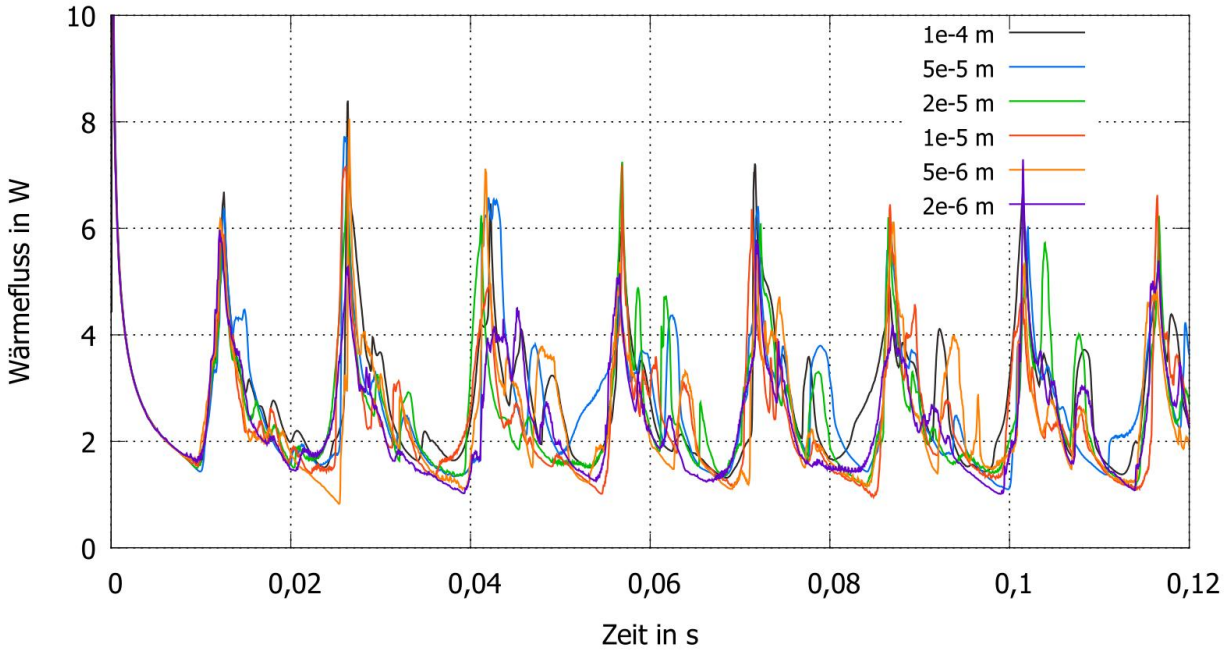


Abb. 15: *Vergleich der Wärmeströme in jedem Zeitschritt bei unterschiedlicher Auflösung (Abstand des ersten Knotens) nach der Anpassung*

Fazit

CFX BERLIN

- Besonderheiten bei der Simulation von Ölen
  - Hohe Prandtl-Zahlen
  - Temperaturabhängige Viskosität → reduzierte Wandschubspannung und erhöhter Wärmetransport
- Wandgesetze
  - Verwendung zur Berechnung von Reibung und Wärmeübergang an der Wand
  - Allgemein nur bei konstanten Stoffeigenschaften gültig
  - Anwendung bei hoher Prandtl-Zahl und temperaturabh. Viskosität führt zu Fehlern
- Modellanpassung
  - Bei ausgebildeten Grenzschichten durch Anpassung der Wandgesetze
  - Bei stark instationären Problemen Abschätzung mit Grenzschichtdicke

→ Modellanpassungen erlauben die Verwendung gröberer Netze und bieten somit eine Rechenzeitverringerung bei hinreichend zuverlässigen Ergebnissen.

Quellenverzeichnis

[1] Schenker, M.: „Modellierung des Wärmeübergangs von Fluiden hoher Prandtl-Zahl mit temperaturabhängiger Viskosität in einem RANS-Turbulenzmodell“, Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin, 2016

[2] Butler, Ronald D.: The viscosity of synthetic turbine engine lubricants from 100 to 700F. Springfield: National Technical Information Service, 1971

[3] Kader, B.A: “Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers” In: International Journal of Heat and Mass Transfer 24 (1981), Nr. 9, S. 1541-1544

[4] Büyükalaca, O. ; Jackson, J.D: “The correction to take account of variable property effects on turbulent forced convection to water in a pipe”, In: International Journal of Heat and Mass Transfer 41 (1998), Nr. 4-5, S. 665-669

[5] Lee, J. et al.: “Effect of wall heating on turbulent boundary layers with temperature-dependent viscosity” In: Journal of Fluid Mechanics 726 (2013), S. 196-225

[6] Lee, J. et al.: “Turbulent thermal boundary layers with temperature-dependent viscosity” In: International Journal of Heat and Fluid Flow 49 (2014), S. 43-52

[7] Kraume, M.: „Energie-, Impuls- und Stofftransport II“, Berlin: Technische Universität Berlin, 2012

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!