

Mitteilung

Projektgruppe / Fachkreis: Numerische Aerodynamik

Effiziente Modellierung wandnaher Turbulenz in hybriden RANS/LES Simulationen

Marius Herr, Axel Probst

DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Bunsenstraße 10, 37073 Göttingen, marius.herr@dlr.de

Die hybride RANS/LES Methodik (HRLM) verknüpft die statistische RANS-Modellierung mit der Large-Eddy Simulation (LES), um Strömungen der Flugzeugaerodynamik mit hoher Reynoldszahl einem lokal skalenauflösenden Ansatz zugänglich zu machen. Die bisher in den unstrukturierten DLR-Codes TAU (kompressibel) und THETA (inkompressibel) verwendeten Varianten der Detached-Eddy Simulation basieren im wandnahen RANS-Bereich auf der so genannten *low-Reynolds* Modellierung, die eine vollständige Auflösung der Grenzschicht bis in die viskose Unterschicht ($y^+ \approx 1$) erfordert. Um diese hohen Anforderungen an die wandnormale Netzauflösung zu relaxieren, wird in dieser Arbeit die Kombination der HRLM mit analytischen Wandfunktionen nach Knopp [1] für die turbulente Grenzschicht verfolgt. Diese stellen zwischen der normierten ersten Zelhöhe $y^+(1)$ und der als Randbedingung vorgegebenen Wandschubspannung τ_w einen funktionalen Zusammenhang her, der von der viskosen Unterschicht, über den Übergangsbereich bis in den logarithmischen Bereich gültig ist. Die Methodik wird mit beiden Lösern TAU und THETA auf wandnormal vergrößerten *high-Reynolds* Netzen ($y^+(1) \approx 12.5 \dots 210$) an verschiedenen kanonischen HRLM-Testfälle (periodische Kanalströmung, rückspringende Stufe, ablösende Hügelströmung) erprobt und hinsichtlich seiner Sensitivitäten und Potentiale für die Rechenzeitreduktion bewertet.

Vorgehen und Ergebnisse

Die Auswahl der Testfälle adressiert unterschiedliche Strömungs- und Modellierungsphänomene bei begrenztem Rechenaufwand. So wird mit der Kanalströmung bei $Re_\tau = 4200$ eine *wandmodellerte LES* (IDDES) einer einfachen Grenzschicht ohne Druckgradient betrachtet, während die rückspringende Stufe und die Hügelströmung geometrie- bzw. druckinduzierte Ablösungen aufweisen, in der die hierfür verwendete DDES vom RANS-Modus in den lokalen DES/LES Modus umschaltet. Für alle betrachteten Testfälle werden neben den *high-Reynolds* Netzen mit variierenden Werten $y^+(1) > 1$ auch die jeweiligen *low-Reynolds* Netze erstellt, die zur Erzeugung von numerischen Referenzergebnissen dienen. Mit der Gegenüberstellung von TAU- und THETA-Ergebnissen werden zudem unterschiedliche Zellmetriken am viskosen Rand betrachtet: während TAU die Wandfunktion am oberen Rand der Primärgitterzelle auswertet, verwendet THETA einen zusätzlich eingeführten Punkt innerhalb der Zelle, wodurch sich die effektive wandnormale Auflösung $y^+(1)$ bei ansonsten identischem Netz erhöht. Um eine Vergleichbarkeit zwischen beiden Lösern herzustellen, beziehen sich die $y^+(1)$ -Werte im Folgenden auf den Abstand zwischen dem Auswertepunkt und der Wand. Abbildung 1 (links) zeigt exemplarisch einen Ausschnitt des Primärnetzes für die rückspringende Stufe mit $y^+(1) = 50$, wobei sich der $y^+(1)$ -Wert auf die Stelle $x/h = -1$ bezieht. Es handelt sich um hybride Netze mit strukturierter Vernetzung in Wandnähe und unstrukturierten Gitterzellen im Ablösebereich der Strömung. In Abbildung 1 (rechts) sind die mittleren Wandreibungsverläufe für eine effektive Auflösung von $y^+(1) = 12.5$ (TAU) bzw. 13.5 (THETA) im Vergleich zu Referenzergebnissen dargestellt. Abgesehen von einer Überschätzung der Wandreibung im Wiederanlegebereich ($10 < x/h < 26$) bei THETA, liegen in beiden Strömungslösern gute Übereinstimmungen mit der *low-Reynolds* Rechnung vor. Die Abweichungen stromauf der Stufe ($x < 0$) sind auf Diskretisierungsfehler der viskosen Flüsse zurückzuführen [2], die nur bei Netzen in diesem $y^+(1)$ -Bereich beobachtet werden. Im Rahmen von Netzstudien mit systematisch vergrößerten *high-Reynolds* Gittern konnte gezeigt werden, dass sich für beide Löser akzeptable Übereinstimmung-

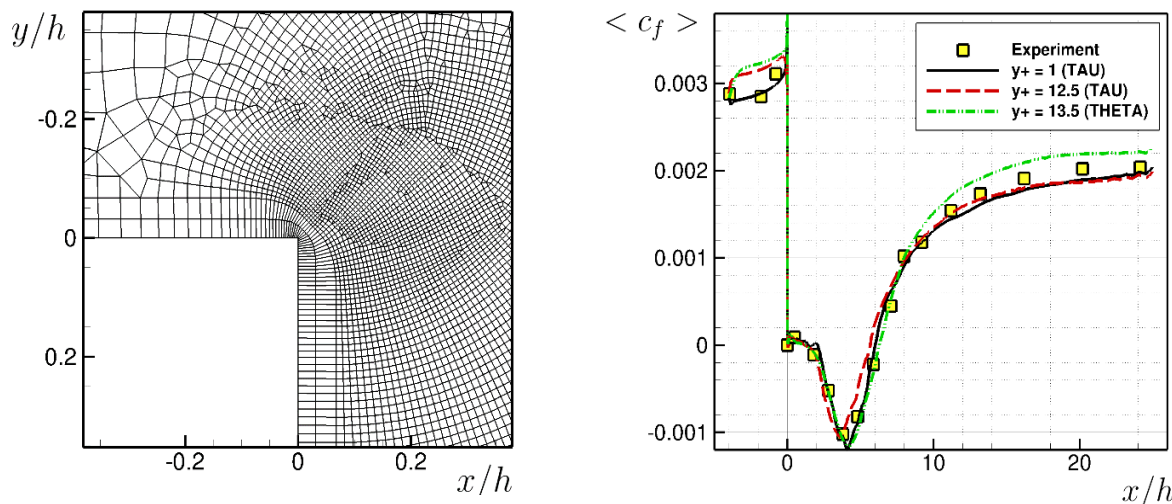


Abbildung 1: **Links:** Gitterstruktur eines Wandfunktionsnetzes der rückspringenden Stufe im Bereich der konvexen Ecke. **Rechts:** Mittlere Wandreibungsverläufe entlang der Stufenebenen von DDES – Rechnungen mit den DLR-Strömungslösern TAU und THETA.

en im Vergleich zur *low-Reynolds* Rechnung ergeben, sofern ein $y^+(1)$ – Wert von 25 nicht überschritten wird. Die prozentuale Ersparnis an Netzpunkten verglichen mit dem Referenznetz liegt bei TAU für $y^+(1) = 12.5$ bei 24.5% und für $y^+(1) = 25$ bei 29.3%, während sich bei THETA für vergleichbare (effektive) wandnormale Auflösungen durch die besondere Randmetrik sogar 34.1% bzw. 37.1% Netzpunkten einsparen lassen. Zur ganzheitlichen Beurteilung der möglichen Rechenzeitreduktion wurden am Beispiel einer ablösenden Hügelströmung (*NASA wall-mounted hump*) Effizienzuntersuchungen durchgeführt. Wie Tabelle 1 für den TAU Code zu entnehmen ist, reduziert sich bei zunehmenden $y^+(1)$ -Werten die Rechenzeit pro (innerer) Iteration, was auf die sinkende Gesamtanzahl von Netzpunkten zurückzuführen ist. Zusätzlich nimmt für ansteigende $y^+(1)$ -Werte jedoch auch die durchschnittliche Anzahl an inneren Iterationen ab, die zum Erreichen eines fest gewählten Konvergenzkriteriums in jedem physikalischen Zeitschritt des impliziten dualen Zeitschrittverfahrens benötigt werden. Dies geht vermutlich auf die reduzierte Streckung der wandnaher Zellen und die dadurch verringerte

numerische Steifigkeit zurück. Beide Effekte führen in TAU zu einer deutlichen Gesamteinsparung der Rechenzeit von 60.4 % für $y^+(1) = 12.5$ bzw. 72.6 % bei $y^+(1) = 50$.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich mit dem Wandfunktionsansatz nach Knopp [1] in Kombination mit HRLM sowohl im TAU- als auch im THETA-Code gute Ergebnisse erzielen lassen. Dies gilt sowohl für DDES-Simulationen von Strömungen mit Ablösung und Wiederanlegebereich, als auch für IDDES-Simulationen von Kanalströmungen als wandmodellerte LES, auf die in der finalen Veröffentlichung näher eingegangen wird. Die Verkürzung des Rechenaufwandes für die Hügelströmung mit TAU von mehr als 60 % gegenüber der herkömmlichen HLRM demonstriert das Potential des Wandfunktionsansatzes für industrielle Anwendungen. Weitere Aspekte der geplanten Veröffentlichung sind die Untersuchung verschiedener wandnaher Vernetzungsstrategien sowie die Ableitung von globalen Anforderungskriterien für *high-Reynolds* Netze anhand der drei betrachteten Testfälle (Kanal-, Stufen- und Hügelströmung).

$y^+(1)$	Einsparung Zellen	Einsparung Rechenzeit / It.	Reduktion It. / Zeitschritt	Reduktion Rechenzeit
12.5	28.1 %	25.7 %	46.7 %	60.4 %
25	33.8 %	31.6 %	51.4 %	66.7 %
50	38.9 %	36.8 %	56.7 %	72.6 %

Tabelle 1: Übersicht der Rechenzeitverkürzungen durch Wandfunktionen beim 2D - Wall mounted Hump mit TAU.

Literatur:

- [1] Knopp, T. (2005): A new adaptive wall-function method for subsonic and transonic turbulent flows. Bericht des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR IB 224-2005 A14.
- [2] Kalitzin, G., et al. (2005): Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions. In: Journal of Computational Physics 204.1, S. 265-291.