

Studien zur Turbulenzverteilung in Verdichterströmungen

Skalenauflösende Simulation der Schaufel-Nachlauf-Wechselwirkung transsonischer Verdichterströmungen

C. Bode, J. Friedrichs, Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen, Technische Universität Braunschweig

Kurzgefasst

- Skalenauflösende Simulation
- RANS-Modellentwicklung
- Stoß-Grenzschicht Interaktion
- Instationäre Schaufelwechselwirkung

Trotz der bisherigen Anstrengungen zur Verbesserung der Effizienz von Flugtriebwerken hat der Luftverkehr nach wie vor einen enormen Einfluss auf den Klimawandel und ist daher von hoher gesellschaftlicher Bedeutung. Das Projekt wird dazu beitragen, die negativen Auswirkungen die mit diesem Wachstum einhergehen, abzuschwächen und einen Beitrag zur Erreichung der *Flightpath 2050*-Ziele zu leisten [1]. Ein wesentlicher wissenschaftlich-technischer Beitrag wird in der Steigerung der Effizienz und Zuverlässigkeit zukünftiger Flugantriebe und ihrer Komponenten wie z.B. des Verdichters durch die Weiterentwicklung der im industriellen Entwurfsprozess verwendeten computergestützten Methoden gesehen.

Der Wirkungsgrad und die Zuverlässigkeit von Turbomaschinenkomponenten wie z.B. des Verdichters wird durch die instationären oder transienten Strömungsphänomene während des Betriebs erheblich beeinflusst. Diese Strömungsphänomene werden z.B. durch transiente Manöver, wie das Beschleunigen oder Verzögern der Turbomaschine, einer gestörten Zuströmung und die Wechselwirkung benachbarter Schaufelreihen aufgrund der Relativbewegung zwischen Rotoren und Statoren verursacht. Die damit einhergehende, mehrskalige turbulente Strömung, die auf eine einzelne Schaufelreihe wirkt, führt zu einer komplexen Strömungsinteraktion. So führt die Wechselwirkung eines turbulenten Nachlaufs mit stromabwärts liegenden Grenzschichten z.B. zu einer signifikanten Änderung der mittleren Leistung der betreffenden Schaufelreihen. Neben der Erhöhung der zeitlich gemittelten Verluste der Grenzschichten durch eine stückweise Ausbildung turbulenter Grenzschichtflecken bewirkt die Turbulenzkonvektion aus dem Nachlauf in die laminare Grenzschicht auch eine Zunahme der Störungen innerhalb der Grenzschicht. Die Zunahme

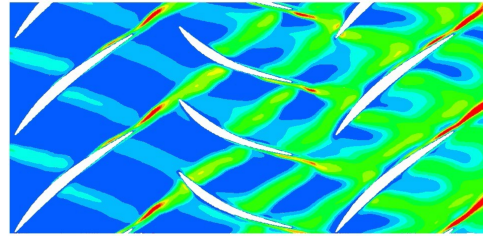


Abbildung 1: Rotor-Stator-Interaktion einer mehrstufigen Verdichterströmung

der Störungen kann zu einem früheren laminar-turbulenten Übergang führen. Beide Effekte führen zu höheren Verlusten im Vergleich zu einer laminaren Grenzschicht ohne auftretenden Nachlauf. Ein weiterer wesentlicher Einfluss auf das allgemeine Strömungs- und Verlustverhalten findet sich in den vorderen Stufen eines Hochdruckverdichters. Aufgrund der geometrischen Auslegung von Hochdruckverdichtern treten in den vorderen Stufen hohe Machzahlen und Kompressionsstöße auf, die zu komplexen Stoßwellen-Schaufel-Wechselwirkungen führen. Diese Wechselwirkungen zwingen die Grenzschicht zu zusätzlichen Verlusten, die von einer Vielzahl weiterer Parameter wie etwa dem Charakter der Grenzschicht sowie auftretender Grenzschichtablösungen abhängen. Dieses hochkomplexe Strömungsverhalten macht sowohl die Vorhersage bestehender Verdichter als auch die Auslegung neuer hocheffizienter Verdichter schwierig und ungenau, da die heute verfügbaren Auslegungswerkzeuge diese Phänomene nur unzureichend oder gar nicht berücksichtigen. Das aktuelle Problem bei der Vorhersage des Strömungsverhaltens eines mehrstufigen Hochdruckverdichters mit Hilfe von (U)RANS-basierten 2-Gleichungsturbulenzmodellen, die in der industriellen Umgebung etabliert sind, besteht darin, dass sie für aktuelle Konfigurationen auf der Grundlage begrenzter verfügbarer Validierungsdaten abgestimmt wurden. Die akzeptable Vorhersage der Gesamtverdichterleistung profitiert hierbei sehr oft von der gegenseitigen Aufhebung mehrerer lokaler Modellierungsdefizite. Diese Beseitigung von Fehlern wird in zukünftigen Designs mit immer kleineren Spielräumen bei der Erhöhung der Verdichterleistung und der zunehmenden Bedeutung lokaler Designmerkmale für das globale Verhalten nicht mehr akzeptabel sein. Ein besseres Verständnis der verschiedenen Einflussparameter auf das allgemeine Strömungs- und Verlustverhalten der Stoßwellenschaufel-Wechselwirkung des Ro-

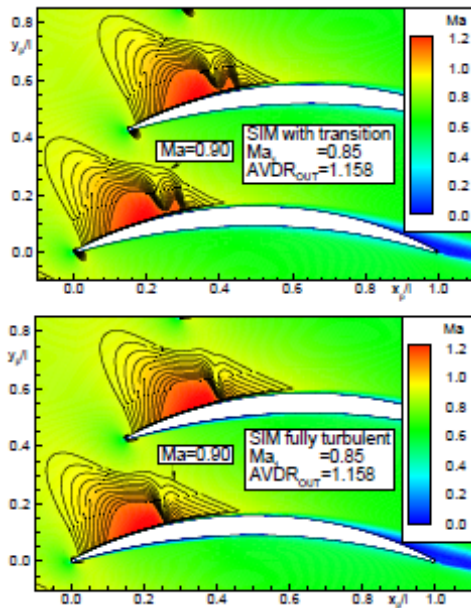


Abbildung 2: Einfluss der Turbulenzmodellierung auf die Stoß-Grenzschicht-Interaktion eines Verdichtergitters [2]

tors sowie der Nachlaufschaufel-Wechselwirkung des Stators in einer transsonischen Verdichterstufe und deren Berücksichtigung in den jeweiligen Turbulenz- und Transitionsmodellen wird zu mehr Vertrauen in die numerische Vorhersage bestehender Designs beitragen und auch eine Steigerung der Effizienz und Zuverlässigkeit zukünftiger Hochdruckverdichter und damit Turbomaschinen ermöglichen. Zur Verbesserung dieser Modelle werden hochauflösende Modellierungsdaten benötigt. Mit der ständig wachsenden Rechenleistung werden skalenauflösende Simulationen wie LES (Large Eddy Simulation) zu einem praktikablen Werkzeug, um diese Validierungsdaten zu erzeugen. Sie können wesentlich vollständigere aerothermische Informationen und Einblicke in die komplexen Strömungsphänomene liefern, verglichen mit immer komplexeren Versuchsumgebungen, die unter dem eingeschränkten Sondenzugang innerhalb der noch komplexeren Prüfstandsapparaturen leiden und für die die Kosten zunehmend ein begrenzender Faktor sind. In den letzten Jahren wurde LES bereits erfolgreich zur Vorhersage einer Vielzahl von Turbomaschinenproblemen eingesetzt, wie z.B. dem aerodynamischen Verhalten von Hoch- und Niederdruckturbinenkaskaden sowie Verdichterkaskaden, die alle mit verschiedenen Arten von Turbulenzphänomenen wie laminarem Grenzschichtübergang, einströmender Nachläufe oder Stößen zu tun haben. Neben neuen Einsichten in die zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen wurden auf der Grundlage dieser generierten High-Fidelity-Datenbanken maschinelle Lernwerkzeuge eingesetzt, um die Vorher-

sagegenauigkeit von RANS-Modellen zu verbessern. Auf diese Weise können High-Fidelity-Simulationen wie LES von Turbomaschinen-Strömungen direkte Auswirkungen auf industrielle Entwurfsiterationen haben, indem sie dazu beitragen, verlässlichere und genauere Modelle reduzierter Ordnung, z.B. RANS, zu generieren. Weiterhin erlauben solche Modelle eine bessere Übertragbarkeit auf zukünftige Konfigurationen ohne die heutige Validierung von RANS-Parametern im Vorfeld.

Unter Verwendung skalenauflösender Simulationen sollen in diesem Projekt Möglichkeiten zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit für mehrstufige Turbomaschinenkomponenten und damit ihrer Effizienz identifiziert werden, indem hochkomplexe instationäre turbulente Strömungen, die mit Nachlaufströmungen und Stößen überlagert sind, in einer einstufigen Rotor-Stator-transsonischen Verdichtenumgebung verstanden werden. Zu diesem Zweck werden im Rahmen dieses Projekts skalenauflösende Simulationen transsonischer Verdichterströmungen durchgeführt. Hierfür stehen mehrere bereits experimentell vermessene Testfälle (Verdichter-Kaskaden und Verdichter-Stufe) zur Verfügung. Diese bereits vorhandenen Validierungsdaten stehen sowohl für den Abgleich der skalenauflösenden Simulationen zur Verfügung und sollen darüber hinaus auch als Basismodell zur Unterstützung der Verbesserung der Transitions- und Turbulenzmodellierung dienen.

WWW

<http://www.ifas.tu-braunschweig.de>

Weitere Informationen

- [1] Kallas, S.; Geoghegan-Quinn, M., *Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation - Report of the High Level Group on Aviation Research / European Commission*, 2011.
- [2] Bode, C.; Kozulovic, D.; Stark, U; Hoheisel, H., *Boundary Layer Development Of A High Turning Compressor Cascade At Sub- And Supercritical Flow Conditions*, Proc. ASME Turbo Expo, Paper No. GT2012-68362, Copenhagen (Denmark), 2012.