

DNS von Turbinenströmungen unter Teillastbedingungen

Direkte Numerische Simulation einer Turbinenströmung zur Bewertung von Reynolds-Averaged Navier-Stokes Modellkorrelationen bei Teillast

C. Müller-Schindewolffs, F. Herbst, J.R. Seume,
Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, Leibniz Universität Hannover

Kurzgefasst

- Direkte Numerische Simulation
- RANS-Modellentwicklung
- Turbinen
- Teillastbetrieb

Im Rahmen der Energiewende wird von stationären Gasturbinen ein transientes Betriebsverhalten mit schnellen und häufigen An- und Abfahrvorgängen sowie ein Betrieb im Teillastbereich gefordert. Dies ist notwendig, um unvorhersehbare Schwankungen im Stromnetz auszugleichen, die bei der Einspeisung von Solar- und Windenergie unvermeidbar sind. Um diesen neuen Herausforderungen zu begegnen, wird vom Land Niedersachsen an der Leibniz Universität Hannover das Großprojekt *Dynamik der Energiewandlung* (DEW) durchgeführt. Im Themenbereich II des DEW ist vorgesehen die transienten Betriebsaspekte von Turbinen mittels skalenauflösender Simulationen zu untersuchen. In dem beantragten Vorhaben werden hierzu Vorarbeiten geleistet. Die Grundlage hierfür sind Flugzeugturbinen, für die diese Anforderungen seit langem bestehen.

In dem aktuellen Vorhaben sollen hierzu Direkte Numerische Simulationen (DNS) einer Turbinenschaukel durchgeführt werden. DNS haben die Eigenschaft die Navier-Stokes Gleichungen, die zur Beschreibung jeglicher Fluid-Strömung genutzt werden, „direkt“ zu lösen, ohne weitere Modelle zu nutzen. Dies macht diese Rechenmethode bei ausreichender räumlicher und zeitlicher Diskretisierung hoch exakt. Da der Einfluss strömungsbeeinflussender Sonden fehlt und sämtliche Informationen über das Strömungsfeld an jeder Position verfügbar sind, bieten DNS hinsichtlich der gebotenen Informationsdichte und nicht vorhandenen Messfehlern Vorteile gegenüber den Experimenten. Der für diese Art der Simulationen notwendige numerische Aufwand ist - vom jeweiligen Standpunkt aus gesehen - jedoch extrem, da sämtliche turbulente Skalen aufgelöst werden müssen, um sich einstellende turbulente Schubspannungen wiederzugeben.

Die Größe turbulenter Strukturen wird durch die Reynolds-Zahl bestimmt, die das Verhältnis von dem

Impuls der Strömung zur Viskosität des Fluids beschreibt. Das bedeutet, je größer der Druck und die Geschwindigkeit, und damit die Reynolds-Zahl, umso kleiner werden die turbulenten Skalen. Verglichen mit meteorologischen Simulationen ist die Größe der Rechendomäne sehr klein. Die in diesem Vorhaben betrachteten Turbinenprofile haben eine Sehnenlänge von $l < 0,1\text{m}$. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind aber mit $Ma_{2,th} = 0.6$ sehr hoch, was bei Teillast zu Profilreynolds-Zahlen von $Re_{2,th} = 50.000$ bis $Re_{2,th} = 90.000$ führt. Die turbulenten Skalen sind entsprechend klein. In dem derzeitigen Setup wird ein Profilabschnitt mit 44 Mio. Zellen berechnet. Eine gut aufgelöste RANS Rechnung mit demselben Profilabschnitt würde näherungsweise 250.000 Zellen benötigen. Neben der höheren Anforderung an die räumliche Auflösung ist auch die zeitliche Auflösung signifikant höher, zumal verglichen mit stationären RANS Simulationen zeitliche Skalen erfasst werden müssen. Der daraus resultierende Rechenaufwand für eine Simulation mit dieser Auflösung beziffert sich auf eine Größenordnung von 370.000 CPU h pro Simulation (ca. 40.000 NPLs). Der entsprechende Aufwand für die RANS-Rechnung liegt bei 20 CPU h. Um die Netzsensitivität zu bewerten, wurde eine Simulation mit einer Verfeinerung des Netzes durchgeführt, wobei die Anzahl der Zellen in jede Raumrichtung mit dem Faktor 1,4 erhöht wurde. Um die dimensionslose zeitliche Auflösung beizubehalten, muss der Zeitschritt entsprechend reduziert werden. Der Rechenaufwand erhöht sich somit um den Faktor $1,4^4$ auf 1.400.000 CPU h (ca. 150.000 NPLs).

Aufgrund des hohen Rechenaufwands sind DNS für ingenieurstechnische Anwendungen nicht nutzbar und beschränken sich derzeit noch auf den Bereich der Wissenschaft. In den von der Industrie genutzten RANS-Simulationen kommen Modelle zum Einsatz, die anhand experimenteller Daten kalibriert wurden, um den Effekt von Turbulenz wiederzugeben. Wie in vorangegangenen Projekten [1,2] gezeigt wurde, sind RANS-Modellen nur für einen eingeschränkten Parameterbereich kalibriert. Für Sonderfälle ist es notwendig die Korrelationen anzupassen. Das am weitesten verbreitete Turbulenz-Modell ist das SST-Modell [3] in Kombination mit dem γ - Re_{θ} -Modell [4], welches den Ort des laminar-turbulenten Umschlags der Grenzschicht definiert. Diese Modelle werden auch in dem zugrundeliegenden Vorhaben genutzt.

Bei Turbinen unter Teillastbedingungen trägt der

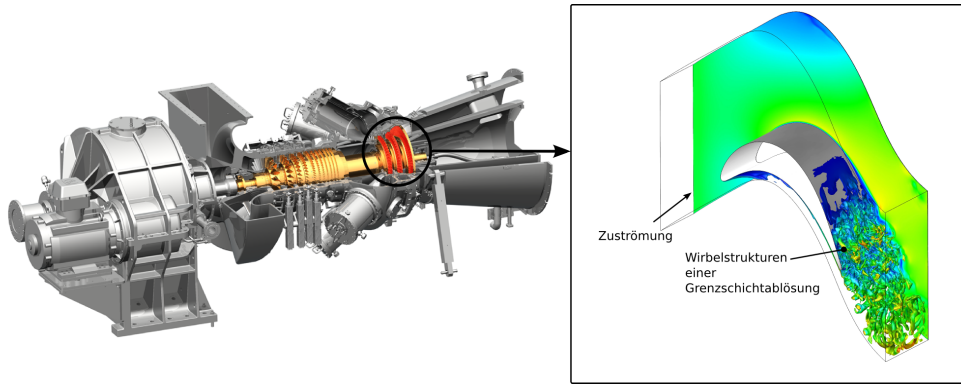


Abbildung 1: Links: Schnitzzeichnung einer stationären MAN Gasturbine zur Abdeckung von Lastspitzen ©MAN; Rechts: Visualisierung der Strömungslösung in der Turbinenkaskade; Iso-Surfaces: Vorticity-Magnitudo; Kontur: Absolutgeschwindigkeit.

laminar-turbulente Umschlag über der Ablöseblase wesentlich zu der Leistungsfähigkeit und der Belastbarkeit der Turbinenprofile bei. Der heutige Stand ist, dass die Transitionsmodelle in erster Linie für außenaerodynamische Testfälle kalibriert sind und die Transition über Ablöseblasen mit deutlich weniger komplexen Korrelationen abbilden als Natürliche- oder Bypass-induzierte Transition. Der untersuchte Testfall weist eine intensive Ablöseblase auf, in der der Modus für ablösungsinduzierte Transition aktiv ist (Abbildungen 1). An diesem Beispiel kann unter Zuhilfenahme der dem Modell zugrundeliegenden Korrelationen ein Soll-Ist Abgleich geschaffen werden, um Defizite des Modells zu erkennen. Auf dem RRZN durchgeführte Vorstudien belegen das Potential der DNS (Abbildungen 2). Die Untersuchungen sollen auf weitere Betriebspunkte ausgedehnt werden. Die Ergebnisse der Simulation werden zeitlich hoch aufgelöst, aber räumlich auf ein notwendiges Minimum reduziert, abgelegt. Dieser hohe Informationsgehalt bietet eine vielseitige Auswertung. In naher Zukunft soll ein begutachteter Konferenzbeitrag entstehen, in dem eine DNS genutzt werden soll, um Modellgrößen aus einer RANS-modellierten Simulation nachzuvollziehen. Dieser direkte Vergleich trägt

dazu bei Schwächen bestehender RANS-Modelle aufzudecken und die Quellen der Abweichungen zu lokalisieren. In einem folgenden Schritt können die Modellkorrelationen angepasst werden. Die Entwicklung und Verbesserung von RANS Modellen wird am TFD seit einigen Jahren erfolgreich durchgeführt und die Unterstützung durch DNS stellt einen, auch im internationalen Kontext, bis jetzt unerreichten Zugewinn an Vergleichsdaten dar.

WWW

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

Weitere Informationen

- [1] F. Herbst, A. Fiala und J.R. Seume, Modeling Vortex Generating Jet-Induced Transition in Low-Pressure Turbines, *Journal of Turbomachinery*, vol. 136, (2014) doi: DOI:10.1115/1.4025735
- [2] C. Müller und F. Herbst, Modelling of Crossflow-Induced Transition Based on Local Variables, *6th European Conference on Computational Fluid Dynamics*, (2014)
- [3] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal of Fluids Engineering*, vol. 38, pp. 269-289, (1994)
- [4] R.B. Langtry und F.R. Menter, Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes, *AIAA Journal*, vol. 47, pp. 2894-2906, (2009)

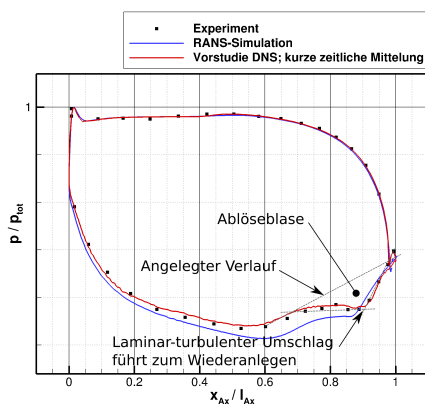


Abbildung 2: Druckverteilung auf Turbinenprofil; Grenzschichtablösung bewirkt Druckplateau; laminar-turbulenter Umschlag initiiert Wiederanlegen; Vergleich: Experiment, RANS, DNS

Projektpartner

AG: Numerische Methoden TFD

Förderung

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