

Fehleranalyse für skalenauflösende Simulationen

Fehlerbewertung für skalenauflösende Simulationen mit OpenFOAM am Testfall Flow over Periodic Hills

L. Wein, J.R. Seume, *Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, Leibniz Universität Hannover*

Kurzgefasst

- LES
- Validierung
- Flow over Periodic Hills

In den vergangenen Jahren kam es zu einem starken Zuwachs bei der Nutzung von skalenauflösenden Simulationen im Bereich der Ingenieurwissenschaften. Diese ermöglichen im Vergleich zu industriell eingesetzten RANS-Verfahren einen signifikanten Zugewinn in der genauen Vorhersage von insbesondere großen Ablösegebiete und zugrundeliegenden Stabilitätsmechanismen. Bei einer entsprechend hohen Auflösung ist ebenfalls die Transitionsvorhersage in angelegten Grenzschichten möglich.

Diese Perspektive macht skalenauflösende Simulationen zu einem wesentlichen Werkzeug in der technischen Strömungsmechanik, das experimentelle Untersuchungen zumindest wesentlich ergänzt, wenn in Teilen sich sogar ablöst. Neben diesem breiteren Einsatz und der hohen Gewichtung von skalenauflösenden Simulationen, steigt ebenfalls die Anforderung an eine quantifizierbare Aussage. Wie in Experimenten wird ebenfalls auch eine Aussage über die Fehlerkomponente gefordert.

Wie der einschlägigen Literatur zu entnehmen, findet die Einteilung des numerischen Fehlers in verschiedenen Kategorien statt. Einige dieser Fehler lassen sich quantifizieren (z.B. Diskretisierungsfehler), andere (z.B. Modellfehler; im Sinne der Turbulenzmodellierung, aber auch aus der Abbildung des geometrischen Modells) eher nicht. Im Kontext einer ingenieurtechnischen Betrachtung, ist es häufig von großer Bedeutung Verfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Vor diesem Hintergrund ist es von besonderem Interesse, die eingesetzten Ressourcen einem resultierenden Fehler gegenüberzustellen. In diesem Fall konkurriert der Diskretisierungsfehler direkt mit dem Mittelungsfehler, der bei den inhärent instationären skalenauflösenden Simulationen gegenüber stationärer RANS mit einfließt.

In dem meisten technischen Fällen kann ein Problem als stationär oder periodisch wiederkehrend eingenommen werden. Der Diskretisierungsfehler

fällt exponentiell mit der Netzauflösung und der Ordnung des eingesetzten Verfahrens. Bei einer gegebenen Rechenkapazität τ die zur Beurteilung eines Problems zur Verfügung steht τ steigt der Aufwand pro simulierte Zeiteinheit mit Δx^4 . Dieser höhere numerische Aufwand pro Zeiteinheit reduziert in diesem Rechenbeispiel die Möglichkeit eine Mittlung des Strömungsfelds durchzuführen. Der Mittelungsfehler fällt ebenfalls exponentiell mit der Anzahl der eingesetzten Samplewerte. Diese beiden Fehler bedingen sich somit und der Anwender muss die Entscheidung treffen, ob die zur Verfügung stehenden Ressourcen in die Mittelwertbildung oder in die Diskretisierung investiert werden sollen. Eine quantitative Bewertung des eingesetzten Lösers muss durchgeführt werden, um eine Bemessungsgrundlage zu bekommen. Es ist zu betonen, dass das jeweilige Verfahren (streng genommen ebenfalls die Architektur des eingesetzten Rechensystems) entscheidend ist, denn die Ordnung und der Typ (Limiter etc.) des Verfahrens beeinflusst den Diskretisierungsfehler und der jeweilige numerische Löser ebenfalls nicht linear skaliert.

In einer systematischen Studie des Rechenfalls Flow over Periodic Hills (siehe Abbildung 1) nach Breuer et al. 1 sollen diese Eigenschaften für einen etablierten inkompressiblen PISO-Löser aus der OpenFOAM Umgebung durchgeführt werden. Dieser Testfall hat den Vorteil, dass der Kanal als endlos angenommen werden kann und die Simulation mit periodischen Randbedingungen sowie reibungsbehafteten Rändern auskommen kann. Die Fehlermöglichkeiten werden drastisch reduziert. Es besteht nur die Unsicherheit bezüglich des spannenweiten Auflösung des Strömungsquerschnitts.

Der eingesetzte Finite-Volumen-Löser hat eine räumliche und zeitliche Genauigkeit zweiter Ordnung. Es werden relative Netzaufösungen gewählt, die zwischen einer Very Large Eddy Simulation (VLES) und einer Quasi Direkten Numerischen Simulation (QDNS) einzustufen wären. Der Terminus QDNS soll darauf hinweisen, dass ein entsprechend dissipationsarmes Verfahren zweiter Ordnung den Anforderungen einer DNS genügen würde. Um Modellfehler zu eliminieren, wird ein impliziter Netzfilter eingesetzt.

Die relative Netzauflösung wird auf drei Rechenetzen über die absolute Auflösung sowie über drei unterschiedliche Reynolds-Zahlen eingestellt. Die Auswertung wird eine Netzunabhängigkeitsstudie inklusive der Extrapolation eines exakten Lösungs-

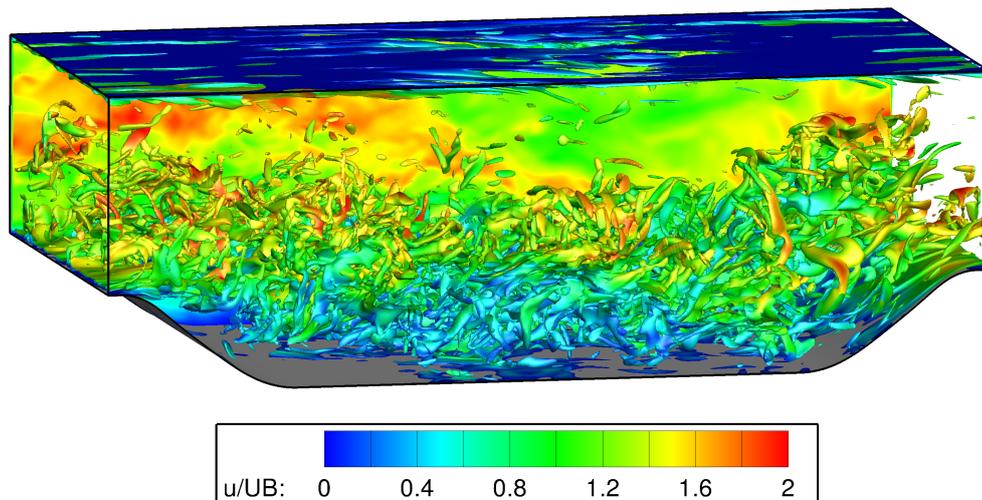


Abbildung 1: Instantanes Strömungsbild des Flow over Periodic Hills Testfalls bei $Re=2800$; Iso-Surface: Vorticity; Kontur: Geschwindigkeit

wertes auf der Basis der anteiligen turbulenten kinetischen Energie stattfinden. Der Mittelungsfehler wird über die Schwankungsbreite ermittelt. Darüber hinaus können Rückschlüsse über die Skalierbarkeit des Löser gezogen werden.

Vor der Netzunabhängigkeitsstudie wird die spannenweite Breite des Strömungsquerschnitts variiert. Über die Korrelation turbulenter Strukturen (hierfür werden die kleinste Reynolds-Zahl und das mittlere Netz gewählt) wird eine geometrische Unabhängigkeit bestätigt.

WWW

<http://www.tfd.uni-hannover.de>

Weitere Informationen

[1] M. Breuer, Peller N. Rapp, C. and M. Manhart, Flow Over Periodic Hills: Numerical and Experimental Study in a Wide Range of Reynolds Numbers, *Computers and Fluids*, 38(2), pp. 433-457

Projektpartner

AG: Multiphysik turbulenter Strömungen TFD

Förderung

Der Bearbeiter ist über ein unabhängiges öffentlich co-finanziertes Projekt finanziert.