

Analyse transienter Meßdaten eines zehnstufigen Hochdruckverdichters an der Stabilitätsgrenze

W. Hofmann ¹, F. Kameier ², T. Schnitfeld ³, F. Thiele ⁴, U. Wenger ³

Einleitung

Die Leistungsgrenze mehrstufiger Axialverdichter wird maßgeblich durch aerodynamische Instabilitäten begrenzt. In der vorliegenden Arbeit werden Ergebnisse einer Untersuchung zum Auftreten aerodynamischer Instabilitäten an der Stabilitätsgrenze eines zehnstufigen axialen Hochdruckverdichters vorgelegt. Die Ergebnisse basieren auf der Analyse kontinuierlich und niederfrequent abgetasteter Meßdaten (transient), die geringe Betriebspunktschwankungen erkennen lassen. Unter anderem lassen sich mit Hilfe der transienten Meßdaten Wirkungsgradmaxima sehr zuverlässig bestimmen und zum Beispiel die zeitliche Entwicklung von Druck- und Temperaturverteilungen in radialer Richtung sowie stufenabhängige Kenngrößen verfolgen, die eine detaillierte Analyse der Messungen ermöglicht. So hat sich gezeigt, Problembereiche der Schaufelenauslegung mehrstufiger Hochdruckverdichter sind nicht alleine die Randbereiche an Blattspitze und Nabe, sondern liegen unter exponierten Betriebsbedingungen durchaus auch in der Schaufelhöhenmitte.

BR700 Hochdruckverdichter

Gegenstand der Untersuchung ist der zehnstufige, axiale Hochdruckverdichter der BR700 Triebwerksfamilie der BMW Rolls-Royce GmbH. Die Verdichter der Triebwerke BR710 und BR715 unterscheiden sich nicht in konstruktiver Hinsicht, sondern in dem Verstellgesetz (*Schedule*) für die Relation der Schaufelwinkel des Eintrittsleittrads sowie der Statoren 1 bis 3 (**Bild 1**).

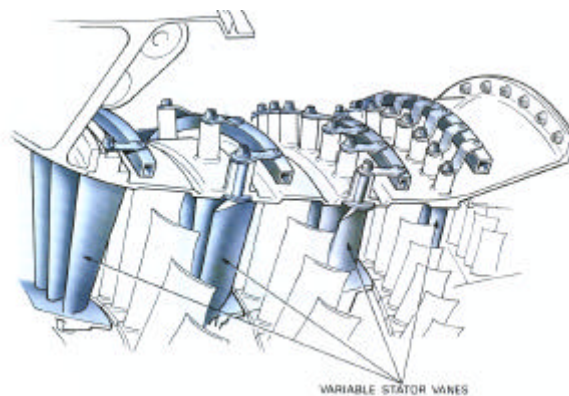


Bild 1 Variable Leitradverstellung /5/

¹ RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet für Mechanik

² FH Düsseldorf, Fachgebiet Strömungsmaschinen

³ BMW Rolls-Royce GmbH, AeroEngines, Dahlewitz

⁴ TU Berlin, Hermann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik

Die Verstellwinkel der Schaufeln werden abhängig vom Betriebspunkt eingestellt, wobei die Leitgitter mit Verringerung der Drehzahl geschlossen werden. Erst ein empirisch ermittelter *Schedule* sorgt für einen verbesserten Betrieb im *Offdesign*, da sich dort Betriebspunkte wegen mangelnder Konvergenz der Auslegungsprogramme nicht oder nur mit ungenügender Genauigkeit vorherbestimmen lassen.

Das Verstellgesetz des BR710 Verdichters und das des BR715 sind im Bereich niedriger Drehzahlen identisch. Ansonsten sind die Schaufeln bei dem BR715 *Schedule* weiter geöffnet als bei dem BR710, wodurch sich ein insgesamt größeres Druckverhältnis bei gleichem Volumenstrom einstellt. Gut erkennbar wird dies, wenn das Gesamtdruckverhältnis im Vergleich zur üblichen Darstellung, Auftragung über den Massenstrom (**Bild 2**), über den Volumenstrom (**Bild 3**) aufgetragen wird.

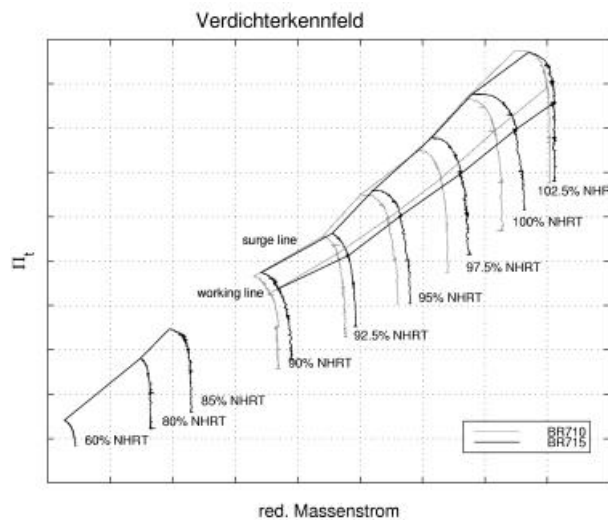


Bild 2 Experimentell ermitteltes Verdichterkennfeld (Totaldruckverhältnis über reduzierten Massenstrom)

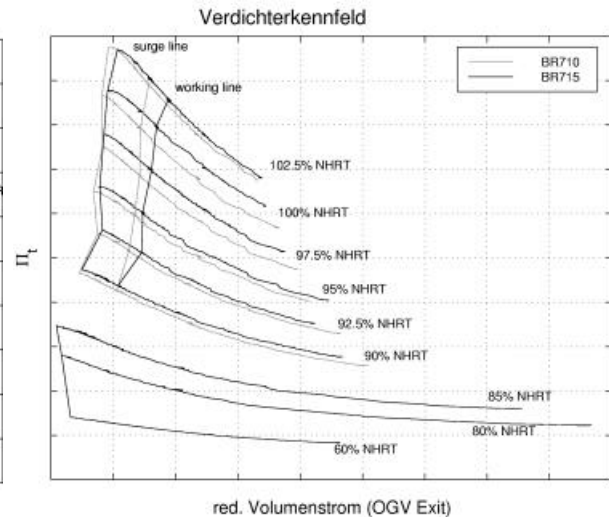


Bild 3 Experimentell ermitteltes Verdichterkennfeld (Totaldruckverhältnis über reduzierten Volumenstrom *OGV-Exit*)

Datenerfassung

Zur Ermittlung eines Verdichterkennfeldes werden entlang Drossellinien, die sich durch austrittsseitiges Drosseln des Massenstroms bei konstant gehaltener aerodynamischer Drehzahl (NHRT) ergeben, im ganzen Betriebsbereich einschließlich der Pumpgrenze Daten erfaßt.

Es wird zwischen drei Arten von Meßdaten unterschieden, stationär, transient und dynamisch, wobei das zeitliche Verhalten der Sensorik der jeweiligen Datenerfassung angepaßt ist.

Stationäre Daten sind dadurch charakterisiert, daß entlang der Drossellinien bestimmte Betriebspunkte angesteuert und gehalten werden, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Während dieses

Betriebspunktes werden 30 Sekunden lang mit einer Frequenz von 100Hz Meßwerte genommen, die dann für die jeweiligen Aufnehmer zu einem Wert verrechnet werden. Zwecks Auswertung von Stufencharakteristiken sind die Messaufnehmer stromauf der Leitgitter in Umfangsrichtung und radialer Richtung positioniert.

Transiente Daten sind dadurch gekennzeichnet, daß während des Versuchs entlang der gesamten Drosselkurve kontinuierlich Meßdaten mit einer *Sampling* Frequenz von 100Hz erfaßt und zu Zeitreihen im Sekundentakt zusammengefaßt werden. Die ausgewerteten transienten Daten werden dabei mittels derselben Aufnehmer und -positionen wie bei den stationären Daten erfaßt.

Die Erfassung der dynamischen Daten dient der Analyse hochfrequenter instationärer Strömungsphänomene und Strukturschwingungen. Demgemäß werden Zeitreihen mit einer *Sampling* Frequenz im kHz Bereich erstellt. Aufgrund der großen Datenmenge einzelner Aufnehmer ist deren Anzahl beschränkt. Zudem erfordert die hochfrequente Messung eine Positionierung der *Transducer* direkt am Meßort, damit die Meßgröße möglichst unverfälscht und nicht verzögert wahrgenommen wird. Da die Aufnehmer temperaturempfindlich bzw. in ihrem Temperaturbereich begrenzt sind, können sie nicht überall dort eingesetzt werden, wo transiente oder stationäre Daten erfaßt werden.

Stabilitätsverhalten

Für mehrstufige Verdichter existiert kein allgemeingültiges Stabilitätskriterium. Prinzipielles Stabilitätsverhalten einer einzelnen Verdichterstufe läßt sich mit einem Stufenkennfeld diskutieren (**Bild 4**). Aufgetragen ist die spezifische Stufenarbeit Y über dem Volumenstrom. Die spezifische Stufenarbeit ergibt sich aus der Energieerhaltung für eine kompressible, isentrope Strömung zu

$$Y = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + h_2 - h_1 = \Delta h_t . \quad (1)$$

Die Größen c bzw. h kennzeichnen die Absolutgeschwindigkeit bzw. die Enthalpie der Strömung, die Indizes 1 und 2 Rotoreintritt und Statoraustritt.

Die äußerste Gerade in **Bild 4** wird als Eulersche Gerade bezeichnet. Sie zeigt das Verhalten für eine ideale Verdichterstufe mit unendlichen vielen Schaufeln und ohne Verluste. Die gekrümmte Linie stellt eine Drosselkurve unter realen Betriebsbedingungen dar.

Charakteristisch für eine Drosselkurve ist das Auftreten einer horizontalen Tangente und das Überschreiten des Maximums, was im folgenden als Überrollen bezeichnet wird. Für einen großen Volumenstrom ergeben sich Stoßverluste, die zum Sperren führen können. Mit dem Überschrei-

ten des Arbeitspunktes sind die Verluste durch Ablösephänomene bedingt, da die Inzidenz- bzw. Anströmwinkel zu groß werden. Bis zum Maximum sollte von einer gesunden Strömung ausgegangen werden. Insofern wird dieser Arbeitsbereich als stabil bezeichnet. Erst mit dem Überschreiten des Maximums kommt man in einen Arbeitsbereich, in dem der Verdichter nicht unbedingt stabil arbeiten muß.

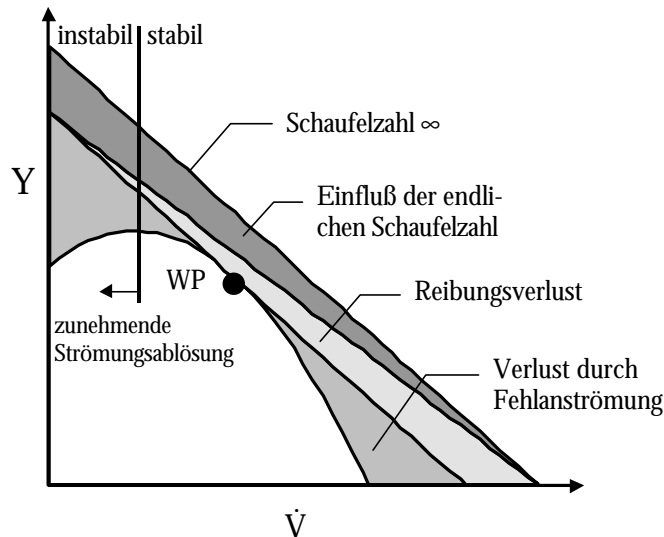


Bild 4 Stufenkennfeld eines Verdichters bei konstanter Drehzahl [nach Hennecke /2/]

Die charakteristische Größe zur Beschreibung der Verdichterstabilität muß nicht zwangsläufig die spezifische Stufenarbeit Y sein. Es können auch dimensionslose Kenngrößen aufgetragen werden, um einen entsprechenden Verlauf zu erhalten. Es werden daher Druckverhältnis Π und Druckziffer Ψ_{t-s} über dem Durchfluß Φ aufgetragen.

Druckziffer Ψ_{t-s}

Die Druckziffer oder -zahl Ψ_{t-s} (*total to static*) ergibt sich aus der Druckdifferenz des statischen Drucks am Austritt und des Totaldrucks am Eintritt einer Stufe und wird definiert durch

$$\Psi_{t-s} = \frac{(p_{\text{aus}} - p_{t,\text{ein}})}{\frac{1}{2} \rho u^2}. \quad (2)$$

Durchfluß Φ

Der Durchfluß ist eine dimensionslose Form der axialen Strömungsgeschwindigkeit und ist durch

$$\Phi = \frac{c_{\text{ax}}}{u} \quad (3)$$

definiert. Dabei ist die axiale Strömungsgeschwindigkeit mittels dem an der Venturidüse bestimmten Massenstrom, der jeweiligen Dichte und Querschnittsfläche bestimmt worden

$$c_{ax} = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho} \quad (4)$$

Auswertung

Im folgenden werden exemplarische Ergebnisse der Untersuchung gezeigt. Es werden dabei drei Fälle unterschieden: Auswertung von Stufencharakteristika, von lokalen und globalen Kenngrößen. Als lokale Kenngrößen werden die Größen bezeichnet, die sich durch Mittelung der Meßwerte nur in Umfangsrichtung ergeben und so eine radiale Verteilung von Meßgrößen zeigen. Ziel dieser Auftragung ist, eine detailliertere Kenntnis über das Betriebsverhalten der einzelnen Verdichterstufen zu bekommen, als es mit den Stufencharakteristika möglich ist. Grundlegend für die Beurteilung von Stufencharakteristika sowie lokalen Kenngrößen ist das Stabilitätsverhalten einer einzelnen Verdichterstufe. Globale Kenngrößen berechnen sich aus Meßwerten am Verdichtereintritt und -austritt, die in Umfangsrichtung und radialer Richtung gemittelt werden. Beispiel hierfür ist der Gesamtverdichterwirkungsgrad. Anhand der globalen Kenngrößen ergeben sich Hinweise auf Strömungsinstabilitäten und zeigen sich Vorteile transienter Daten gegenüber stationären.

Stufencharakteristika

Bei der anschließenden Untersuchung der einzelnen Stufen wird die Frage zu beantworten sein, welche Stufen das Betriebsverhalten negativ oder positiv beeinflussen.

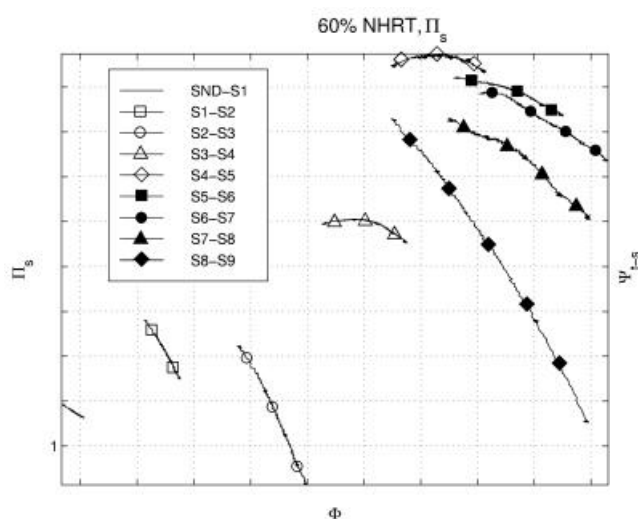


Bild 5 Statisches Druckverhältnis über Durchfluß der jeweiligen Stufe, 60% NHRT, Stufen 1 bis 9

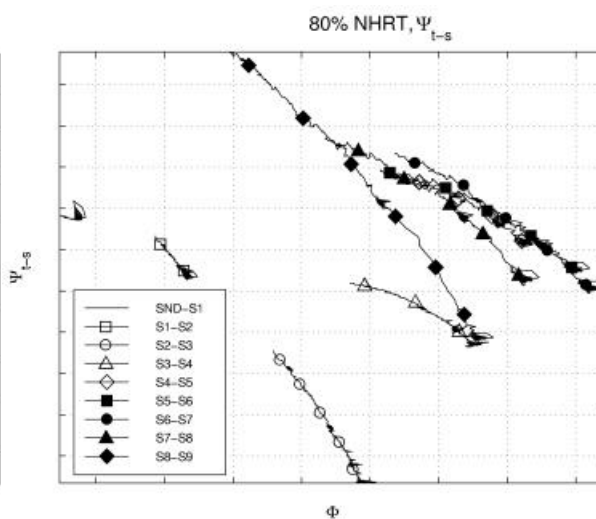


Bild 6 Druckziffer Ψ_{t-s} über Durchfluß der jeweiligen Stufe, 80% NHRT, Stufen 1 bis 9

Bei 60% NHRT fällt der geringe Durchsatz und der niedrige Druckaufbau in Stufe 1 verglichen mit den übrigen auf **(Bild 5)**. Dasselbe gilt auch für die Drehzahlen 80% **(Bild 6 7)** und 85% NHRT **(Bild 8)**. Zur Verdeutlichung des transienten Verhaltens ist in **Bild 7** der Drosselprozeß bei 80% NHRT dargestellt. Mit dem Androsseln des Verdichters verläuft die Stufenkennlinie in zyklischen Bahnen gegen den Uhrzeigersinn. In Richtung kleiner werdendem Durchsatz steigt der Kennlinienverlauf wie bei stabiler Arbeitsweise an. Von zeitlich hochaufgelösten (dynamischen) Messungen ist bekannt, daß die erste Stufe bei 80% NHRT auf einer Sekundärcharakteristik mit rotierenden Ablösezellen arbeitet, was die Ursache des in **Bild 7** gezeigten Verlaufs sein könnte. Bei 85% und 90% NHRT **(Bild 8, 9)** sinkt die Druckziffer der ersten Stufe mit geringer werdendem Durchfluß, weshalb vermutlich dort Ablösungen oder Instabilitäten /1/ vorhanden sind. Diese Erscheinung tritt bei 90% NHRT für die beiden untersuchten Leitgitterstellungen auf.

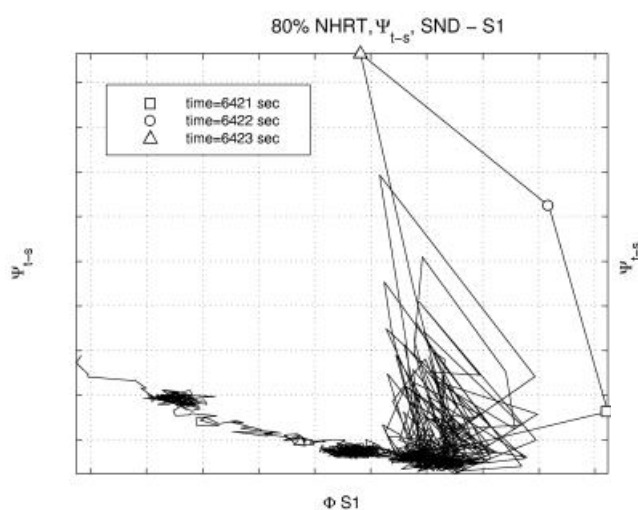


Bild 7 Druckziffer Ψ_{t-s} über Durchfluß, 80% NHRT, Stufe 1

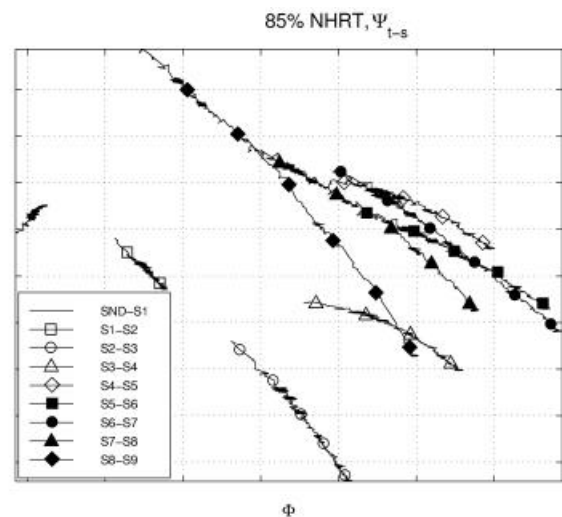


Bild 8 Druckziffer Ψ_{t-s} über Durchfluß der jeweiligen Stufe, 85% NHRT, Stufen 1 bis 9

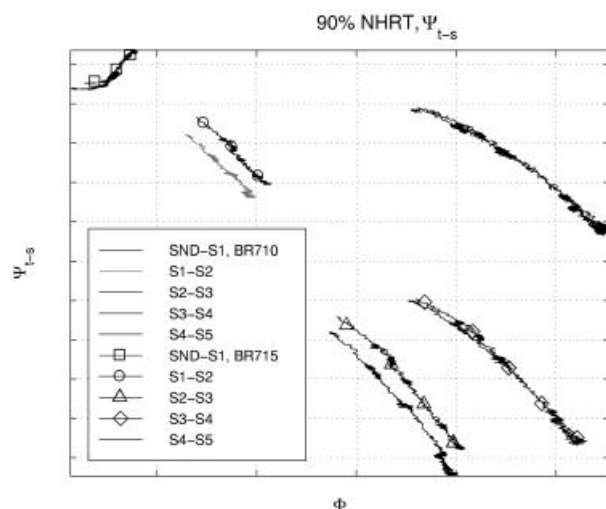


Bild 9 Druckziffer Ψ_{t-s} über Durchfluß der jeweiligen Stufe, 90% NHRT, Stufe 1 bis 5

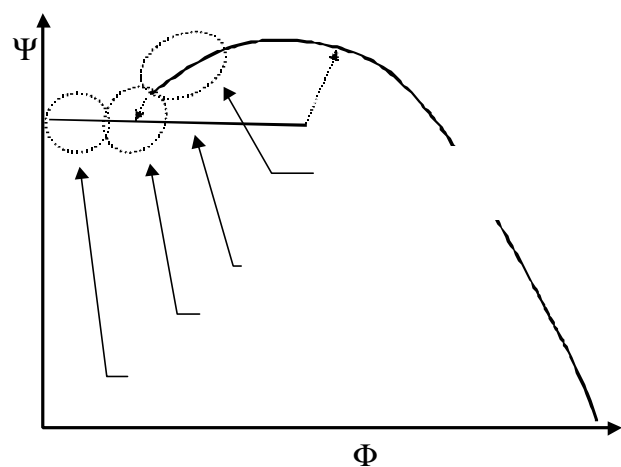


Bild 10 Schematisches Stufenkennfeld der ersten Stufe mit Sekundärcharakteristik

Durch die Analyse dynamischer Daten von Kameier /4/ und die Zusammenfassung der Aussagen betreffend der ersten Stufe und Drehzahlen bis 90% NHRT läßt sich das Stufenkennfeld in **Bild 10** aufzeichnen.

In **Bild 11** zeigen die hier diskutierten transienten Daten, daß in den hinteren Stufen die Kenngrößen während der Mittelung eines stationären Betriebspunktes deutlich driften (Pfeile). Die Untersuchung des Blattspitzenspalts (**Bild 12**) zeigt eine vermutlich thermisch verursachte Spaltweitenänderung als mögliche Erklärung. Bei dem Durchsatz $\Phi = \Phi^*$ vergrößert sich kurzzeitig stark der Radialspalt zwischen Blattspitze und Gehäuse. Weil einzig zur Auswertung des *Tip Clearance* Daten für die Rotoren 1, 6 und 10 zur Verfügung standen, ließ es sich nur abschätzen, ob derselbe Sachverhalt wie bei Stufe 6 auch bei den dahinter liegenden Stufen zutrifft. Durch Bestimmung des Durchsatzes für die hinteren Stufen (**Bild 13**) erkennt man die Übereinstimmung der Durchflußwerte mit denjenigen, bei denen die Charakteristika wegdriften (**Bild 11**).

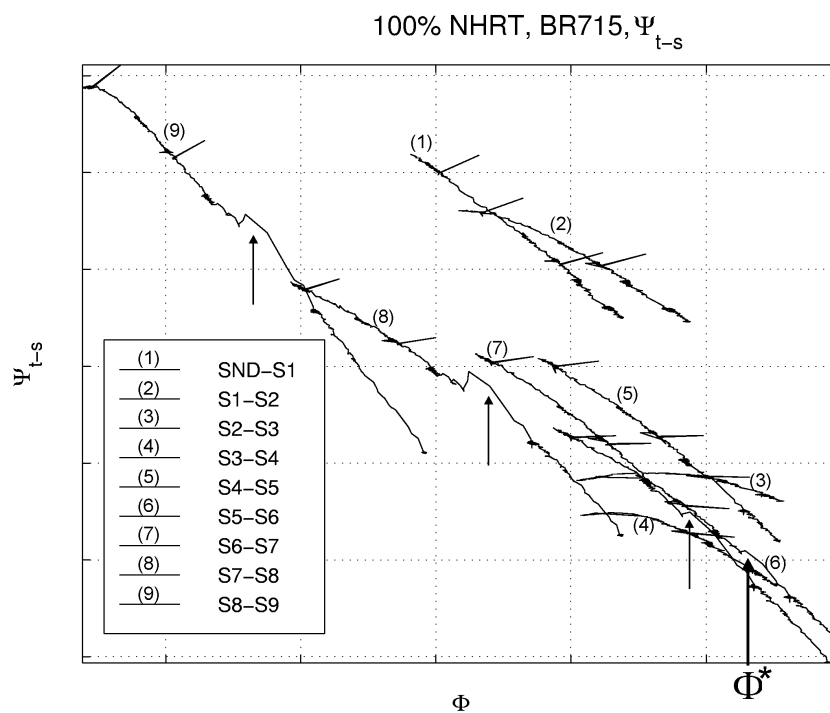


Bild 11 Druckziffer Ψ_{t-s} über Durchfluß der jeweiligen Stufe, 100% NHRT, BR715, Stufe 1 bis 9

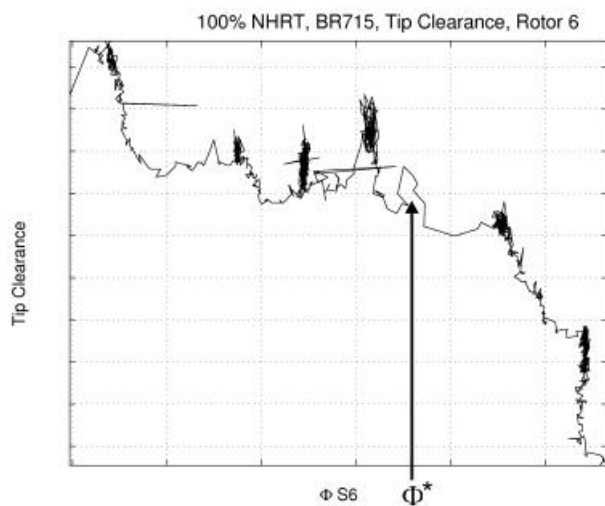


Bild 12 Blattspitzenspalt am Rotor 6 über Durchfluß von Stator 6, 100% NHRT, BR715

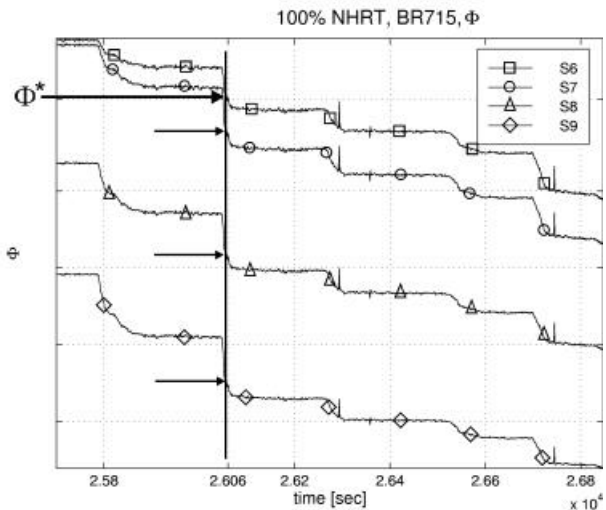


Bild 13 Zeitverlauf der Durchflüsse von Stator 6 bis 9, 100% NHRT, BR715

Lokale Kenngrößen

Um eine radiale Verteilung von Kenngrößen ermitteln zu können, wird vereinfachend vorausgesetzt, daß Aufnehmer, die in einer Stufe etwa auf derselben Blatthöhe in % positioniert sind, durch einen Stromfaden bzw. Stromfläche verbunden sind. Aufgrund der Komplexität des Strömungsfeldes und damit diese lokalen Kenngrößen noch repräsentativ bleiben, wird diese Art der Untersuchung nur auf einzelne Stufen angewendet.

Es ist jedoch bei dieser Auftragung radialer Verteilungen von Kenngrößen Vorsicht geboten, denn teilweise kommen so Wirkungsgrade größer eins zustande (**Bild 15**). Hier ist die Annahme, daß ein Stromfaden auf einer radialen Ringhöhe in % verläuft, nicht mehr zulässig. Viel mehr muß man die Werte im Kontext sehen und nicht absolut betrachten. Wirkungsgrade größer eins und sehr flach verlaufende oder konstante Druckverhältnisse lassen darauf schließen, daß die Strömung sehr turbulent ist oder Blockage vorliegt.

Generell fällt auf, daß unabhängig von der Drehzahl und dem *Schedule* bei Stufe acht außen (**Bild 14**) die Charakteristik überrollt. Daß eine Art von Strömungsinstabilität bei Stufe 8 an der Gehäusewand vorliegt, zeigt auch die radiale Verteilung der Wirkungsgrade. Sie nehmen außen Werte deutlich größer eins an (**Bild 15**).

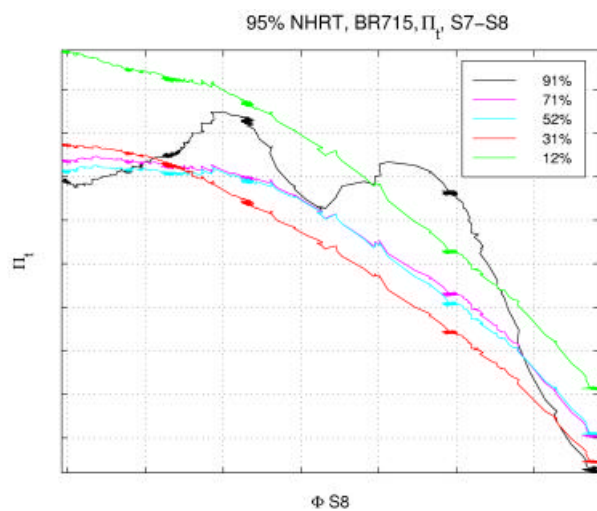


Bild 14 Radiale Verteilung der Totaldruckverhältnisses über Durchfluß, 95% NHRT, BR715, Stufe 8

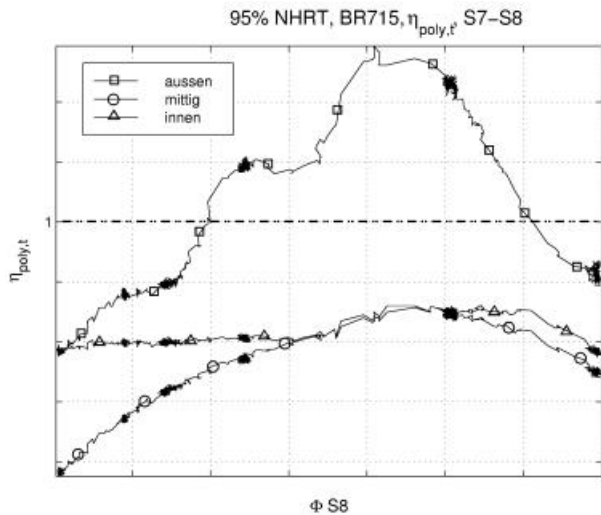


Bild 15 Radiale Verteilung des Wirkungsgrades statischer Größen über Durchfluß, 95% NHRT, BR715, Stufe 8

In **Bild 14** fällt der wellige Verlauf der Druckziffer in der Nähe der Gehäusewand auf. Solches Verhalten tritt bei jeder Drehzahl und unabhängig vom *Schedule* ab Stufe 6 auf, besonders ausgeprägt bei den Stufen 8 und 9. Ursache dessen könnte die Änderung des Blattspitzenspaltes infolge thermisch bedingter Ausdehnung sein. Gegen den Einfluß des Blattspitzenspaltes spricht der gleichartige Verlauf der Charakteristik außen bei allen Drehzahlen unabhängig vom Verhalten des Spalts. Denkbar ist auch eine Veränderung der Grenzschichtcharakteristik an der Gehäusewand, da stromab von Stator 4 die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt, Drücke und Temperaturen zunehmen, womit auch die Zähigkeit steigt. Es ist nicht möglich, Ablösung, Vergrößerung der Grenzschichtdicke oder einen Umschlag von laminarer zu turbulenter Grenzschicht für das Auftreten des welligen Kurvenverhaltens verantwortlich zu machen. Um diese Frage zu klären, wären detailliertere Untersuchungen notwendig. Unter Umständen ist diese Erscheinung sogar für den Pumpeintritt verantwortlich.

Ab 90% NHRT tritt bei Stufe 2 - in **Bild 16** für 100% NHRT dargestellt - an der Gehäusewand eine Blockage auf, die stromab in Richtung Nabe wandert und sich mit höherer Drehzahl über mehrere Stufen erstreckt. Bei 100% NHRT, BR715 reicht dies bis zur 5. Stufe (**Bild 19**).

Bei den Drehzahlen 97.5% NHRT und höher zeigen sich Unterschiede in der Druckzahl in den vorderen Stufen bei den verschiedenen *Schedules*, hauptsächlich bei den Stufen 3 und 4. Vorzugsweise wird deshalb auf die BR715 Variation eingegangen, weil für diese Einstellungen die Charakteristika deutlich überrollen.

Für die Stufen 3 (**Bild 17**, 55% Schaufelhöhe) und 4 (**Bild 18**, 34% Schaufelhöhe) lassen sich im Bereich der mittleren Schaufelhöhe Verläufe der Druckverhältnisse folgendermaßen interpretieren.

Bei Stufe 3 fällt zuerst das Druckverhältnis in 55% Höhe ab (**Bild 17**). Darauf folgen die äußeren Positionen, 55% und 91% Höhe. Schließlich sinken im Nabenbereich die Werte, womit gleichzeitig das Verhältnis in Blattmitte wieder steigt. Gegen Ende des Drosselns erkennt man ein Ansteigen der Kurven der äußeren Positionen. Unter der Annahme, daß der Druckabfall aus einer Ablösung resultiert, läßt sich folgern: Zu Beginn des Drosselvorgangs existiert in Mitte der Schaufelhöhe ein lokal begrenztes Gebiet mit Ablösung. Dies ist insofern sinnvoll, da die Auswertung des Durchflusses zeigte, daß dieser in Blattmitte am geringsten ist. Die dadurch hervorgerufene Fehlansströmung der übrigen radialen Bereiche wird mit fortgesetzter Drosselung so groß, daß zuerst in den äußeren Bereichen und dann in den inneren Blockage auftritt. Durch das Auftreten der Blockage an den Kanalrändern wird die Strömung in Kanalmitte gedrängt, so daß günstige Anströmwinkel vorliegen und das Druckverhältnis wieder ansteigt.

Bei Stufe 4 (**Bild 18**) tritt zuerst Blockage in 34% Höhe auf. Die Argumentation, weshalb es daraufhin zu dem Überrollen der übrigen Druckverhältnisse kommt, läßt sich aus dem zuvor diskutierten übertragen.

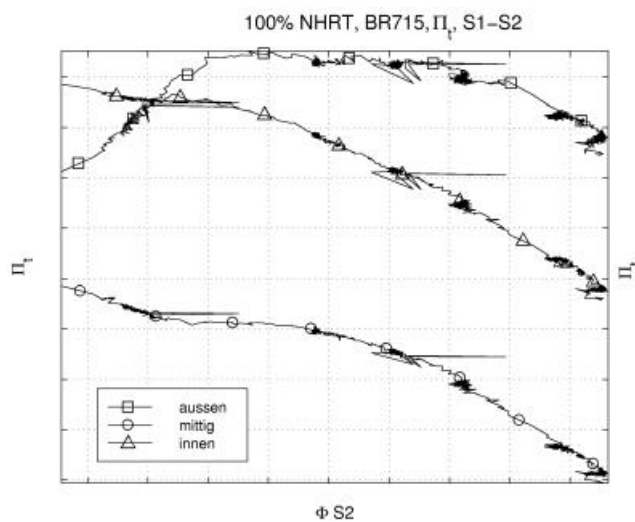


Bild 16 Radiale Verteilung des Totaldruckverhältnisses, 100% NHRT, BR715, Stufe 2

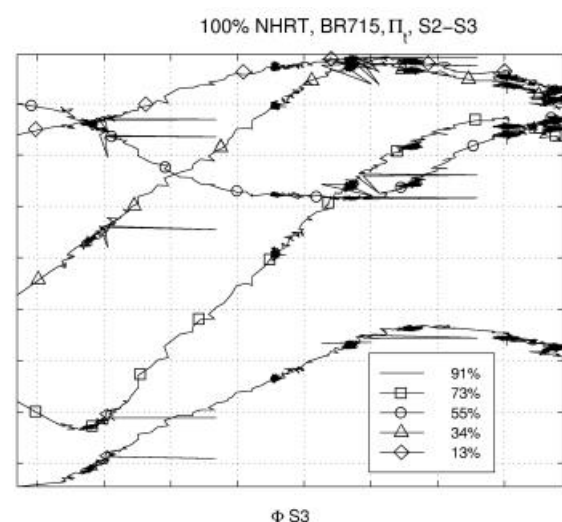


Bild 17 Radiale Verteilung des Totaldruckverhältnisses, 100% NHRT, BR715, Stufe 3

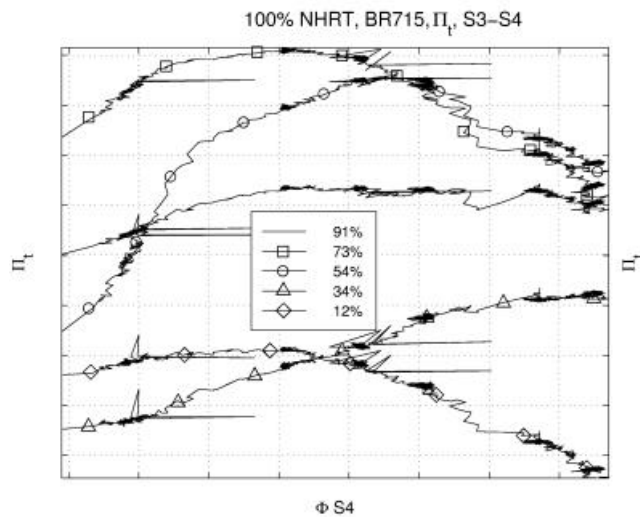


Bild 18 Radiale Verteilung des Totaldruckverhältnisses, 100% NHRT, BR715, Stufe 4

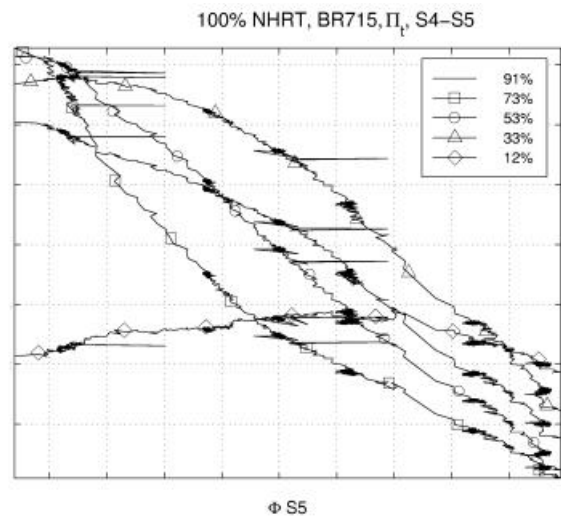


Bild 19 Radiale Verteilung des Totaldruckverhältnisses, 100% NHRT, BR715, Stufe 5

In **Bild 20** sind die Ergebnisse der Analyse transienter Daten respektive lokaler Kenngrößen (**Bild 16 - 19**) bei 100% NHRT, BR715 zusammengefaßt.

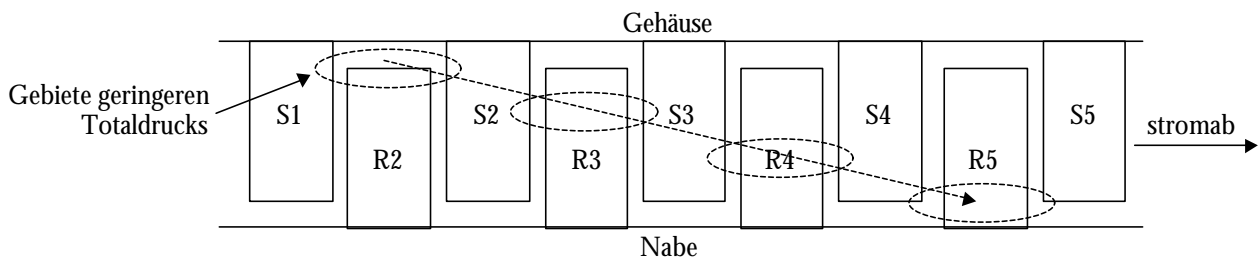


Bild 20 Schematische Darstellung der Ablösegebiete bei 100% NHRT, BR715

Globale Kenngrößen

In **Bild 21** ist der polytrope Wirkungsgrad totaler Meßgrößen von Verdichtereintritt und -austritt über dem Durchfluß am Austritt aufgetragen. Meßpunkthäufungen kennzeichnen Messungen bei konstant gehaltenen Betriebsbedingungen, an denen Daten für einen stationären Betriebspunkt erfaßt werden. Mit Überschreiten des Wirkungsgradmaximums erstrecken sich die stationären Betriebspunkte über ein längeres Linienelement. Dies deutet daraufhin, daß es sich um vermeintlich konstante Betriebspunkte handelt und der Verdichter bei negativem Wirkungsgradgradient stabiler arbeitet als bei positivem.

In **Bild 22**, das den Zeitverlauf des Gesamtdruckverhältnis und Massenstroms zeigt, ist vor Pumpbeginn eine stetige Abnahme des Massenstroms bei konstantem Druckverhältnis festzustellen. Dies deutet daraufhin, daß der Verdichter mehr oder weniger selbständig ins Pumpen gefahren

ren ist. Denkbar ist, daß sich mit dem Androsseln vor dem Strömungszusammenbruch ein Ablösegebiet nach und nach aufbaut, das schließlich den Strömungszusammenbruch verursacht. Damit dieses Verhalten auftritt, ist es wichtig, einen Betriebspunkt in der Nähe der Pumpgrenze anzufahren. Dieses Verhalten ist unabhängig von der Drehzahl und den hier untersuchten Leitgitterstellungen aufgetreten.

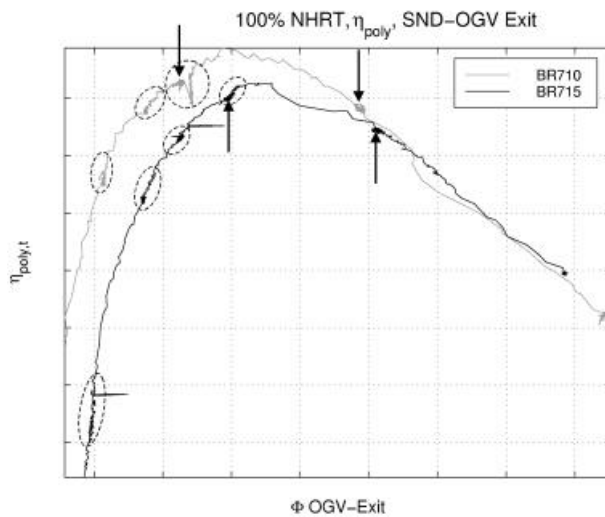


Bild 21 Wirkungsgrade totaler Größen, 100% NHRT über Durchfluß

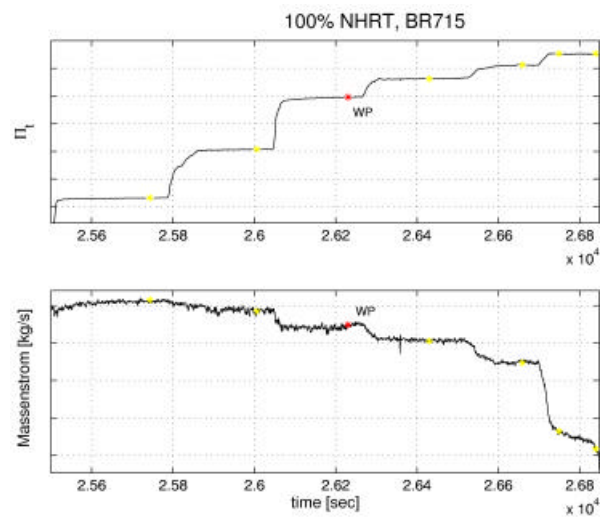


Bild 22 Zeitverlauf von Gesamttotaldruckverhältnis und Massenstrom 100% NHRT, BR715 während eines Drosselvorgangs

Ersichtlich wird in **Bild 21** ein Vorteil transienter Daten, das zuverlässige Bestimmen von Wirkungsgradmaxima. Stationäre Daten sind vor und nach Erreichen des Wirkungsgradmaximums erfaßt worden. Zwischen diesen Meßpunkten muß also interpoliert werden. Die transienten Daten geben dagegen den eigentlichen Wirkungsgradverlauf wieder. Der Wirkungsgrad totaler Größen und transienter Daten ist um 0.3 Prozentpunkte bei BR710 und um 0.1 Prozentpunkte bei BR715 höher als der aus stationären Daten bestimmte. Der unrunde Verlauf kommt durch Meßfehler zustande, da der Drosselvorgang etwa 25 Sekunden beträgt und das System deswegen dynamisch agiert.

Zusammenfassung

Der Verdichter arbeitet trotz Auftreten von Ablösungen stabil, er wird jedoch durch sie in seiner Leistungsfähigkeit beschränkt. Im Bereich niedriger Drehzahlen existieren innerhalb der ersten Stufe rotierende Instabilitäten, die nur durch Analysen dynamischer Daten genau bestimmbar sind. Bei höheren Drehzahlen treten innerhalb der Schaufelhöhe in den vorderen Stufen lokal begrenzte Ablösungen auf. Hauptsächlich geschieht dies nur im Bereich zwischen Arbeitslinie

und Pumpgrenze. Charakteristiken der Stufen 8 und 9 an der Gehäusewand deuten daraufhin, daß dort vermutlich das Pumpen ausgelöst wird.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, daß sich der Mehraufwand bei der Verwendung von transienten Meßdaten gegenüber ausschließlich stationär gemittelten Meßdaten in folgender Hinsicht lohnt: Wirkungsgrade lassen sich aufgrund der nicht benötigten Interpolation genauer bestimmen, instabiles Betriebsverhalten läßt sich durch leichtes Driften der Kennfeldpunkte feststellen.

Hinsichtlich der vorliegenden Erkenntnisse sollten Verdichtertests auch in der industriellen Praxis unter dem Gesichtspunkt einer transienten Datenverarbeitung durchgeführt werden. Da ein langsames kontinuierliches Androsseln der Strömungsmaschine ein vollständigeres und präziseres Kennfeld ergibt, als es bei einer sukzessiven angedrosselten Strömungsmaschine mit langen Mittelungszeiten der Meßdaten möglich ist. Neben den Erfahrungen von Drosselkennlinien könnten mit Hilfe der transienten Meßdatenerfassung außerdem echte Arbeitslinien eines Verdichters bereits im Komponententest gefahren werden.

Literaturverzeichnis

- /1/ M. **Baumgartner**, F. **Kameier**, J. **Hourmouziadis**: "Non Engine Order Blade Vibration in a High Speed Compressor", Twelfth International Symposium on Airbreathing Engines, Melbourne, Australia, Sept. 10-15, 1995.
- /2/ D.K. **Hennecke**, K. **Wörrlein**: "Flugantriebe" Vorlesungsumdruck, Technische Hochschule Darmstadt, Fachgebiet Gasturbinen und Flugantriebe, WS 1994/95.
- /3/ W. **Hofmann**: "Untersuchung des Betriebsverhalten eines mehrstufigen Axialverdichters an der Stabilitätsgrenze hinsichtlich des systematischen Auftretens aerodynamischer Instabilitäten", Diplomarbeit, TU Berlin, Hermann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, 1998.
- /4/ F. **Kameier**: "Technical Report, Surge Investigations Overview - Unsteady Data Analysis". Nr. E-TR044/97-(FR) ISS00, BMW Rolls-Royce, Dahlewitz, 1997.
- /5/ **Rolls-Royce**: "The Jet Engine". The Technical Publications Department, Rolls-Royce plc, Derby, England, 1992.