



Untersuchung, Verifikation und Validierung der Rauheitsmodellierung im ANSYS CFX SST-Modell

Bachelorarbeit für die Prüfung zum Bachelor of Science

im Studiengang Physikalische Ingenieurwissenschaft

an der Technischen Universität Berlin

Fakultät V Verkehrs- und Maschinensysteme

Institut für Strömungsmechanik und technische Akustik

Fachgebiet Experimentelle Strömungsmechanik

Berlin, 02.03.2015

Erstgutachter: Prof. Dr. Ing. C. O. Paschereit

Zweitgutachter: Dr. C. N. Nayeri

Betreuer CFX Berlin: Dr. rer. nat. A. Spille-Kohoff

Betreuer TU Berlin: M.Sc. J. Wendler

Autor: Sascha Voigt

Matrikelnr.: 340706

Anschrift: Spiekermannstraße 32 in 13189 Berlin

Email: sascha.voigt90@googlemail.com

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Theoretische Grundlagen turbulenter Strömungen	3
2.2	Turbulenzmodelle	6
2.2.1	Skalenauflösende Turbulenzmodelle	6
2.2.2	Statistische Turbulenzmodellierung (RANS – Modelle).....	7
2.3	Das ANSYS CFX SST-Modell.....	13
2.4	Theoretischer Ansatz zur Behandlung glatter Wände	14
2.5	Umsetzung in ANSYS CFX.....	19
2.6	Theoretischer Ansatz zur Behandlung rauher Wände	21
2.6.1	Rauheitsmodell: Äquivalente Sandrauheit	23
2.6.2	Einfluss der Sandrauheit auf turbulente Grenzschichten.....	24
2.7	Umsetzung in ANSYS CFX.....	29
2.8	Umrechnung technischer Rauheiten in äquivalente Sandrauheiten	34
2.8.1	Umrechnung nach Hermann Schlichting (1936)	34
2.8.2	Re-Evaluierung nach Coleman, Hodge und Taylor (1984).....	35
2.8.3	Umrechnungsalgorithmus von Adams, Grant und Watson (2012)	36
2.8.4	Umrechnung nach Schlichting und Gersten (2006).....	37
3	Verifikation der Wandmodelle in ANSYS CFX	39
3.1	Vorüberlegungen	39
3.2	Simulation eines turbulenten 2D-Kanals	41
3.2.1	Aufbau und Durchführung.....	41
3.2.2	Ergebnisse	46
4	Validierung des Rauheitsmodells in ANSYS CFX	53
4.1	Simulation des Versuchs zur rauhen Rohrströmung von Nikuradse.....	53
4.1.1	Versuchsaufbau und Durchführung	53
4.1.2	Simulation des Experiments	54
4.1.3	Ergebnisse	57
4.2	Simulation der Rauheitsexperimente von Schlichting.....	60
4.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	60
4.2.2	CFD Modell der Schlichting Versuche	62

4.2.3	Mikroskopische Simulationen	64
4.2.4	Vergleich zwischen mikroskopischen und äquivalenten Simulationen	77
5	Fazit und Ausblick	83
	Literaturverzeichnis	87

5 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, die Qualität des Rauheitsmodells in ANSYS CFX zu untersuchen. Dazu wurde zunächst das Modell selbst vorgestellt und welche theoretischen Grundlagen und Annahmen diesem zugrunde liegen. Anschließend musste die tatsächliche Implementierung des Modells in ANSYS CFX nachgewiesen werden. Anhand der 2D – Kanalströmungssimulationen in Kapitel 3 konnte das Modell zu großem Teil verifiziert werden, bis auf eine Ausnahme bei der Berechnung der Wirbelviskosität μ_t aus den k - und ω - Randbedingungen. Eine mögliche Erklärung dieser Abweichung liegt in der Version von ANSYS CFX. Während die in [9] beschriebenen Formeln für das Rauheitsmodell für die Version 11 von CFX angegeben sind, wurde innerhalb dieser Arbeit mit Version 15 gearbeitet. Es besteht also die Möglichkeit, dass während der neueren Versionen kleinere Änderungen in den Modellgleichungen vorgenommen wurden.

Die erfolgreiche Verifikation des Modells erlaubt die Validierung anhand nachsimulierter Experimente und die Verknüpfung der Ergebnisse mit den theoretischen Modellüberlegungen. Zur Validierung wurden zum einen die rauen Rohrströmungsversuche von Nikuradse [11], zum anderen die Rauheitsexperimente von Schlichting [12] in einer Rechteckkanalströmung mit gleichmäßig angeordneten Rauheitselementen simuliert.

Für die Nikuradse – Versuche konnte eine gute Übereinstimmung der Rohrreibungszahlen in Abhängigkeit der Reynoldszahlen und relativen Rauheiten im turbulenten Bereich erzielt werden. Bei der Untersuchung der Schlichting – Experimente wurden zwei verschiedene Simulationen durchgeführt. Neben der Simulation des per se glatten Kanals, d. h. ohne Rauheitselemente und mit äquivalenter Sandrauheit, wurden zusätzlich mikroskopisch aufgelöste Simulationen für vier Testfälle simuliert.

Nach analoger Auswertung der mikroskopisch aufgelösten Simulationen zum Experiment ergaben sich große Abweichungen für die mittleren Geschwindigkeiten sowie die erhaltenen äquivalenten Sandrauheiten gegenüber den Messdaten. Eine mögliche Ursache für diese Abweichungen können die dem SST – Modell zugrunde liegenden Modellannahmen sein, insbesondere die Unfähigkeit die Anisotropie der Turbulent korrekt darzustellen, die mit dem Ansatz von Boussinesq einhergeht. Aus diesem Grund wurde für die Rauheit KW4 eine SAS Simulation gestartet, die die SST – Lösung als Initialisierung enthielt. Abbildung 5-1 zeigt wie sich die Konvergenz der mittleren Geschwindigkeit für diese Simulation verhielt.

Fazit und Ausblick

Simulation der Rauheitsexperimente von Schlichting

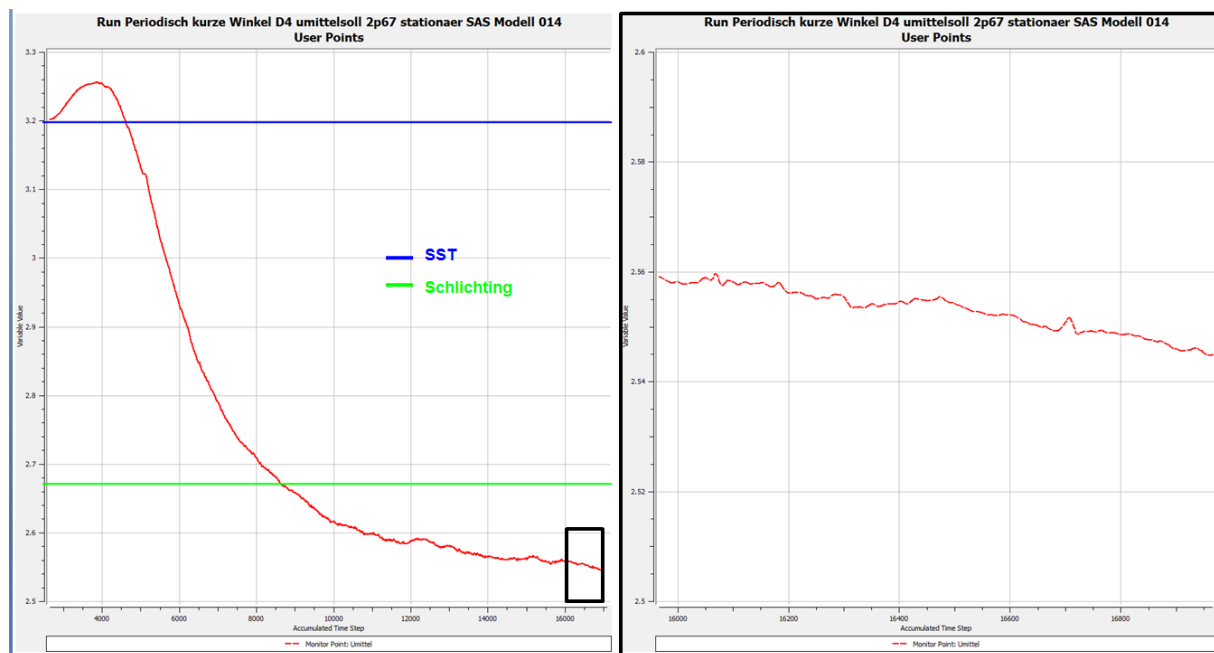


Abbildung 5-1: Konvergenz der mittleren Geschwindigkeit einer SAS Simulation für KW4 mit der SST -Startlösung

Die mittlere Geschwindigkeit fällt deutlich ab im Vergleich zur SST – Lösung und sinkt sogar noch weit unter den experimentellen Wert von Schlichting. Dabei muss beachtet werden, dass sich noch kein konstanter Wert eingestellt hat und die Konvergenz somit noch nicht abgeschlossen ist. Es können somit keine weiteren Aussagen über einen möglichen Endwert für die mittlere Geschwindigkeit getroffen werden. Die SAS Simulation soll nur einen kleinen Ausblick geben, auf welche Art und Weise eventuell bessere Ergebnisse erzielt werden können. Eine Betrachtung der Simulationsdauer von 16000 Zeitschritten lässt erahnen, wie viel aufwändiger eine SAS – Simulation und damit ein eventuell genaueres Ergebnis gegenüber der SST – Berechnung ist. Durch die teilweise Auflösung von Wirbelstrukturen muss die Berechnung zwingen transient durchgeführt werden, was enorme Rechenzeiten erfordert. Abbildung 5-2 zeigt exemplarisch solch aufgelöste Wirbelstrukturen bei einer SAS Simulation. Beim SST – Modell werden all diese Strukturen geglättet und entstehen mittlere Profile, die im Allgemeinen nicht den Verhältnissen in der Realität entsprechen. In Abbildung 5-3 ist die Geschwindigkeitskontur am Messquerschnitt des SST Modells zusammen mit einem Momentanwert sowie dem zeitlichen Mittelwert der SAS – Simulation dargestellt.

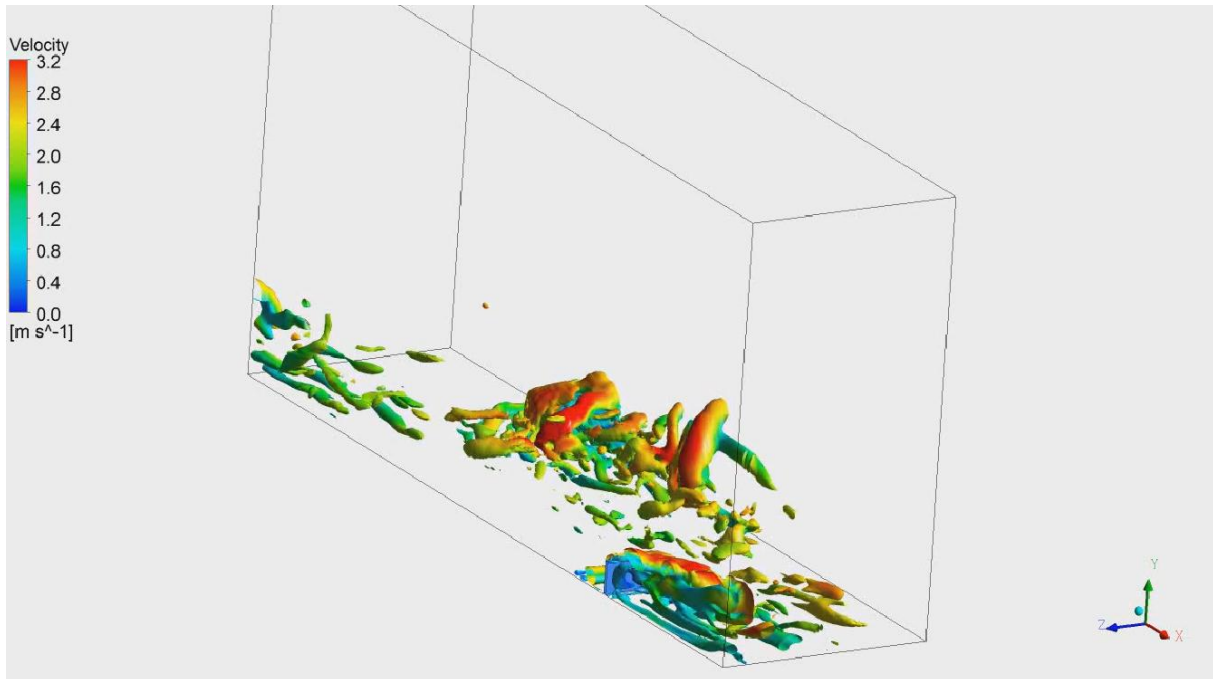


Abbildung 5-2: Vortex Core Regions einer SAS Simulation von KW4 mit dem Q-Kriterium von 0,05

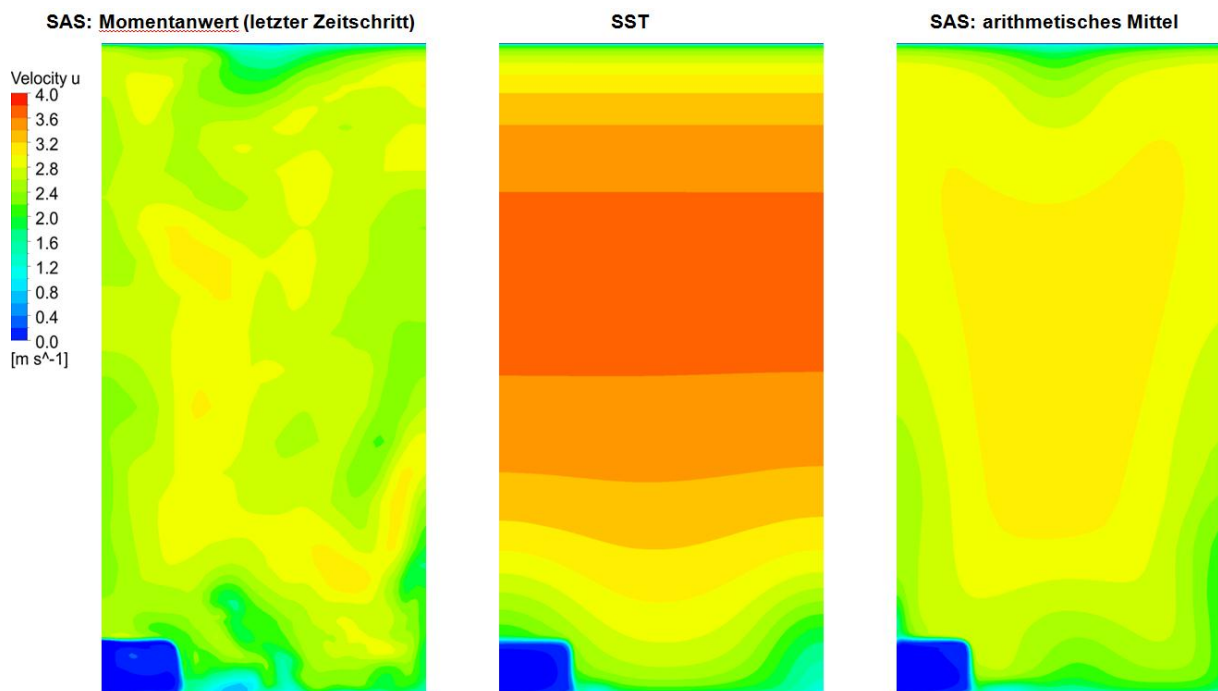


Abbildung 5-3: Geschwindigkeitskonturen im Messquerschnitt für KW4, Vergleich SAS und SST

Ein Blick auf die Kontur für die Momentaufnahme der Geschwindigkeit verrät, wie ein tatsächliches Geschwindigkeitsfeld zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer turbulenten Kanalströmung aussieht. Selbst eine zeitliche Mittelung ergibt kein so gleichmäßiges Profil wie es beim SST – Modell der Fall ist. Auffällig ist zu dem die veränderliche Struktur des Profils in Spannweitenrichtung an der glatten Wand bei der arithmetischen Mittelung in der SAS Simulation.

Der Profilcharakter tatsächlicher Strömungen, insbesondere über Wände mit Rauheitselementen ist ohnehin kritisch zu betrachten. In der Kontur der SST Simulation ist eine große Diskrepanz zwischen den Profilen an unterschiedlichen Stellen in Spannweitenrichtung zu erkennen. Darüber hinaus gibt es auch eine Abhängigkeit in Strömungsrichtung, da zum Beispiel unmittelbar hinter einem Rauheitselement aufgrund der Ablösung ein Rückströmungsgebiet entsteht, was auch in Abbildung 5-3 hinter dem Winkel zu erkennen ist.

Um bessere Ergebnisse zu erhalten kann also die Auflösung gewisser Turbulenzstrukturen wie in einer SAS Simulation dienen. Dabei ist stets abzuwägen, ob der bedeutend größere Aufwand in lohnendem Verhältnis zum Genauigkeitsergebnis steht. Außerdem kann bei der Auswertung von Geschwindigkeitsprofilen an rauen Wänden eine Spannweitenmittelung sowie eine Mittelungen über mehrere Profile in Strömungsrichtung ein Profil ergeben, dass die Verhältnisse in der Strömung besser erfasst, als ein punktuelles Profil.

Zusammenfassend bietet das SST – Modell mit dem integrierten Sandrauheitsmodell und der automatischen Wandfunktion eine einfache und benutzerfreundliche Möglichkeit, turbulente Strömungen über rauen Wänden mit erstaunlicher Genauigkeit zu simulieren, wenn man die starken Vereinfachungen der RANS – Modelle und zusätzlich die Erfassung von komplexen Rauheitsstrukturen in nur einem einzigen Parameter berücksichtigt.