

Theoretische Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten

Schlußbericht

Vorhaben-Nr.: 1.274

Turbotech 2

Laufzeit: 1.1.1996 – 31.12.1998

Bearbeiter: Prof. Dr. J. Förste, Dr. W. Höppner, Dr. O. Schmidtman WIAS Berlin

Partner: Dr. J. Anders BMW Rolls-Royce AeroEngines Dahlewitz

1 Ziele, Planung, Ablauf und Voraussetzungen zur Durchführung des Projektes

Gegenstand des Projektes sind analytische und numerische Stabilitätsuntersuchungen für mehrstufige Axialverdichter mit Hilfe der Euler-Gleichungen der Gasdynamik. Ziel ist die Entwicklung von effizienten Verfahren zur aktiven Kontrolle von Verdichterstabilitäten. Für verschiedene Werte des Massenstromes sollen qualitative und quantitative Eigenschaften der Strömungen untersucht werden, insbesondere soll der Übergang von Strömungszuständen mit rotierenden Ablösezellen zum Pumpen mit Hilfe von numerischen Methoden der Bifurkationsanalyse studiert werden.

Verdichter als Bausteine von Turbomaschinen werden eingesetzt, um mit Hilfe des Rotors Energie auf das Gas zu übertragen, was durch die Wirkung des Diffusors eine Erhöhung der Enthalpie und des Druckes zur Folge hat. In Abhängigkeit von den Randbedingungen am Ein- und Austritt des Verdichters treten stationäre oder zeitabhängige Strömungszustände auf. Durch Reduzierung des Massenstromes am Eintritt bzw. durch Verringerung des Querschnitts am Austritt des Verdichters kann eine anfangs stabile stationäre Strömung instabil werden und sich ein zeitabhängiger Strömungszustand einstellen.

Ein zentrales Problem bei der Entwicklung von Turbomaschinen ist die Untersuchung solcher Verdichter-Instabilitäten, wie Pumpen oder rotierende Ablösung, da durch das Auftreten von Instabilitäten die Verdichterleistung reduziert oder der Verdichter zerstört werden kann. Um die Strömung durch einen mehrstufigen Hochgeschwindigkeitsverdichter zu modellieren und Instabilitäten zu untersuchen, werden häufig die Euler-Gleichungen der Gasdynamik für ein ideales Gas benutzt (Anderson et al. [ATP84], LeVeque [LeV90]) und der Einfluß von Rotor bzw. Stator durch Quellterme beschrieben. Die Mehrzahl der Untersuchungen solcher Instabilitäten beschränken sich auf räumlich eindimensionale Probleme oder auf die Untersuchung niedrigdimensionaler Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen (Greitzer [Gre81, Gre76]).

Mit Hilfe eines Modells für die von den Gittern verursachten Kräfte wurden von Longley [Lon96] und Breuer [Bre95, Bre96] Stabilitätsuntersuchungen für Systeme gekoppelter Verdichterstufen durchgeführt. Dabei sind für bestimmte Parameter rotierende Ablösezellen beobachtet worden.

Ein Ziel des Projektes ist es, diese Untersuchungen durch systematische Anwendung der Methoden der Bifurkationstheorie fortzusetzen.

Die Arbeit in diesem Projekt erfolgte in enger Kooperation mit BMW Rolls-Royce AeroEngines, Dahlewitz sowie dem Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Berlin. Zur Durchführung der numerischen Simulationen standen Workstations der Fa. Silicon Graphics zur Verfügung.

2 Darstellung der erzielten Ergebnisse

2.1 Aufbau des 2D Verdichtermodells

Die Strömung im Verdichter wird durch die Wechselwirkung von verschiedenen Verdichterstufen beeinflusst. Jede Stufe besteht aus Stator und Rotor, die durch einen unbeschauelten Zwischenraum getrennt sind. Die Simulation der Strömung erfolgt nur in diesen unbeschauelten Gebieten mittels 2D Euler-Gleichungen, wobei die Kopplung der einzelnen Stufen und der Einfluß der Gitter durch Übergangsfunktionen berücksichtigt werden. Diese Übergangsfunktionen werden aus Verdichterkennlinien und Erhaltungsgleichungen gewonnen.

Für die Simulation der Strömung in den unbeschauelten Gebieten vernachlässigen wir die Radialkomponente der Geschwindigkeit und beschränken uns auf periodische Randbedingungen in Umfangsrichtung. Am Eintritt und Austritt des Verdichters werden nichtreflektierende Randbedingungen benutzt (siehe Engquist et al. [EM77] und Giles [Gil88, Gil90]), um nichtphysikalische Reflexionen an den Rändern zu verhindern.

2.2 Instabilitäten und Bifurkationen

Für die numerische Berechnung der Strömung in den unbeschauelten Gebieten des Modells wurde ein Godunov-Verfahren mit einem Roe-solver von LeVeque [LeV94, LeV97] benutzt. Die Strömung ist in einem 2-stufigen Verdichter untersucht worden. Das Rechengebiet besteht aus 5 unbeschauelten Gebieten, am Eintritt und hinter jedem Rotor bzw. Stator. Das Lösungsverhalten des Modells ist durch die Werte für Dichte, Geschwindigkeit und Druck am Eintritt und Austritt des Verdichters, über die die Euler-Gleichungen zur Formulierung nichtreflektierender Randbedingungen linearisiert wurden, bestimmt. Für einen gegebenen Massenstrom sind die Werte dieser Variablen durch die Verdichtercharakteristik gegeben. Ausgehend von diesen Werten für einen bestimmten Massenstrom wurde das Lösungsverhalten des Modells durch Erhöhung des Drucks \hat{p}_r am Austritt gesteuert. Mit wachsendem Austrittsdruck verliert eine anfangs stabile stationäre Lösung ihre Stabilität in einer Hopfbifurkation an verschiedene koexistierende, zeitlich periodische Lösungen mit unterschiedlich vielen rotierenden Ablösezellen (rotierende Ablösung), gefolgt von Lösungen mit einer zeitlichen Änderung des Drucks in den Ablösezellen (rotierende Instabilität). Während für diese zeitlich periodischen Zustände der Massenstrom zeitunabhängig ist, wird der Massenstrom zeitabhängig (Pumpen), falls der Austrittsdruck hinreichend groß ist. Ein Überblick über die verschiedenen Lösungswege ist in Tabelle 1 gegeben und schematisch in Abb. 1 dargestellt.

Zweig	Stabilitätsintervall für \hat{p}_r	Bemerkung
Stationäre Lösung	$167000 < \hat{p}_r < 170000$	Zeitunabhängige Strömung 2 Zellen, 150 Hz 3 Zellen, 150 Hz 4 Zellen, 150 Hz 1 Zelle, 150 Hz, 600 Hz 5 Hz
Rotierende Ablösung-1	$170000 < \hat{p}_r < 199000$	
Rotierende Ablösung-2	$182000 < \hat{p}_r < 199000$	
Rotierende Ablösung-3	$192000 < \hat{p}_r < 199000$	
Rotierende Instabilität Pumpen	$199000 < \hat{p}_r < 205000$ $205000 < \hat{p}_r < 208000$	

Tabelle 1: Überblick über die verschiedenen Lösungszweige.

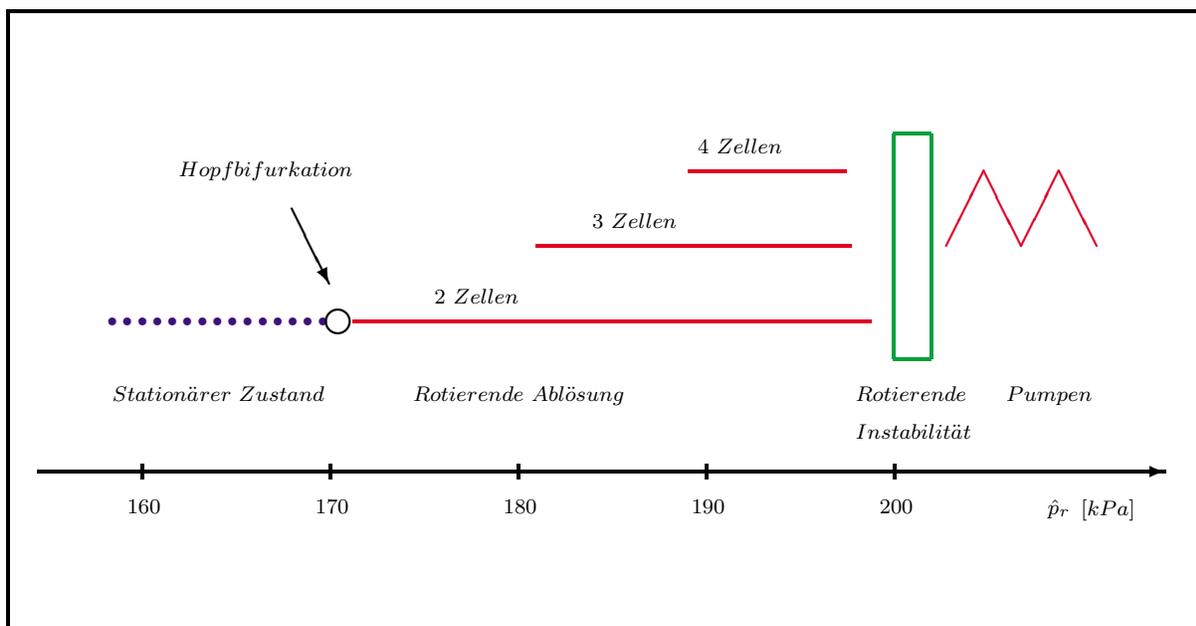


Abbildung 1: Schematisches Bifurkationsdiagramm.

2.2.1 Bifurkation von stationären Lösungen

Für $\hat{p}_r = 167400$ Pa erhalten wir immer eine stabile stationäre Lösung, d.h. alle Trajektorien werden von dieser Lösung angezogen. Der Zustand des Systems konvergiert gegen eine Lösung, die in jedem einzelnen Rechengebiet zeitlich und räumlich konstant ist. Für einen hinreichend kleinen Austrittsdruck ist das die einzige Lösung.

2.2.2 Rotierende Ablösung

Falls der Austrittsdruck einen kritischen Wert, $\hat{p}_r \approx 170000$ Pa, übersteigt, entsteht eine periodische Lösung mit 2 rotierenden Ablösezellen in jedem einzelnen Rechengebiet des Modells. In Abb. 2 ist der Druck in den 5 unbeschaukelten Gebieten des Verdichters für einen Zeitpunkt für $\hat{p}_r = 172160$ Pa gegeben. In jedem einzelnen Gebiet entstehen 2 Ablösezellen, die sich in Umfangsrichtung bewegen. In Abb. 3 ist die Instabilität der stationären Lösung für $\hat{p}_r = 172160$ Pa demonstriert. Der Druck über dem Umfang am Austritt des Verdichters ist als Funktion der Zeit gegeben. Der Zustand des Systems verläßt den ursprünglich stationären Zustand und konvergiert gegen die neue Lösung mit zwei Ablösezellen.

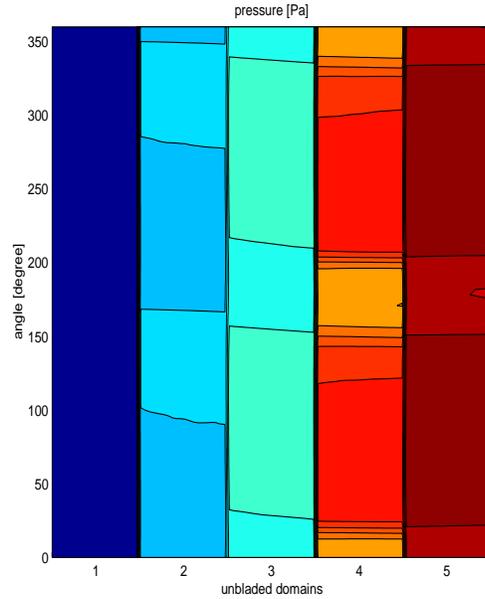


Abbildung 2: Druck im Verdichter für eine periodische Lösung mit 2 rotierenden Ablösezellen in jedem unbeschaukelten Gebiet, die sich in Umfangsrichtung bewegen, $\hat{p}_r = 172160$ Pa.

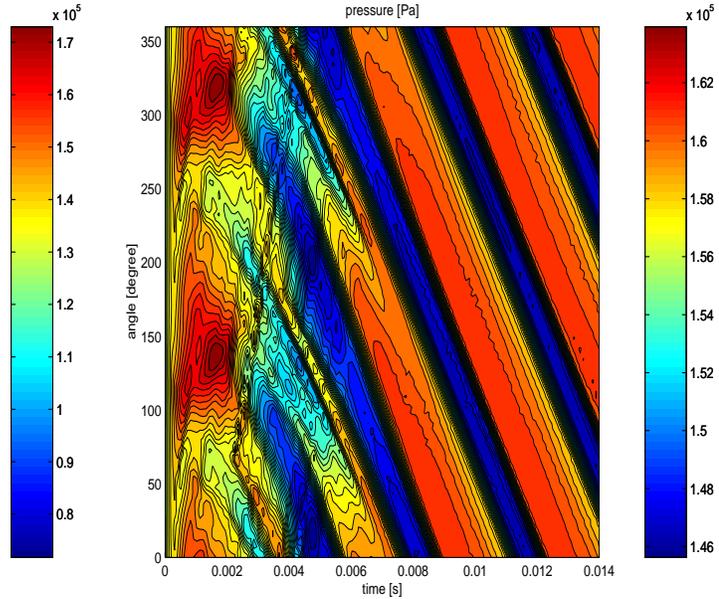


Abbildung 3: Druck am Verdichteraustritt als Funktion der Zeit, $\hat{p}_r = 172160$ Pa.

Die Anzahl der Ablösezellen der neuen periodischen Lösung hängt vom Austrittsdruck ab. Für $\hat{p}_r = 182220$ Pa entsteht eine periodische Lösung mit 3 Ablösezellen und für $\hat{p}_r = 192080$ Pa entsteht eine periodische Lösung mit 4 Ablösezellen. Der Zweig mit 2 Zellen bleibt stabil. Damit koexistieren 3 stabile periodische Lösungen. Die Drehrichtung der Zellen entspricht der Drehrichtung des Rotors und die Rotationsfrequenz der Zellen beträgt ca. 150 Hz. In den Abb. 4 und 5 ist der Austrittsdruck für stabile periodische Lösungen mit 3 und 4 Ablösezellen über der Zeit abgetragen.

2.2.3 Rotierende Instabilitäten

Für $\hat{p}_r \approx 199740$ Pa verschwinden die periodischen Lösungen mit Ablösezellen, und es entsteht eine neue Lösung mit zwei Zellen, deren Druck sich jetzt zeitlich ändert. Beide Zellen bewegen sich in Umfangsrichtung mit entgegengesetztem Rotationssinn (siehe Abb. 6). In Abb. 7 ist die Geschwindigkeit in axiale Richtung am Austritt des Verdichters als Funktion der Zeit gegeben.

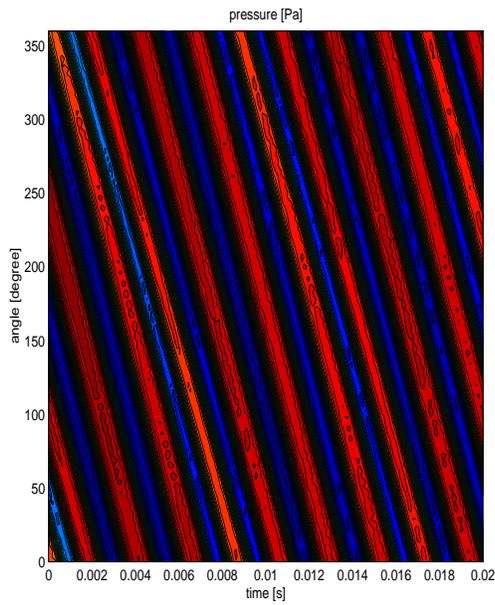


Abbildung 4: Druck am Verdichteraustritt als Funktion der Zeit, $\hat{p}_r = 182220$ Pa.

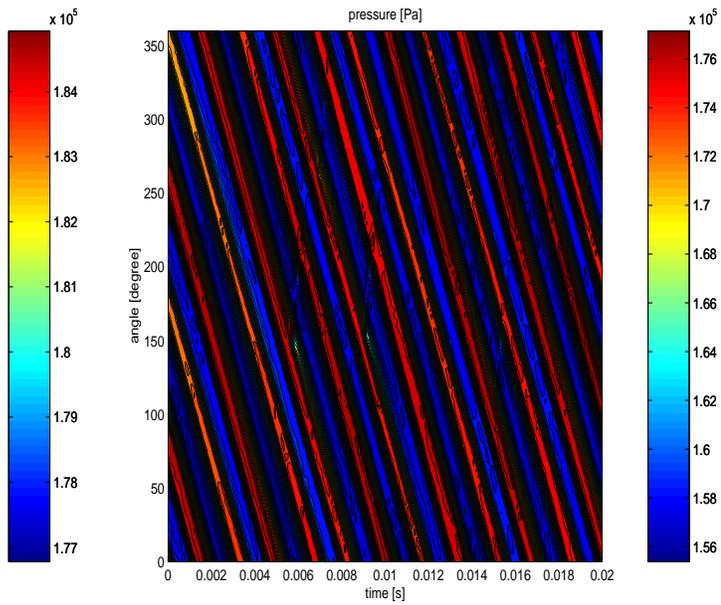


Abbildung 5: Druck am Verdichteraustritt als Funktion der Zeit, $\hat{p}_r = 192080$ Pa.

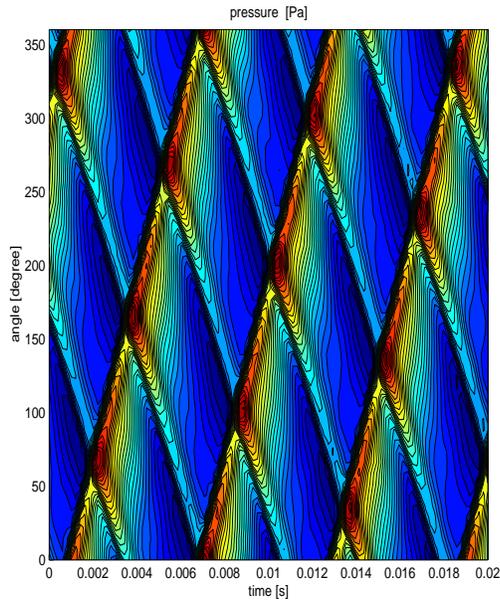


Abbildung 6: Druck am Verdichteraustritt als Funktion der Zeit, $\hat{p}_r = 199740$ Pa.

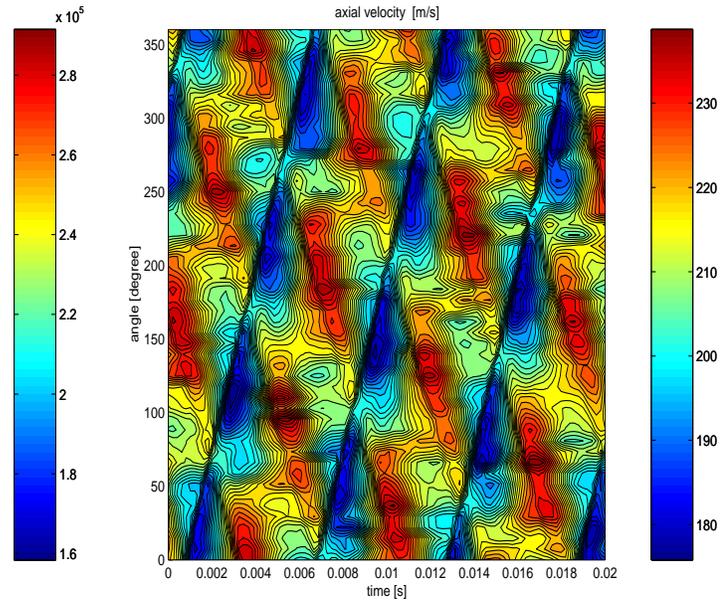


Abbildung 7: Geschwindigkeit in axiale Richtung am Verdichteraustritt als Funktion der Zeit, $\hat{p}_r = 199740$ Pa.

Im Gegensatz zur rotierenden Ablösung ändert sich der Druck in den Ablösezellen jetzt zeitlich periodisch. Der Massenstrom bleibt zeitunabhängig. Die Rotationsfrequenz der Ablösezellen beträgt ca. 150 Hz und die Frequenz der Druckschwankungen ca. 600 Hz. Diese Form der Instabilität wurde kürzlich von Kameier und Diederer [KD96, Kam94] sowie von Mailach et al. [MBHK98] experimentell beobachtet.

2.2.4 Pumpen

Wenn der Austrittsdruck weiter erhöht wird, $\hat{p}_r \geq 205110$ Pa, werden alle Lösungszweige mit Ablösezellen instabil, und es entsteht eine Lösung mit einer zeitlichen Änderung des Massenstroms. In Abb. 8 und Abb. 9 ist der über den Umfang gemittelte Druck und der Massenstrom am Austritt des Verdichters als Funktion der Zeit gegeben. Der Anstieg des Drucks ist mit einem Abfall des Massenstromes gekoppelt. Der Massenstrom wird negativ, gefolgt von einer Periode regulären Verhaltens, bis der nächste Pumpstoß beginnt. Die Pumpfrequenz beträgt etwa 5 Hz, was mit experimentellen Messungen übereinstimmt.

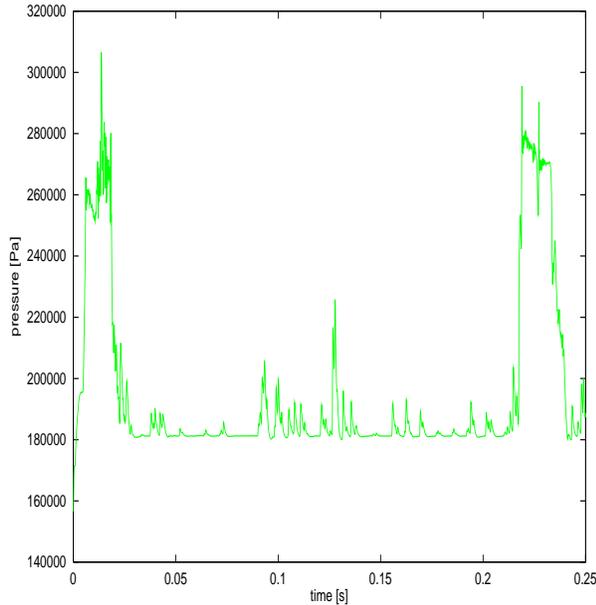


Abbildung 8: Umfangsgemittelter Druck am Verdichteraustritt als Funktion der Zeit, $\hat{p}_r = 205110$ Pa.

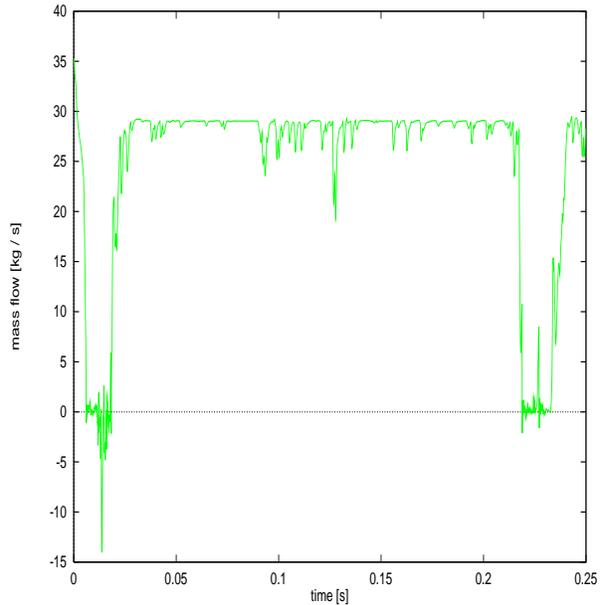


Abbildung 9: Massenstrom als Verdichteraustritt als Funktion der Zeit, $\hat{p}_r = 205110$ Pa.

Abb. 10 zeigt den Arbeitspunkt im Kennfeld Massenstrom / Druckverhältnis. Der Massenstrom sinkt, gefolgt von einem Abfall des Druckverhältnisses zwischen Austritt und Eintritt, bis der Massenstrom und das Druckverhältnis wieder ansteigen.

2.3 Schlußfolgerungen

In diesem Projekt wurden die Auswirkungen der Androsselung des Verdichters auf das Stabilitätsverhalten der Strömungen numerisch untersucht. Das entwickelte 2D-Modell ist in der Lage, das qualitative und quantitative Verhalten der Strömung vom Einsetzen der Instabilitäten bis zum Pumpen zu beschreiben. Die verschiedenen Strömungszustände werden durch Veränderung eines einzigen Parameters, nämlich des Austrittsdrucks erzeugt. Obwohl die Euler-Gleichungen benutzt wurden, um die Strömung im unbeschauften Gebiet zu simulieren, berücksichtigt das Modell die Effekte der Viskosität durch die Übergangsbedingungen.

Es wurde gezeigt, daß der Strömungszustand bei wachsendem Austrittsdruck verschiedenen qualitativen Änderungen unterliegt. Es wurden zeitunabhängige Lösungen sowie koexistierende

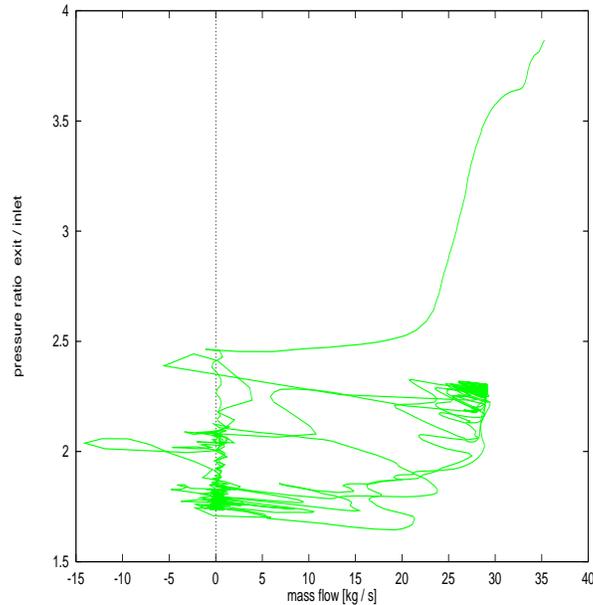


Abbildung 10: Bewegung des Arbeitspunktes im Kennfeld, $\hat{p}_r = 205110$ Pa.

periodische Lösungen mit rotierenden Ablösezellen gefunden. Die koexistierenden Lösungswege führen bei weiterer Druckerhöhung zu rotierenden Instabilitäten und zu Lösungen mit zeitlich periodischer Änderung des Massenstromes.

Dieser Übergang zum Pumpen scheint einem Szenario zu folgen, das bereits von Day [Day93, Day94] gefunden wurde, d.h. das Pumpen erscheint nach einem Strömungszustand mit rotierender Ablösung. Außerdem ist der Weg zum Pumpen ähnlich dem Übergang zu irregulärem Verhalten, der aus vielen Beispielen in der Hydrodynamik bekannt ist. Ein anfangs stabiler stationärer Zustand verliert seine Stabilität an eine periodische Lösung, gefolgt von einer quasiperiodischen Lösung mit 2 beteiligten Frequenzen und schließlich irregulärem turbulenterem Verhalten.

3 Verwertbarkeit und Veröffentlichung der Ergebnisse

Mit Hilfe des in diesem Projektes entwickelten Modells können Stabilitätseigenschaften von Strömungen in Verdichtern numerisch untersucht werden. Vom zu untersuchenden Verdichter müssen lediglich einige Auslegungsparameter und Verdichterkennlinien bekannt sein. Die Anwendung des Modells auf einen 2-stufigen Verdichter trug zu einem besseren Verständnis der Mechanismen bei, die zur Bildung von Verdichterstabilitäten führen.

Die in diesem Vorhaben erzielten Ergebnisse wurden u.a. auf Einladung der Arbeitsgemeinschaft Hochtemperatur-Gasturbine in Form von Vorträgen auf den Arbeitskreissitzungen der AG TURBO in Köln und in Dahlewitz bei BMW Rolls-Royce vorgestellt.

J. Förste. Theoretische Untersuchung zum Stabilitätsverhalten.
23.10.1997, 15. AK-Sitzung Turbotech 2, Köln

W. Höppner. Stabilität von Verdichtersystemen.
24.11.1997, Universität Potsdam

J. Anders und O. Schmidtman. Lokale und globale Strömungsinstabilitäten.
12.3.1998, 16. AK-Sitzung Turbotech 2, Köln

O. Schmidtman. Stability Investigations in Turbo Compressors.
19.8.1998, International Congress of Mathematicians, Berlin

O. Schmidtman. Numerische Untersuchung von Verdichterinstabilitäten.
2.2.1999, Dahlewitz, BMW Rolls-Royce

O. Schmidtman. Numerische Untersuchung von Verdichterinstabilitäten.
11.3.1999, 18. AK-Sitzung Turbotech 2, Köln

Außerdem ist die Veröffentlichung eines Artikels "Route to surge for a throttled compressor" in Journal of Fluids and Structures geplant.

Literatur

- [ATP84] D.A. Anderson, J.C. Tannehill, and R.H. Pletcher. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1984.
- [Bre95] T. Breuer. Theoretische Untersuchung des instationären Betriebsverhaltens transonischer Axialverdichter an der Stabilitätsgrenze. *Abschlußbericht HTGT - Turbotech, Arbeitspaket Nr. 1.1.1.11*, 1995.
- [Bre96] T. Breuer. Theoretische Untersuchung des instationären Betriebsverhaltens transonischer Verdichter an der Stabilitätsgrenze. *Abschlußbericht HTGT - Turbotech Interim, Arbeitspaket Nr. 1.240*, 1996.
- [Day93] I.J. Day. Stall Inception in Axial Flow Compressors. *ASME Journal of Turbomachinery*, 115 No.1:1–9, 1993.
- [Day94] I.J. Day. Axial Compressor Performance during Surge. *ASME Journal of Propulsion and Power*, 10 No.3:329–336, 1994.
- [EM77] B. Engquist and A. Majda. Absorbing Boundary Conditions for the Numerical Simulation of Waves. *Mathematics of Computation*, 31 No.139:629–651, 1977.
- [Gil88] M. Giles. Nonreflecting Boundary Conditions. *CFDL-TR-88-1*, 1988.
- [Gil90] M. Giles. Nonreflecting Boundary Conditions for Euler Equation Calculations. *AIAA Journal*, 28 No.12:2050–2057, 1990.
- [Gre76] E.M. Greitzer. Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors, Part 1: Theoretical Compression System Model. *ASME Journal of Engineering for Power*, 98:190–198, 1976.
- [Gre81] E.M. Greitzer. The Stability of Pumping Systems – The 1980 Freeman Scholar Lecture. *Journal of Fluids Engineering*, 102:139–242, 1981.

- [Kam94] F. Kameier. Experimentelle Untersuchung zur Entstehung und Minderung des Blattspitzen–Wirbellärms axialer Strömungsmaschinen. *Fortschritt—Berichte VDI*, Reihe 7 Nr. 243, Düsseldorf, 1994.
- [KD96] F. Kameier and W. Diederer. Aerodynamic Investigation of Rotating Instabilities in BR710 HPC Rotor 1. *Technical Report*, E-TR063/96, 1996.
- [LeV90] R.J. LeVeque. *Numerical Methods for Conservation Laws*. Birkhäuser, Basel, 1990.
- [LeV94] R. J. LeVeque. CLAWPACK - a software package for solving multidimensional conservation laws. *J. Glimm et al. editors, Proceedings of the Fifth International Conference on Hyperbolic Problems: Theory, Numerics Applications*. World Scientific, 1994.
- [LeV97] R. J. LeVeque. Wave propagation algorithms for multi-dimensional hyperbolic systems. *J. Comput. Phys.*, 131:327–353, 1997.
- [Lon96] J.P. Longley. Advanced Civil Core Compressor Aerodynamics. *Brite/Euram AC3A Project, Task B6*, 1996.
- [MBHK98] R. Mailach, T. Breuer, F. Holste, and F. Kameier. Untersuchung von Verdichterinstabilitäten am Niedergeschwindigkeitsverdichter Dresden. *6. Statusseminar, AG-TURBO*, Köln, 1998.