

Ein Beitrag zur numerischen Simulation von Schraubenspindelpumpen mit überlappenden Gittern

Dipl.-Ing. **S. Herrmann**, Technische Universität München, München;
Dipl.-Ing. **B. Flurl**, Technische Universität München, München;
o. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. **R. Schilling**, Technische Universität München, München;

Kurzfassung

Ein bestehendes Finite-Volumen-Verfahren wird um die Chimera-Technik erweitert, die die Behandlung von überlappenden Gittern zulässt. Dadurch wird eine größtmögliche Flexibilität des blockstrukturierten Algorithmus hinsichtlich der Vernetzung der Geometrie erreicht. Die Validierung anhand der Simulation einer Gleitlagerströmung liefert sehr gute Ergebnisse. Auch die Anwendung auf eine vereinfachte Geometrie einer Schraubenspindel­pumpe gelingt.

Abstract

An existing finite-volume-method is extended by the Chimera-technique, which allows the treatment of overlapping grids. This ensures maximum flexibility of the block-structured algorithm in terms of meshing the geometry. The validation with the simulation a flow in a floating bearing provides very good results. The application to a simplified geometry of a screw pump is made.

1. Einleitung

Die Bestimmung des Betriebsverhaltens von Schraubenspindelpumpen mit numerischen Methoden ist nach wie vor sehr aufwändig. Grund dafür sind die schwierigen geometrischen Bedingungen, die sich zeitlich und räumlich ständig verändern. Dabei liegen Bereiche mit sehr engen Spalten und jene mit großen Räumen sehr nah beieinander, was für die Modellierung des Problems große Herausforderungen mit sich bringt. Diese Arbeit nähert sich dem Thema mit einem neuartigen Ansatz, der eine Überlappung der Gitter zulässt, um eine größtmögliche Qualität der Rechengitter als Voraussetzung für die Güte der Ergebnisse zu gewährleisten.

2. Numerische Methoden

2.1. Ausgangsverfahren

Alle Berechnungen wurden mit Hilfe des Lehrstuhl eigenen Codes namens NS3D durchgeführt, s. Skoda [6] und Einzinger [2]. Dieser löst die dreidimensionalen, Reynolds gemittelten Navier-Stokes Gleichungen auf blockstrukturierten Gittern mit Hilfe eines Finite-Volumen-Verfahrens. Das Verfahren ist zellzentriert, wobei das Zellvolumen durch die acht umliegenden Netzknoten gebildet wird. Um ein höchstmögliches Maß an Flexibilität in Bezug auf die zu vernetzenden Geometrien zu gewährleisten, kann das Netz in einzelne Blöcke zerlegt werden, wobei die Übergänge dazwischen nur eingeschränkt nicht passende Netzknoten besitzen dürfen. Darüber hinaus ist das Verfahren mit Hilfe des Message Passing Interface (MPI) vollständig parallelisiert.

Während der Entwicklung des automatisierten Netzgenerators stellte sich heraus, dass die Vernetzung der durchströmten Räume einer Schraubenspindelpumpe (SSP) mit nicht überlappenden Netzblöcken unter Verwendung strukturierter Rechengitter nur schwer möglich ist. Eine variabel einsetzbare Alternative ist die Vernetzung jeder Spindel für sich, ohne Rücksicht auf die anderen Körper in der Pumpe. Dadurch kommt es jedoch zu sich gegenseitig überschneidenden Gittern. Diese können mit dem bisherigen im Code eingesetzten Verfahren nicht verarbeitet werden.

Als Ausweg bietet sich die so genannte Chimera-Technik an.

2.2. Chimera-Verfahren

Dieses u.a. von Steger et. al. [8] entwickelte Verfahren dient zur Flexibilisierung blockstrukturierter Verfahren in dem sie eine gegenseitige Überlappung der Blöcke ermöglicht. Die bisher bekannten Anwendungsfälle sind vorwiegend in der Aerodynamik zu finden, bei der man es mit Umströmungsproblemen von Mehrkörpersystemen in verhältnismäßig großen Strömungsräumen zu tun hat, siehe z.B. Schwarz [4]. Sie werden zunächst durch ein oder mehrere, meist kartesische, sog. Hintergrundnetze abgedeckt. Die umströmten Einzelkörper erhalten ihrerseits individuell angepasste sog. Komponentennetze, die deren individuelle Geometrie möglichst optimal wiedergeben. Der Vorteil dabei ist vor allem, dass diese Komponentennetze ohne Rücksicht sowohl auf das Hintergrundnetz als auch auf die anderen Komponenten erstellt werden können, weil eine Überlappung zulässig ist.

Da der lehrstuhleigene Code diese Überlappung momentan nicht behandeln kann, musste er um folgende Schritte erweitert werden:

- Bestimmung der Punkte des Rechengitters, die außerhalb des Rechengebiets liegen; Diese Punkte bilden die in der Fachliteratur so genannten „Löcher“.
- Klassifizierung der übrigen Punkte in Interpolations- und Diskretisierungspunkte.
- Belegung der Interpolationspunkte mit Randwerten durch Interpolation der Strömungswerte aus den überlappenden Netzen.

Zur Verdeutlichung der Einzelpunkte wird das Beispiel einer zweidimensionalen Tragflügelumströmung in Bild 1 herangezogen.

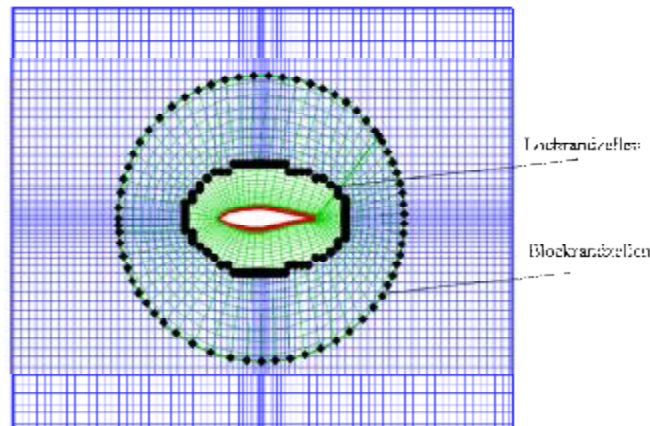


Bild 1: Chimera-Gitter um einen Tragflügel

Das blaue Gitter ist das Hintergrundnetz, das den gesamten Außenbereich der Umströmung abdeckt und es besitzt durch die kartesische Topologie eine optimale Qualität. Das grüne und rote Gitter sind die beiden Komponentennetze des Tragflügels, die dessen Kontur in Form eines C-Netzes ideal annähern. Dabei kommt es sowohl zwischen Hintergrund- und Komponentennetz als auch zwischen Hintergrundnetz und Tragflügelstruktur zu einer Überlappung. Da für diejenigen Zellen des Hintergrundnetzes, die sich in der Struktur des Tragflügels befinden keine Strömungslösung berechnet werden soll, müssen sie ausgeschaltet werden. Sie werden auch während der anschließenden Strömungsberechnung nicht weiter betrachtet. Die ausgeschalteten Zellen werden als Loch im Rechengitter bezeichnet.

Durch das „Lochscheiden“ entstehen neue Berandungen, die sog Lochrandzellen, an denen die Strömungslösung vorgegeben werden muss. Genauso verhält es sich mit den

Zellen an der äußeren Begrenzung des Profilnetzes, die in Bild 1 mit „Blockrandzellen“ bezeichnet sind. Auch für diese müssen die Strömungswerte vorgegeben werden.

Diese kommen aus dem jeweils anderen, überlappenden Gitter. Die Lochrandzellen erhalten ihre Werte aus der Interpolation der Werte aus dem Komponentengitter, wohingegen die Blockrandzellen mit interpolierten Werten aus dem Hintergrundnetz vorbelegt werden. Da die Interpolation nur an den beiden Randzellarten erfolgt, wird im Überlappungsgebiet auf beiden Rechengittern eine Strömungslösung berechnet. Nach dem Lochschneiden ist folglich der zweite Schritt, die künstlichen Berandungen mit Strömungsgrößen zu belegen.

Dazu sind möglichst effektive Suchalgorithmen zu implementieren, mit deren Hilfe diejenigen Knoten eines sog. Gebernetzes gefunden werden müssen, die als Interpolationspunkte für einen gegebenen Punkt eines anderen Netzes dienen können. Konkret muss für einen Lochrandknoten diejenige Zelle im Komponentennetz gefunden werden, die den Knoten enthält. Anschließend können die Strömungswerte von den vier Knoten, die die Zelle bilden, auf den Lochrandknoten bilinear interpoliert werden. Genauso verfährt man mit den Blockrandknoten.

Bei der Erweiterung des Verfahrens auf dreidimensionale Probleme, sollte die dann notwendige trilineare Interpolation der Strömungswerte nicht auf der Basis von Hexaedern durchgeführt werden. Dies wäre die logische Vorgehensweise im Vergleich zum ebenen Verfahren. Allerdings führt dies bei stark verzerrten Geberzellen nicht mehr zu eindeutigen Lösungen. Stattdessen sollten zur Interpolation Tetraeder verwendet werden. Dazu werden die vorliegenden Hexaeder eines strukturierten Gitters in jeweils fünf Tetraeder zerlegt.

Ob der betrachtete Zellmittelpunkt im Tetraeder liegt, wird durch Lösung des linearen Gleichungssystems entschieden:

$$c_1(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) + c_2(\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1) + c_3(\mathbf{x}_4 - \mathbf{x}_1) = \mathbf{x}_Z - \mathbf{x}_1$$

wobei \mathbf{x}_1 bis \mathbf{x}_4 die Eckkoordinaten des Tetraeders bezeichnen und \mathbf{x}_Z das Zentrum der zu prüfenden Zelle. Die daraus resultierenden Gleichungen liefern eindeutige Lösungen für die drei Koeffizienten c_1 bis c_3 . Sofern für sie $c_1, c_2, c_3 \geq 0$ und $c_1 + c_2 + c_3 \leq 1$ gilt, befindet sich das Zellzentrum im Inneren des Tetraeders.

Durch die zusätzliche Aufteilung wird der Suchraum verfünffacht, was wiederum den zeitlichen Aufwand des Verfahrens enorm erhöht. Um dies zu vermeiden, kommt ein mehrstufiges Suchverfahren zum Einsatz, so dass die Zerlegung nur für eine bereits eingeschränkte Menge an geeigneten Zellen Anwendung findet.

Zusätzlich zum vorgestellten Grundverfahren wurden wesentliche Verbesserungen implementiert, die die Güte und die Stabilität der Rechnungen anheben. Angelehnt an ein Verfahren von Chessire et. al. [1] wird automatisch gleichzeitig die Überlappungsbreite zwischen zwei Gittern minimiert, und die Interpolationsgrenze so weit wie möglich von Körperoberflächen fern gehalten. Dies bevorzugt die Interpolation in Bereichen niedriger Gradienten so weit wie möglich. Das Problem der immanenten Nichtkonservativität der Interpolation wird durch die Vorgehensweise von HADŽIĆ [3] teilweise behoben. Der Algorithmus wurde für die strukturierten Gitter des Löser NS3D entsprechend angepasst und weiterentwickelt.

3. Validierung und Ergebnisse

3.1 Gleitlagerberechnung

Neben der Strömung in den abgedichteten Kammern zwischen den Spindeln einer SSP haben vor allem die Radial-Spalte zwischen dem Außendurchmesser der Spindeln und den angrenzenden Wänden entscheidenden Einfluss auf das Betriebsverhalten der gesamten Pumpe. Die Verhältnisse dort können näherungsweise mit denen in einem Gleitlager verglichen werden, weshalb dieser Fall zur Validierung des Verfahrens herangezogen wird. Dabei rotiert eine genutete Welle mit einer festgelegten Drehzahl innerhalb eines stehenden Gehäuses. Zusätzlich wird noch eine Druckdifferenz in axialer Richtung aufgebracht, die in der SSP zwischen den geschlossenen Kammern entsteht. Eine Prinzipskizze ist in Bild 2 zu sehen.

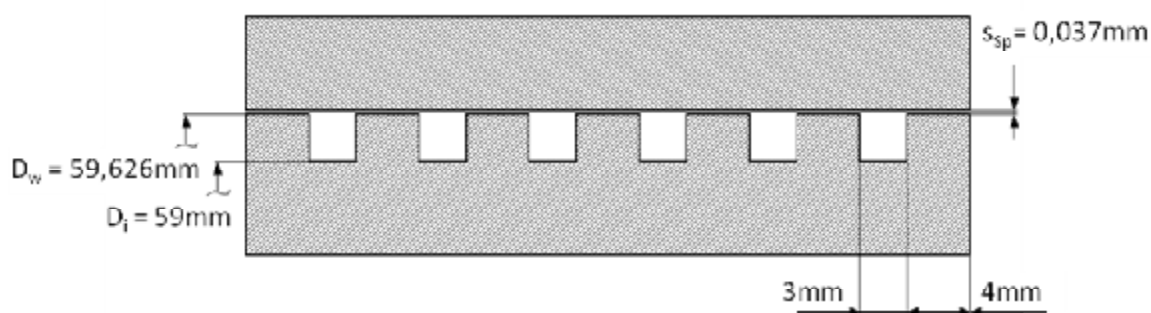


Bild 2: Prinzipskizze der Spaltgeometrie

Der Verlustmassenstrom durch einen solchen Spalt lässt sich mit Hilfe empirischer Formeln analytisch bestimmen und wird in Stampa [7] wie folgt angegeben:

$$Q_{Sp} = m_{Sp} \cdot A_{Sp} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p / r} .$$

Während die Spaltfläche $A_{Sp} = (D_W + s_{Sp}) \cdot p \cdot s_{Sp}$ von der Spaltart unabhängig ist, muss bei der Durchflusszahl m_{Sp} unterschieden werden. Stampa [7] gibt für den vorliegenden Fall eines Labyrinthspalts die Spaltdurchflusszahl mit

$$m_{Sp} = \left(\sqrt{1,5 + Z_N + \frac{I}{2 \cdot s_{Sp}} \sum_{i=1}^n l_i} \right)^{-1}$$

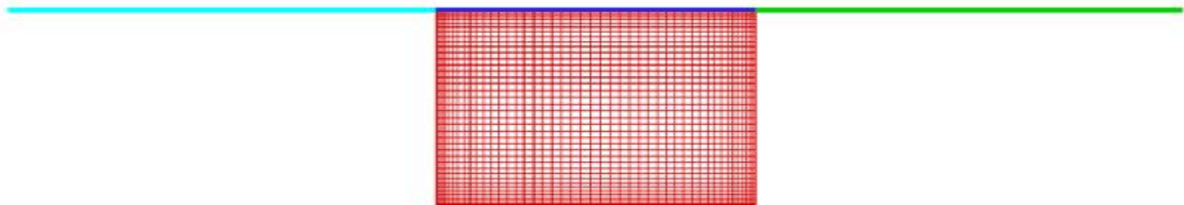
an. Diese berücksichtigt neben der Anzahl der Nuten Z_N , der Spalthöhe s_{Sp} , der Längen l_i vor allem die Reibungszahl I . Daraus ergibt sich der Druckverlust zu

$$\Delta p = \frac{r}{2} \cdot \left(\frac{Q_{Sp}}{m_{Sp} \cdot A_{Sp}} \right)^2 = \frac{1}{m_{Sp}^2} \cdot \frac{r}{2} \cdot c_{Sp}^2 .$$

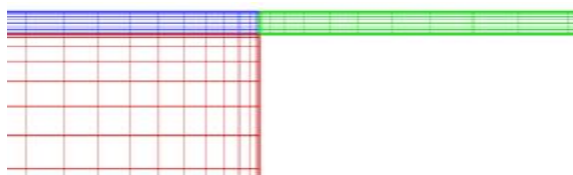
In der Simulation wurde zunächst nur eine Nut berücksichtigt, so dass sich mit den eingesetzten Abmessungen des Gleitlagers eine Durchflusszahl von 0,239 ergibt.

Es wurde jeweils eine Berechnung ohne und mit Chimera-Technik durchgeführt, die Netze sind in Bild 3 zu sehen.

a)



b)



c)

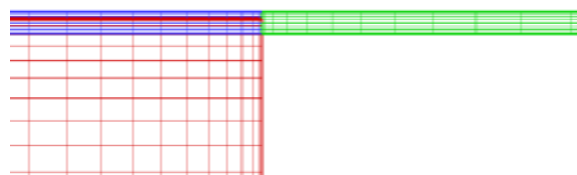


Bild 3: Rechennetze bei einer Nut, a) Gesamtnetz, b) Netzübergang nicht überlappende Gitter, c) Netzübergang überlappende Gitter

Dabei sind insbesondere die Übergänge von den Spaltblöcken in den roten Nutblock zu beachten. Die Chimera-Technik benötigt hier eine geringfügige Überlappung, um die Interpolation zu ermöglichen.

In Tabelle 1 sind die Werte für den statischen Druckverlust bei einem vorgegebenen Spaltvolumenstrom Q_{Sp} von $4,65 \frac{l}{min}$ bzw. $7,75 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ einander gegenüber gestellt. Die Simulationen wurden bei einer Drehzahl von 1750 min^{-1} durchgeführt, wobei diese den Druckverlust kaum beeinflusst.

Tabelle 1: Druckverluste bei einer Nut

	Druckverlust [10^6 Pa]
Analytischer Ansatz	1,096
Simulation ohne Chimera-Technik	1,072
Simulation mit Chimera-Technik	1,068

Als Strömungsmedium wurde Wasser bei 25°C verwendet.

Für eine Welle mit sechs Nuten liegen zusätzlich noch Messergebnisse eines Projektpartners vor. Dabei wurde jedoch eine statische Druckdifferenz vorgegeben und der Spaltvolumenstrom gemessen, während bei der Simulation umgekehrt vorgegangen wird. Auch hier beträgt die Drehzahl 1750 min^{-1} . Die Ergebnisse dafür zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Druckverluste bei sechs Nuten

	Druckverlust [10^6 Pa]
Messwert	4,000
Analytischer Ansatz	3,877
Simulation ohne Chimera-Technik	4,024
Simulation mit Chimera-Technik	3,983

3.2 Schraubenspindelpumpe mit einer Spindel

Die Anwendung des Verfahrens auf Schraubenspindelpumpen wurde zunächst anhand der Durchströmung einer vereinfachten, einspindeligen Schraubenspindelpumpe ebenfalls mit Wasser bei 25°C vollzogen. In Bild 4 a) und b) sind die Druckverläufe bei positivem bzw. negativem Drehsinn der Spindel dargestellt.

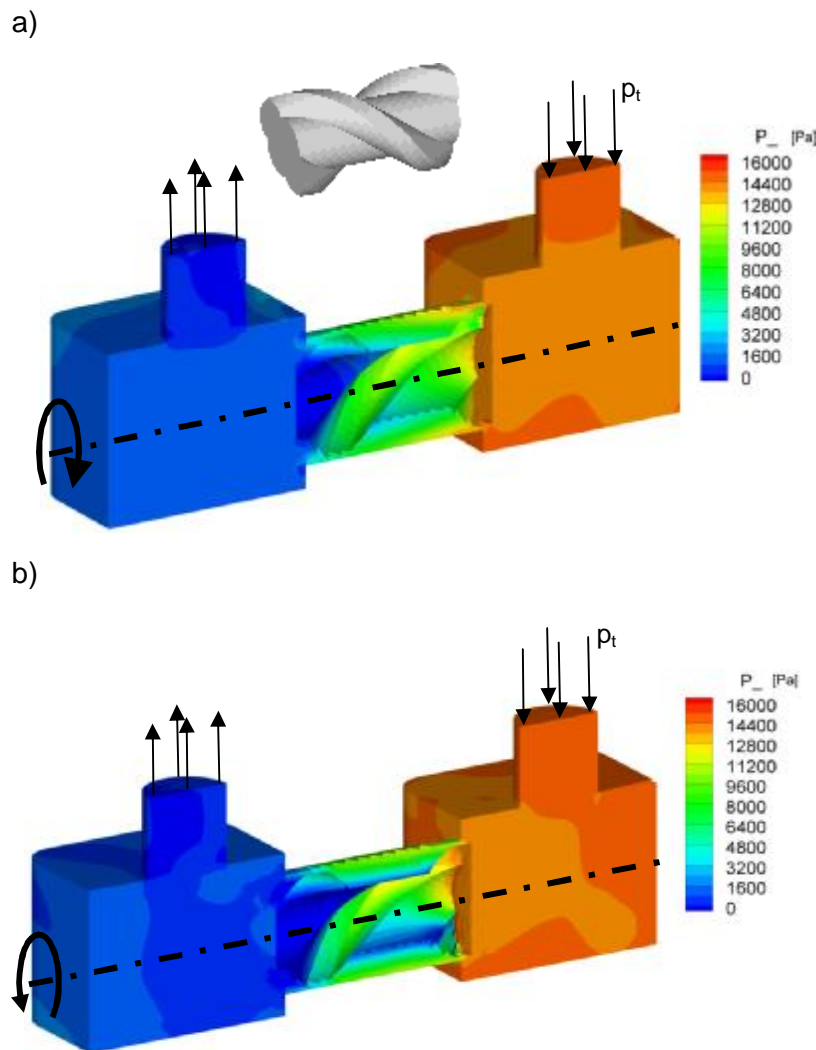


Bild 4: Strömung in einer einspindeligen Schraubenspindelpumpe mit Rotation der Spindel bei vorgegebenem Totaldruck, statischer Druckverlauf in einem Längsschnitt bei a) positivem Rotationssinn, b) negativem Rotationssinn

Die Spindel hat die Windungszahl eins und bewegt sich im Spindelgehäuse mit einem relativ großen Spalt, wie er in der Praxis üblicherweise nicht vorkommt. Am Eintritt jeweils im Bild rechts wird der Totaldruck p_t von 16000 Pa festgelegt, so dass sich der Volumenstrom als Ergebnis einstellt, am Austritt links wird ein statischer Druck von 0 bar gesetzt. In Bild a) ist zusätzlich zum Strömungsverlauf noch die aktuelle Lage der Spindel und ihre Drehachse zum besseren Verständnis gezeigt. Die qualitative Analyse zeigt, dass die Interpolation beim Übergang von den Spindelblöcken in die beiden Gehäuse korrekt vollzogen wird. Es kommt zu einer korrekten Interpolation der Werte an den Blockrändern, so dass Flächen gleichen Drucks stetig vom einen Block in den anderen übergehen.

Bei der gegebenen Geometrie, den Randbedingungen und einer Drehzahl von 1750 U/min fließt die Strömung in den Bildern von rechts nach links unabhängig von der Drehrichtung. In Bild a) rotiert die Spindel mit positivem Drehsinn und wirkt dadurch strömungsfördernd, so dass der statische Druckverlust geringer ausfällt, als im Fall b), bei negativem Rotationssinn. Im ersten Fall ergibt sich ein Betrag von 15700 Pa , während dies bei b) 18400 Pa sind.

Bei beiden Varianten bleibt jedoch die Erkenntnis, dass die Förderwirkung durch die Rotation aufgrund der großen Spalte sehr eingeschränkt ist. Der Volumenstrom bei positiver Drehung fällt jedoch mit $71,6 \text{ l/min}$ deutlich höher aus, als bei negativer Drehung. Dabei ergeben sich lediglich $64,8 \text{ l/min}$.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Während der Entwicklung des automatisierten Netzgenerators stellte sich heraus, dass die Vernetzung der durchströmten Räume einer SSP mit nicht überlappenden Netzblöcken unter Verwendung strukturierter Rechengitter nur schwer möglich ist. Deshalb wurde das bestehende Finite-Volumen-Verfahren erweitert, um überlappende Gitter behandeln zu können. Dazu wurde die so genannte Chimera-Technik implementiert und um weitere stabilisierende Verfahren erweitert. Mit der gezeigten Berechnung einer Gleitlagerströmung wurde es erfolgreich validiert und anschließend auf eine vereinfachte Schraubenspindelpumpe mit einer Spindel angewendet.

Beim Übergang auf eine mehrspindelige Pumpe wurde festgestellt, dass die Chimera-Technik alleine zu fehlerhaften Ergebnissen führt, weil durch die vorgegebene Netztopologie für Lochrandpunkte im Bereich der Spindelaußendurchmesser keine geeigneten Gebernetze zur Verfügung stehen. Auch lassen die strukturierten Gitter keine lokale Verfeinerung in diesen Gebieten zu, so dass ein Wechsel auf unstrukturierte Verfahren auch in Kombination mit überlappenden Gittern vollzogen wird. Das zugehörige Verfahren wird aktuell entwickelt.

Das Projekt wurde vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA) und von Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) im Rahmen des AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14624 N/1 gefördert.

- [1] Chessire, G., Henshaw, W. D.: Composite Overlapping Meshes for the Solution of Partial Differential Equations, *Journal of Computational Physics*, Vol. 90 (1990), 1-64
- [2] Einzinger, J.: Numerische Simulation der Fluid-Struktur Interaktion in Turbomaschinen, Dissertation TU München, 2006

- [3] Hadžić, H.: Developement and Application of a Finite Volume Method for the Computation of Flows Around Moving Bodies on Unstructured, Overlapping Grids, Dissertation TU Hamburg Harburg, 2005
- [4] Schwarz, T.: Ein blockstrukturiertes Verfahren zur Simulation der Umströmung komplexer Konfigurationen, DLR Forschungsbericht 2005-20, 2005
- [5] Sigloch, H.: Strömungsmaschinen – Grundlagen und Anwendungen. Hanser, München, 2006
- [6] Skoda, R.: Numerische Simulation abgelöster und transitionale Strömungen in Turbomaschinen, Dissertation TU-München, 2003, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 7, Nr. 451
- [7] Stampa, B.: Experimentelle Untersuchungen an axial durchströmten Ringspalten. Dissertation, TU Braunschweig, 1971
- [8] Steger, J.L., Dougherty, F.C., and Benek, J.A.: A Chimera Grid Scheme, Advances in Grid Generation, K.N. Ghia and U. Ghia, eds., ASME FED Vol. 5, June 1983