

# NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM WIRKUNGSGRAD VON AKTIVER STRÖMUNGSBEEINFLUSSUNG IM STATOR EINES MEHRSTUFIGEN AXIALVERDICHTERS

A. Vorreiter, J. Seume,  
Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, Appelstraße 9,  
Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover,  
Deutschland

## Zusammenfassung

Auf dem Gebiet der Fluggasturbinen besteht seit jeher das Bestreben, die Anzahl der Verdichterstufen unter Beibehaltung des Druckverhältnisses zu reduzieren, um so Gewicht, Material und Kosten einzusparen. Um die resultierende Erhöhung der spezifischen Stufenarbeit des Verdichters zu ermöglichen, ist eine Erhöhung der aerodynamischen Belastung in der Stufe unumgänglich. Bereits in früheren Forschungsprojekten wurde daher versucht, durch aktive Strömungsbeeinflussung die aerodynamische Belastbarkeit von verzögerten Grenzschichtströmungen zu erhöhen. Stationäre Absaugung und Einblasung, instationäre Beeinflussung und strahlförmige Wirbelerzeuger finden Anwendung, um Fluid mit niedrigem Impuls zu entfernen, Impulsdefizite aufzufüllen oder die Durchmischung in der Grenzschicht zu fördern und so eine Ablösung der Strömung zu unterbinden. Eine gekrümmte Oberfläche im Bereich der Schaufelhinterkante zur Nutzung des Coanda-Effekts ist ein weiteres Verfahren, um die Ablöse neigung der Profilhrenzschicht zu beeinflussen. In dieser Veröffentlichung werden die aerodynamischen Eigenschaften eines Stators mit aktiver Strömungsbeeinflussung und Nutzung des Coanda-Effekts bei reduzierter Schaufelzahl für einen Hochgeschwindigkeits-Axialverdichter vorgestellt. Die gekrümmte Coanda-Oberfläche befindet sich hinter einem Ausblassechlitz auf der Saugseite im Bereich der Schaufelhinterkante des Stators der ersten Stufe eines vierstufigen Hochgeschwindigkeits-Axialverdichters. Die gezeigten Ergebnisse basieren auf numerischen Berechnungen des Verdichters. Es erfolgt eine Analyse des aktiv beeinflussten Stators hinsichtlich des energetischen Wirkungsgrades der Verlustminderung durch die Ausblasung in Abhängigkeit von der Ausblasrate und der Leistung des Ausblasstrahls.

## 1. NOMENKLATUR

Ma	Mach-Zahl
$P_v$	Verlustleistung
P	Leistung
Re	Reynolds-Zahl
$T_t$	Totaltemperatur
W	Strömungsgeschwindigkeit
b	Schaufelhöhe
$c_j$	Impulsbeiwert
h	Schlitzhöhe
l	Sehnenlänge
$\dot{m}$	Massenstrom
n	Drehzahl
p	statischer Druck
$p_t$	Totaldruck
q	dynamischer Druck
r	Radius
t	Teilung
$\pi$	Totaldruckverhältnis
$\beta$	Strömungswinkel
$\eta_v$	Wirkungsgrad
$\nu_t$	turbulente Viskosität
$\rho$	Dichte
$\zeta_v$	Totaldruckverlustbeiwert
$\Delta p$	Druckerhöhung
$\Delta\beta$	Umlenkwinkel

## Indizes

j	Ausblasstrahl
1	Eintritt
2	Austritt

## 2. EINFÜHRUNG

Heutige Fluggasturbinen werden charakterisiert durch geringes Gewicht und kompakte Größe bei gleichzeitig geringer mechanischer Komplexität. Diese Eigenschaften werden zum größten Teil vom Verdichter beeinflusst, da es sich hierbei um die größtmäßig dominierende Komponente handelt. Um das Leistungsgewicht zu senken, wird unter anderem daran gearbeitet, in Verdichtern mit weniger Stufen auszukommen. Dazu muss die spezifische Stufenarbeit des Verdichters erhöht werden, was nur durch eine Erhöhung der aerodynamischen Belastung in den Stufen möglich ist [1, 2]. Eine vielversprechende Methode zur Erhöhung der aerodynamischen Belastbarkeit von verzögerten Grenzschichtströmungen bietet die aktive Strömungsbeeinflussung. Verschiedene Konzepte, wie z.B. Absaugung und Einblasung, instationäre Beeinflussung und strahlförmige Wirbelerzeuger finden Anwendung, um entweder Fluid mit niedrigem Impuls aus der Grenzschicht zu entfernen, Impulsdefizite aktiv aufzufüllen oder die Durchmischung in der Grenzschicht

zu fördern und so die Ablösneigung der verzögerten Strömung zu reduzieren. Die Kombination von Ausblasung mit einer nachfolgenden gekrümmten Oberfläche im Bereich der Schaufelhinterkante zur Nutzung des Coanda-Effekts stellt eines der vielfältigen Konzepte dar, um die Ablösneigung der Profilgrenzschicht zu beeinflussen [3-5]. Ein zusätzlicher Vorteil dieses Konzepts liegt in der Möglichkeit zur Beeinflussung der Umlenkung des Schaufelgitters durch gezielte Ausnutzung des Coanda-Effekts. Bei dem in der vorliegenden Veröffentlichung dargestellten Hochgeschwindigkeits-Versuchsverdichter befindet sich die gekrümmte Coanda-Oberfläche hinter einem Ausblasschlitz auf der Saugseite im Bereich der Schaufelhinterkante des Stators der ersten Stufe, siehe Bild 1 und Bild 2. Guendogdu et al. [6] haben gezeigt, dass durch diese Konfiguration im Auslegungsbetriebspunkt eine Ausblasrate von 0,5% Sekundärluft bezogen auf den Hauptmassenstrom ausreicht, um das Teilungsverhältnis der Statorschaufeln unter Beibehaltung des Abströmwinkels des ursprünglichen Stators um 25% anzuheben. Hieraus resultiert eine Steigerung der aerodynamischen Belastung der Lieblein-Diffusionszahl von 14%.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden Ergebnisse von numerischen Untersuchungen zur Wirksamkeit und Effizienz des Strahlklappen-Konzepts mit aktiver Strömungsbeeinflussung unter Nutzung des Coanda-Effekts in einem mehrstufigen Hochgeschwindigkeits-Axialverdichter vorgestellt. Einige der hier gezeigten Bilder sind bereits in Vorreiter et al. [7] und Lietmeyer et al. [8] vorgestellt worden.

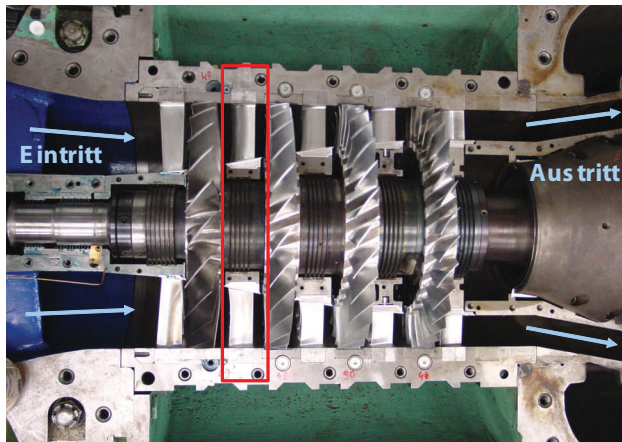


BILD 1. Vierstufiger Axialverdichter mit Stator der ersten Verdichterstufe (rot umrahmt)

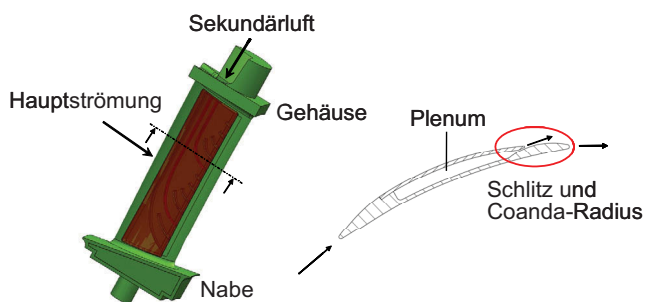


BILD 2. Darstellung des Strahlklappen-Stators

## 2.1. Versuchs-Axialverdichter

Der Versuchs-Axialverdichter wird von einem Gleichstrommotor mit 1,35 MW Leistung angetrieben. Der Verdichter verfügt über vier Stufen und ein Eintrittsleitrad mit CDA-Beschaufelung. Die Auslegungsdrehzahl beträgt  $n = 18.000 \text{ U/min}$  und der Verdichter verdichtet die Luft auf ein Gesamt-Totaldruck-Verhältnis von  $\pi = 2,7$ . Bild 3 zeigt die Schnittdarstellung des Verdichters. Tabelle 1 bietet eine Übersicht über die Leistungsdaten des Verdichters. Für die experimentellen Untersuchungen werden die Strahlklappen-Statorschaufeln über ein Roots-Gebläse mit Sekundärluft versorgt.

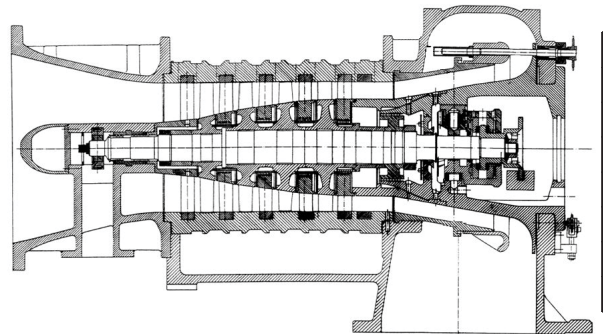


BILD 3. Schnittdarstellung und Leistungsdaten des Versuchs-Axialverdichters

TAB 1. Leistungsdaten des Versuchs-Axialverdichters

Auslegungsdrehzahl	18000 U/min
Massenstrom	7,93 kg/s
Totaldruckverhältnis	2,7
Isentroper Wirkungsgrad	89,1%
Leistungsaufnahme	950 kW
Durchflusszahl Stufe 1	0,72
Leistungszahl Stufe 1	0,44
Reynolds-Zahl (Stator 1)	$4 \times 10^5$
Schaufelzahl Stator 1	30

## 3. NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

Für die numerischen Untersuchungen wurde der kommerzielle Strömungslöser FINE/Turbo von Numeca verwendet. Alle Berechnungen erfolgten stationär und für voll turbulente Strömung unter Verwendung des Turbulenzmodells nach Spalart und Allmaras [9]. Die Strömung im Verdichter wurde für drei unterschiedliche Ausblasraten an zwei Betriebspunkten bei der Auslegungsdrehzahl von  $n = 18000 \text{ U/min}$  berechnet. Die Ausblasrate ist definiert als das Verhältnis des durch die Strahlklappen-Statoren ausgeblasenen Sekundärluftmassenstroms zum Eintrittsmassenstrom des

Verdichters. Die Simulationen wurden für Ausblasraten von  $\dot{m}_j / \dot{m}_1 = 0,0\%$ ;  $0,5\%$  und  $1,0\%$  durchgeführt. Als interessante Betriebspunkte wurden der Auslegungsbetriebspunkt für den besten Verdichterwirkungsgrad und ein Off-Design-Betriebspunkt in Richtung der Stabilitätsgrenze des Verdichters ausgewählt. Der Off-Design-Betriebspunkt führt in der Zuströmung des Stators der ersten Stufe zu einer Erhöhung der Inzidenz um  $3^\circ$  (Anströmwinkel im Auslegungsbetriebspunkt  $\beta_1 = 40^\circ$ , bzw. im Off-Design-Betriebspunkt  $\beta_1 = 43^\circ$ ). Das Strömungsfeld wurde für den gesamten vierstufigen Verdichter mit einem Netz von 4,1 Millionen Zellen aufgelöst. Für die Kopplung der rotierenden und stehenden Schaufelreihen wurde ein Mischungsebenenansatz gewählt. Die Werte für den dimensionslosen Wandabstand  $y^+$  wurden entsprechend den Anforderungen durch das Turbulenzmodell von Spalart und Allmaras [9] kleiner 1, bzw. an den Schaufelvorderkanten kleiner 2 gehalten. Bild 4 zeigt das verwendete Netz im Mittenschnitt des Verdichters.

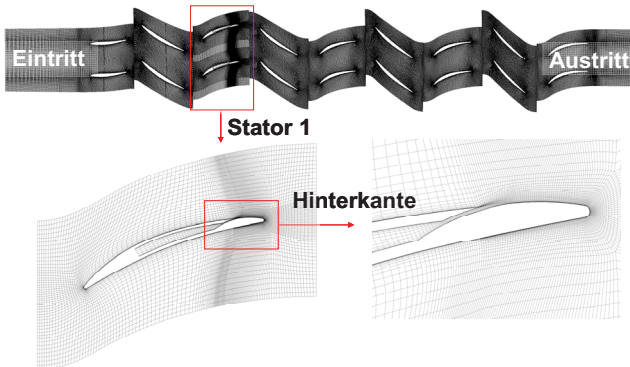


BILD 4. Netz im Mittenschnitt des Versuchs-Axialverdichters

Am Eintritt wurden der Totaldruck ( $p_t = 60$  kPa), die Totaltemperatur ( $T_t = 300$  K) und das Wirbelviskositätsverhältnis ( $\nu_t/\nu = 4$ ) vorgegeben. Als Austrittsrandbedingung wurde im Auslegungsbetriebspunkt ein statischer Nabendruck mit Berücksichtigung des radialen Gleichgewichts ( $p = 1485$  kPa) und im Off-Design-Betriebspunkt ein Massenstrom ( $\dot{m} = 7,63$  kg/s) eingestellt.

#### 4. ERGEBNISSE

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Strahlklappe auf den Stator der ersten Stufe, aber auch Effekte, hervorgerufen durch den dreidimensionalen Charakter der Verdichterströmung, betrachtet werden. Für die Darstellung der Ergebnisse werden folgende dimensionslose Beziehungen verwendet:

Momentenbeiwert:

$$(1) \quad c_j = \frac{\dot{m}_j \cdot W_j}{\frac{\rho}{2} W_j^2 \cdot b \cdot l}$$

Umlenkwinkel:

$$(2) \quad \Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$$

$$(3) \quad \rightarrow \Delta(\Delta\beta) = \Delta\beta(c_j > 0) - \Delta\beta(c_j = 0)$$

Totaldruckverlustbeiwert:

$$(4) \quad \zeta_v = \frac{P_{t1j} - P_{t2}}{P_{t1} - P_1}$$

$$(5) \quad \text{mit } P_{t1j} = \frac{\dot{m}_1 \cdot p_{t1} + \dot{m}_j \cdot p_{tj}}{\dot{m}_1 + \dot{m}_j}$$

$$(6) \quad \rightarrow \Delta\zeta_v = \zeta_v(c_j = 0) - \zeta_v(c_j > 0)$$

Druckerhöhung:

$$(7) \quad \Delta p / q_1 = \frac{p_2 - p_1}{P_{t1} - P_1}$$

$$(8) \quad \rightarrow \Delta(\Delta p / q_1) = \Delta p / q_1(c_j > 0) - \Delta p / q_1(c_j = 0)$$

Um die Wirksamkeit der Strahlklappe auch aus energetischer Sicht (hinsichtlich des Aufwandes für die Ausblasung) beurteilen zu können, wird eine Wirkungsgraddefinition nach Bae et al. [10] verwendet:

$$(9) \quad \eta_V = \frac{P_{V(\dot{m}_j=0)} - P_{V(\dot{m}_j>0)}}{\frac{1}{2} W_j^2 \dot{m}_j}$$

$$(10) \quad \text{mit } P_V = (p_{t1j} - p_{t2}) \cdot \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_j}{\rho_1}$$

Positive Werte für den Wirkungsgrad  $\eta_V$  weisen auf eine Reduktion der Verlustleistung in der aktiv beeinflussten Beschauelung hin, während negative Werte für  $\eta_V$  einen Verlustanstieg gegenüber dem unbeeinflussten Fall indizieren. Nur wenn  $\eta_V$  den Wert von 1 überschreitet, ist die Reduktion der Verluste in der betrachteten Beschauelung größer als die für die aktive Strömungsbeeinflussung aufgewendete Leistung.

##### 4.1. Einfluss der Strahlklappe auf den Verdichter

Aufgrund der dreidimensional ausgeprägten Strömung im Verdichter ergeben sich signifikante Unterschiede in den Kennwerten über die Kanalhöhe. Daher wird im Folgenden das Verhalten der Strömung in drei verschiedenen radialen Positionen dargestellt: in der Nähe der Nabe (8,5% der Kanalhöhe), im Mittenschnitt (50% der Kanalhöhe) und in Gehäusenähe (91,5% der Kanalhöhe).

Um den unterschiedlichen Einfluss der Strahlklappe auf das Verhalten der dimensionslosen Parameter in den verschiedenen Kanalhöhen zu erklären, werden die radialen Verteilungen der Totaldruckverlustbeiwerte für die beiden simulierten Betriebspunkte gezeigt. Abschließend erfolgt ein kurzer Ausblick bezüglich der Auswirkungen

des Strahlklappen-Stators auf die stromab befindlichen Stufen des Verdichters.

#### 4.1.1. Einfluss der Strahlklappe auf die Kennwerte des Stators

Zunächst soll eine Gegenüberstellung der Kennwerte zur Beschreibung des Ausblasstrahls erfolgen. In Bild 5 sind hierzu das Totaldruckverhältnis des Ausblasstrahls bezogen auf die Zuströmung des Stators sowie der in Gleichung (1) definierte Momentenbeiwert des Ausblasstrahls in Abhängigkeit von der Ausblasrate für den Auslegungsbetriebspunkt (oberes Diagramm) und den Off-Design-Betriebspunkt (unteres Diagramm) dargestellt.

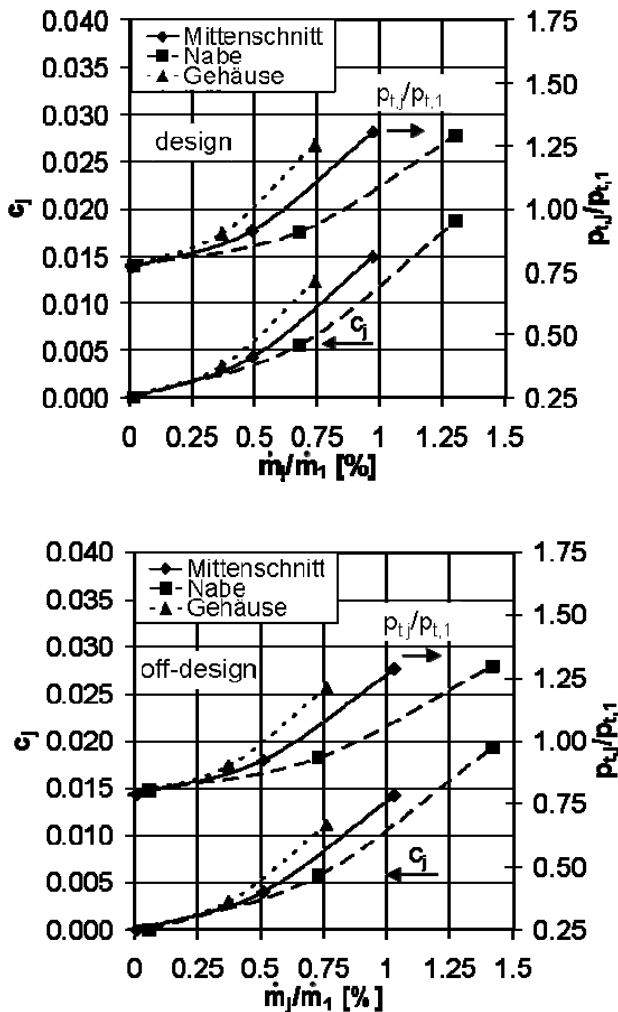


BILD 5. Momentenbeiwert und Totaldruckverhältnis von Ausblasstrahl und Zuströmung am Auslegungsbetriebspunkt (oben) und am Off-Design-Betriebspunkt (unten)

Das Totaldruckverhältnis von Ausblasstrahl und Zuströmung bleibt über die radiale Höhe nahezu konstant. Es fällt bei einer Ausblasrate von 1,0% lediglich in Gehäusenähe leicht ab. Der Momentenbeiwert weist dagegen eine höhere Abhängigkeit von der radialen Position auf. Er ist an der Nabe deutlich höher als im Mittenschnitt und fällt sowohl im Auslegungsbetriebspunkt

als auch im Off-Design-Betriebspunkt zum Gehäuse hin ab. Dieses Verhalten resultiert aus einer Zunahme der Anström-Mach-Zahl des Stators über die Kanalhöhe, während der Impuls des Ausblasstrahls radial nahezu konstant verteilt ist.

Bild 6 zeigt die Reduktion der Totaldruckverlustbeiwerte in den drei Schnitten in Abhängigkeit von der Ausblasrate für den Auslegungsbetriebspunkt (oberes Diagramm) und den Off-Design-Betriebspunkt (unteres Diagramm). In Gehäusenähe und im Mittenschnitt werden die Totaldruckverluste, verglichen mit dem Nabenschnitt, nur marginal reduziert. Bei einer Ausblasrate von 0,5% werden die Totaldruckverluste an der Nabe bereits auf ein Niveau reduziert, das vergleichbar mit der Verlustreduktion in den anderen Schnitten bei einer Ausblasrate von 1,0% ist. Den größten Vorteil bietet die Strahlklappe am Off-Design-Betriebspunkt, wobei hier die Nabe besonders profitiert.

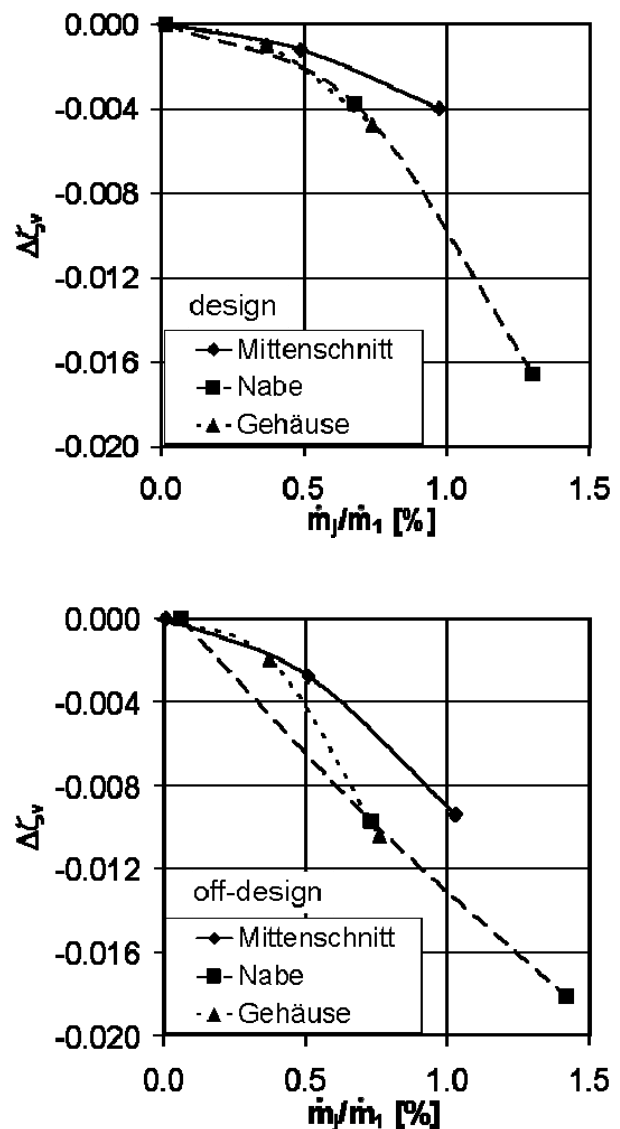


BILD 6. Totaldruckverlustbeiwerte am Auslegungsbetriebspunkt (oberes Diagramm) und am Off-Design-Betriebspunkt (unteres Diagramm)



Das Verhalten der Totaldruckverlustbeiwerte bezüglich der Strahlklappe deckt sich mit den Wirkungsgraden nach Gleichung (9). In Bild 7 sind die Wirkungsgrade über dem Verhältnis der Leistung des Ausblasstrahls zur Leistung in der Zuströmung (Strahlleistungsverhältnis) für den Auslegungsbetriebspunkt (oberes Diagramm) und den Off-Design-Betriebspunkt (unteres Diagramm) aufgetragen. Dieses Strahlleistungsverhältnis ist wie folgt definiert:

$$(11) \quad P_j / P_1 = \frac{p_{tj} \cdot \dot{m}_j / \rho_j}{p_{t1} \cdot \dot{m}_1 / \rho_1}$$

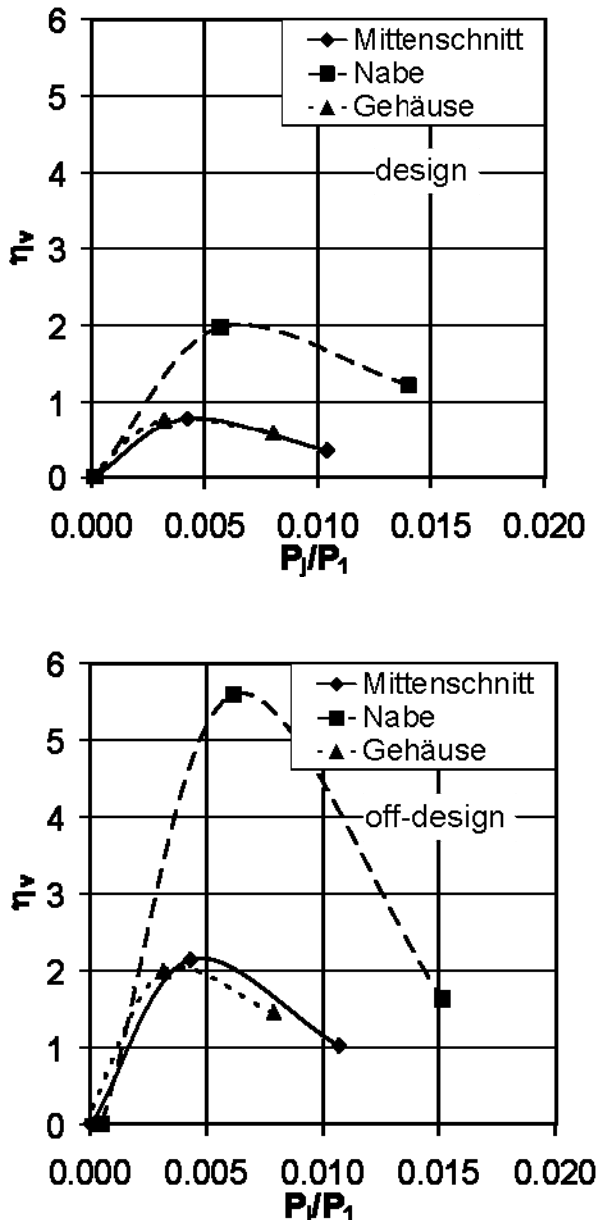


BILD 7. Wirkungsgrad der Ausblasung in Abhängigkeit vom Strahlleistungsverhältnis am Auslegungsbetriebspunkt (oberes Diagramm) und am Off-Design-Betriebspunkt (unteres Diagramm)

Es zeigt sich, dass die Strahlklappe im Bereich der Nabe nicht nur hinsichtlich der Reduktion der Totaldruckverluste die größte Wirkung erzielt, sondern dass dies auch in einer sehr günstigen Ausnutzung der aufgewendeten Leistung für den Ausblasstrahl erfolgt. Während das Verhältnis der Leistung des Ausblasstrahls zur Leistung der Zuströmung über die radiale Höhe ähnlich wie der Momentenbeiwert in Bild 5 aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der Anström-Mach-Zahl über die Kanalhöhe variiert, weichen die Werte von  $\eta_v$  für den Mittenschnitt und am Gehäuse kaum voneinander ab. Am Auslegungsbetriebspunkt überschreitet  $\eta_v$  lediglich an der Nabe den Wert von 1 und erzielt hier eine Reduktion der Verlustleistung, die den Aufwand für die Ausblasung (lokal) übersteigt. Bei Betrieb des Verdichters am Off-Design-Betriebspunkt übersteigen die Werte von  $\eta_v$  in allen drei Schnitten den Wert von 1 und es wird eine globale Reduktion der Verlustleistung erzielt, die den Aufwand für die Ausblasung deutlich überschreitet. Hierbei übertrifft der Wirkungsgrad der Strahlklappe an der Nabe die Wirkungsgrade an den übrigen Schnitten um fast das Dreifache. Das Maximum des Wirkungsgrades wird dabei in allen Fällen bei einer Ausblasrate von 0,5% erreicht.

Der statische Druck bezogen auf das Verhältnis der Leistung des Ausblasstrahls zur Leistung in der Zuströmung ist in Bild 8 über dem Verhältnis der Leistung des Ausblasstrahls zur Leistung in der Zuströmung (Strahlleistungsverhältnis) aufgetragen. Bei Betrieb des Verdichters am Auslegungsbetriebspunkt (oberes Diagramm in Bild 8) wirkt sich die Ausblasung nachteilig auf die Druckerhöhung des Stators aus. Lediglich an der Nabe bei einer Ausblasrate von 1,0% lässt sich durch Einsatz der Ausblasung eine Steigerung der Druckerhöhung erzielen. Dagegen bewirkt die Ausblasung beim Betrieb des Verdichters am Off-Design-Betriebspunkt in allen Schnitten eine deutliche Steigerung der statischen Druckerhöhung, siehe Bild 8, unteres Diagramm. Dabei zeigt die Zunahme der Druckerhöhung im gehäusenahen und im Mittenschnitt einen mehr als proportionalen Anstieg bezogen auf die Steigerung der Ausblasrate. Der immer noch starke Einfluss der Ausblasung auf den aerodynamisch höher belasteten nabennahen Schnitt fällt bei einer Ausblasrate von 1,0% nicht mehr ganz so deutlich aus. Dieses Verhalten deutet darauf, dass hier bereits eine Grenze der möglichen Verbesserung der statischen Druckerhöhung erreicht wird.

#### 4.1.2. Radiale Verteilung der Totaldruckverlustbeiwerte bei Auslegungs- und Off-Design-Betrieb

Um eine Erklärung für den gegenüber der gehäusenahen Region und dem Mittenschnitt außerordentlich positiven Einfluss der Strahlklappe auf den nabennahen Bereich des Stators zu finden, ist es hilfreich, die radiale Verteilung der Totaldruckverlustbeiwerte als Indikator für die Verteilung der aerodynamischen Belastung in dem vorliegenden Stator zu betrachten. In Bild 9 sind die Verteilungen der Totaldruckverlustbeiwerte des Strahlklappen-Stators bei Betrieb des Verdichters im Auslegungsbetriebspunkt (oberes Diagramm) und im Off-Design-Betriebspunkt (unteres Diagramm) gezeigt. Die Totaldruckverluste nehmen am Gehäuse und im Mittenschnitt bei Off-Design-Betrieb bereits ohne Ausblasung ab. Trotzdem, der Gesamtwirkungsgrad des

Verdichters nimmt im Off-Design-Betrieb ab. Guendogdu et al. [6] zeigten, dass die Nabenregion des Stators aerodynamisch deutlich höher belastet ist, als die Bereiche im Mittenschnitt oder am Gehäuse. Es resultieren deutlich höhere Totaldruckverluste in der Nabenregion beim Off-Design-Betrieb. Hieraus ergibt sich eine sehr deutliche Wirkung der Strahlklappe auf die Nabenregion. Die Strahlklappe führt hier zu einer effizienten Reduktion der negativen Effekte im Off-Design-Betrieb.

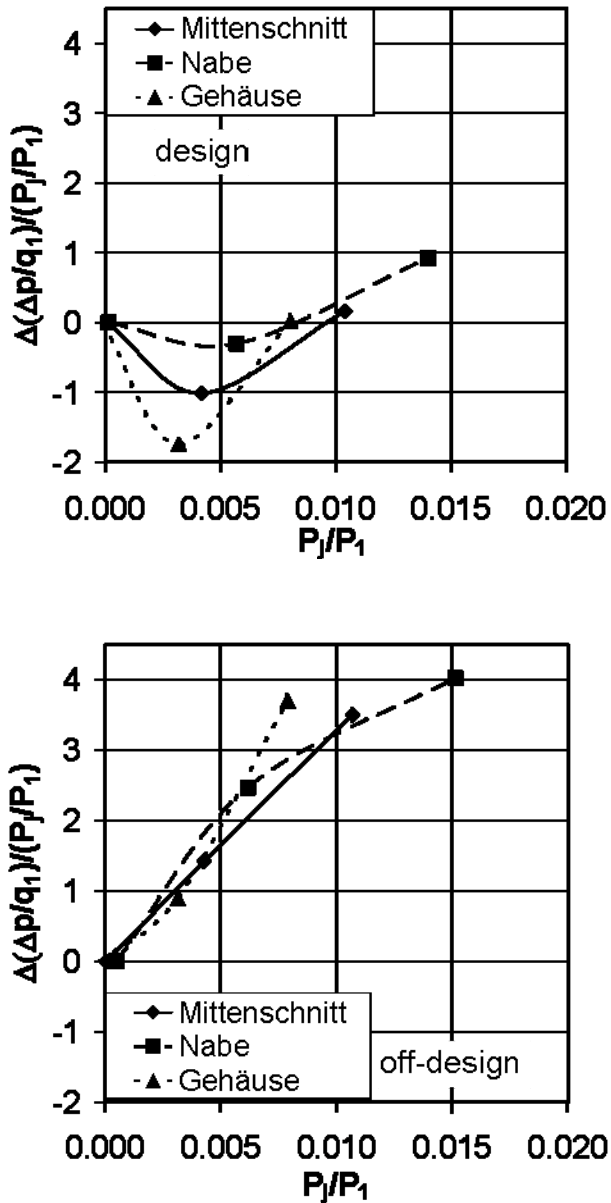


BILD 8. Statische Druckerhöhung bezogen auf das Strahlleistungsverhältnis aufgetragen über dem Strahlleistungsverhältnis bei Auslegungsbetrieb (oberes Diagramm) und bei Off-Design-Betrieb (unteres Diagramm)

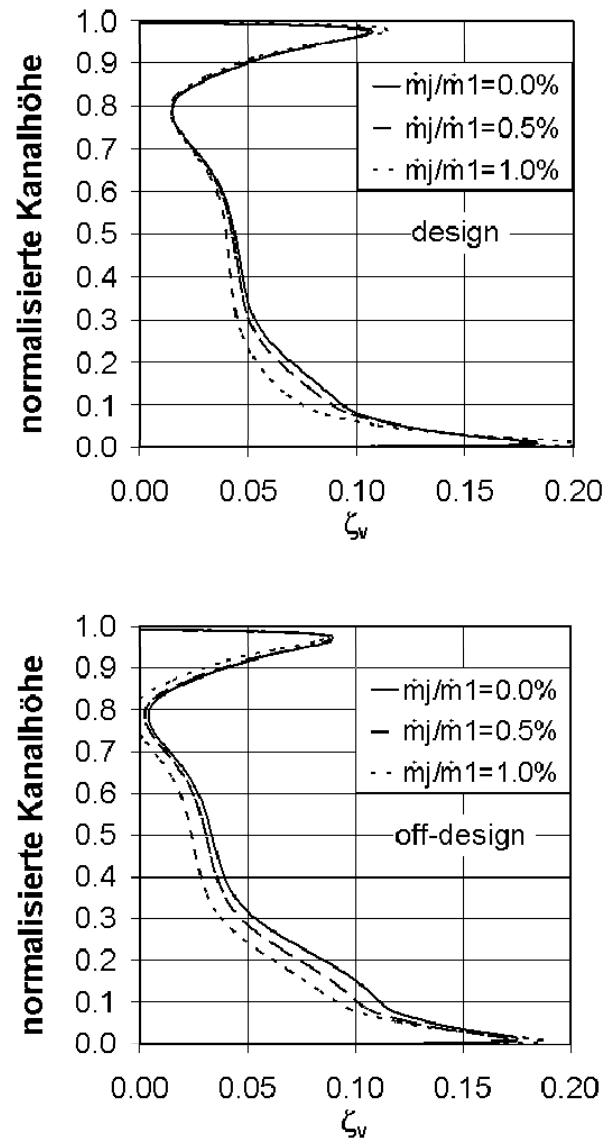


BILD 9. Radiale Verteilung der Totaldruckverlustbeiwerte am Auslegungsbetriebspunkt (oberes Diagramm) und am Off-Design-Betriebspunkt (unteres Diagramm)

#### 4.1.3. Visualisierung des Einflusses der Ausblasung auf stromab befindliche Verdichterstufen

Während das experimentelle Versuchsprogramm am Verdichter fortschreitet, soll im Rahmen aktueller und in naher Zukunft beginnender Untersuchungen auch eine Evaluation des Strahlklappen-Stators hinsichtlich seines Einflusses auf die übrigen, nicht aktiv beeinflussten Verdichterstufen erfolgen, um so die Vor- und Nachteile des Strahlklappen-Konzepts in einem mehrstufigen Verdichter zu bestimmen. Obwohl es nicht die Intention ist, in der vorliegenden Veröffentlichung Mehrstufeneffekte zu betrachten, so soll doch bereits ein Ausblick auf das von der Numerik vorhergesagte Verhalten der stromab des Strahlklappen-Stators

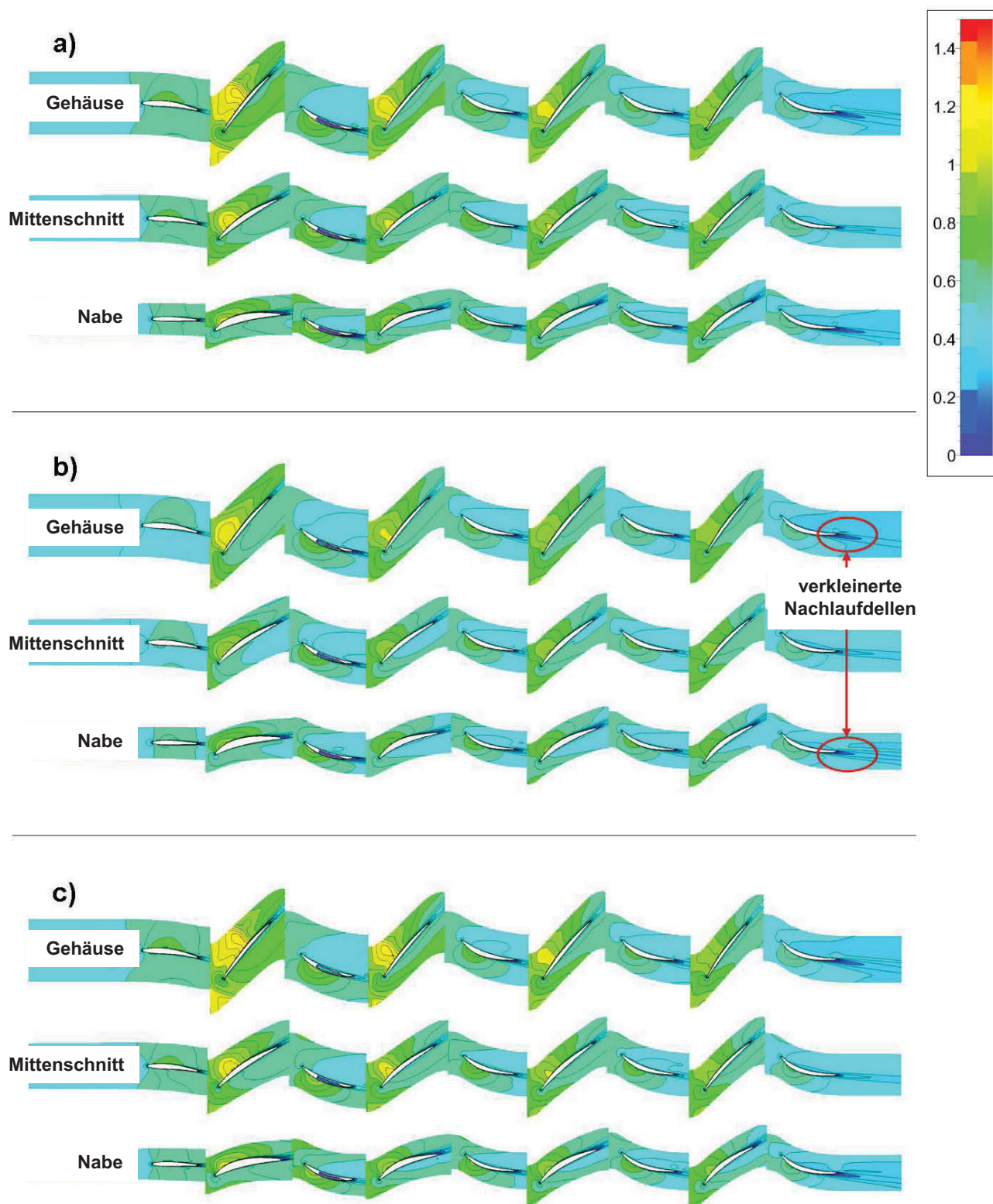


BILD 10. Relative Mach-Zahlen am Gehäuse, im Mittenschnitt und an der Nabe im Auslegungsbetrieb  
 a)  $\dot{m}_j / \dot{m}_1 = 0,0\%$  , b)  $\dot{m}_j / \dot{m}_1 = 0,5\%$  , c)  $\dot{m}_j / \dot{m}_1 = 1,0\%$

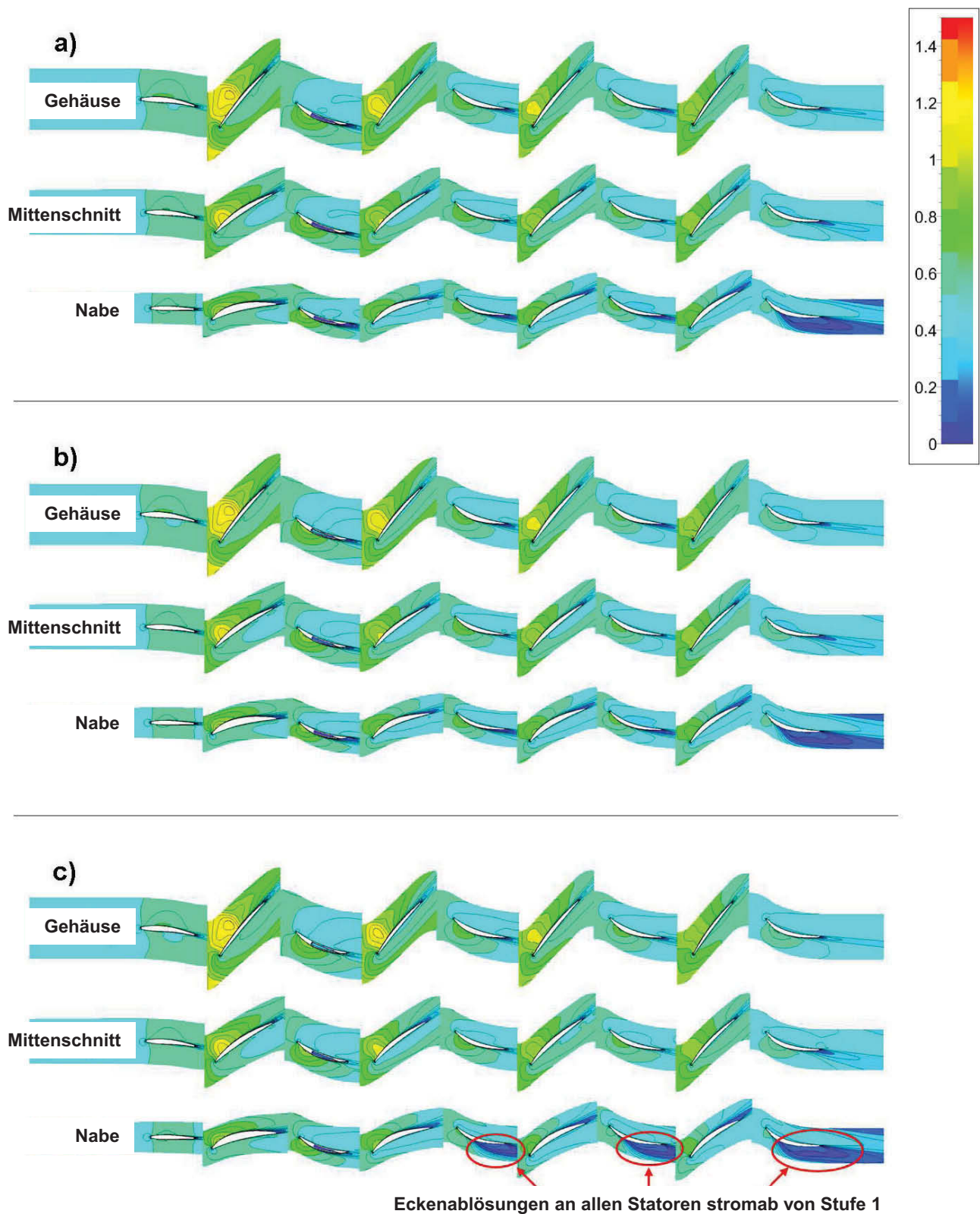


BILD 11. Relative Mach-Zahlen am Gehäuse, im Mittenschnitt und an der Nabe im Off-Design-Betrieb  
 a)  $\dot{m}_j / \dot{m}_1 = 0,0\%$  , b)  $\dot{m}_j / \dot{m}_1 = 0,5\%$  , c)  $\dot{m}_j / \dot{m}_1 = 1,0\%$



liegenden Verdichterstufen gegeben werden. Bei Betrachtung von Bild 10 fällt auf, dass, verglichen mit dem Off-Design-Betrieb, die Effekte im Auslegungsbetrieb klein, aber dennoch signifikant sind. Für den Auslegungsbetrieb ist aus Bild 10 zu entnehmen, dass mit der hohen Ausblasrate von 1,0%, genauso wie ohne Ausblasung die aerodynamische Belastung der hinteren Stufen ansteigt. Dies wird durch das Anwachsen der Nachläufe der Statoren, besonders des Nachlaufs vom Stator der vierten Stufe an Nabe und Gehäuse verdeutlicht. Im Off-Design-Betrieb (siehe Bild 11) unterstützt die Strahlklappe mit zunehmender Ausblasrate sogar die Ausbildung von Eckenablösungen in den Statoren der nachfolgenden Stufen. Die Strahlklappe ist also in der Lage, die Strömung in der ersten Stufe bei Betrieb des Verdichters am Off-Design-Betriebspunkt zu verbessern, allerdings auf Kosten der nachfolgenden Stufen. Diese werden durch den Einsatz der Ausblasung aerodynamisch überlastet. Um die negative Wirkung der Strahlklappe auf die hinteren Stufen zu kompensieren, erscheint der Einsatz von Bow- und Sweep-Beschaufelungen, wie sie Fischer et al. [11] und Braun et al. [12] beschreiben, vielversprechend.

## 5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die aktuelle Veröffentlichung bestätigt, basierend auf numerischen Ergebnissen, dass der in Guendogdu et al. [6] vorgestellte Einsatz der Strahlklappe in einem Hochgeschwindigkeits-Axialverdichter ein effektives Konzept zur Steigerung der aerodynamischen Belastung in Verdichter-Statoren darstellt. Die dargestellten Ergebnisse präzisieren das Bild.

Im Auslegungsbetrieb ist die Strahlklappe in der Lage, einen positiven Effekt auf den Nabenschnitt des Stators der ersten Verdichterstufe auszuüben. Unter Berücksichtigung des Auftretens von zusätzlichen Verlusten im Sekundärluftversorgungssystem des Strahlklappen-Statoren erscheint dieser positive Effekt in einer Gesamtbetrachtung allerdings in Frage gestellt. Dagegen zeigt die Strahlklappe im Off-Design-Betrieb ihr volles Potential. Der Stator der ersten Stufe wird in sämtlichen Schnitten positiv beeinflusst. Dabei kann die Strahlklappe die Verlustleistung in diesem Bereich um das bis zu Fünffache der Leistung, die für die aktive Strömungsbeeinflussung aufgebracht werden muss, reduzieren. Diese Verlustreduktion wird mit einem Sekundärmassenstrom erreicht, der 0,5% des Verdichtereintrittsmassenstroms beträgt. In dem vorgestellten mehrstufigen Axialverdichter werden die Statoren der stromab befindlichen Verdichterstufen jedoch durch den Einsatz der Strahlklappe aerodynamisch im Nabebereich überlastet. Dieser Effekt könnte durch den Einsatz von Bow- oder Sweep-Beschaufelungen in den hinteren Stufen kompensiert werden.

## 6. DANKSAGUNG

Die in dieser Veröffentlichung vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Förderkennzeichen SE 1023/12-01 geförderten Projekts erarbeitet. Die Voruntersuchungen der Strahlklappe erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Institut für

Strömungsmechanik der TU Braunschweig unter der Leitung von Prof. Radespiel [13].

## 7. LITERATUR

- [1] Lord, W.K., MacMartin, D.G., Tillman, T.G., 2000: *Flow control opportunities in gas turbine engines*. AIAA (Paper 2000-2234)
- [2] Nerger, D., Saathoff, H., Radespiel, R., 2007: *Experimental and numerical analysis of a highly loaded low aspect ratio compressor stator cascade*. Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Turbomachinery Conference (Paper A129)
- [3] Car, D., Kuprowicz, N.J., Estevadeordal, J., Zha, G., Copenhaver, W., 2004: *Stator diffusion enhancement using a re-circulating co-flowing steady jet*. Proceedings of the ASME Turbo Expo (Paper GT2004-53086)
- [4] Harff, M.R., Wolff, J.M., Copenhaver, W., 2004: *A CFD investigation of IGV flow vectoring by counter flow blowing*. Proceedings of the ASME Turbo Expo (Paper GT2004-53941)
- [5] Hill, H.E., Guillor, S.A., Ng, W.F., Vlachos, P.P., 2007: *2D parametric study using CFD of a circulation control inlet guide vane*. Proceedings of the ASME Turbo Expo (Paper GT2007-28058)
- [6] Guendogdu, Y., Vorreiter, A., Seume, J.R., 2008: *Design of a low solidity flow-controlled stator with Coanda surface in a high speed compressor*. Proceedings of the ASME Turbo Expo (Paper GT2008-51180)
- [7] Vorreiter, A., Fischer, S., Saathoff, H., Radespiel, R., Seume, J.R., 2010: *Numerical investigations of the efficiency of circulation control in a compressor stator*. Proceedings of the ASME Turbo Expo (Paper GT2010-22721)
- [8] Lietmeyer, C., Gündogdu, Y., Kleppa, O., Oehlert, K., Vorreiter, A., Seume, J., 2009: *Zukunftsperspektiven für die Hochtemperaturgasturbine*. VGB Powertech
- [9] Spalart, P.R., Allmaras, S.R., 1992: *A one-equation turbulence model for aerodynamic flows*.
- [10] Bae, J.W., Breuer, K.S., Tan, C.S., 2005: *Active control of tip clearance flow in axial compressors*. ASME Journal of Turbomachinery, 127, pp. 352-362
- [11] Fischer, A., Riess, W., Seume, J.R., 2004: *Performance of strongly bowed stators in a four-stage high-speed compressor*. ASME Journal of Turbomachinery, 126, pp. 333-338
- [12] Braun, M., Seume, J.R., 2006: *Forward sweep in a four-stage high-speed axial compressor*. Proceedings of the ASME Turbo Expo (Paper GT2006-90218)
- [13] Fischer, S., Saathoff, H., Radespiel, R., 2008: *Numerical and experimental investigation on a low-speed compressor cascade with circulation control*. Proceedings of the ASME Turbo Expo (Paper GT2008-50302)