

Parameterized Galerkin models for closed-loop flow control of a cylinder wake

Mark Luchtenburg⁰, Oliver Lehmann, Bernd R. Noack, Rudibert King¹,
Marek Morzyński² and Gilead Tadmor³

¹Technische Universität Berlin HF1, Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin

Tel: 030 - 31424665 ; Fax: 030 - 31421101

e-mail: Mark.Luchtenburg@pi.tu-berlin.de

²Poznań University of Technology, Poznań, Poland,

³Northeastern University, Boston, MA, USA

1 Introduction

Low dimensional models are crucial enablers for feedback flow control. The proper orthogonal decomposition (POD) is one method used for this purpose. Traditionally, POD modes are obtained at one operating condition. While the kinematics of the reference simulation are resolved by this model, the dynamic envelope is limited.

For robust control and observer design it is necessary to include more information. Therefore the concept of parameterized POD (pPOD) Galerkin models is introduced. The pPOD model and its application to control theory are demonstrated by using single-input single-output control to stabilize the wake flow behind a circular cylinder.

2 Method

POD is a post-processing tool that extracts the most energetic modes of a snapshot ensemble obtained from experiment or simulation. The flow field is approximated by a truncated series expansion of temporal Fourier coefficients and space-dependent POD modes. In the current study the concept of parameterized POD is introduced. Instead of having the POD of one reference simulation, a collection of PODs obtained from several simulations with forcing is used. These mode sets provide ample information to apply the machinery of control theory for stabilization of the cylinder wake in a simulation (DNS). Moreover they are crucial for realistic and robust control and observer design.

3 Results

Using the parameterized POD approach the flow can be adequately represented over an extended dynamic range. This model is used for closed-loop flow control with the purpose of stabilizing the wake flow behind the cylinder. The advantage of pPOD over traditional (single operating condition) POD is demonstrated both with respect to achievable closed-loop performance and optimization of the sensor positions over a wide dynamic range. The flow field state is estimated by an extended Kalman filter (EKF).

⁰Corresponding author

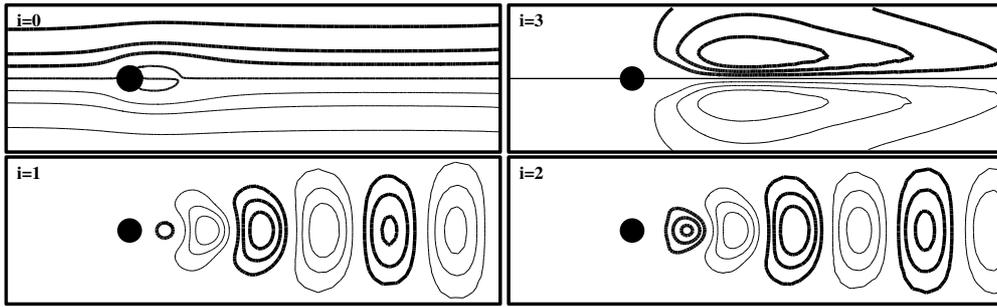


Figure 1: POD Modes derived from the natural flow. The mean flow ($i=0$), the shift mode ($i=3$), and the first two POD modes ($i=1,2$) resolving 95% of the fluctuation energy. The flow fields are visualized with streamlines $\Psi = const$. Positive values of Ψ are emphasized by a larger width.

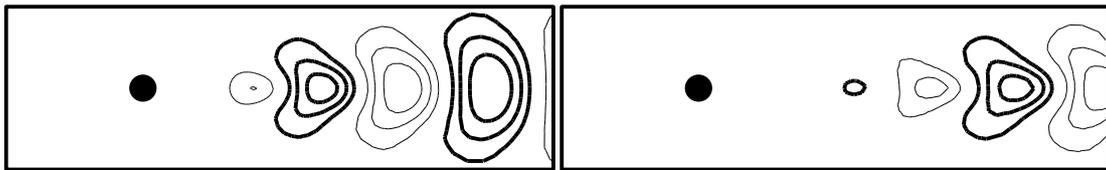


Figure 2: Demonstration of how the first POD mode changes under the effect of forcing: moderately forced (left), aggressively forced (right)

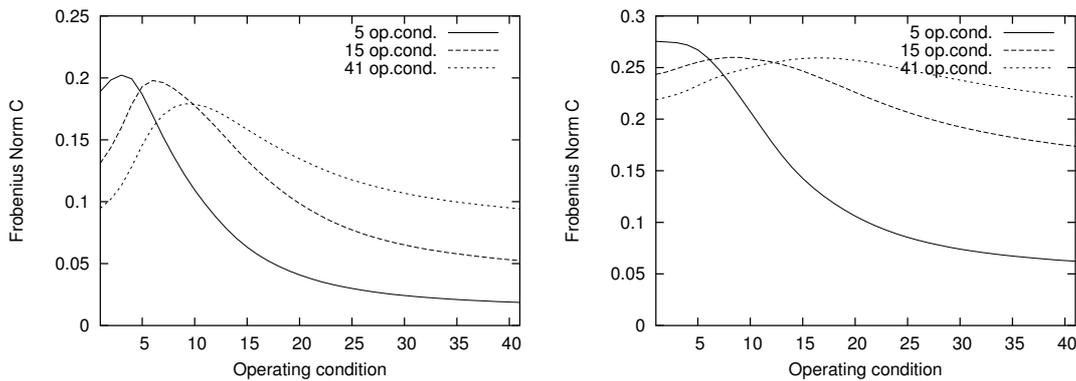


Figure 3: Demonstration of the optimization procedure for the sensors over a broader dynamic range. A large Frobenius norm is an indicator of a good sensor position. The optimal sensor location is computed for the first 5, 15, 41 (out of 41) equally spaced operating points (controlled flows, ordered by effectiveness of control).

Beeinflussung von rotierender Instabilität und Blattspitzenwirbellärm von axialen Turbomaschinen

Lars Neuhaus

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik,

Abteilung Turbulenzforschung

Müller-Breslau-Str. 8, 10623 Berlin

Tel: 030 – 310 00 647 ; Fax: 030 – 310 00 639

Email: lars.neuhaus@dlr.de

1 Einleitung

Bei ummantelten axialen Strömungsmaschinen befindet sich ein radialer Spalt zwischen den rotierenden Schaufelspitzen und dem feststehenden Gehäuse. Die Druckdifferenz zwischen Saug- und Druckseite der Laufradschaufeln verursacht eine Überströmung der Schaufelspitzen, die sich negativ auf das aerodynamische und akustische Verhalten der Maschine auswirkt.

Bei großen Kopfspaltweiten tritt eine breitbandige Geräuschkomponente in der Nähe der halben Blattpassierfrequenz (BPF) in den Wanddruckschwankungen auf den Rotorblättern auf, die mit Pegelspitzen überlagert ist. Diese Quelle, rotierende Instabilität (RI) genannt, strahlt ins Fernfeld als Blattspitzenwirbellärm (BSpWL) ab.

Ziel dieser Arbeit ist es, die negativen Auswirkungen Schaufelspitzenüberströmung, aktiv und ohne Einbauten im Kopfspalt zu verringern. Als Beeinflussungsmethode wird hier das stationäre Einblasen von Druckluft in den Kopfspalt des Ventilators eingesetzt.

2 Drucklufteinblasung durch den azimuthalen Einblasschlitz

Zunächst wurde die Beeinflussung mit 24 gleichmäßig über den Umfang verteilten Düsen bei 24 Laufradschaufeln erprobt. Hier zeigte sich, dass sowohl aerodynamische Verbesserungen erreicht werden konnten, als auch die vollständige Unterdrückung von RI und BSpWL ab einem Einblasmassenstrom von $m_{in} = 0,6\%$ des Hauptmassenstromes bei ungedrosseltem Ventilator. Allerdings wurde auch eine Anhebung des BPF-Pegels beobachtet, die eine Folge der Wechselwirkung zwischen Düsenstrahlen und Laufradschaufeln ist (vgl. [1]). In Analogie zur Rotor/Stator-Wechselwirkung (vgl. [2]) wird bei der BPF eine ebene Welle erzeugt, die sich immer in den angeschlossenen Strömungskanal ausbreiten kann. Die Anhebung der BPF begrenzt somit die erreichbaren aerodynamischen Verbesserungen.

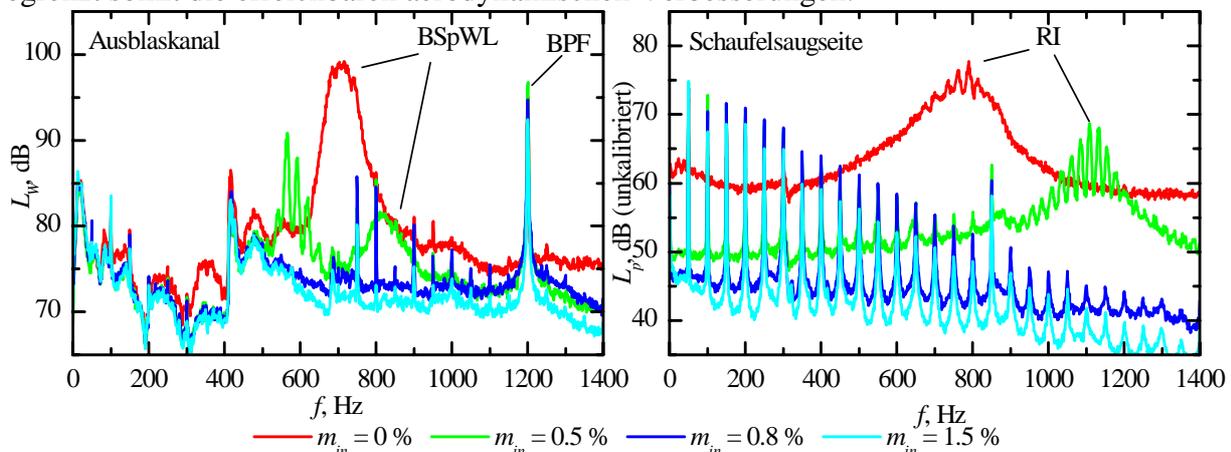


Abbildung 1: Spektren der Schallleistung im Ausblaskanal und der Wanddruckschwankungen auf der Schaufelsaugseite bei verschiedenen Einblasmassenströmen und stationärem Einblasen durch den azimuthalen Einblasschlitz ; $n = 3000/\text{min}$, $\zeta = 5,6\%$, $\varphi = 0,2$.

Um die negativen Auswirkungen der Laufrad/Düsenstrahl-Wechselwirkung zu verringern,

wurde das Einblasen über einen azimuthalen Schlitz untersucht. Abbildung 1 zeigt Spektren der in den Ausblaskanal abgestrahlten Schalleistung und der Wanddruckschwankungen auf einer Schaufelsaugseite des Laufrades für verschiedene Einblasmassenströme am Arbeitspunkt des Ventilators, bei dem der BSpWL stark hervortritt. Ab einem Einblasmassenstrom von $m_{in} = 0,8\%$ sind RI und BSpWL vollständig unterdrückt. Der Pegel der BPF wird hier sogar etwas reduziert. Bei einer weiteren Erhöhung des Einblasmassenstroms zeigt sich, dass das abgestrahlte Geräusch weiter reduziert werden kann und dass die erreichbaren aerodynamischen Verbesserungen hier nicht durch die akustischen Auswirkungen begrenzt werden.

3 Drucklufteinblasung durch 17 Schlitzdüsen

Eine weitere Möglichkeit, die Anhebung des BPF-Pegels zu verhindern ist, die Erfahrungen bei der Auslegung von Strömungsmaschinen bezüglich der Rotor/Stator-Wechselwirkung zu nutzen. Die Schaufelzahlen von Rotor und Stator werden so ausgelegt, dass die durch ihre Wechselwirkung erzeugten Moden, sich nicht im angeschlossenen Strömungskanal ausbreiten können (vgl. [2]). Dieses Cut-Off-Design wird hier bezüglich der Rotor/Düsenstrahl-Wechselwirkung angewandt.

Abbildung 2 zeigt wiederum die Spektren im Ausblaskanal und die Wanddruckschwankungen auf einer Schaufelsaugseite für verschiedene Einblasmassenströme am Ventilatorarbeitspunkt mit BSpWL. Mit Erhöhung der Einblasmenge werden RI und BSpWL verringert. Ab einem Einblasmassenstrom von $m_{in} = 0,6\%$ werden beide Effekte vollständig unterdrückt. Damit konnte der benötigte Einblasmassenstrom gegenüber der Konfiguration mit azimuthalen Einblasschlitz um $0,2\%$ verringert werden. Der Pegel der BPF bleibt nahezu unverändert. Die aerodynamischen Kenngrößen konnten bei dieser Einblaskonfiguration nur teilweise verbessert werden. Der Wirkungsgrad des Ventilators verringert sich bei dieser Einblaskonfiguration bei sehr hohen Einblasmassenströmen (vgl. [3]).

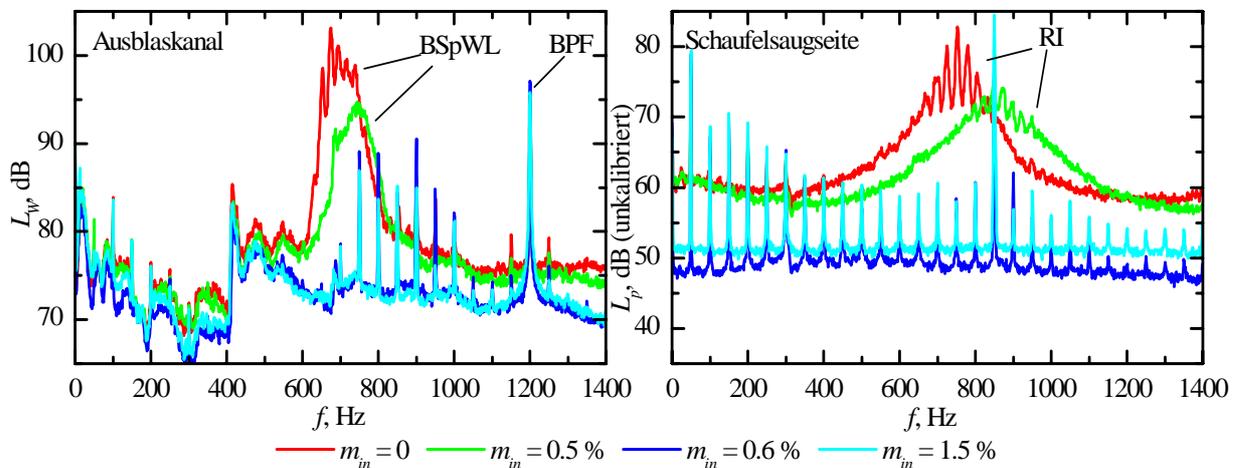


Abbildung 2: Spektren der Schalleistung im Ausblaskanal und der Wanddruckschwankungen auf der Schaufelsaugseite bei verschiedenen Einblasmassenströmen und stationärem Einblasen aus 17 gleichmäßig über den Umfang verteilten Düsen; $n = 3000/\text{min}$, $\zeta = 5,6\%$, $\varphi = 0,2$.

4 Literatur

- [1] Neuhaus, L., Neise, W.: "Active flow control to improve the aerodynamic and acoustic performance of axial turbomachines". AIAA-2002-2948, 1st Flow Control Conference, 24.-27. June, St. Louis, Missouri, USA, 2002.
- [2] Tyler J. M., Sofrin T. G.: "Axial Flow Compressor Noise Studies". Transactions of the Society of Automotive Engineers 70 (1962), 309-332.
- [3] Neuhaus, L., Neise, W.: "Active control to improve the aerodynamic performance and reduce the tip clearance noise of axial turbomachines". AIAA-2005-3037, 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 23 – 25 May, Monterey, California, USA, 2005

Systemreduktion und Optimalsteuerung zur Beeinflussung von Strömungen (SFB 557-C7)

Michael Schmidt
Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin
Straße des 17. Juni 136, 10623 Berlin
Tel: 030-314-79177
Fax: 030-314-79706
e-mail: mschmidt@math.tu-berlin.de

1 Einleitung

Eine große Herausforderung stellt heutzutage die Steuerung und Regelung von komplexen physikalischen Systemen dar, die durch instationäre partielle Differentialgleichungen beschrieben werden. Ein wichtiges Beispiel ist die Luftwiderstandsreduktion bei umströmten Körpern durch das gezielte Ein- und Ausblasen von Luft an bestimmten Körperkanten, was mathematisch als ein Optimalsteuerungsproblem für die Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben werden kann.

Theoretische Methoden zur Berechnung einer optimalen Steuerung oder auch optimalen Regelung sind vorhanden (Pontryagin's Maximums-Prinzip, funktionalanalytische Version von Belman' Prinzip der dynamischen Programmierung) und zeigen auf, wie weit man sich einem gewünschten Steuerungs- oder Regelungsziel mit der vorhandenen Aktuation überhaupt nähern kann.

Die tatsächliche Berechnung von Steuerungen und Regelungen muss allerdings numerisch erfolgen. Man unterscheidet zwei wesentliche Ansätze:

- „*Erst diskretisieren, dann optimieren*“: Die partielle Differentialgleichung wird zunächst (meist mittels einer Raumdiskretisierung) durch ein endlich-dimensionales dynamisches System approximiert. Dann können klassische Methoden zum Steuerungs- und Reglerentwurf zum Einsatz kommen.
- „*Erst optimieren, dann diskretisieren*“: Die oben erwähnten theoretischen Methoden erlauben es, die optimale Steuerung oder Regelung mittels der Lösung einer speziellen partiellen Differentialgleichung (Optimalitätssystem bzw. Hamilton-Jacobi-Belman-Gleichung) darzustellen. Diese Gleichungen müssen dann diskretisiert und numerisch gelöst werden.

Beide Ansätze führen bei klassischen Diskretisierungsverfahren auf diskrete Probleme von derartiger Größe, dass eine Lösung oft nicht mehr oder nur mit enormen Rechen-, Speicher- und Zeitkapazitäten möglich ist. Ein wesentliches Ziel ist daher, die Komplexität der auftretenden Systeme und Methoden zu reduzieren.

2 Verfahren und Ergebnisse

Wir verfolgen in unserem Projekt zwei Ansätze zur Reduzierung der Komplexität beim Steuerungs- und Regelungsentwurf:

Ansatz 1 - Systemreduktion: Ein wesentlicher Komplexitätsfaktor ist das endlich-dimensionale Modell, das die zugrunde liegende partielle Differentialgleichung approximiert. Wird es durch

klassische Raumdiskretisierungsmethoden erzeugt, ist die Anzahl seiner Zustände sehr hoch und muss mittels Modellreduktionstechniken reduziert werden. In unserem Projekt soll das Ausgangssystem direkt durch ein niedrigdimensionales Modell approximiert werden.

Dazu soll nicht -wie in vielen klassischen Ansätzen- das Zustandsraummodell selbst, sondern die entsprechende Input-Output-Abbildung niederdimensional diskretisiert werden, da das Eingangs-Ausgangsverhalten eine entscheidende Rolle bei Steuerungs- und Regelungsproblemen spielt. Betrachtet werden dazu u.a. Projektionen auf Unterräume der Eingangs- und Ausgangssignalsräume.

Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Herleitung von Schranken für den Diskretisierungsfehler im Eingangs/Ausgangsverhalten, die zum einen die gewünschte Approximationsgüte garantieren, und zum anderen eine effiziente Wahl des betriebenen Approximationsaufwandes ermöglichen sollen. Erste Fehlerschätzungen und numerische Simulationsergebnisse werden demnächst veröffentlicht.

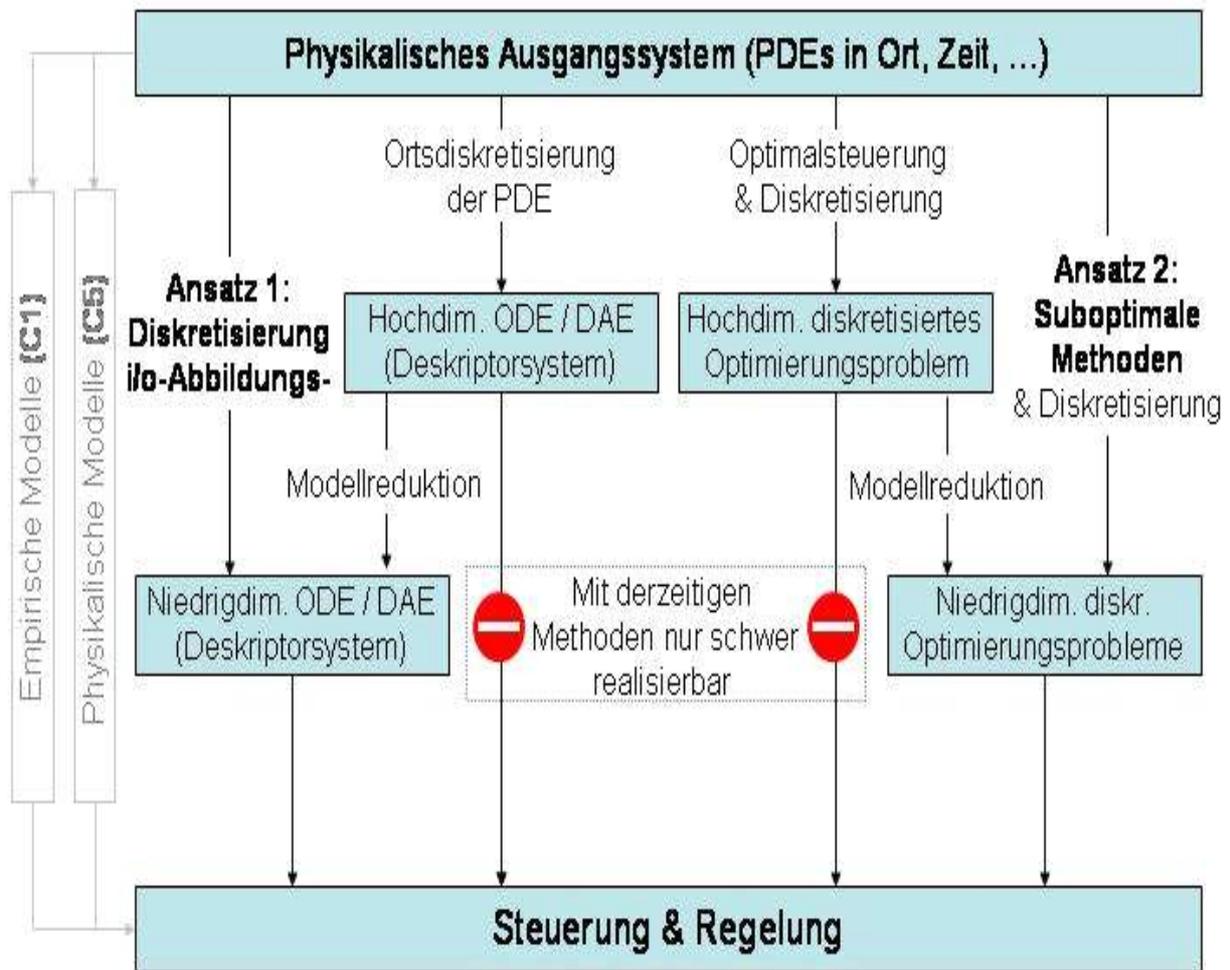
(Ansprechpartner: Dipl.-Math. Michael Schmidt, e-mail: mschmidt@math.tu-berlin.de)

Ansatz 2 – Suboptimale Methoden: Anstatt des numerisch sehr aufwändigen optimalen Steuerungs- und Regelungsdesigns werden suboptimale Methoden eingesetzt.

So wird beispielsweise bei der *Momentansteuerung* nicht mehr über das gesamte Zeitintervall, sondern nacheinander über aufeinanderfolgende kleinere Teilintervalle optimiert, womit die Rechen- und Speicherplatzanforderungen erheblich reduziert werden können. Diese Techniken haben sich bereits in einer vergangenen Projektphase bewährt und sollen nun an einer Tragflügel-Hochauftriebskonfiguration getestet werden.

Des Weiteren ist geplant, neuartige suboptimale Verfahren der Anpassung off-line berechneter Optimalsteuerungen bei Eintreten von Störungen auf Kontrollprobleme bei Navier-Stokes-Gleichungen anzuwenden. Diese Untersuchungen haben vorrangig mathematischen Grundlagencharakter, sollen aber auf die Anwendbarkeit für die experimentell untersuchten Konfigurationen untersucht werden.

(Ansprechpartner: Prof. Dr. Fredi Tröltzsch, e-mail: troeltz@math.tu-berlin.de)



Feature-Based Comparison of Flow Fields

Tino Weinkauff and Jan Sahner

Zuse Institute Berlin

Takustr. 7, 14195 Berlin

Tel: +49 30 84185 - {224, 356} ; Fax: +49 30 84185-107

e-mail: {weinkauff, sahner}@zib.de

1 Introduction

Active flow control involves setting a high number of parameters in order to achieve the goal of, e.g., higher lift. Using the methods developed in our project (SFB 557, A2) we want to ease the exploration of this high-dimensional parameter space. For this, it is important to compare flow fields, which have been simulated using different parameters. We have chosen a comparison approach based on flow features, since they capture the most important structures of the flow. The features considered in this project are critical points, separatrices, vortices, vortex cores as well as attachment and detachment lines.

After developing methods and tools to extract those features in a robust manner, we are going to develop comparison techniques for them. This means to develop solutions for the following tasks:

- Relate a feature of flow A with a similar feature of flow B.
- Compute their distance in feature space using a metric.
- Determine the influence of a feature on the flow.
- Weight several distance measures based on the specific application and combine them to one metric.
- Visualize the feature based difference of flow A and flow B.

This approach of visual analysis helps us to optimize actuation and to validate the used simulation methods. Since computation times are long and expensive, a tightly focused optimization is needed. This is only possible by gaining a thorough understanding of the dominant processes inherent to the flow.

Furthermore, feature based comparison bridges the gap between simulation, experiment and low-dimensional modelling. Those three techniques generate data with very different properties, i.e., data from simulations has a much higher resolution than from an experiment and modelled flows are often much smoother than their simulation input. However, all three techniques aim to resolve the same flow processes in the same setting. By looking at the most important features instead of the data itself, we build up some kind of abstraction and offer more meaningful comparisons of those different types of data.

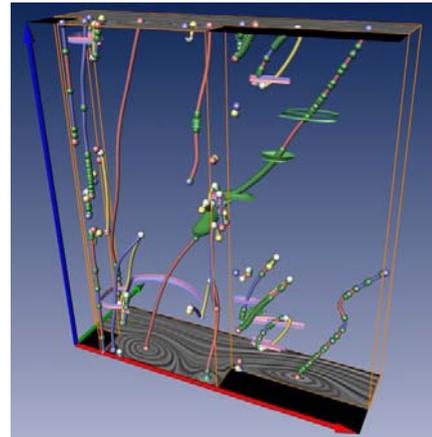


Figure 1: Topology at a 2D cavity.

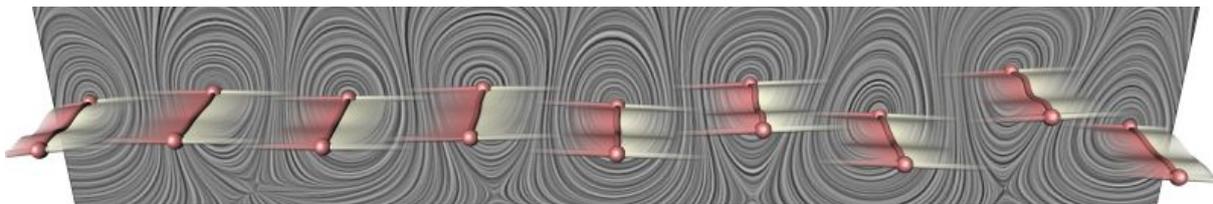


Figure 2: Flow behind a circular cylinder. Shown are vortex core lines in a certain frame of reference. Their evolution over time is tracked by our algorithm and depicted using transparent surfaces. Red color encodes the past while gray shows the future.

2 Methods

In the first stages of our project, we developed novel and robust feature extraction and tracking techniques for the treatment of topological and vortical flow structures. Those methods have been integrated into a virtual lab based on our visualization and data analysis software suite Amira. Instead of developing a specific extraction method for each feature, we designed our UNIFIED FEATURE EXTRACTION ARCHITECTURE which allows to treat almost all features with only a small set of basic algorithms. Two concepts build the foundation of our approach and will be shortly described in the following.

2.1 Feature Flow Fields

Feature tracking algorithms for time-dependent data sets are usually based on a correspondence analysis of the features at different time steps. Our approach is based on the integration of stream lines (or more general: stream objects) of a certain vector field called feature flow field (FFF). Given a vector field \mathbf{v} we have to construct a FFF \mathbf{f} , which fulfills the following: starting a stream line of \mathbf{f} at a point \mathbf{x}_0 meeting a certain local feature property, each point \mathbf{x} on this stream line fulfills this property as well. In other words: the path of a feature over time is a stream line of \mathbf{f} . Furthermore, a set of starting points must be defined to guarantee that all occurrences of a feature are covered. We developed FFF for tracking critical points and vortex core lines. Furthermore, FFF can be used to extract vortex core lines in a snapshot.

2.2 Saddle Connectors Approach

While FFF cover local features only, the saddle connectors approach treats global features. The main idea behind this is to intersect stream objects. The intersection of a n -dimensional stream object is a $(n - 1)$ -dimensional stream object. This way, we are able to extract specific stream lines, which connect saddle points of a flow field. Furthermore, this approach has been applied to detect hetero- and homoclinic orbits as well as closed stream lines.

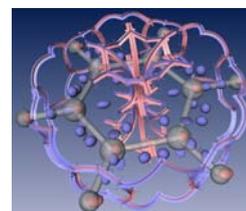


Figure 3: Topology of electrostatic field of the benzene molecule.

3 Results

We applied our methods to a number of data sets from different applications. Figure 1 shows tracked critical points and other topological features in a 2D cavity flow. Tracked vortex core lines behind a circular cylinder are shown in Figure 2. Figure 3 depicts saddle connectors in the electrostatic field of the benzene molecule.

Berechnung des Schalls aus der Wechselwirkung von Turbulenz mit komplexen Körpern bei hohem Signal-Störabstand

Marcus Bauer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

Tel: 0531 - 295 2420 ; Fax: 0531 - 295 2320

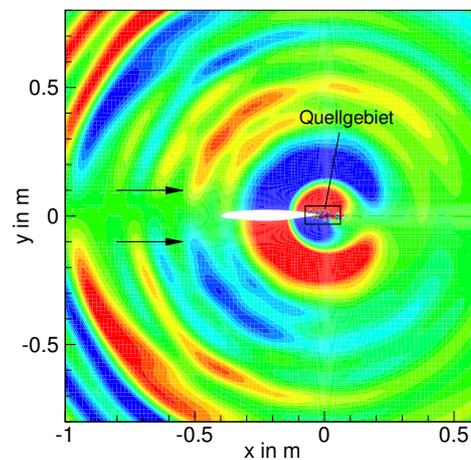
e-mail: Marcus.Bauer@dlr.de

1 Einleitung

Der Schall, der durch Wechselwirkung von Turbulenz mit starren Körpern entsteht (Umströmungsgeräusch), belastet bei entsprechend schnellen Verkehrsmitteln sowohl die Bevölkerung, als auch die Reisenden, erheblich. Für den Entwurf lärmarmen Fortbewegungsmittel benötigt man deswegen Werkzeuge, die bereits am Computer eine akustische Optimierung entsprechender Komponenten ermöglichen (z.B. Rückspiegel, Wasserfangleisten, Fensterdichtungen, Stromabnehmer, Landeklappen, Fahrwerke etc.). Mit den heute verfügbaren Rechnerressourcen ist dies durch eine Direkte Numerische Simulation als Lösung der zugrundeliegenden Navier-Stokesschen Gleichungen (NSG) bei realistischen Reynoldszahlen jedoch nicht möglich.

Am DLR wird deshalb ein hybrides Verfahren eingesetzt, bei dem vereinfachte Formen der NSG herangezogen werden: Im ersten Schritt werden die RANS-Gleichungen (Reynolds Averaged Navier Stokes, zeitgemittelte NSG) durch den hauseigenen CFD¹-Code FLOWer gelöst. Die zeitabhängige Turbulenz als Schallquelle wird mittels statistischer Turbulenzinformation aus der RANS-Simulation künstlich erzeugt. Im zweiten Schritt wird zur Berechnung der hochstationären Schallerzeugung und -ausbreitung eine modifizierte Form der Eulergleichungen (NSG ohne Reibung) mit dem CAA²-Code PIANO des DLR gelöst. PIANO basiert auf finiten Differenzen und blockstrukturierten Rechengittern. Die modifizierten Eulergleichungen werden durch einen Quellterm angeregt, der im sog. Quellgebiet aus der zuvor berechneten synthetischen Turbulenz errechnet wird. Er soll keinen Schall direkt anregen (Störschall), sondern vielmehr turbulente Schwankungen leise in die modifizierten Eulergleichungen einbringen. Zur eigentlichen Schallerzeugung kommt es erst, wenn die eingebrachte Turbulenz mit der jeweiligen Geometrieinhomogenität wechselwirkt.

Mit diesem hybriden Verfahren wurde bisher erfolgreich der Hinterkantenlärm einer ebenen Platte, verschiedener Tragflügel (siehe Bild) und eines Vorflügels, sowie das Umströmungsgeräusch von vorwärtsgeneigten Stufen vorausberechnet [1, 2, 3, 4].



¹Computational Fluid Dynamics

²Computational Aero Acoustics

2 Beispielhaftes PIANO-Ergebnis

Die Abbildung zeigt eine Momentaufnahme der zeitabhängigen Druckschwankungen aus einer zweidimensionalen PIANO-Simulation. Es wurde der Hinterkantenlärm eines unsymmetrischen Tragflügels mit einer Sehnenlänge von 0.4 m bei einem Anstellwinkel von 3.3° und einer Anströmgeschwindigkeit von 30 m/s berechnet. Im Quellgebiet sind kleinskalige turbulente Druckschwankungen erkennbar, die durch den Quellterm leise induziert wurden. Der Schall entsteht (fast) nur direkt an der Hinterkante. Typisch für Hinterkantenlärm ist, dass kein Schall in das Gebiet direkt hinter der Hinterkante abgestrahlt wird (Auslöschung).

3 Ziele der Dissertation

Im Rahmen der Dissertation werden folgende Ziele angestrebt:

- Verbesserte Vermeidung unphysikalischer Störungen bei der Quellbeschreibung: Durch die Verwendung eines räumlich begrenzten Quellgebietes entstehen neben störendem Schall auch unerwünschte turbulente Störungen. Die Vermeidung all dieser Störungen soll weiter verbessert werden.
- Erweiterung von PIANO um unstrukturierte Elemente: Bisher arbeitet der CAA-Code PIANO ausschließlich mit blockstrukturierten Netzen. Um den Code auch auf komplexe Strukturen anwenden zu können, ist zusätzlich in bestimmten Bereichen eine unstrukturierte Vernetzung nötig. Zudem soll ein Ankopplungsmechanismus zwischen strukturierten und unstrukturierten Teilgebieten erarbeitet werden.
- Vorhersage des Umströmungsgeräusches komplexer Hinterkanten: Mit Hilfe der o.a. Ergebnisse soll der Hinterkantenlärm eines Tragflügels mit unterschiedlichen lärmmindernenden Hinterkanten-Ausführungen, wie z.B. eine Zackung in spannweitenrichtung, dreidimensional berechnet werden. Die berechneten Ergebnisse sollen anhand von Daten aus einer DLR-Messkampagne validiert werden.

Literatur

- [1] M. Bauer, *Berechnung der Schallabstrahlung überströmter Hinterkanten*, Diplomarbeit, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Technische Universität Dresden, 2002
- [2] M. Bauer, *Berechnung des Umströmungsgeräusches vorwärtsgeneigter Stufen mit Hilfe eines synthetischen turbulenten Geschwindigkeitsfeldes*, Tagungsband DAGA'05, 14.-17. März 2005, München
- [3] R. Ewert and M. Bauer, *Towards the Prediction of Trailing Edge Noise via Stochastic Surface Sources*, American Institute for Aeronautics and Astronautics, AIAA-Paper 2004-2861, 2004
- [4] R. Ewert and R. Emunds, *CAA Slat Noise Studies Applying Stochastic Sound Sources Based on Solenoidal Digital Filters*, American Institute for Aeronautics and Astronautics, AIAA-Paper 2005-????, 2005

Wellen- und Windbelastung von Offshore-Windkraftanlagen

Carsten Corte

Institut für Stahlbau, Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 51, 38106 Braunschweig
Tel: 0531-391 33 78 ; Fax: 0531-391 45 92
e-mail: c.corte@tu-bs.de

1 Einleitung

Offshore-Windkraftanlagen stellen sehr schlanke, elastische Bauwerke dar. Dahingehend hat das dynamische Strukturverhalten maßgebenden Einfluß auf die Bemessung. Die Belastungen, denen Offshore-Windkraftanlagen ausgesetzt sind, können in extreme Kurzzeitbelastung und in stochastisch verteilte Langzeitbelastung gegliedert werden. Es werden Computermodelle zur numerischen Beschreibung der Kurzzeitbelastung durch extreme Wellen sowie für die Beschreibung der Langzeitbelastung von Offshore-Windkraftanlagen durch Wellen und Wind entwickelt.

2 Seegangsbelastung

Für die Modellierung des Seegangs stehen standortspezifische Seegangsspektren zur Verfügung, welche auf Langzeitmessungen beruhen. Durch diese Seegangsspektren läßt sich die Energieverteilung der Wellen im Seegang über den relevanten Frequenzbereich beschreiben. Aus der betreffenden Energieverteilung im Seegang lassen sich unter Anwendung linearer oder nichtlinearer Wellentheorien stochastische Wellenzeitschriebe generieren. Hieraus folgen dann direkt das transiente Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfeld innerhalb des Seegangs. Zur Ermittlung der Turmbelastung von Offshore-Windkraftanlagen findet die Morison-Gleichung Anwendung, welche den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Wellenkinematik und der Pfahlbelastung beschreibt.

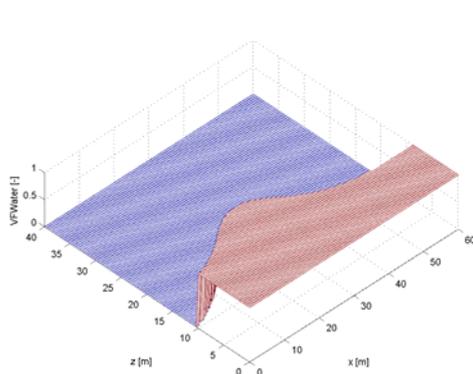


Abb. 1: Wellenform (Ranalelementemethode)

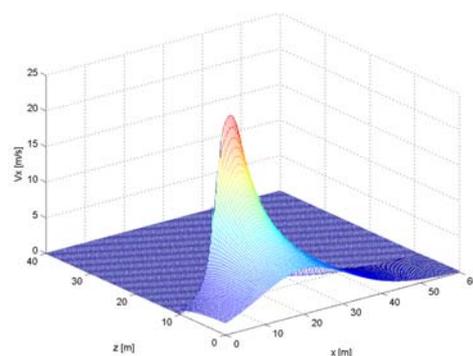


Abb. 2: Horizontalgeschwindigkeit (BEM-Lösung)

Einen Sonderfall der Wellenbelastung stellt das Auftreffen einer Extremwelle auf die Turmstruktur einer Offshore-Windkraftanlage dar. In diesem Fall stellt sich eine steile Wellenfront vor der Turmstruktur ein, und ein Auftreffen der Welle mit hoher Horizontalgeschwindigkeit verursacht eine kurzzeitige hohe Belastung sowohl lokal auf der Zylinderoberfläche als auch global in Hinblick auf extremale Schnittgrößen z. B. am Turmfußpunkt. Zur Beschreibung der Wellenentwicklung wird das Strömungsverhalten des Seegangs als Potentialströmung mit freier Oberflächenentwicklung modelliert. Das sich

ergebende Differentialgleichungssystem wird numerisch mit einer höherwertigen Randelementemethode (BEM) im Zeitbereich gelöst, um so die zeitliche Entwicklung einer Extremwelle beschreiben zu können.

In einem weiteren Schritt wird dann das Auftreffen der Wassermasse auf die Außenwand des Zylinders (Druckschlagbelastung) numerisch modelliert. Die Strömung wird hierbei mit den Navier-Stokes-Gleichungen für viskose Fluide für eine Zweiphasenströmung (Luft-Wasser-Strömung mit Grenzschicht) beschrieben. Die numerische Beschreibung erfolgt mit einem Finite-Volumen-Modell (FV) in Verbindung mit einer Volume of Fluid-Methode (VOF) zur Erfassung der freien Oberfläche. Hieraus ergibt sich die transiente Druckverteilung auf der Zylinderaußenwand (Kreisumfang) bzw. die Gesambelastung auf die Turmstruktur zur Ermittlung von globalen extremen Schnittgrößen.

3 Windbelastung

Bei Offshore-Windkraftanlagen muß für die Bemessung neben der höhenabhängigen mittleren Windgeschwindigkeit auch die Turbulenz des Windes mitberücksichtigt werden. Es existieren funktionale Beschreibungen der Windturbulenz (Autoleistungsdichtespektren). Für die Lastermittlung an den Rotorblättern wird die 2D-Blatteleumentheorie angewendet. Bei der Umströmung der Rotorblätter tritt eine zeitliche Verzögerung bei der Änderung der Kraftbeiwerte im Vergleich zur Anströmwinkeländerung auf (Hystereseverläufe). Diese begründen sich mitunter durch das Phänomen des Strömungsabrisses und des Wiederanlegens der Strömung an das Rotorblattprofil (Dynamic Stall). Die auftretenden Hysteresen werden mit Differentialgleichungssystemen erster Ordnung beschrieben und dienen der realistischen Darstellung der Rotorblattbelastung im Zeitbereich.

4 Strukturdynamik

Zur Beschreibung der Strukturdynamik wird die Gesamtstruktur als Balkenstruktur idealisiert und mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) diskretisiert. Das so erhaltene Modell ermöglicht die Ermittlung des Systemverhaltens im Frequenzbereich (Eigenfrequenzen, Eigenformen) sowie die Berechnung für Langzeitbelastungen im Zeitbereich unter Berücksichtigung großer Verformungen und dem daraus resultierenden geometrisch nichtlinearen Verhalten der Gesamtstruktur. Aus den Zeitreihen der Schnittkraftverläufe lassen sich Aussagen über die Langzeitbelastung und die resultierende Materialermüdung treffen.

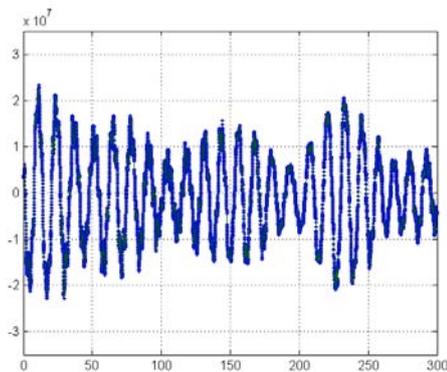


Abb. 3: Fußpunktmoment Turm [Nm] (Zeitbereich)

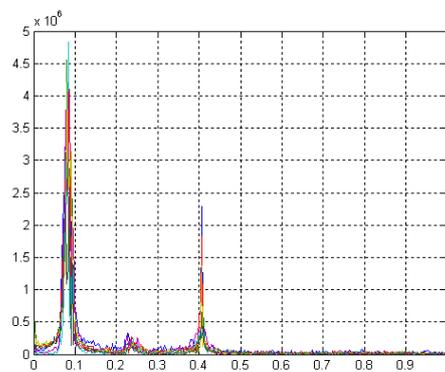


Abb. 4: Fußpunktmoment Turm [Nm/Hz] (Frequenzbereich)

Model Order Reduction

Laura Florean

Institut Computational Mathematics, Braunschweig University

Pockelsstr. 14, 38108 Braunschweig

Tel: 0531-391-7542

E-mail:l.florean@tu-bs.de

1 Introduction

A real system can be described with partial differential equations (PDEs) using theoretical physics and applied mathematics. To be able to simulate them on computers the PDEs must be discretized and converted to ODEs. Mathematically a dynamical system can be represented as

$$\Sigma = (f, h) : \begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= h(x(t), u(t)) \end{cases}$$

where $u(t) \in \mathbb{R}^m$ is the *input* function, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ is the *output* function and $x(t) \in \mathbb{R}^n$ is the *state* of the system.

The dimension n of the system state is usually very large, which can cause problems. The space and the time necessary to solve and to store the solution is proportional with the state dimension. Moreover the large dimension systems require a lot of computation, which leads to a lack of accuracy due to rounding errors.

These are motivations for the interest in the use of model reduction (MR) techniques in solving dynamical systems. Model reduction means to try to find a system

$$\hat{\Sigma} = (\hat{f}, \hat{h}), \begin{cases} u(t) \in \mathbb{R}^i \\ \hat{y}(t) \in \mathbb{R}^o \\ \hat{x}(t) \in \mathbb{R}^k \end{cases}$$

such that $\hat{\Sigma}$ approximates Σ and $k \ll n$.

There exist also other constraints that are desired for a MR method:

- the existence of a *global error* bound ($\|\Sigma - \hat{\Sigma}\|$)
- the preservation of some properties (e.g. *stability*)
- *computational efficiency* (easy to implement, automatic error tolerance)

2 Methods

A MR process is based on the projection of the system state on a lower dimensional subspace. There exists two classes of MR methods: first the *SVD-based methods*, that use the singular value decomposition (SVD) procedure to determine the projection subspace, and second the *Krylov-based methods*, which are using a Krylov-subspace as projection subspace.

Each of this two classes of methods have advantages and disadvantages when they are used. The SVD-based methods can be applied also to non-linear systems, while the Krylov methods

require first a linearization of the considered system. But the time required by the SVD methods is of order $O(n^3)$, while the Krylov-based methods need only $O(k^2n)$. For the SVD methods there exists some global error estimators and they preserve the stability of the reduced system. The Krylov-based methods have no global error estimators and no guarantee for stability.

We consider a flapping wing propulsion system; this can be described by Navier-Stokes equations. Different methods for generating a reduced-order model will be considered and compared concerning computational efficiency and errors in the model.

Literatur

- [1] A.C. Antoulas - *Approximation of Large-Scale Dynamical Systems*, SIAM, 2005
- [2] P. Holmes, J.Lumley, G. Berkootz - *Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996

Kopplung von BEM und Strahlenverfahren zur Berechnung von Schallausbreitung im Freien

Sebastian Hampel, Sabine Langer, Heinz Antes
Institut für Angewandte Mechanik, D-38106 Braunschweig, Germany,
Email: sebastian.hampel@tu-bs.de

Einleitung

Bei der Schallausbreitung im Freien spielt gerade über größere Distanzen die Brechung, die aus Wind- und Temperaturprofilen resultiert, eine große Rolle. Es existiert bislang kein numerisches Verfahren, das sowohl Wellenphänomene - insbesondere Beugung - als auch solche Brechungseffekte berücksichtigt und trotzdem über größere Ausbreitungsdistancen mit vertretbarem Aufwand das Schallfeld berechnet. Oft ist dabei das Auftreten von Beugungseffekten an Hindernissen auf einen kleinen Teil des betrachteten Gebiets begrenzt. Für diesen Fall wird im Folgenden ein hybrides Modell vorgestellt, das die Randelementmethode (engl. Boundary Element Method, BEM) als wellenbasiertes Verfahren mit dem Raytracingverfahren aus der geometrischen Akustik verbindet: Im Nahfeld um Hindernisse und komplexe Geometrien, wo Beugung und Mehrfachreflexionen zu erwarten sind, wird die Randelementmethode verwendet. Daran wird für die Berechnung des Schallfeldes im Fernfeld ein Strahlenmodell gekoppelt.

Brechung

Eines der wichtigsten Phänomene bei der Schallausbreitung im Freien ist die Brechung. Eine kontinuierliche Änderung der effektiven Schallgeschwindigkeit in Form eines Wind- oder Temperaturprofils bewirkt eine kontinuierliche Brechung, die in gekrümmten Schallstrahlen resultiert. Der meist ungünstigste und damit maßgebende Fall ist dabei die abwärts brechende Atmosphäre. Sie entsteht z.B. bei Temperaturinversion - d.h. bei einer mit der Höhe zunehmenden Temperatur - oder bei Schallausbreitung in Mitwindrichtung, da die Windgeschwindigkeit in der Regel mit der Höhe zunimmt.

BEM-Modell

Die Randelementmethode (BEM) hat sich in der Akustik und speziell für Außenraumprobleme als geeignetes numerisches Verfahren erwiesen, weil damit zum einen der Diskretisierungsaufwand um eine Dimension herabgesetzt wird und zum anderen die SOMMERFELDSche Abstrahlbedingung implizit erfüllt wird. Wellenphänomene wie Beugung werden berücksichtigt. Die Grenzen der BEM liegen in der rechenintensiven Gleichungslösung und zum anderen in der Beschränkung auf homogene Medien. Quasi-lineare Schallgeschwindigkeitsprofile sind allerdings durch das sog. *Conformal Mapping* möglich (siehe dazu [1] und [2]).

Strahlenverfahren

Statt vom Wellencharakter der Schallausbreitung gehen die Verfahren der geometrischen Akustik vom Teilchencharakter des Schalls aus. Es werden in Abhängigkeit der Geometrie und des Mediums Schallstrahlen ermittelt, d.h. die möglichen Ausbreitungswege der Teilchen von der Quelle zum Empfänger. Die Anteile der Strahlen werden dann zum Gesamtschalldruck am Empfänger aufsummiert. Der Rechenaufwand dieser Verfahren ist in der Regel erheblich geringer als bei Diskretisierungsverfahren wie der BEM und

sie können ein Wind- und Temperaturprofil relativ einfach berücksichtigen. Da der Wellencharakter vernachlässigt wird, eignen sich diese Verfahren jedoch wiederum nicht zur Erfassung von Wellenphänomenen wie Beugung. Für die Kopplung mit der BEM ist das semi-analytische Verfahren nach SALOMONS [3] besonders geeignet, da es im Gegensatz zu den meisten Raytracingverfahren im Frequenzbereich rechnet.

Kopplung

Entscheidend für eine Kopplung der beiden Verfahren ist, dass das Raytracingverfahren als Eingangsdaten Punktquellen und deren Quellintensität benötigt. Aus der BEM-Rechnung können jedoch nur Druck- oder Flussverteilungen ermittelt werden. Zur Umrechnung von einer Druckverteilung in eine Quellverteilung kann man sich der Indirekten Randelementmethode (z.B. [4]) bedienen. Aus dem bekannten Druck wird die gesuchte Quellintensitätsverteilung berechnet, die als Lasten im Raytracingverfahren aufgebracht werden.

Literatur

- [1] K. M. Li und Q. Wang: A BEM approach to assess the acoustic performance of noise barriers in a refracting atmosphere, JSV(1998) **211**(4), p.663-681.
- [2] S. Hampel, S. Langer und H. Antes: Representing outdoor sound propagation effects with a BEM model, Proceedings of CFA/DAGA '04, 2004.
- [3] E. M. Salomons: Computational atmospheric acoustics, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [4] H. Antes: Anwendungen der Methode der Randelemente in der Elastodynamik und der Fluidmechanik, Math. Methoden in der Technik **9**, Teubner Stuttgart, 1988.

Verwendung eines verallgemeinerten viskoplastischen Material zur Beschreibung einer Siloentleerung

Caroline Leppert
Institut für Statik, TU Braunschweig
Beethovenstraße 51, 38106 Braunschweig
Tel:0531-391-3673 ; Fax:0531-391-8116
e-mail: c.leppert@tu-bs.de

1 Materialbeschreibung

Beim Ausfließen von Silos und während Hangrutschungen treten in granularen Materialien Phasenübergänge von einem festen, ratenunabhängigen in einen flüssigen, viskosen Zustand auf. Im Ruhezustand kennzeichnet ein elasto-plastisches, dilatantes Verhalten das Material. Für geringe Dichten und hohe Geschwindigkeitsgradienten dominieren hingegen Flüssigkeitseigenschaften. Dabei wird das Granular als kompressibles, nicht-Newtonsches Fluid betrachtet. Ein verallgemeinertes, visco-plastisches Materialmodell unter Verwendung der Coulombschen Reibung ermöglicht die Bestimmung der ratenabhängigen Spannungskomponenten. Die Gesamtspannung \mathbf{T} ist zusammengesetzt aus einem ratenunabhängigen $\mathbf{T}^e = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}$ und einem viskosen $\mathbf{T}^v = \mathbf{G}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ Anteil, wobei die Relation der Spannungskomponenten ξ vom aktuellen Zustand des granularen Materials abhängt.

$$\mathbf{T} = \xi\mathbf{T}^e + (1 - \xi)\mathbf{T}^v \quad (1)$$

2 Numerische Umsetzung

Die Beschreibung der Strömung des granularen Materials erfolgt in raumfester Betrachtungsweise, um große Verschiebungen und Geschwindigkeiten darstellen zu können. Die Diskretisierung der schwachen Form der Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls sowie der konstitutiven Beziehungen erfolgt mit der Raum-Zeit Finite Elemente Methode. Als Variablen werden Geschwindigkeiten und Spannungen in einer gemischten Formulierung verwendet. Zur Beschreibung des ratenunabhängigen Spannungsanteils wird dieser in einer Ratenformulierung $\dot{\mathbf{T}}^e = \mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ verwendet. Die Spannungen müssen explizit im Geschwindigkeitsfeld mit $\dot{\mathbf{T}}^e = \frac{\partial \mathbf{T}^e}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{T}^e$ transportiert werden, da sie sich auf einen Materialpunkt beziehen. Die einheitliche Diskretisierung der verschiedenen Teilbereiche erlaubt die monolithische Kopplung zwischen dem fließenden Material und der umgebenden Struktur sowie die Erweiterung auf Strömungen mit freien Oberflächen.

Numerische Simulation des frei fliegenden elastischen Flugzeuges unter Reiseflugbedingungen

Andreas Michler

Institut für Aerodynamik & Strömungstechnik, DLR

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

Tel.: 0531-295-3362

e-mail: andreas.michler@dlr.de

Die Beurteilung der aerodynamischen Leistungsfähigkeit eines frei fliegenden elastischen Flugzeuges im Reiseflug erfordert eine multi-disziplinäre Betrachtung zum einen von Strömung und Struktur, da die Strömung eine Deformation des Flugzeuges hervorruft, andererseits aber eine Deformation die Strömung wiederum beeinflusst. Zum anderen muss ein stabil fliegender Flugzeug getrimmt sein, und die dazu notwendige Bewegung der Steuerflächen beeinflusst in entscheidendem Maße den Gesamtwiderstand. Es müssen also Strömung, Struktur und Flugmechanik (Trimmung) in gekoppelter Art und Weise betrachtet werden.

Da sowohl Strömung als auch Struktur komplexe Anforderungen an die Berechnungsmodelle stellen, sollen bereits vorhandene, hochentwickelte Löser für die interagierenden Disziplinen eingesetzt werden. Im Rahmen der Arbeit soll der am DLR entwickelte Strömungs-Simulations-Code TAU mit einem kommerziellen, für die Struktur gängigen Strukturlöser wie etwa NASTRAN gekoppelt werden. Ferner ist ein Trimm-Modul in diese Prozesskette einzubeziehen und die Trimmung in einem iterativen Prozess zu bestimmen.

Bei der Kopplung von Strömung und Struktur tritt die Schwierigkeit auf, dass aus der Strömungsberechnung resultierende Kräfte auf die Struktur transferiert werden müssen und andersherum die Verschiebungen der Struktur auf das Fluid. Allerdings werden aufgrund unterschiedlicher charakteristischer Skalen unterschiedliche Diskretisierungen eingesetzt. Eine Interpolation der Lösungen muss nun sicherstellen, dass ein konservativer Austausch stattfindet, d.h. Energie und Impuls des Systems müssen erhalten bleiben, da andernfalls numerische Instabilitäten auftreten können.

Die Prozesskette ist zum einen modular zu gestalten, so dass die verwendeten Löser relativ einfach ausgetauscht werden können. Zum anderen soll sie auf parallelen Plattformen effizient betrieben werden können. Schliesslich ist sie an einer Flugzeug-Konfiguration mit Rumpf, Flügeln, Pylons, Triebwerken und Leitwerken zu verifizieren.

Experimentelle und numerische Analysen an bewegten Profilen bei kleinen Reynoldszahlen

Ulrich Scholz

Institut für Strömungsmechanik, Technische Universität Braunschweig

Bienroder Weg 3, 38106 Braunschweig

Tel: 0531-3912973 ; Fax: 0531-3915952

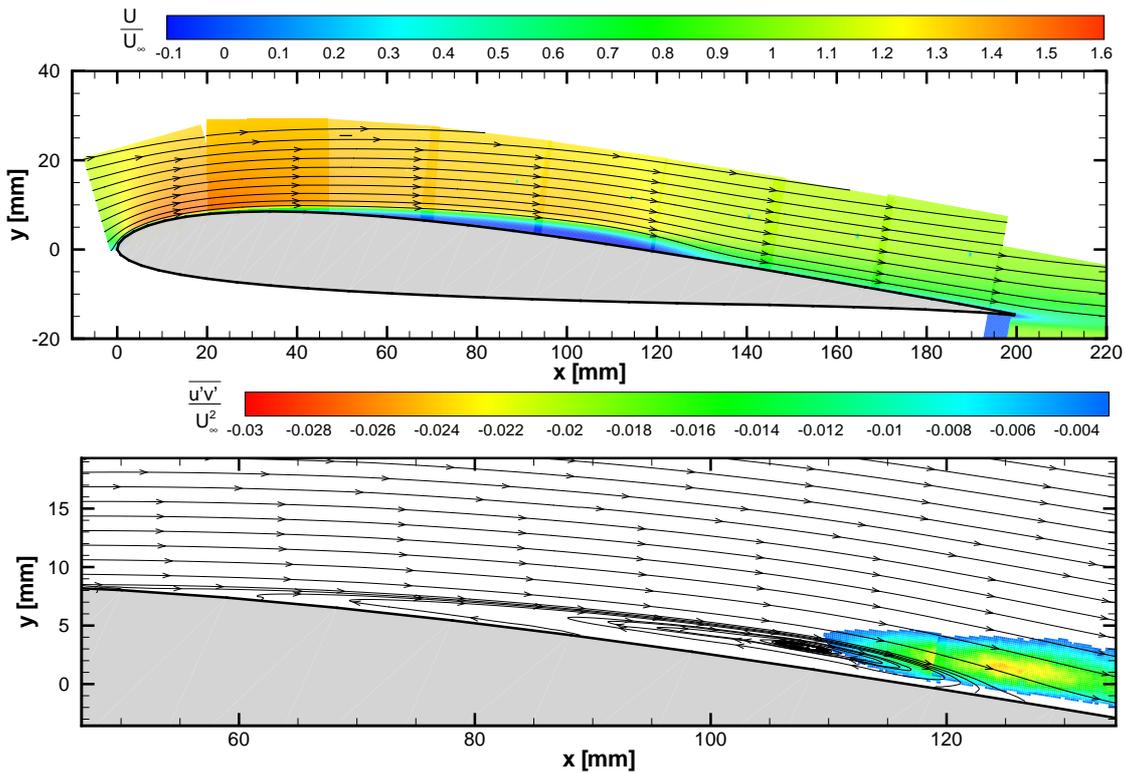
e-mail: u.scholz@tu-bs.de

1 Einleitung

In naher Zukunft, so eine Vision, könnten unbemannte Kleinflugzeugen (Micro Aerial Vehicles) in Gebiete vorstoßen, deren Zugänglichkeit heutzutage noch stark eingeschränkt ist. Ob Überwachungs- oder Forschungsaufgabe, das Einsatzspektrum erscheint vielfältig. Um die Herausforderungen die bei kleinen Abmessungen entstehen zu bewältigen, ist das interdisziplinäre Zusammenwirken vieler Fachgebiete von der Aerodynamik bis hin zur Fertigungstechnik erforderlich. Aus aerodynamischer Sicht liegen die Herausforderung im Antriebskonzept und dem Verständnis der laminaren Ablöseblasen, die nur bei kleinen Abmessungen und Geschwindigkeiten ($Re \approx 10^4$ - 10^6) auftreten. Neben dem klassischen Propellerantrieb ist auch der Antrieb durch Schlagflug eine Alternative, da dessen Effizienz mit abnehmender Reynoldszahl steigt (im Gegensatz zum Propeller). Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Untersuchung des Einflusses der laminaren Ablöseblase auf die Effizienz des Schlagflugkonzepts. Da die volle dreidimensionale Behandlung ineffektiv ist, wird das Schlagen der Tragfläche durch eine Hub- und Nickbewegung angenähert, wobei die Nickbewegung die elastische Tragfläche nachbildet. Die Hubbewegung ist in dieser Arbeit geführt, d.h. der Flügel bewegt sich in der Zeit sinusförmig auf und ab. Für die Nickbewegung ist die Tragfläche drehbar gelagert, wobei sich der Nickwinkel in Folge der Druck- und Reibungskräfte am Flügel, der Wahl des Lagerungspunktes, des Massenträgheitsmomentes, der Lagerreibmomente und der Federkräfte einstellt. Da die Strömungsmechanik bei ausgebildeter Ablöseblase kompliziert und sensitiv gegenüber Modellierungseinflüssen ist, reicht es nicht aus, die Konfiguration nur numerisch zu untersuchen. Zur Validierung müssen daher auch experimentelle Daten gewonnen werden. Zur Erläuterung: Laminare Ablöseblasen treten vorwiegend an dünnen Profilen bei Reynoldszahlen von 10^4 bis 10^6 auf. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass die Strömung aufgrund eines Druckanstiegs laminar ablöst, über der Blase in turbulente Strömung umschlägt und sich durch den turbulenten Impulsaustausch wieder anlegt, wie in Abbildung 1 zu sehen ist.

2 Experimentelles Vorgehen

Die Messungen am schlagenden Profil SD7003 werden mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) durchgeführt, die es erlaubt, ein Geschwindigkeitsfeld in einer Messebene flächenhaft zu bestimmen. Dazu wird ein Laserstrahl verwendet, der fächerartig aufgeweitet die Messebene beleuchtet. An kleinen Partikeln, die der Strömung künstlich zugesetzt sind, streut das Licht und wird von einer Kamera aufgenommen. Durch die Aufnahme zweier Bilder lassen sich aus den Partikelbildverschiebungen mit dem Zeitintervall zwischen den Bildern (Δt) und dem Abbildungsmaßstab die Geschwindigkeiten orts aufgelöst bestimmen. Die Untersuchungen mit PIV finden sowohl im Wasserkanal bei einer maximalen Hubfrequenz von 2Hz und 2cm Hubamplitude sowie im Windkanal bei einer maximalen Hubfrequenz von 10Hz und 10cm Hubamplitude statt.



Laminare Ablöseblase bei $Re = 60000$ und $\alpha = 4$
 Oben: normiertes Geschwindigkeitsfeld
 Unten: normierte Scheinschubspannung kleiner als 0

Bei PIV-Anwendung kommt es häufig vor, dass Teile des Bildes keine strömungsmechanischen Informationen enthalten. Diese können und müssen vor der Geschwindigkeitsbestimmung maskiert werden. Für eine geringe Anzahl von Fällen ist dies von Hand möglich, bei hinreichend vielen Messpositionen jedoch nur noch prinzipiell (bewegte Objekte). Für dieses Problem wurde ein Verfahren entwickelt, das die Maskierung automatisch übernimmt. Dazu wird zunächst nach Partikelbildern gesucht und deren Position bestimmt. Mit Hilfe derer lässt sich für viele Fälle schon eine Maske mit dem Verfahren der Delaunay-Triangulation bestimmen. Für andere Fälle müssen jedoch noch weitere Informationen über die Art und Form von Objekten, die nicht zum Strömungsfeld gehören, angegeben werden, um die Grenze zwischen Strömungsgebiet und Objekt scharf und mit so wenigem Strömungsinformationsverlust wie möglich zu bestimmen.

Eine weitere messtechnische Teilgebiet, das behandelt wurde, ist die Erhöhung der räumlichen Auflösung der PIV-Auswerteverfahren. Für Standard PIV-Verfahren beträgt diese ungefähr 16 Pixel. Die örtliche Auflösung kann bei quasi-stationärer Strömung und geringer Turbulenz bis auf ein Pixel erhöht werden. Dazu wird eine Anzahl N von Partikelbildaufnahmen zum Zeitpunkt t und $t + \Delta t$ benötigt. Das Muster der Grauwerte, das sich an einem festen Ort zum Zeitpunkt t über alle Bilder ergibt, muss auch in den Bildern zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ zu finden sein. Mathematisch kann diese Position mit der Kreuzkorrelation bestimmt werden, wobei das Maximum der Korrelation der mittleren Verschiebung entspricht. Die Güte der Messungen ist von vielen Parametern abhängig. Einige davon sind die Partikeldichte, die Partikelbildgröße, das Hintergrundrauschen, usw..

3 Numerisches Vorgehen

Die numerische Simulation erfolgt mit dem DLR Strömungslöser FLOWer, einem Finite Volumen Verfahren, das strukturierte Netze verwendet. Es besteht zudem die Möglichkeit einer zeitgenauen Simulation mit bewegten Netzen. Dieser Löser wurde im Hause um eine Transitionsvorhersage erweitert. Für diese Arbeit wurde des Weiteren die Feder-Dämpfer-Kopplung um die Nickachse in den Code implementiert. Die verwendete Bewegungsgleichung ist eine inhomogene Differentialgleichung zweiter Ordnung, die mit einem Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung gelöst wird. Die Kopplung von Strömung und Struktur wird mit einem sequentiellen Verfahren gelöst. Da die Zeitschritte aufgrund der Strömung klein sein müssen, sind auch die zu erwartenden Fehler dieser Vorgehensweise klein. Erste Validierungsrechnungen mit einer vollturbulenten Grenzschicht zeigen, dass das Verfahren die erwarteten Ergebnisse liefert. So verhält sich ein symmetrisches NACA0012 Profil stabil, wenn der Drehpunkt=Schwerpunkt vor dem Druckpunkt liegt und instabil im entgegengesetzten Fall.

Simulation von Erosion und Sedimenttransport mit der Lattice-Boltzmann-Methode

Maik Stiebler

Institut für Computeranwendungen im Bauingenieurwesen

Pockelsstr. 3, 38106 Braunschweig

Tel:0531 391 7597 ; Fax:0531 391 7599

e-mail: stiebler@cab.bau.tu-bs.de

1 Einleitung

Im Strömungsumfeld von Wasserbaukonstruktionen kommt es aufgrund der lokal erhöhten Fließgeschwindigkeiten zu erhöhten Erosionsraten und zur Bildung von Kolken, die eine Einschränkung der Funktionsfähigkeit des Bauwerkes bewirken können. Daher ist Kolkbildung für die Bemessung von Wasserbaukonstruktionen ein zentrales Thema. Bemessungsvorschriften beruhen häufig auf empirischen Formeln für normierte Bauwerksgeometrien, während die quantitative Bestimmung von Kolk-tiefen mit numerischen Methoden für praktische Problemstellungen gegenwärtig Gegenstand der Forschung ist. Einen Überblick über den Stand findet man in [1].

2 Verfahren

Als Strömungslöser wird ein Lattice-Boltzmann-Modell verwendet. Das Lattice-Boltzmann-Verfahren [2] hat sich in den letzten fünfzehn Jahren zu einer leistungsfähigen Alternative zur Strömungssimulation auf Grundlage der Navier-Stokes-Gleichungen entwickelt. Die Methode beruht auf einer mikroskopischen Sichtweise und lässt sich auf das stochastische Verhalten hypothetischer Gasteilchen zurückführen. Sie bietet gegenüber Navier-Stokes-Lösern folgende Vorteile:

- Modellierung der Nichtlinearität des Strömungsverhaltens durch den lokalen Kollisionsoperator und einen linearen, diagonalen Advektionsoperator
- explizites Verfahren
- gute Parallelisierbarkeit
- gute Anwendbarkeit in Verbindung mit komplexen Geometrien
- Spannungstensor lokal aus Knotengrößen berechenbar

Ein wesentlicher Nachteil der Lattice-Boltzmann-Methode ist ihre Beschränkung auf uniforme, kartesische Gitterformen. In dem Vortrag wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem Gebiete unterschiedlicher Gitterauflösung miteinander gekoppelt werden können [3].

Der Sedimenttransport in der inkompressiblen Strömung wird durch eine Advektions-Diffusionsgleichung modelliert, deren Parameter lokal durch die Strömung bestimmt werden.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u_{j,\text{Fluid}} + u_{j,\text{Sink}}) \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{v_t}{\sigma_c} \frac{\partial^2 c}{\partial x_i \partial x_j}$$

Diese Advektions-Diffusionsgleichung wird auf dem gleichen Rechengitter wie das Strömungsmodell mit einem abgewandelten Lattice-Boltzmann-Verfahren approximiert.

Zusätzlich ist das Strömungsfeld durch schubspannungsabhängige Sedimentations- und Erosionsraten mit dem Bett gekoppelt.

Literatur

- [1] R. Whitehouse, *Scour at marine structures - A manual for practical applications*, Thomas Telford Publications, London 1998.
- [2] Y. H. Qian, D. D'Humières, P. Lallemand, *Lattice BGK models for Navier-Stokes equation*, *Europhys. Lett.*, **17** (1992) 479.
- [3] B. Crouse, E. Rank, M. Krafczyk, J. Tölke *An LB-based approach for adaptive flow simulations*, *Int. J. of Modern Physics B*, **17** (2002) 109.

Hydraulic Performance of Artificial Reef for tsunami protection

Agnieszka Strusinska
Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
Beethoven Straße 51a, 38106 Braunschweig
Tel:531 391 3929
e-mail: astrusinska@tu-bs

1 Einleitung

The urgent necessity of introducing new reliable countermeasures for coastal protection against tsunami hazard has appeared after the Sumatra earthquake on 26.11.2004. In general, the current protection systems include both natural barriers, such as mangrove forests or dunes and man-made structures like sea walls or breakwaters. In the case of tsunami waves, one expects large dimensions of the protective structures, and therefore their low-budget counterparts are preferred. Another factors influencing the choice of the appropriate solution are ecological and touristic values of a shore, that should not be imparted. For these reasons, the submerged obstacles are given the priority.

The prime objective of my study is to investigate the feasibility of applying an artificial submerged reef for the tsunami damping process, occurring offshore. Such structures have proved very good performance for wind-wave conditions. However, tsunami phenomena is distinct from the mentioned waves with the respect to wave length, height, period and velocity. Due to the economic reasons, it is designed of geotextile mega containers, that is, geotextile units filled with sand. For simplification, the reef is assumed to be rectangular and impermeable.

The efficiency of the tsunami attenuation at the artificial reef will be examined through structure parameters (reef width, height, distance from the shore and depth of submergence), wave characteristic (wave length, height and period) and their relationships. The hydraulic performance of the reef basis on a description of the following valid processes: wave transmission, reflection, breaking and energy dissipation.

The first stage of the study is literature review that will enable a specification of the reef model as well as the main objectives. Since it is impossible to obtain reliable results in a laboratory, only a numerical model will be tested.

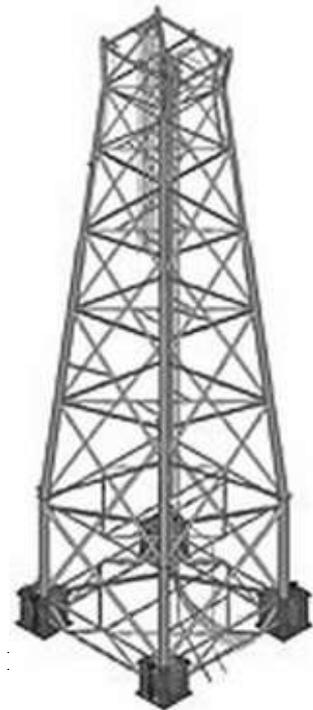
Ermittlung der Wellenschlagbelastung auf Offshore-Windkraftanlagen mit aufgelöster Tragstruktur

Dipl.-Ing. Simon Wiesener
Technische Universität Braunschweig
Institut für Stahlbau
Beethovenstrasse 51, 38106 Braunschweig
Telefon: 0531-3193375 Fax: 0531-3194592
e-mail: s.wiesener@is.tu-braunschweig.de

Start: 01.06.2005

Ziel des Forschungsvorhabens

Gegenwärtig laufen in mehreren Anrainerstaaten von Nord- und Ostsee umfangreiche Planungsarbeiten zur Errichtung von Offshore-Windparks. Dabei werden unterschiedliche Tragstrukturen diskutiert: Neben den kompakten Varianten Monopile und Tripod sind auch aufgelöste Strukturen (jackets) eine denkbare Alternative. Im Hinblick auf die Gründungskonstruktion und den Materialverbrauch bei der Tragstruktur sind diese von Vorteil. Allerdings weisen aufgelöste Strukturen ein komplexeres Umströmungsverhalten als kompakte Konstruktionen auf, weshalb die üblicherweise angewandten Verfahren zur Ermittlung der Lasten aus dem Wellenschlag auf ihre Gültigkeit hin zu überprüfen sind. Insbesondere die höhere Nachgiebigkeit, die eine stärkere Interaktion mit der Wellenanregung erwarten lassen, und auftretende Turbulenzeffekte sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens mit numerischen Verfahren untersucht werden. Für die Simulationsrechnungen sollen in geeigneter Weise bereits vorhandene Programmsysteme genutzt und angepasst werden.



Strömung-Struktur Wechselwirkungen bei Wärmeübergangsmessungen in einem Rohrwindkanal für den Hyperschall

Torsten Wolf

Institut für Strömungsmechanik, Universität Braunschweig

Bienroder Weg 3, 38106 Braunschweig

Tel: 0531-391 2978 ; Fax: 0531-391 5952

e-mail: t.wolf@tu-bs.de

1 Einleitung

Das Institut für Strömungsmechanik verfügt über einen Rohrwindkanal für den Hyperschall, der nach dem Ludwig'schen Prinzip arbeitet. Der Hyperschallwindkanal Ludwigrohr Braunschweig (HLB) wurde für eine Machzahl von 5.9 in der Messstrecke und Reynoldszahlen von 3 bis $20 \cdot 10^6 1/m$ bei einer Messdauer von ca. 80 ms entworfen. Abbildung 1 zeigt schematisch den HLB wobei in Abbildung 2 das – anstelle der von Ludwig ursprünglich vorgesehenen Membran – verwendete Schnellschlussventil abgebildet ist.

Darüberhinaus wird am Institut für Strömungsmechanik derzeit ein Messverfahren für flächige Wärmeübergangsmessungen mit der Infrarottechnik entwickelt. Das Auswerteverfahren verwendet dafür analytische Näherungsbeziehungen für die Wärmeleitung in der Struktur. Während des realen Windkanalversuchs findet demgegenüber eine Aufheizung des Modells statt, bei der es je nach den lokalen Gradienten des Wärmeübergangs und der Modellgeometrie zu beträchtlichen thermischen Wechselwirkungen von Strömung und Struktur kommt. Diese Wechselwirkungen sollen im Rahmen des Graduiertenkollegs mit gekoppelten numerischen Simulationen des instationären Verhaltens von Strömung und Struktur berechnet und analysiert werden. Die Ergebnisse sollen ein detailliertes und genaues Bild der Vorgänge während der Windkanalversuche ergeben, gegenüber dem die Annahmen der experimentellen Methoden bewertet werden können.

2 Verfahren

Die Simulation des gesamten Problems wird aufgespalten. In einem ersten Schritt soll das zeitgenaue Strömungsfeld im HLB simuliert werden, ohne dass sich ein Modell in der Messstrecke befindet. Die zeitlichen Verläufe der Strömungsgrößen im Eintrittsquerschnitt der Messstrecke werden anschliessend ausgelesen und gespeichert. Im nachfolgenden Schritt werden zeitgenaue Simulationen des Strömungsfelds um Testkörper in der Messstrecke durchgeführt, wobei die zuvor gesammelten Ergebnisse als Zuströmgrößen verwendet werden. Bei diesen Simulationen wird ein Strukturlöser hinzugezogen, der in einem gekoppelten Verfahren die Aufheizung des Modells berechnet, so dass die Wechselwirkung zwischen Struktur und Fluid erfasst werden kann.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden zunächst Erfahrungswerte hinsichtlich einer effizienten Nutzung des verwendeten Strömungslösers (DLR TAU-Code) gesammelt. Auf dem Gebiet der Flussberechnungsschemata wurde AUSMPW+ für die nachfolgenden Simulationen ausgewählt. Basierend auf den Ergebnissen unterschiedlicher Testfälle konnte für dieses Schema eine vergleichsweise sehr gute räumliche Auflösung von bewegten sowie stationären Diskontinuitäten (Verdichtungsstöße, Kontaktunstetigkeiten) bei gleichzeitig geringer numerischer Dissipation ohne numerische Instabilitäten nachgewiesen werden. Anhand der zeitgenauen Simulation der Strömung in einem Ludwigrohr vereinfachter Geometrie wurde der Einfluss der

Netzfeinheit auf die im Strömungsfeld auftretenden Strukturen untersucht, wobei anstelle eines sich während der Simulationsdauer öffnenden Ventils eine Membran aufplatzt. Diese Simulationen zeigen bereits die Grundzüge der im Stoßwellenrohr stattfindenden Entwicklung der Strömung auf. So bewegt sich direkt nach dem Wegfall der Trennfläche das vom Treibergas komprimierte Fluid in Form eines heißen Propfens mit hoher Geschwindigkeit durch die Düse. Im darauffolgenden Zeitraum stellt sich unter abklingender Wellenaktivität der Betriebszustand des Ludwiegrohrs ein. Die räumliche Auflösung des heißen Propfens benötigt deutlich feinere Rechenetze als das zeitlich nachfolgende Strömungsfeld, wohingegen der Einfluss auf die Strömungsgrößen an einem Testkörper in der Messstrecke als gering angesehen wird. Mit diesen Ergebnissen kann somit für nachfolgende Simulationen der Strömung im HLB die Netzfeinheit derart gewählt werden, dass die maßgeblichen Strömungsphänomene ausreichend genau erfasst werden und dabei der numerischen Aufwand gering gehalten werden kann.

Die zeitgenaue Simulation der Strömung im HLB führt zu dem Problem der Modellierung des Ventilöffnungsvorgangs, welches folgendermaßen gelöst wird: Ausgehend von einer Berandung des Rechengebiets bei geringer Ventilöffnung wird ein Startnetz generiert, auf dem die instationäre Simulation initiiert wird. Die Punkte auf der Berandung des Ventilkörpers werden mittels Netzdeformation im Verlauf der Simulation mitgeführt. Mit Hilfe einer modifizierten Version des Deformationsprogramms werden diese Verschiebungen auf die Punkte im Strömungsfeld übertragen, so dass die Verzerrung der Zellen vergleichsweise gering ausfällt. Die Öffnungsgeschwindigkeit des Ventils sowie der Öffnungsweg wurden experimentell ermittelt. Bevor nach mehrmaliger Deformation die Qualität des Netzes zu stark abnimmt, wird basierend auf der aktuellen Ventilöffnung ein Folgenetz erzeugt, welches die Grundlage für die nächsten Deformationsschritte bildet. Die jeweils aktuelle Lösung wird mittels eines Interpolationsverfahrens auf das Folgenetz übertragen. Es konnte gezeigt werden, dass mit der verwendeten Interpolationsmethode die prozentuale Abweichung nach zwei Interpolationsschritten z.B. in der Dichteverteilung an Diskontinuitäten unter 5% und in glatten Gebieten unter 0.02% liegt.

3 Ergebnisse

Gegenstand der aktuellen Arbeiten ist die Simulation des zeitgenauen Strömungsfelds im HLB, deren Ergebnisse als Zuströmgrößen für die nachfolgenden Simulationen verwendet werden. Mithilfe der Ergebnisse aus ersten Simulationen mit zunächst konstanter Ventilöffnungsgeschwindigkeit kann die Entwicklung des Strömungsfelds in drei Abschnitte unterteilt werden. Zunächst bildet sich an der Spitze des Ventilstößels ein schräger Verdichtungsstoß aus, während eine Expansionswelle entlang des Ventilkörpers in das Speicherrohr hineinläuft. Diese Entwicklung vollzieht sich unabhängig von der Ventilöffnung. Darauffolgend verlagert sich der Verdichtungsstoß stromauf und folgt dabei der Bewegung des Ventilstößels. Mit dem sich erweiternden Ringspalt an der Stößelspitze nimmt die Stärke des Verdichtungsstoßes ab, bis die Ventulumströmung schliesslich vollständig im Unterschall erfolgt. Damit beginnt der dritte Abschnitt, in dem wiederum unabhängig von der Ventilöffnungsgeschwindigkeit der ehemalige Verdichtungsstoß nun als subsonische Verdichtungsstelle stromauf in das Speicherrohr läuft. Abbildung 3 zeigt in zeitlicher Abfolge den Übergang vom zweiten zum dritten Abschnitt mittels berechneter Schlierenbilder (Dichtegradient). Deutlich erkennt man ein komplexes System aus Verdichtungsstößen, Expansionsfächern (R) und deren Reflexionen (R). Unter Berücksichtigung der tatsächlichen, beschleunigten Stößelbewegung wird eine gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment erwartet.

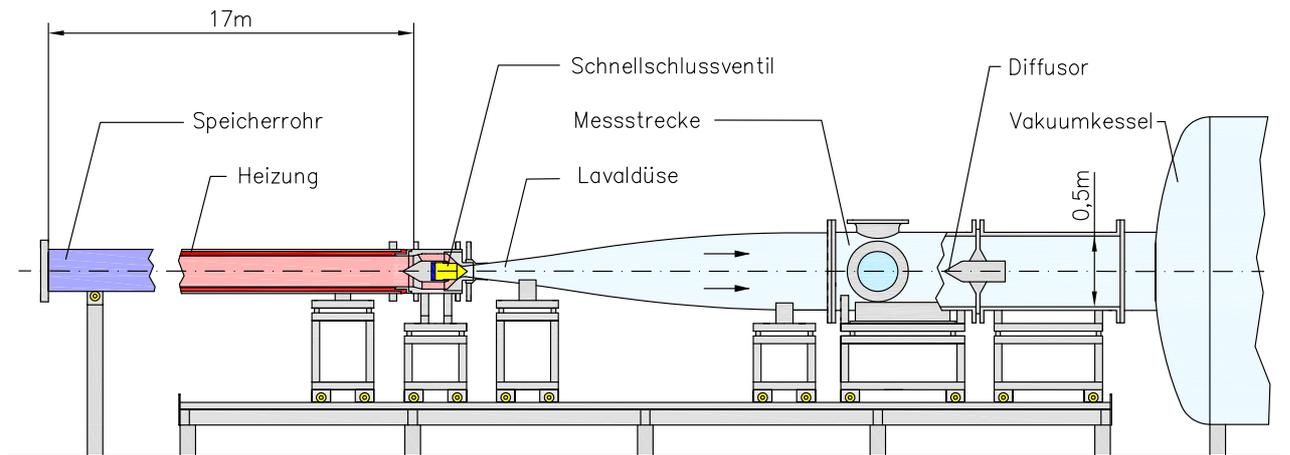


Abbildung 1: Skizze des HLB

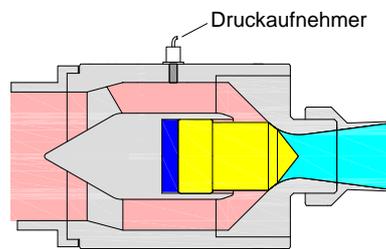


Abbildung 2: Schnellschlussventil des HLB

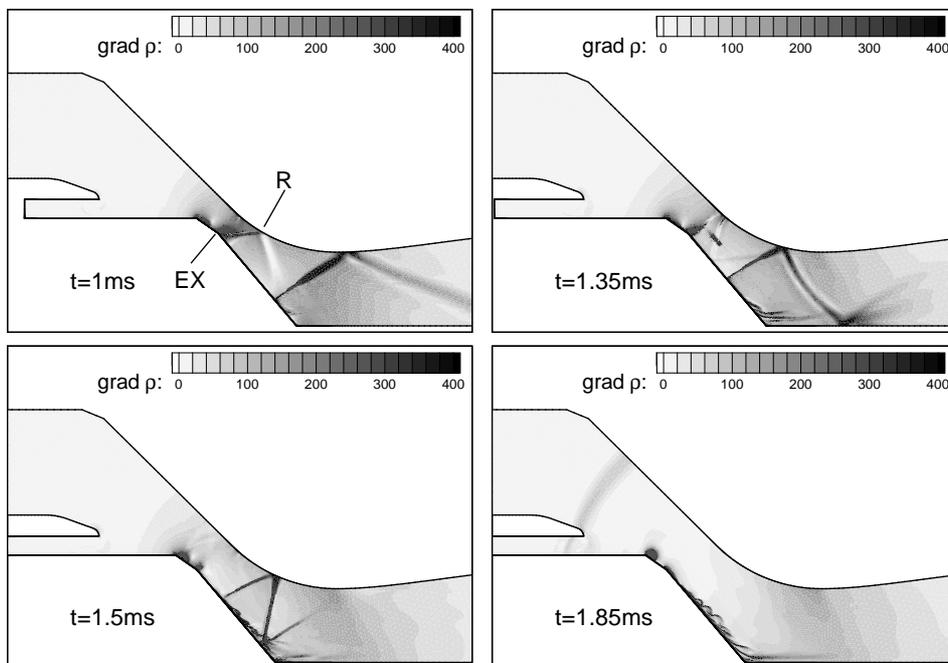


Abbildung 3: Berechnete Schlierenbilder zu verschiedenen Zeitpunkten in der Umgebung des Ventilkörpers

Strömungskontrolle mit wandparallelen Lorentzkraften

Thomas Albrecht, Roger Grundmann
Institut für Luft- und Raumfahrttechnik; Technische Universität Dresden
01067 Dresden
Tel:0351-463 38096; Fax:0351-463 38087
e-mail: albrecht@tfd.mw.tu-dresden.de

Tom Weier, Gunter Gerbeth
Institut für Sicherheitsforschung, Forschungszentrum Rossendorf
PF 51 01 19, 01314 Dresden
Tel:0351/260 2226; Fax:0351/260 2007
e-mail: T.Weier@fz-rossendorf.de

1 Einleitung

Neben den traditionell in der Labor-Magnetohydrodynamik untersuchten flüssigen Metallen kann auch die Strömung von Fluiden geringer elektrischer Leitfähigkeit σ , z.B. von Elektrolyten wie Seewasser ($\sigma \sim O(10)$ S/m), durch Lorentzkraften beeinflusst werden. Eine Lorentzkraftdichte \mathbf{F} resultiert aus dem Vektorprodukt von Stromdichte \mathbf{j} und magnetischer Induktion \mathbf{B} . Die Stromdichte ergibt sich dabei aus dem Ohmschen Gesetz für bewegte Medien $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$, wobei \mathbf{E} die elektrische Feldstärke und \mathbf{u} das Strömungsfeld bezeichnen. Wegen der geringen Leitfähigkeit sind die durch den $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ Term erzeugten Stromdichten sehr klein, weshalb die daraus bei moderaten magnetischen Feldstärken ($B_0 \sim 1$ T) folgenden Lorentzkraftdichten die Strömung praktisch unverändert lassen. Um Lorentzkraftdichten zu erzielen, die einen merklichen Einfluss auf die Strömung ausüben, muss deswegen ein zusätzliches elektrische Feld E_0 mit $\phi = E_0/(U_\infty B_0) \gg 1$ angelegt werden. Das impliziert einerseits, dass die Lorentzkraftverteilung unabhängig von der Strömung ist. Andererseits bedeutet ein hoher Beladungsfaktor ϕ eine geringe energetische Effizienz der Impulserzeugung. Ungeachtet dessen besitzt die Lorentzkraft eine Reihe von Eigenschaften, die sie zu einem – zumindest für den Experimentator – interessanten Aktuator qualifizieren: Impuls wird ohne zusätzliche Volumenströme direkt im Fluid erzeugt, nahezu beliebige Kraft-Zeit-Verläufe sind problemlos realisierbar, der Aktuator reagiert praktisch verzögerungsfrei.

2 Transitionsverzögerung

Für eine modifizierte Hartmannzahl $Z = 1$, definiert als das Verhältnis von elektromagnetischer zu Reibungskraft, geht das Blasiusprofil asymptotisch in ein exponentielles über. Analog zum kontinuierlichen Absaugen wird das Grenzschichtwachstum unterdrückt und gleichzeitig eine höhere Stabilität gegenüber primären Störungen erreicht. Dieser Effekt konnte anhand der in Abbildung 1 gezeigten Ergebnisse numerisch nachgewiesen werden. Alle untersuchten Störfrequenzen $0.4 \leq F^+ \leq 3.75$, $F^+ = (2\pi f\nu/U_\infty^2) * 10^4$ werden unter dem Lorentzkraffteinfluss gedämpft (Aktuation im Bereich der dimensionslosen Lauflängenkoordinate $\xi \geq 0$), zum Vergleich ist zusätzlich eine Kurve für den unbeeinflussten Fall dargestellt. Untersuchungen mit zeitlich veränderlicher Kraft führen bei äquivalentem Impulseintrag zu gleichen (mittleren) Geschwindigkeitsprofilen.

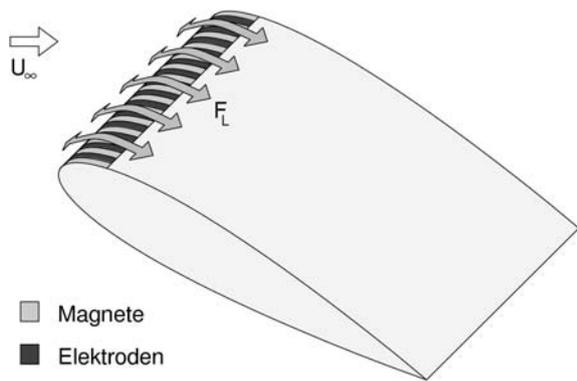


Abbildung 2: Prinzipskizze der instationären Anregung.

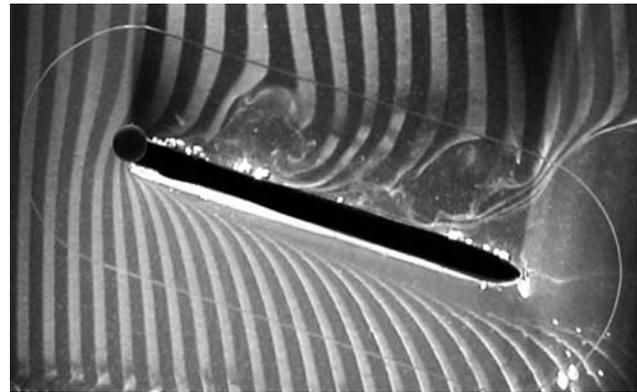


Abbildung 3: Periodische Lorentzkraft an 15° geneigter Platte, $Re \approx 10^4$, $F^+ = 1.4$, $c'_\mu = 4.4\%$.

3 Ablösungskontrolle

Auf der Saugseite von Profilen werden abwechselnd Permanentmagnete und Elektroden angeordnet (siehe Abbildung 2). Versorgt man die Elektroden mit Strom, entsteht im Fluidvolumen oberhalb des mit Elektroden und Magneten bedeckten Bereichs die Lorentzkraftdichte F_L , deren Stärke mit wachsendem Wandabstand exponentiell abnimmt. Bei der hier verwendeten Konfiguration wirkt die Lorentzkraft stets wandparallel. Der wesentliche Parameter zur Charakterisierung der Lorentzkraftwirkung auf die saugseitige Strömung an einem Tragflügel ist der Impulskoeffizient, der den integralen elektromagnetisch eingetragenen Impuls zum Produkt aus dynamischem Druck der Anströmung und Profilfläche ins Verhältnis setzt (siehe [1]). Einen Eindruck von der abgelösten saugseitigen Strömung an einer angestellten Platte unter Einwirkung einer oszillierenden Lorentzkraft vermittelt Abbildung 3. c'_μ ist der effektive Impulskoeffizient, F^+ die mit der Profiltiefe und der Anströmgeschwindigkeit entdimensionierte Frequenz der Anregung. Die, ohne Beeinflussung bereits bei einem Anstellwinkel von $\alpha \approx 5^\circ$ ablösende, Strömung folgt der Plattenkontur. Charakteristisch sind dabei die von der periodischen Anregung ausgelösten Wirbelstrukturen.

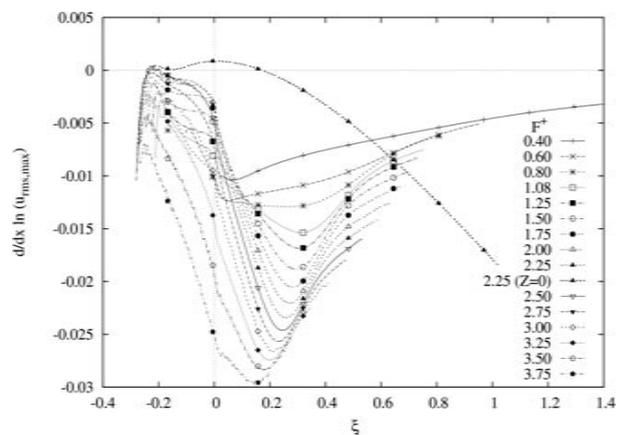


Abbildung 1: Entwicklung der TSW-Wachstumsraten für verschiedene Frequenzen im Übergang vom Blasius- zum exp. Profil

Literatur

- [1] Weier, T., Gerbeth, G., Mutschke, G., Lielausis, O., Lammers, G.: Control of flow separation using electromagnetic forces. *Flow, Turbulence and Combustion*, 71, 5–17, 2003.
- [2] Weier, T., Gerbeth, G.: Control of separated flows by time periodic Lorentz forces. *Eur. J. Mech. B Fluids*, 2004, im Druck.

Effiziente Implementierung der Spektralelementmethode

Uwe Fladrich

Zentrum für Hochleistungsrechnen (ZHR), TU Dresden

01062 Dresden

Tel: +49-351-46332442 ; Fax: +49-351-46337773

e-mail: fladrich@zhr-tu-dresden.de

1 Einleitung

Die numerische Simulation instationärer Strömungen führt zu hohen Anforderungen an die benötigte Rechenleistung. Ursache sind insbesondere lange Integrationszeiträume und durch hohe physikalische und/oder geometrische Komplexität erforderliche hohe räumliche Auflösung. Im beschriebenen Projekt wird die Spektralelementmethode (SEM) untersucht, welche potentiell eine effiziente Alternative zu linearen Finiten Elementen darstellt.

Für die Diskretisierung mittels SEM wird das Rechengebiet in finite Spektralelemente (Tetraeder) zerlegt. Die Verwaltung des verteilten Gitters sowie die später beschriebene Adaption inklusive der notwendigen Repartitionierung wird dabei von der Bibliothek *MG* übernommen. Der Raum der Ansatz- und Testfunktionen besteht aus lokalen Lagrange-Polynomen variabler (jedoch für alle Elemente gleicher) Ordnung, die durch eine generische Punkteverteilung auf den Spektralelementen definiert werden.

2 Generische Helmholtz-Gleichung

Für die Integration der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen in der Zeit wird ein Splitting-Ansatz genutzt, der in jedem Zeitschritt auf die Lösung einer Poisson-Gleichung für den Druck und eines Systems von Helmholtz-Gleichungen für die Geschwindigkeitskomponenten führt. Die iterative Lösung der entsprechenden linearen Gleichungssysteme stellt den wesentlichen Anteil des Rechenaufwandes dar. Aus diesem Grund wurde die Lösung einer generischen Helmholtz-Gleichung als Testbeispiel für die SEM-Implementierung gewählt. Die parallele Effizienz des Gleichungslösers wurde auf einer SGI Origin3800 mit ausgezeichneten Ergebnissen untersucht.

3 Adaptionstechniken

Wesentlich für die spektrale Konvergenz (und damit für die Effizienz) der SEM ist die Glätte der Lösung. Mit Hilfe von Adaptionstechniken können „schwierige“ Anteile der Lösung isoliert werden, ohne die Problemdimension entscheidend zu erhöhen. Im Rahmen der Tests für die Helmholtz-Gleichung wurde die Adaption im Zusammenhang mit der SEM untersucht. Für eine Testfunktion mit einer zweidimensionalen, räumlich eng begrenzten Störung konnte eine Reduktion des Fehlers um mehr als zwei Größenordnungen bei gleicher Anzahl der Freiheitsgrade nachgewiesen werden. Auch für die Adaption wurde die Effizienz auf einem massiv parallelen System erfolgreich getestet.

Modellierung der Erstarrung von Legierungen: Phänomenologisch orientierte, numerische Simulation

Matthias Jurgk

Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme

Nöthnitzer Straße 38, 01187 Dresden

Tel: 0351-871-2221 ; Fax: 0351-871-1999

E-Mail: jurgk@mpipks-dresden.mpg.de

Petr Nikrityuk

Institut für Luft- und Raumfahrttechnik, TU Dresden

Marschnerstraße 32, 01307 Dresden

Tel: 0351-463-38-092; Fax: 0351-463-38-087

E-Mail: nikrityu@tfd.mw.tu-dresden.de

Das Hauptaufgabenfeld des Teilprojektes B2 des SFB 609 ist es, die gerichtete Erstarrung einer zylindrischen Pb-Sn-Legierungsprobe unter Magnetfeldeinfluß auf dem Computer zu simulieren. Dabei steht es zunächst nicht so sehr im Vordergrund, numerisch und mathematisch hochoptimierte Simulationen zu erschaffen, sondern Simulationen zu entwickeln, die experimentell beobachtbare Phänomene anfangs qualitativ und letztendlich auch quantitativ genau vorhersagen können. Das anwendungsorientierte Ziel ist es, die Erstarrungsmorphologie (die Gefügeeigenschaften) von Pb-Sn-Legierungen durch den Einsatz von Magnetfeldern während der Erstarrung im Hinblick auf optimale Materialeigenschaften zu kontrollieren. Dieses Ziel soll sowohl von theoretischer, modellierender Seite im Teilprojekt B2, als auch von experimenteller Seite im Teilprojekt B1 erreicht werden.

Die grundlegende Methodik für die Modellierung in B2 besteht dabei in einer Skalentrennung, d.h. in der Aufspaltung in mikroskalige und makroskalige Modellierung.

Für die makroskopische Skala wurde ein Kontinuumsmodell implementiert, das in die Klasse der sogenannten Mischungsmodelle gehört. Das Modell beinhaltet die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls, Energie und Teilchenzahl für die erstarrende Legierung in kompressibler Form. Das von außen aufgeprägte Magnetfeld, dessen Einfluss es zu untersuchen gilt, wird über einen Lorentz-Kraft-Term in den Impulserhaltungsgleichungen modelliert. Die Mush-Zone als Übergangsbereich zwischen der festen und der flüssigen Phase der erstarrenden Legierung wird mit einem für poröse Medien entwickelten Ansatz behandelt. Das so entstehende Gleichungssystem wird numerisch mit der Methode der finiten Volumen gelöst. Mit dieser Implementierung wurden wesentliche, durch das Magnetfeld hervorgerufene Phänomene, wie zum Beispiel die Veränderung in den Abkühlkurven, die Änderung des Strömungsfeldes oder die Krümmung der Erstarrungsfront präzise vorhergesagt.

Für die mikroskopische Skala wurde die Implementierung eines sogenannten Sharp-Interface-Modells erweitert und angepasst. Dieses Modell gehört ebenfalls in die Klasse der Kontinuumsmodelle und wurde dazu verwendet, das gerichtete Wachstum von dendritischen Mikrostrukturen (kolumnare Dendriten) in der Legierungsprobe zu simulieren. Die Schwierigkeit bei diesem Modell besteht darin, daß das modellierte Problem ein sogenanntes freies Randwertproblem ist, bei dem Transportgleichungen in einem sich verändernden Gebiet (flüssigen Phase) gelöst werden müssen und die Änderungen dieses Gebietes aber wiederum durch das Transportfeld beeinflusst werden. Dieses nichtlineare Problem erfordert eine relativ aufwendige Numerik.

Die Kopplung der beiden, für unterschiedliche Längenskalen entwickelten Modelle im Teilprojekt geschieht nun dadurch, daß die Abstände der oben erwähnten Mikrostrukturen (primäre Dendritenarmabstände), die im Mikroskalenmodell in Abhängigkeit von den Prozessparamete-

tern berechnet werden, im Makroskalenmodell dazu verwendet werden, die Permeabilität der Mush-Zone für die strömende, flüssige Phase zu berechnen.

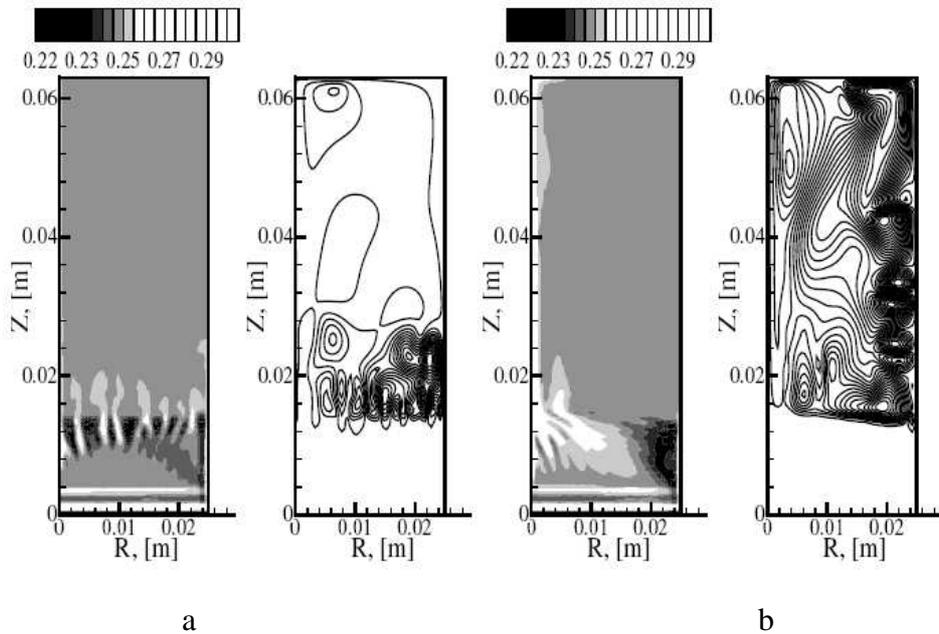


Abbildung 1: Ergebnisse der Makrosimulation, nach 30 Sekunden Erstarrung: (a) ohne Magnetfeld, (b) mit rotierendem Magnetfeld mit $B = 2$ mT, jeweils links: Massenkonzentration von Sn, jeweils rechts: Stromlinien der meridionalen, sekundären Strömung

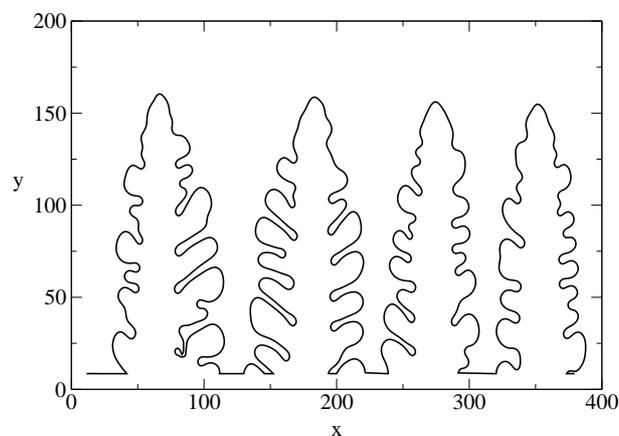


Abbildung 2: Ergebnisse der Mikrosimulation: zweidimensionale, mikroskopische Erstarrungsfront (kolumnare Dendriten) für Kristallisation der Pb-reichen Phase von Pb-Sn

Einflüsse eines statischen Magnetfeldes auf elektrochemische Prozesse

S. Koehler, A. Ispas, R. Peipmann, A. Bund
Technische Universität Dresden, Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie
Mommsenstr. 13, 01062 Dresden
Tel: 0351-46335164
e-mail: silvio.koehler@chemie.tu-dresden.de

Die Arbeiten unseres Teilprojektes im Rahmen des SFB 609 befassen sich mit dem Einfluß eines statischen Magnetfeldes (bis zu 1T) auf die einzelnen Teilschritte einer elektrochemischen Reaktion (Abbildung 1), wie Massentransport, Ladungsdurchtritt durch die elektrochemische Doppelschicht und Elektrokristallisation in schwach leitfähigen Fluiden, insbesondere Wasser.

Dabei zeigten Messungen an Makro- und Mikroelektroden für verschiedene Redoxsysteme eine Zunahme des Massentransportes im Falle einer senkrechten Anordnung von elektrischem und magnetischem Feld. Diese Resultate können mit dem Magnetohydrodynamischen (MHD) Effekt erklärt werden. Das Ladungsdurchtritt hingegen blieb an allen Fällen unbeeinflusst. [1]

Einen weiteren Schwerpunkt unserer Untersuchungen bildet die galvanostatische Abscheidung ferromagnetischer Schichten (Nickel, Nickel-Eisen Legierungen) im Magnetfeld. Dabei kommt die elektrochemische Quarzmikrowaage (EQCM) zum Einsatz. Durch die Registrierung der Abnahme der Resonanzfrequenz des Quarzes während der Abscheidung, welche proportional zur abgeschiedenen Masse ist (Sauerbrey-Gleichung) [2], ist eine Unterscheidung zwischen Metallabscheidung und Wasserstoffentwicklung möglich, wodurch die Stromausbeute bestimmt werden kann. Daraus wurde ein Modell für die Nickelabscheidung entwickelt, welches erklärt, warum bei kleinen Stromdichten ($-0,1\text{mA/cm}^2$) die Stromausbeute im Magnetfeld abnimmt, während sie bei hohen Stromdichten (-50mA/cm^2) unverändert bleibt. Eine Charakterisierung der Oberflächen mittels Atomkraftmikroskopie (AFM) ergab, daß bei allen Abscheidungen im Magnetfeld die Oberflächenrauigkeit zunahm [3].

Ebenfalls mit Hilfe der EQCM wurde die Dispersionsabscheidung von vernickelten und unbehandelten Aluminiumoxid-Partikeln in eine Nickelmatrix untersucht. Jene Composite-Materialien besitzen aufgrund besserer mechanischer Eigenschaften und höherer Korrosionsbeständigkeit eine große technische Bedeutung [4]. Untersuchungen bei verschiedenen Ausrichtungen eines Magnetfeldes (bis 0,7T) ergaben, daß bei einer senkrechten Anordnung von magnetischem und elektrischem Feld die Stromausbeute im Falle unbehandelter Al_2O_3 -Partikel anstieg, was als verbesserter Einbau interpretiert wird. Diese Beobachtung kann mit dem MHD-Effekt erklärt werden. Allerdings konnte dieser Effekt bei den vernickelten Partikeln nicht beobachtet werden. Statt dessen verbesserte sich deren Einbau bei einer parallelen Orientierung der Felder.

Ein weiterer Teil unserer Arbeiten befaßt sich mit der Elektropolymerisation von Pyrrol in einem Magnetfeld. In der Literatur werden im Wesentlichen zwei Effekte beschrieben. Dabei handelt es sich zum einen um den magnetohydrodynamischen Effekt (MHD-Effekt) im Falle einer senkrechten Anordnung von magnetischem und elektrischem Feld, und zum anderen

einer Ausrichtung der aromatischen Einheiten parallel zum angelegten Magnetfeld, unabhängig von der Richtung des elektrischen Feldes. Allerdings wird der zweite Effekt bei Verwendung von Elektromagneten (bis 1T) als klein und schwer detektierbar beschrieben [5], [6].

Beide Effekte führen zu einer Veränderung der Oberflächenmorphologie, was sich wiederum auf das Ionenaustauschverhalten während der Oxidation bzw. Reduktion auswirkt [7]. Messungen mit der EQCM ergaben, daß eine potentiostatische Abscheidung von Polypyrrol aus perchlorathaltigen Lösungen zu rauen Schichten führt, während glatte Schichten bei der Verwendung von tosylathaltigen Elektrolyten resultieren (Templat-Effekt). In einer senkrechten Anordnung von magnetischem und elektrischem Feld konnte für perchlorat-dotierten Schichten eine Zunahme des Abscheidestromes beobachtet werden (MHD-Effekt). Bei tosylat-dotierten Schichten hingegen blieb der Abscheidestrom unverändert, aber die Filme wurden kompakter. Des weiteren zeigte sich bei der reversiblen Oxidation und Reduktion, daß bei diesen Schichten der Ionenaustausch erschwert wurde.

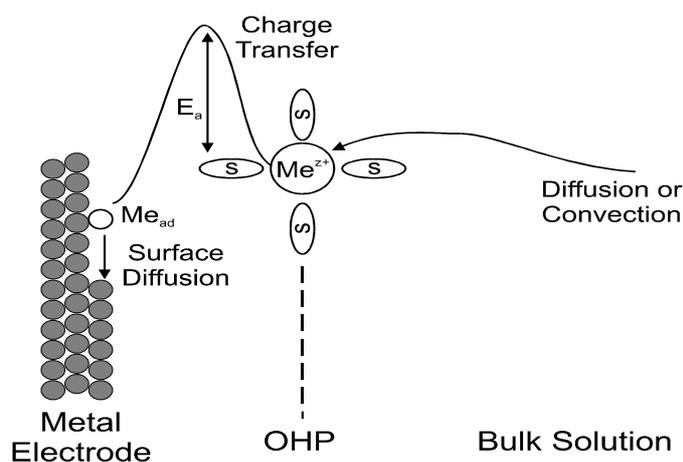


Abbildung 1 Teilschritte einer elektrochemischen Reaktion

Lit.:

- [1] A. Bund, S. Köhler, H.H. Kühnlein, W. Plieth; *Electrochim. Acta* **49** (2003) 147
- [2] G. Sauerbrey; *Z. Phys.* **155** (1959) 206
- [3] A. Bund, A. Ispas; *J. Electroanal. Chem.* **575** (2005) 221
- [4] J.P. Celis, J. Fransaer; *Galvanotechnik* **88** (1997) 2229
- [5] R. Aogaki *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* **25** (2000), 321
- [6] T. Kimura *Polymer Journal* **35** (2003), 823
- [7] I. Mogi *Bull. Chem. Soc. Jpn* **69** (1996), 2661

Kontrolle freier Ränder bei der Erstarrung von Kristallschmelzen

Stefan Ziegenbalg
Institut für numerische Mathematik, TU-Dresden
Zellescher Weg 12 – 14, 01069 Dresden
e-mail: ziegenb@math.tu-dresden.de

1 Einleitung

Betrachtet wird der Erstarrungsvorgang einer Schmelze in einem Container. Ziel ist es, den freien Rand (das Interface zwischen fester und der flüssiger Phase) mit Hilfe der Temperatur auf der Containerwand zu steuern.

2 Problemformulierung

Der Erstarrungsprozesses wird mittels Wärmeleitungsgleichung (1) innerhalb der festen und flüssigen Phase $\Omega_{s/l}$, Stefan-Bedingung (2) am freien Rand Γ und Wärmeübergangsgleichung (4) an der Containerwand $\partial\Omega$ modelliert:

$$\partial_t u = D_{s/l} \Delta u \quad \text{in } \Omega_{s/l} \quad (1)$$

$$V_\Gamma = k_s \partial_\mu u|_{\Omega_s} - k_l \partial_\mu u|_{\Omega_l} \quad \text{auf } \Gamma \quad (2)$$

$$u = 0 \quad \text{auf } \Gamma \quad (3)$$

$$u_b = u + \frac{k_{s/l}}{\alpha_{s/l}} \partial_\nu u \quad \text{auf } \partial\Omega \quad (4)$$

$$u(0, x) = u_0(x) \quad \Gamma(0) = \Gamma_0 \quad \text{für } t = 0. \quad (5)$$

Dabei ist u die normierte Temperatur, (3) ist die Schmelztemperatur-Bedingung, (5) sind die Startbedingungen, und V_Γ ist die Geschwindigkeit des freien Randes in Normalenrichtung, D_s , D_l , p_s , p_l , α_s , α_l sind Materialkonstanten. Die Temperatur u_b auf der Containerwand wird in einen festen und einen variablen Anteil (die Steuergröße) zerlegt: $u_b = u_{b0} + \beta u_{bc}$, wobei mit der Funktion β Einfluss der Steuergröße u_{bc} gewichtet werden kann.

Der freie Rand wird als Graph dargestellt: $\Gamma(t) = \{(x, f(t, x))^T\}$. Die Funktion \bar{f} bezeichne den gewünschten freien Rand. Ziel ist es das Fehler-/Kostenfunktional

$$J(f, u_{bc}) := \frac{1}{2} \int_0^T \int_S (f(t, y) - \bar{f}(t, y))^2 dy dt + \frac{\lambda_1}{2} \int_0^T \int_{\partial\Omega} \beta(t, x)^2 u_{bc}(t, x)^2 dx dt \\ + \frac{\lambda_2}{2} \int_S (f(T, y) - \bar{f}(T, y))^2 dy = \min_{u_{bc}}!$$

unter den Nebenbedingung (1) – (5) zu minimieren.

3 Lösung des Minimierungsproblems

Mittels Lagrange-Ansatz wird das restringierte Minimierungsproblem in ein unrestringiertes überführt. Die Lagrange-Funktion berechnet sich schematisch aus

$$L(f, u, u_{bc}, p) := J(f, u_{bc}) + \langle \text{NB (1) – (4)}, p \rangle \quad (6)$$

Mit der notwendige Optimalitätsbedingung $\nabla L(f^*, u^*, u_{bc}^*, p^*) = 0$. Durch die Richtungsableitungen

$$\begin{aligned} D_u L \tilde{u} &= 0 & \forall \tilde{u} \in \tilde{U} \\ D_f L \tilde{f} &= 0 & \forall \tilde{f} \in \tilde{F} \end{aligned} \quad \text{für zulässige } \tilde{U}, \tilde{F} \quad (7)$$

ergibt sich das adjungierte Gleichungssystem, mit dessen Hilfe der Gradient des reduzierten Kostenfunctionals $K(u_{bc}) := J(f(u_{bc}), u_{bc})$ ermittelt werden kann. Der Rechenaufwand zur Berechnung des Gradienten von K ist in etwa so groß wie der zur Lösung des Vorwärtsproblems und unabhängig von der Dimension des Problems (unendlich-dimensional beim kontinuierlichen Problem). Auf diese Weise ist ein sehr kosteneffizientes Gradientenverfahren möglich.

4 Ergebnisse

Es soll ein gerader freier Rand angesteuert werden, d.h. $\bar{f}(t, x) = \bar{f}(t)$. Es wird die Temperatur (graue Streifen) und der freie Rand (schwarze Linie zu drei Zeitpunkten für das unkontrollierte Problem und das kontrollierte Problem (nach 20 Gradienteniterationen) dargestellt. Der Graph über den Bildern gibt die Temperatur auf und an der der Containerwand an.

