Modellierung des Wärmeübergangs von Fluiden hoher Prandtl-Zahl mit temperaturabhängiger Viskosität in einem RANS-Turbulenzmodell

Fachgebiet: Energieverfahrenstechnik und
Umwandlungstechniken regenerativer Energien

von

Moritz Schenker

Betreuer:
Univ. Prof. Dr. rer. nat. Frank Behrendt
Dr. rer. nat. Andreas Spille-Kohoff (CFX Berlin)

3. August 2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **IV**

Tabellenverzeichnis **VI**

Nomenklatur **VII**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung 2

1.3 Gliederung der Arbeit 3

2 Grundlagen **4**

2.1 Numerische Strömungssimulation 4

2.1.1 Transportgleichungen 5

2.1.2 Turbulenzmodellierung 6

2.1.3 Diskretisierung 7

2.1.4 Fehler in der numerischen Strömungssimulation 10

2.2 Methodik und Software 12

2.3 Wandgesetze 13

2.3.1 Geschwindigkeit 13

2.3.2 Temperatur 19

2.3.3 Nutzung der Wandgesetze als Randbedingung 23

2.4 Literaturreview 26

2.4.1 Einfluss der hohen Prandtl-Zahl 26

2.4.2 Einfluss der temperaturabhängigen Viskosität 29

3 Numerische Simulation einer Kanalströmung **35**

3.1 Geometrie und Vernetzung 35

3.2 Randbedingungen 37

3.3 Materialeigenschaften 40

4 Ergebnisse und Diskussion **42**

4.1 Verifikation der Wandgesetze in ANSYS CFX 42

4.2 Basismodell: Ausgebildete Grenzschichten 44

4.2.1 Vergleich zwischen temperaturabhängiger und konstanter Viskosität 44

4.2.2 Berechnung mit gröberer Auflösung 54

4.2.3 Fazit Basismodell 60

4.3 Sprunghafte Veränderung der Temperaturrandbedingung 61

4.4 Blockprofileinströmung 66

4.5 Hinweise zur Gitterqualität bei Verwendung der Standardmodelle in ANSYS CFX 71

5 Modellanpassung **73**

5.1 Unterschiede in der Herleitung der Wandgesetze 74

5.2 Achsenverschiebung des logarithmischen Bereichs 77

5.3 Nichtlinearität in der viskosen Unterschicht 83

5.4 Überblendung zwischen linearem und logarithmischem Verlauf von T^+ 88

5.5 Fazit und Grenzen der Modellanpassung 90

6 Zusammenfassung und Ausblick **93**

A Anhang **96**

Literaturreferenzen **103**

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Verhalten von Fluiden mit hoher Prandtl-Zahl und temperaturabhängiger Viskosität bei der Strömung durch einen beheizten Kanal im Hinblick auf den Wärmeübergang untersucht, um Rückschlüsse auf die Anwendung von Ölen zur Kühlung in Motoren oder Turbinen ziehen zu können. Dazu wurden numerische Strömungssimulationen mit Hilfe von ANSYS CFX im RANS-Turbulenzmodell durchgeführt. Die Ergebnisse für Strömungen mit temperaturabhängiger bzw. konstanter Viskosität unterschieden sich dabei grundlegend. Die Simulationen mit variabler Viskosität zeichneten sich durch eine verringerte Reibung und einen erhöhten Wärmeübergang an der Wand aus.
Anschließend wurden die Resultate der ausgebildeten turbulenten Grenzschichtströmung bei einer hinreichend feinen Vernetzung den herkömmlichen Ansätzen zur Modellierung von Geschwindigkeits- und Temperaturverläufen in der Nähe der Wand gegenübergestellt. Dabei konnten deutliche Veränderungen sowohl aufgrund der variablen Viskosität als auch der hohen Prandtl-Zahl festgestellt werden. Das dimensionslose Geschwindigkeitsprofil weicht in der viskosen Unterschicht vom linearen Verlauf ab und weist im logarithmischen Bereich eine höhere Verschiebung gegenüber einer Simulation mit konstanter Viskosität auf. Dieser Unterschied nimmt mit steigendem Viskositätsverhältnis zu. Für das dimensionslose Temperaturprofil kann bei konstanter Viskosität eine Abweichung im logarithmischen Bereich gegenüber der Korrelation von Kader [11, S. 1543] festgestellt werden, die aus der hohen Prandtl-Zahl resultiert. Des Weiteren wird die Verschiebung des logarithmischen Bereichs von der temperaturabhängigen Viskosität beeinflusst. Dieses Verhalten konnte mit Hilfe von DNS-Daten aus der Literatur bestätigt werden [25, S. 45]. Die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit ist daher elementar für die Berechnung einer solchen Strömung.
Im nächsten Schritt wurden die Fehler analysiert, die bei Verwendung der herkömm-

lichen Modelle unter Einsatz von gröberen Gittern auftreten. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Wandschubspannung bei variabler Viskosität überschätzt wird, während die Wandwärmestromdichte zu niedrig berechnet wird. Die Abweichungen gegenüber der Lösung mit feinem Netz nehmen mit steigendem Wandabstand des ersten Gitterknotens tendenziell zu und erreichen bei der Wärmestromdichte Werte von bis zu 40 %. Bei Verwendung der standardmäßig implementierten Modelle sollte im gesamten Netz ein y^+-Wert von unter eins eingehalten werden, um eine Abweichung von unter 10 % zu garantieren. Es konnte gezeigt werden, dass die Anforderungen an die Vernetzung noch weiter steigen, wenn statt der ausgebildeten Grenzschichten Temperatursprünge an der Wand oder Blockprofilströmungen am Einlass betrachtet werden. Mit diesen Szenarien sollte eine ungleichmäßige Strömung modelliert werde. Dies ist nötig, da in den meisten Anwendungsfällen nicht von konstanten Randbedingungen über einen längeren Zeitraum ausgegangen werden kann, sondern sich sowohl Temperatur als auch Geschwindigkeiten ständig ändern können. Im Fall unausgebildeter Grenzschichten steigen die Abweichungen gegenüber dem feinen Netz noch einmal an, was für noch höhere Anforderungen bis zu $y^+ < 0,5$ sorgt.

Da eine solch hohe Auflösung für komplexere Geometrien nur schwer zu erreichen ist und die Rechenanforderungen dabei enorm ansteigen, ist es von besonderem Interesse, eine Verbesserung der verwendeten Modellgleichungen vorzunehmen. Im letzten Kapitel wurden daher auf Basis der zuvor durchgeführten Fehleranalyse und einer theoretischen Betrachtung Anpassungen in den Wandfunktionen von Geschwindigkeit und Temperatur vorgenommen. Die Modifizierung erfolgte in drei Schritten: Einstellen der Achsenverschiebung in den logarithmischen Bereichen, Anpassung an die Nichtlinearität in der viskosen Unterschicht mit Integralapproximation und Änderung der Überblendung zwischen den zwei Bereichen des dimensionslosen Temperaturverlaufs.

Mit den implementierten Gleichungen konnten die Abweichungen in der Wärmestromdichte und der Schubspannung bei ausgebildeter Grenzschichtströmung für alle Netze unter 15 % gebracht werden, besonders im Bereich $y^+ > 10$ konnten signifikante Verbesserungen beobachtet werden.

Erste Tests zeigten bei Verwendung der angepassten Wandfunktionen auch in den Szenarien Temperatursprung und Blockprofileinströmung erhebliche Verbesserungen. Eine detaillierte Untersuchung dieser Szenarien könnte an die Arbeit anschließen, um die Verbesserung anhand unterschiedlicher Anwendungen zu verifizieren.

Da die Anpassung der Wandfunktionen auf einer Kalibrierung an den Simulationsdaten eines ausreichend feinen Netzes basiert, muss sie für abweichende Fluide und

Randbedingungen neu eingestellt werden. Hierbei wäre es sehr interessant, die Modifikationen an verschiedenen Simulationen mit unterschiedlichem Viskositätsverhalten, im besten Fall anhand von DNS-Daten, zu überprüfen und möglicherweise zu verallgemeinern. Im Anschluss könnten die Zusammenhänge an komplexeren Geometrien und variablen Randbedingungen getestet werden, da bisher nur vereinfachte Fälle mit gleichbleibender Einlasstemperatur und zweidimensionaler, ebener Geometrie betrachtet wurden.

Im Hinblick auf eine weiterführende Arbeit wäre es zudem hilfreich, eine Analyse mit mehrphasiger Strömung durchzuführen, da in den betreffenden Anwendungsbereichen besonders häufig Mischungen aus Luft und Öl verwendet werden. Eine Untersuchung würde zeigen, ob die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse auf die mehrphasige Strömung übertragen werden können bzw. welche zusätzlichen Einflüsse berücksichtigt werden müssen. Eine andere Anwendung der Erkenntnisse könnte die Übertragbarkeit auf den Stofftransport sein. Das Analogon zur Prandtl-Zahl wäre dort eine hohe Schmidt-Zahl, die das Verhältnis von Impuls- zu Stofftransport beschreibt.