

STRÖMUNGSMECHANIK

Direkte Numerische Strömungssimulation

DIREKTE NUMERISCHE SIMULATION DER STRÖMUNG UND DES WÄRMEÜBERGANGS IN EINEM EBENEN TURBINENSCHAUFELGITTER.

VON JAN WISSINK UND WOLFGANG RODI

In Schaufelgittern von Turbomaschinen ist aufgrund der Laufrad/Leitradwechselwirkung die Strömung periodisch instationär, wobei turbulenzbehaftete Nachläufe durch die Schaufelkanäle wandern und einen starken Einfluss auf das Grenzschichtverhalten an den Schaufeln ausüben.

Besonders groß ist dieser Einfluss in den Gittern der Niederdruckturbine, wo wegen der relativ niedrigen Reynoldszahl größere Teile der Grenzschicht laminar sein können und die Transition eine wichtige Rolle spielt, und dieser Einfluss betrifft nicht nur das aerodynamische Verhalten wie z.B. die Tendenz zur Ablösung und die dadurch entstehenden Verluste sondern auch den Wärmeübergang

vom heißen Anströmgas zu den zu kühlenden Schaufeln. Für die Auslegung der Schaufeln ist die Kenntnis der komplexen physikalischen Mechanismen und deren zuverlässige Berechenbarkeit und damit die Entwicklung von Rechenmodellen äußerst wichtig. Hierzu sind verlässliche Detailinformationen über die Strömungsvorgänge notwendig, die nur schwer aus Experimenten zu gewinnen sind. Aufgrund der stetig steigenden Leistung von Großrechnern (s. Grafik) können immer komplexere Strömungsprobleme mit der Methode der Direkten Numerischen Simulation (DNS) untersucht werden, d.h. durch numerisches Lösen der strömungsmechanischen Grundgleichungen ohne Verwendung eines Modells. Wegen der relativ niedrigen Reynoldszahl ist für Niederdruckturbinen die Berechnung der Strömung mit dieser Methode

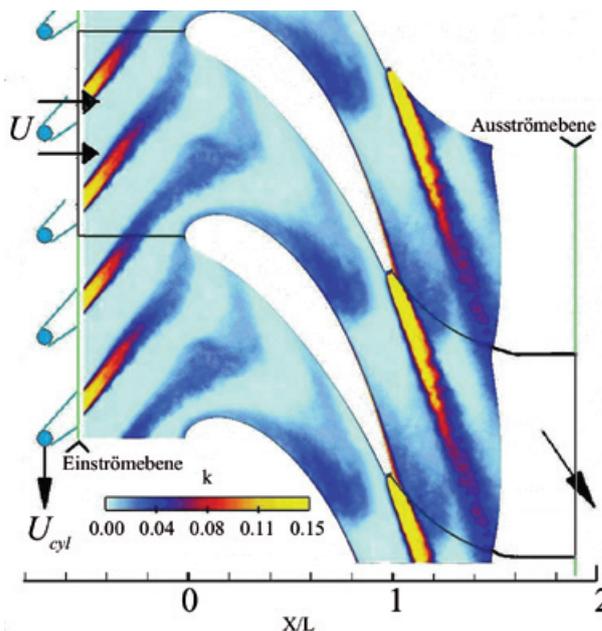
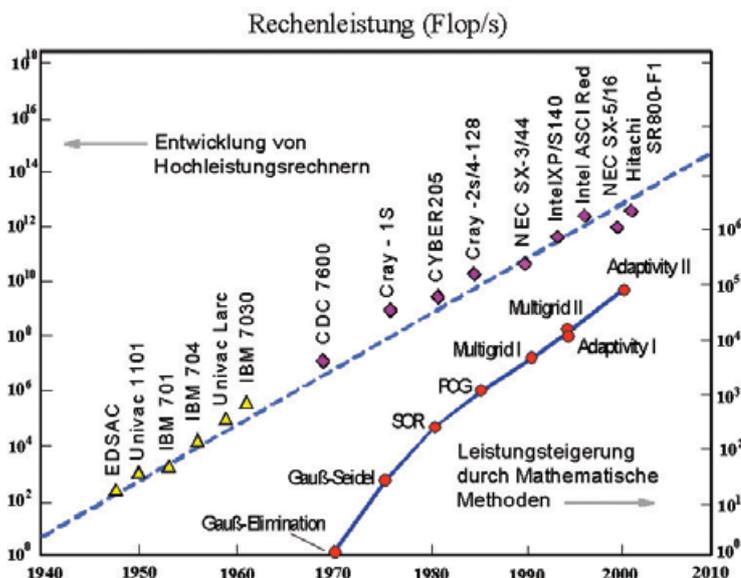


Abb. 1: Berechnete Strömungskonfiguration mit Rechengebiet (zwischen den schwarzen Linien und den 2 oberen Schaufeln) sowie Sichtbarmachung der Nachläufe durch Konturen der phasengemittelten kinetischen Energie k der Schwankungen (k ist dimensionslos gemacht mit U^2).

zumindest im Mittelschnitt möglich – die Methode ist hierbei ein ideales Werkzeug zur Erforschung aller Details der komplexen Strömung und zur Klärung der physikalischen Mechanismen der Transition unter dem Einfluss vorbeilaufender Nachläufe und dem im Experiment beobachteten starken, durch Außen-turbulenz verursachten Anstieg des Wärmeübergangs in den laminar bleibenden Grenzschichten. In einem DFG-Projekt wurden deshalb solche DNS-Rechnungen durchgeführt und es werden in diesem Beitrag ausgewählte Ergebnisse einer solcher Rechnung vorgestellt. Die Untersuchungen sind ausführlich in Wissink und Rodi [4] beschrieben.

Rechenverfahren und untersuchte Konfiguration

In der DNS werden die dreidimensionalen, instationären Navier-Stokes-Gleichungen und die Konvektions-Diffusionsgleichung für die Temperatur mit einem Finite-Volu-



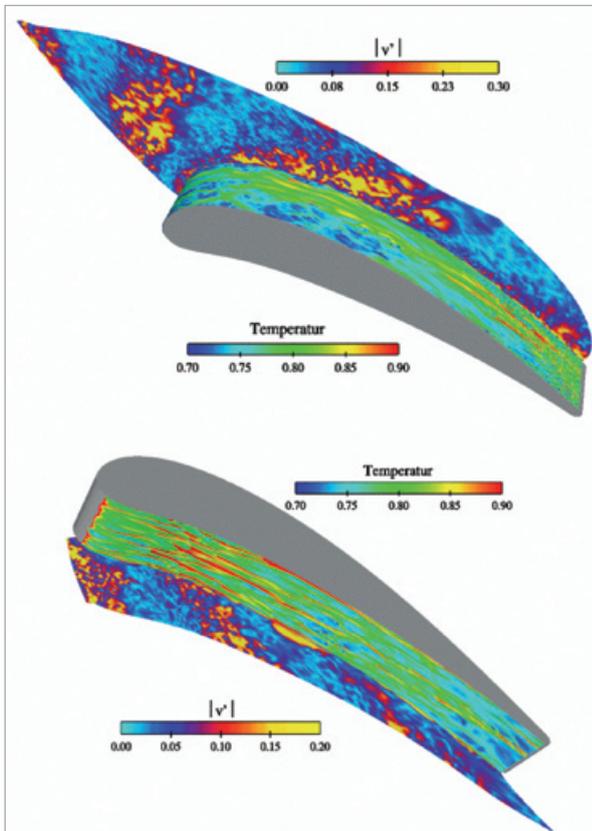


Abb. 2: Momentaufnahmen der Grenzschichten entlang der Saugseite (oben) und der Druckseite (unten) mit Sichtbarmachung durch Isoflächen der momentanen spannungsweitigen Wirbelstärke, eingefärbt mit der lokalen Temperatur. Die Hintergrundebenen senkrecht zur Schaufeloberfläche zeigen Konturen des Betrags der Schwankungsgeschwindigkeit und identifizieren den Ort der Nachläufe.

men-Verfahren unter Verwendung von Zentralfdifferenzen zweiter Ordnung und nichtversetzten Variablenanordnung numerisch gelöst. Es wurde eine Schaufelgitterkonfiguration berechnet, die näherungsweise der von Liu und Rodi [2,3] experimentell untersuchten entspricht. Die Geometrie ist in Abb. 1 dargestellt. Es wurde angenommen, dass die periodischen Nachläufe durch vor dem Schaufelgitter mit einer Geschwindigkeit $U_{cyl} = 1.36 U$ vorbeilaufende Zylinderstäbe erzeugt werden. Die mit der Zuströmgeschwindigkeit U und der axialen Sehnenlänge L gebildete Reynoldszahl ist $Re = 72.000$. Es wurde die Strömung durch einen Schaufelkanal berechnet, und das Rechengebiet ist in Abb. 1 eingezeichnet. Die Nachlauferzeugung wurde nicht mitberechnet, sondern es wurden in der in Abb. 1 gezeigten

Einströmebene der gleichförmigen Einströmgeschwindigkeit U künstliche Nachläufe und dazwischen Hintergrundturbulenz mit einem Turbulenzgrad $Tu = 4\%$ überlagert. Die Nachlaufdaten wurden freundlicherweise von Wu und Durbin von der Stanford Universität zur Verfügung gestellt und die Schwankungen der Hintergrundturbulenz stammen von einer separaten Large-Eddy-Simulation isotroper Turbulenz in einem Quader. Sie berücksichtigen die im Experiment vorhandenen Hintergrundschwankungen. Wie im Experiment waren die Schaufeln beheizt und hatten eine konstante Temperatur $T = T_0$ während die Zuströmung die Temperatur $T = 0,7 T_0$ hatte. Weitere Details über die Rechnung und die Randbedingungen sind in Wissink und Rodi [4] zu finden.

Die Rechnung wurde auf der Hitachi SR8000-F1 des Leibniz Rechenzentrums (LRZ) in München durchgeführt unter Verwendung von 256 Prozessoren und 93,4 Millionen Gitterpunkten. Zur Erzielung verlässlicher statistischer Daten benötigte die Rechnung 240.000 Zeitschritte und insgesamt 2.000 Stunden Laufzeit auf dem Rechner.

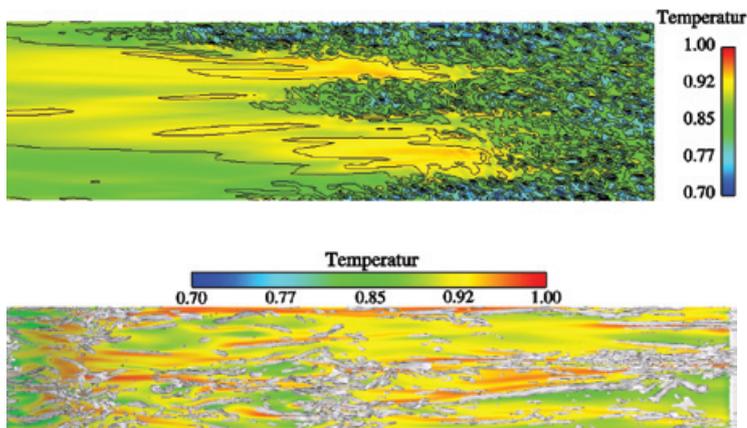
Ergebnisse

Abb. 1 zeigt für einen Zeitpunkt Konturen der phasengemittelten kinetischen Energie der Schwankungen und vermittelt einen guten Eindruck des Wanderns der Nachläufe durch das Rechengebiet und den Schaufelkanal. Beim Eintritt in den Schaufelkanal legen sich die Nachläufe um die Schaufelvorderkante; auf der Saugseite werden sie dann durch die dort vorliegende starke Beschleunigung gestreckt und treffen praktisch tangential auf die Grenzschicht auf. Weiter stromab werden die Nachläufe durch die ungleichförmige Strömung im Kanal stark verzerrt. Im Scheitel der deformierten Nachläufe werden

Schwankungen erzeugt, so dass dort die kinetische Energie erhöht wird. Die an der Hinterkante der Schaufeln entstehenden Nachläufe sind ebenfalls gut zu sehen. Sie vermischen sich stromab der Schaufeln mit den durch den Kanal wandernden Nachläufen.

Abb. 2 illustriert den Einfluss der auf die Grenzschichten auftretenden Nachlauf- und Hintergrundfluktuationen, und zwar im oberen Bild für die Saugseite und im unteren für die Druckseite. Die Vorgänge in den Grenzschichten werden durch Isoflächen der spannungsweitigen Wirbelstärke, welche mit der lokalen Temperatur eingefärbt sind, sichtbar gemacht. Die Hintergrundflächen senkrecht zur Schaufeloberfläche zeigen Konturen des Betrags der Schwankungsgeschwindigkeit und identifizieren damit den Ort der Nachläufe zum betrachteten Zeitpunkt. Zwischen den Nachläufen sind Gebiete mit reduziertem Schwankungsniveau, d.h. die Hintergrundschwankungen sichtbar. Im vorderen Bereich der Saugseite, in welchem die Strömung stark beschleunigt wird, wirken die auftretenden Schwankungen wenig in die Grenzschicht hinein, was an der nur leicht fleckigen Temperaturverteilung zu sehen ist.

Weiter stromab treten streifenförmige Strukturen auf und in der Nähe der Hinterkante, wo die Strömung verzögert wird, ist eine feinskalige Struktur zu erkennen, die auf das Auftreten von Turbulenz hindeutet. In diesem Bereich findet eine sogenannte Bypass-Transition statt, die in Bild 3 noch näher illustriert wird. Dort wird die momentane Temperaturverteilung in einer wandparallelen Ebene in der Nähe der Saugseite zum selben Zeitpunkt wie in Bild 2 gezeigt. Es bilden sich Turbulenzflecken, welche stromab geschwemmt werden und zusammenwachsen, so dass direkt an der Hinterkante die Strömung zu



diesem Zeitpunkt vollturbulent ist. In diesem Gebiet führen die kleinskaligen Turbulenzschwankungen zu einem starken Anstieg des Wärmeübergangs von der Schaufel an die Außenströmung. Im unteren Teil von Bild 2 ist auf der Druckseite ein ausgeprägtes streifenförmiges Muster der Temperaturverteilung zu erkennen. Hier erzeugen die auftretenden Nachläufe ausgeprägte Längswirbel in der Grenzschicht, wie dies auch schon in anderen Direkten Numerischen Simulationen beobachtet wurde.

Diese Längswirbel sind auch in Bild 4 zu erkennen, in welchem sie durch das λ_2 -Kriterium von Jeong und Hussain [1] sichtbar gemacht wurden. Sie führen zu einem Anstieg des Wärmeübergangs von der beheizten Schaufel an die kältere Außenströmung von etwa 30%. Ihr Einfluss zeigt sich auch in den Temperaturkonturen, wobei deren streifenförmiges Muster mit dem Auftreten der Wirbelstrukturen gut korreliert ist. Schließlich zeigt Abb. 5 für verschiedene Querschnitte entlang der Saugseite wieder zum selben Zeitpunkt Konturen der momentanen Temperatur sowie Streichlinien des Geschwindigkeitsfeldes der Schwankungen. Die Bilder illustrieren klar den Einfluss der aus der Aussenströmung auftretenden Störungen auf die Temperaturverteilung entlang der Saugseite, wobei an manchen Stellen

wärmeres Fluid von der Schaufeloberfläche an die Außenströmung getragen wird, und zwar um so weiter nach außen je näher man der Schaufelhinterkante kommt. Durch diese Detailinformationen kann man sehr gut den Wärmeübergangsmechanismus studieren.

Schlussbemerkungen

Es wurden Direkte Numerische Simulationen der Strömung und des Wärmeübergangs in einem Niederdruck-Turbinenschaukelgitter unter dem Einfluss von periodischen Nachläufen und Hintergrundturbulenz in der Anströmung vorgestellt. Entlang der Saugseite initiieren die auftretenden Fluktuationen Bypass-Transition mit turbulenten Flecken, welche stromab geschwemmt werden und dabei zusammenwachsen, so dass im direkten Bereich der Hinterkante die Grenzschicht vollturbulent ist. Die kleinskaligen Schwankungen in diesem Bereich führen zu einem starken Anwachsen des Wärmeübergangs. Entlang der Druckseite verursachen die Nachläufe das Auftreten von längsseitigen Wirbelstrukturen. Diese Strukturen sind verantwortlich für einen Anstieg des Wärmeübergangs auf dieser Schaufelseite von ca. 30%.

Danksagungen

Die vorgestellte Rechnung wurde in einem von der Deutschen For-

schungsgemeinschaft finanzierten Projekt durchgeführt. Die Autoren bedanken sich beim Leitungskomitee des HLRB für die Zurverfügungstellung von Rechenzeit auf dem Hitachi Rechner am Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) in München.

Referenzen

[1] Jeong, J. and Hussain, F. 1995, On the identification of a vortex. *J. Fluid Mech.*, 285, 69-94.
 [2] Liu, X. and Rodi, W. 1994, Velocity measurements in wake-induced unsteady flow in a linear turbine cascade. *Exp. in Fluids* 17, 45-58
 [3] Liu, X. and Rodi, W. 1994, Surface pressure and heat transfer measurements in a turbine cascade with unsteady oncoming wakes. *Exp. in Fluids* 17, 171-178
 [4] Wissink, J.G. and Rodi, W. 2006, DNS of flow and heat transfer in a turbine cascade with incoming wakes. To appear in *J. Fluid Mech.*

Prof. Dr. Wolfgang Rodi und Dr. Jan Wissink arbeiten am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe.



Abb. 3: Momentaufnahme der Verteilung der Temperatur in einer Ebene parallel und in der Nähe der Saugseite im hinteren Bereich der Schaufel.

Abb. 4: Momentaufnahme des Strömungsfeldes in einer Ebene parallel und in der Nähe der Druckseite. Konturen der momentanen Temperatur und Wirbelstrukturen visualisiert durch das λ_2 Kriterium von Jeong und Hussein [4].

Abb. 5: Momentaufnahmen von Konturen der Temperatur und der Streichlinien in verschiedenen Querschnitten entlang der Saugseite der Schaufel.

