

# Entwicklung und Konstruktion einer Vorrichtung zur aktiven Verdichterstabilisierung mittels Lufteinblasung am Turbostrahltriebwerk Larzac 04

F. Kern, S. Bindl, S. Brehm, R. Niehuis  
Institut für Strahlantriebe, Universität der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Deutschland  
E-Mail: f.kern@unibw.de

## ABSTRACT

Um mit einem Turboverdichter maximale Druckverhältnisse und Wirkungsgrade zu erzielen ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen, kann aktive Verdichterstabilisierung zum Einsatz kommen. Lufteinblasung im Schaufelspitzenbereich hat sich dafür als wirksame Stabilisierungsmaßnahme erwiesen und wird am Institut für Strahlantriebe seit vielen Jahren erforscht. Auf Basis der gesammelten Erfahrung wurde eine zweite Baureihe der am Triebwerk Larzac 04 installierten Einblasevorrichtung entwickelt. Dazu mussten zunächst die Anforderungen an das Gesamtsystem geklärt und der zu Verfügung stehende Bauraum analysiert werden. Anschließend erfolgte die Erarbeitung und Bewertung verschiedener Konzepte für den Ejektor, mit Hilfe dessen der Einblasemassenstrom gesteigert wird. Das gewählte Konzept einer ringförmigen Ejektordüse stellte besondere Anforderungen an die Zuführung der Luft, wofür wiederum verschiedene technische Lösungen erarbeitet und bewertet wurden. Anschließend wurde ein besonderes Augenmerk auf die aktive Stabilisierung gerichtet. Sehr kurze Vorwarnzeiten erfordern ein hochdynamisches Ventil, welches in möglichst geringen Abstand zum Verdichter positioniert werden muss. Da auf dem Markt erhältliche Ventile für diese Anwendung nicht in Frage kommen, wurde eine eigene Lösung entwickelt. Hierbei stand die Auswahl der Aktuatoren im Mittelpunkt, um die besonderen Anforderungen an die Dynamik des Systems zu erfüllen. Aus den entwickelten Lösungen wurde anschließend ein umfassendes CAD-Modell erarbeitet. Während der gesamten Konstruktionsphase genoss die Betriebssicherheit höchste Priorität. In diesem Zusammenhang wurden auch die Betriebspunkte ermittelt, bei denen eine Schwingungsanregung des Verdichters mit Resonanzfrequenz möglich wäre. Mit Hilfe der erarbeitenden Ergebnisse wird es möglich sein die Versuche zur aktiven Stabilisierung am Flugtriebwerk Larzac 04 weiter voranzubringen. Insbesondere die Nutzung des Ejektoreffekts und die verbesserte aerodynamische Ausgestaltung lassen höhere Massenströme bei geringerem Aufwand und reduzierten Verlusten erwarten.

## NOMENKLATUR

### Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design (Rechnerunterstützte Konstruktion)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungsmechanik)
DNAR	Detuner to Nozzle Area Ratio (Flächenverhältnis Mischrohr / Ejektordüse)
DND	Detuner to Nozzle Distance (Abstand Ejektordüse und Mischrohr)
EO	Erregerordnung
ISA	Institut für Strahlantriebe (UniBwM)

### Formelzeichen

$A$	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
$d$	Durchmesser	[m]
$h$	Höhe	[m]
$L$	Länge	[m]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/s]
$p$	Druck	[Pa]
$q$	Eintauchtiefe	[m]
$r$	Radius	[m]
$\beta$	Umlenkwinkel	[°]
$\vartheta$	Drosselgrad	[-]
$\mu$	Zumischverhältnis	[-]

## 1 EINLEITUNG

Eines der vorrangigen Ziele bei der Entwicklung neuer Verdichtungssysteme für Flugtriebwerke ist die Reduktion der Stufenzahl bei gleichzeitiger Steigerung des Gesamtdruckverhältnisses und des Wirkungsgrads. Durch diese Maßnahmen lassen sich Baulänge, Gewicht und Komplexität, sowie der spezifische Kraftstoffverbrauch reduzieren. Diesen Entwicklungen sind durch das Stabilitätsverhalten des Verdichters jedoch enge Grenzen gesetzt. Zwar ermöglichen neue Schaufelgeometrien eine höhere Arbeitsumsetzung im Fluid, eine übermäßig hohe Belastung führt jedoch zu Strömungsablösungen im Verdichter. Die entstehenden Instabilitätsphänomene können schwerwiegende Folgen für das Gesamttriebwerk haben und müssen daher unbedingt vermieden werden. Dies geschieht derzeit durch einen großen Sicherheitsabstand zwischen stationärer Betriebslinie und Stabilitätsgrenze, da dieser durch transienten Betrieb, Verschleiß, Fremdkörper und weitere äußere Einflüsse deutlich gemindert werden kann.

Jedoch lassen sich mit den meisten Verdichtern maximale Druckverhältnisse und Wirkungsgrade in der Nähe der Pumpgrenze erzielen. Es wird deutlich, dass hier ein Zielkonflikt zwischen Sicherheitsanforderung und Effizienz besteht, wodurch dieser attraktive Betriebsbereich ungenutzt bleibt. Am Institut für Strahlantriebe werden daher seit vielen Jahren Maßnahmen zur aktiven Verdichterstabilisierung untersucht. Ziel eines solchen Systems ist die aktive

Ausführung einer Gegenmaßnahme, sobald der Verdichter den instabilen Betriebsbereich erreicht. Dadurch ist ein dauerhafter Betrieb nahe der Pumpgrenze bei maximalen Wirkungsgrad und Druckverhältnis ohne Einschränkung der Sicherheit denkbar.

Als probates Mittel zur Stabilisierung des Verdichters hat sich die Einblasung von Luft im Schaufelspitzenbereich erwiesen [2]. Dazu wird verdichtete Luft aus dem Hochdruckverdichter des Triebwerks oder einer externen Quelle vor einem Verdichterroter eingeblassen. So kann die Strömung in diesem Bereich stabilisiert und die Ausbildung von Instabilitäten verzögert werden. Zusätzlich zu einer wirksamen Gegenmaßnahme wird für eine aktive Stabilisierung ein System zur Auslösung der Stabilisierungsmaßnahme benötigt. Dazu wurde am ISA ein Erkennungsalgorithmus für Verdichterininstabilitäten entwickelt und erfolgreich erprobt [2]. Außerdem wurde eine innovative Methode zur weiteren Verbesserung der Effizienz der Einblasung mit vielversprechendem Ergebnis getestet. Diese nutzt den Ejektoreffekt zur Steigerung des eingeblasenen Massenstroms [14].

Die beschriebenen Versuche werden am Zweiwellen-Turbostrahltriebwerk Larzac 04 durchgeführt. Dazu wird vor dem Niederdruckverdichter des Triebwerks ein Einblasegehäuse platziert. Das bestehende Gehäuse zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität aus, wodurch in vergangenen Arbeiten ein breites Spektrum an Parametern untersucht werden konnte. Dabei wurden vielversprechende Ergebnisse erzielt und wertvolle Erfahrungen gesammelt, welche die Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden.

Um die Forschung auf dem Gebiet der aktiven Verdichterstabilisierung weiter voranzubringen, wurde eine neue Vorrichtung zur Lufteinblasung entwickelt und konstruiert. Mit den erarbeiteten Ergebnissen soll ein höherer Einblasemassenstrom mit geringerem Aufwand und reduzierten Verlusten erreicht werden. Hierbei steht besonders die Untersuchung der Ejektoreinblasung im Fokus, deren Potential in Kombination mit aktiven Maßnahmen als besonders hoch einzuschätzen ist [14]. Im folgenden wird der zugrundeliegende Entwicklungsprozess von der Konzeptfindung bis zur detaillierten, konstruktiven Ausgestaltung der Bauteile beschrieben. Dabei werden nicht die Geometriemerkmale als solche beschrieben, sondern vielmehr die maßgebenden Funktionen, Randbedingungen, Auslegungsziele und Fertigungsaspekte diskutiert.

## 2 AKTIVE VERDICHTERSTABILISIERUNG

Aktive Stabilisierung des Verdichtungssystems ist sinnvoll, da so eine größtmögliche Effizienz des Gesamtsystems erreicht werden kann. Die aktive Maßnahme greift nur dann ein, wenn eine Instabilität unmittelbar bevorsteht. Im Normalbetrieb bleibt das Stabilisierungssystem inaktiv und hat im Vergleich zu vielen passiven Maßnahmen keine negativen Auswirkungen auf den Wirkungsgrad.

### 2.1 Vorläufer von Instabilitäten

Der stabile Betriebsbereich von Turboverdichtern wird in Richtung höherer Druckverhältnisse und kleinerer Massenströme durch die Pumpgrenze limitiert. Erreicht oder überschreitet der Betriebspunkt die Pumpgrenze, kommt es zu

den Instabilitätsphänomenen Rotating Stall oder Verdichterpumpen. Diesen Phänomenen gehen Vorläufer voraus, wobei nach Day [5] Long-Length Scale Perturbations oder Modalwellen und Short-Length Scale Perturbations oder Pressure Spikes unterschieden werden.

Ob ein Verdichter zu Modalwellen oder Spikes neigt, kann mit Hilfe des Zero Slope Kriteriums von Camp und Day [4] abgeschätzt werden. Betrachtet wird die Charakteristik des Verdichters. Ist die Steigung der Drehzahllinie an der Pumpgrenze negativ, neigt der Verdichter in diesem Betriebspunkt zur Ablösung durch Spikes. Ist die Steigung größer oder gleich Null entstehen bevorzugt Modalwellen.

Neben der Betrachtung der Charakteristik kann auch auf Grundlage geometrischer und aerodynamischer Daten abgeschätzt werden, welche Form von Instabilitätsvorläufern entsteht. Da Spikes an der Schaufelspitze entstehen ist nachvollziehbar, dass eine höhere aerodynamische Belastung des Profils in Gehäusenähe die Entstehung von Spikes begünstigt [4]. Es lässt sich ebenfalls beobachten, dass transsonisch arbeitende Verdichter zur Ablösung durch Spikes neigen. Es wird vermutet, dass die Interaktion zwischen Spaltwirbel und Verdichtungsstoß für dieses Verhalten verantwortlich ist. Die genauen Vorgänge sind noch nicht abschließend geklärt [1, 2, 16, 17]. Ein weiterer Parameter mit großem Einfluss auf die Instabilitätsvorläufer ist die Dimension des Radialspaltes. Große Spalthöhen führen tendenziell zu modaler Aktivität im Verdichter [13]. Zusammenfassend lässt sich somit erklären, dass die meisten modernen Verdichter mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten, hoher Schaufelbelastung und kleinen Radialspalten zur Ausbildung von Spikes neigen [2]. Auch im Niederdruckverdichter des Triebwerks Larzac 04 dominieren Instabilitätsvorläufer vom Typ Spike den Ablösevorgang.

### 2.2 Erkennung von Instabilitätsvorläufern

Zur Realisierung eines Systems zur aktiven Stabilisierung ist es unumgänglich, über einen zuverlässigen Erkennungsalgorithmus für Verdichterininstabilitäten zu verfügen. Eine reine Auswertung des Kennfelds ist nicht in allen Fällen zielführend, da es durch eine Störung zu einer Verschiebung der Pumpgrenze in Richtung der Betriebslinie kommen kann. Dies wird von einem Auswertalgorithmus, der mit dem ungestörten Kennfeld arbeitet, nicht erfasst.

Daher wurde am Institut für Strahlantriebe ein Algorithmus zur Erkennung von Instabilitätsvorläufern entwickelt. Mit diesem können über den gesamten Betriebsbereich eine hohe Zuverlässigkeit und gute Vorwarnzeiten erreicht werden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass Instabilitätsvorläufer von Typ Spike binnen weniger Rotorumdrehungen zu einer ausgeprägten Verdichterininstabilität führen. Für das Triebwerk Larzac 04 kommt hinzu, dass sich das Intervall zwischen der Entstehung des Spikes und der Ausbildung der Ablösung mit steigender Drehzahl verkürzt. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis der Auswertung für 90% Drehzahl. Im unteren Bereich wird das Signal der Druckaufnehmer dargestellt, im oberen Bereich das Ergebnis der Auswertung in Form eines Triggersignals. Es zeigt sich, dass in diesem Betriebspunkt etwa 6 Rotorumdrehungen verbleiben, um eine Gegenmaßnahme zu initiieren. Bei geringer Drehzahl ist die Vorwarnzeit deutlich länger [2, 15].

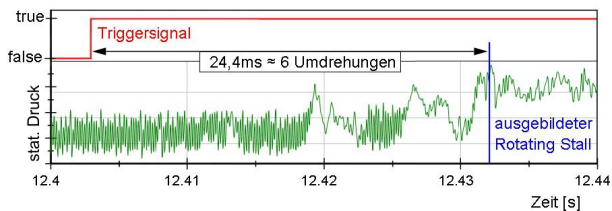


BILD 1: Vorwarnzeit des Stallerkennungsalgorithmus bei hoher Drehzahl [2]

### 2.3 Stabilisierung durch Einblasung

Luft einblasung im Schaufelspitzenbereich hat sich als wirkungsvolles Mittel zur Verdichterstabilisierung erwiesen und wird mit Hilfe eines Einblasegehäuses realisiert, das vor dem Niederdruckverdichter des Versuchsträgers angebracht ist. Es werden diverse Baureihen und Derivate der Gehäuse unterschieden, die jeweils mit einer Kurzbezeichnung der Art #.# benannt sind. Die erste Zahl bezeichnet die Baureihe, die zweite Zahl spezifiziert das Derivat.

Baureihe 1.1 des Gehäuses wurde von Leinhos [9] entworfen. Es verfügt über zehn Einblasekanäle, die durch Ventile einzeln angesteuert werden können. Die Einblasedüsen am Ende der Kanäle sind drehbar und ermöglichen den Betrieb mit unterschiedlichen Einblasewinkeln. Scheidler [13] führte die Untersuchungen unter Verwendung einer zweiten Generation Einblasedüsen mit verringertem Querschnitt fort. Das Einblasegehäuse 1.1 und die Düsen zweiter Generation wurden durch einen Schaden am Versuchsträger zerstört. Das Gehäuse der Baureihe 1.2 wurde von Bindl [2] als Derivat der Baureihe 1.1 entwickelt. Die Geometrie wurde strömungstechnisch überarbeitet und zusammen mit einer dritten Generation Einblasedüsen gefertigt. Stöbel et al. [14] entwickelten am Einblasegehäuse 1.2 die Ejektoreinblasung. Da am Gehäuse selbst keine Änderungen vorgenommen wurden, wird diese Variante mit dem Kürzel E kenntlich gemacht.

Auf Basis der Erfahrungen von Bindl [2] und Stöbel et al. [14] erfolgte die in dieser Arbeit beschriebene Neukonstruktion des Einblasegehäuses, welche als Baureihe 2.1 bezeichnet wird und das bestehende Gehäuse der Baureihe 1.2 / 1.2E ersetzen soll.

Im Folgenden sind die verschiedenen Baureihen der Einblasegehäuse zusammengefasst:

- Baureihe 1.1 (Leinhos [9] und Scheidler [13])
- Baureihe 1.2 (Bindl [2])
- Baureihe 1.2E (Stöbel et al. [14])
- Baureihe 2.1 (Inhalt dieser Publikation)

### 3 EJEKTOREFFEKT

Ein Freistrahler hat die Eigenschaft, ein Vielfaches seines eigenen Massenstroms an umliegendem Fluid zu beschleunigen. Dies wird als Ejektoreffekt bezeichnet und soll in der vorliegenden Veröffentlichung zur Erhöhung des Einblase-massenstroms genutzt werden.

Grundsätzlich ist ein Ejektor aus den vier Hauptkomponenten Primärkanal, Sekundärkanal, Ejektordüse und Mischrohr aufgebaut. Der Primärkanal führt den Primärmassestrom, der über die Ejektordüse mit dem Sekundärmassestrom vermischt wird. Während der Mischung wird über

die Scherschicht zwischen den Fluiden Impuls und Energie vom Primär- auf den Sekundärmassestrom übertragen. Die Wirksamkeit des Effekts wird dabei in erster Linie durch die Wahl der Geometrie bestimmt.

Damit eine zielgerichtete Auslegung des Ejektors erfolgen kann, muss zuvor jedoch der Zweck der Anwendung geklärt werden. Typische Anwendungsfälle in der industriellen Praxis sind Vakuumpumpen, Verdichter oder die Förderung sensibler Fluide. Schon diese Aufzählung zeigt die große Vielfalt der Anwendungen mit deutlich unterschiedlichen Auslegungszielen. Im vorliegenden Fall soll der Ejektor einen möglichst großen Massenstrom fördern, also ein möglichst hohes Zumischverhältnis  $\mu$  erreichen. Als Zumischverhältnis wird der Quotient aus Sekundär- und Primärmassestrom bezeichnet.

Obwohl Ejektoren bereits sehr lange eingesetzt werden, sind sie noch immer Teil aktueller Forschung. Gerade die Vorgänge innerhalb der Scherschicht sind noch nicht abschließend geklärt. Eine analytische Beschreibung der Mischungsvorgänge wird von Greitzer et al. [7] vorgeschlagen. Ansatz ist dabei, das Verhalten eines Ejektors durch seine Geometrie zu beschreiben.

Muth et al. [11] und Stöbel et al. [15] untersuchten einen Anwendungsfall numerisch und experimentell. Als maßgebliche Parameter wurden hierbei das Zumischverhältnis  $\mu$ , der Abstand  $DND$ , die Flächenverhältnisse  $DNAR$  und  $\vartheta$ , sowie der Primärstrahlvordruck  $p_P$  identifiziert.  $DND$  wird der Abstand zwischen Ejektordüse und Mischrohr genannt (Detuner to Nozzle Distance), während  $DNAR$  das Flächenverhältnis zwischen Ejektordüse und Mischrohr (Detuner to Nozzle Area Ratio) bezeichnet. Der Drosselgrad des Systems ist als Quotient von Eintritts- zu Austrittsfläche, also Fläche des Mischrohrs, definiert.

Aufgrund des Auslegungsziels und der Randbedingungen haben für diese Publikation die Einflüsse des  $DNAR$ , des Drosselgrads  $\vartheta$  und der Primärstrahlgeschwindigkeit auf das Zumischverhältnis  $\mu$  besondere Relevanz. Der Parameter  $DND$  ist für das gewählte Konzept nicht definiert. Abbildung 2 zeigt die experimentellen Ergebnisse von Stöbel et al. [15] im Vergleich zur analytischen Lösung nach Greitzer et al. [7]. Das Zumischverhältnis ist über dem Drosselgrad für verschiedene  $DNAR$  und Vordrücke des Primärmassestroms aufgetragen.

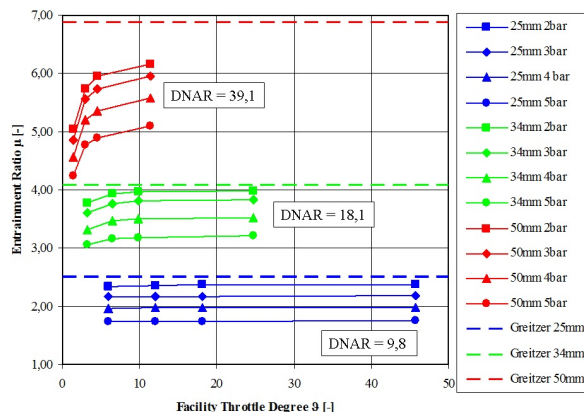


BILD 2: Einfluss von Drosselgrad und  $DNAR$  auf das Zumischverhältnis [15]

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass für ein maximales Zumischverhältnis ein möglichst großes  $DNAR$  bei geringer Androsselung (hoher Drosselgrad  $\vartheta$ ). Außerdem ist zu beobachten, dass die Drosselung besonders bei kleinen Eintrittsquerschnitten große Bedeutung für das Zumischverhältnis hat. Als weiterer wichtiger Parameter für den diskutierten Anwendungsfall wurde die Strahlgeschwindigkeit des Primärmassenstroms identifiziert. Als Maß für diese Geschwindigkeit kann der Vordruck herangezogen werden. Es zeigt sich, dass für alle betrachteten  $DNAR$  eine geringere Austrittsgeschwindigkeit eine höhere Zumischung bewirkt.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch beachtet werden, dass die Untersuchungen von Greitzer et al. [7], Muth et al. [11] und Stöbel et al. [15] jeweils an Ejektoren durchgeführt wurden, deren Düse und Mischrohr jeweils kreisförmigen Querschnitt besaßen. Wie in Kapitel 5.3 erörtert wird, kommt in diesem Anwendungsfall eine Ringdüse zum Einsatz. Daher muss die Übertragung der Ergebnisse mit der nötigen Umsicht erfolgen.

#### 4 COANDA-EFFEKT

Als Coanda-Effekt wird das Anlegen eines Freistrahls an eine feste Oberflächen bezeichnet. Abhängig von der Geometrie kann erreicht werden, dass die Strömung einer konvexen Kontur folgt [6]. Dieser Effekt soll an der Einblasedüse genutzt werden.

Bei der Betrachtung des Coanda-Effekts muss zwischen einer Strömung und einem Strahl unterschieden werden. Als Strömung wird hierbei die gleichmäßige Bewegung aller Fluidteilchen im Strömungsfeld verstanden. Als Strahl wird eine durch Scherschichten begrenzte, lokale Bewegung im Fluid bezeichnet. Im Gegensatz zu einer Strömung kann ein Strahl einer konvexen Wandkontur vergleichsweise lange folgen. Der reduzierte statische Druck im Strahl prägt sich über die Grenzschicht auf die Wand auf. In der entgegengesetzten Richtung ist der Strahl, im Gegensatz zur Strömung, von Fluid höheren statischen Drucks umgeben. Daher wird der Strahl an die Wandkontur herangedrückt [6].

Viele Untersuchungen zum Coanda-Effekt beschäftigen sich mit der Umströmung von Zylindern, wie zum Beispiel die Arbeiten von Fernholz [6] und Neuendorf et al. [12]. Diese haben hier besondere Relevanz, da nach Fernholz [6] bei ausreichender Breite des Versuchsaufbaus die Strömung als zweidimensional betrachtet werden darf. Als Vorgriff auf Kapitel 5.3 sei hier erwähnt, dass sich die Einblasedüse über den gesamten Umfang erstreckt. Damit wird deutlich, dass es sich beim vorliegenden Fall um ein weitestgehend zweidimensionales Problem handelt.

Abbildung 3 zeigt die charakteristischen Parameter des Systems. Es wirken sich die Düsenhöhe  $h$ , der Zylinderradius  $r$  und die Eintauchtiefe  $q$  auf das Anlegen der Strömung und den erreichbaren Umlenkwinkel  $\beta$  aus [6]. Dafür sind die Verhältnisse der Größen  $r/h$  und  $q/h$  entscheidend. Nach Fernholz [6] ist bei  $q/h = 0$  für Verhältnisse von  $r/h \geq 3$  ein Anlegen der Strömung zu erwarten. Mit einer größeren Eintauchtiefe kann auch bei kleineren Radien ein Anlegen beobachtet werden, wobei als Richtwert  $r/h \geq 1$  bei  $q/h = 1$  genannt wird. Wenn es zum Anlegen der Strömung an die Kontur kommt, können je nach Qualität der Oberfläche Umlenkwinkel zwischen  $160^\circ$  und  $220^\circ$  erreicht

werden [6, 12]. Dabei sinkt der erreichbare Umlenkwinkel für kleinere  $r/h$  Verhältnisse. Mason et al. [10] erreichten in ihren Versuchen mit einem Verhältnis von  $r/h = 0,5$  noch Umlenkwinkel von etwa  $\beta = 30^\circ$ . Aus den hier gewonnenen Erkenntnissen wurde die Kontur der Einblasedüse abgeleitet.

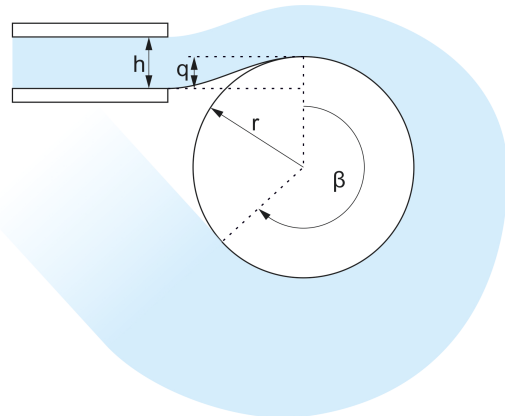


BILD 3: Prinzipskizze des Coanda-Effekts am Zylinder (Darstellung nach Fernholz [6])

#### 5 ENTWICKLUNG UND KONSTRUKTION DES EINBLASEGEHÄUSES DER BAUREIHE 2

Nach der Klärung der Anforderungen an das Einblasegehäuse der Baureihe 2 wird der verfügbare Bauraum analysiert. Anschließend wird das gewählte Konzept erläutert und die verschiedenen Baugruppen festgelegt. Diese werden danach der Strömungsrichtung folgend im Detail erläutert. Abschließend erfolgt eine Betrachtung des Gesamtsystems.

##### 5.1 Anforderungen

Zu Beginn der Entwicklung müssen die zentralen Anforderungen an das Endprodukt geklärt werden. Sie resultieren aus grundsätzlichen Überlegungen und den Erfahrungen mit vorherigen Konstruktionen.

Oberste Priorität genießt die Forderung der Betriebssicherheit. Um Triebwerk, Prüfstand und Messtechnik vor den schwerwiegenden Folgen eines Triebwerksschadens zu schützen, muss gewährleistet werden, dass kein Bauteil des Gehäuses in einen der Strömungskanäle und somit ins Triebwerk gelangen kann. Dies muss selbst im Fehlerfall sichergestellt sein und bedeutet beispielsweise, dass Schrauben, falls sie im Strömungskanal angebracht werden, selbst beim vollständigen Lösen der Verbindung, nicht in das Triebwerk gelangen dürfen.

Eine weitere Kernforderung an das Einblasegehäuse der Baureihe 2 stellt die Nutzung des Ejektoreffekts dar. Diesbezüglich ist auch auf die unkomplizierte und präzise Messbarkeit aller zugeführten Massenströme zu achten, da diese zur Bewertung des Ejektors herangezogen werden.

Weiterhin soll das Gehäuse für möglichst viele Versuche nutzbar sein. Eine Parameterstudie mit konventioneller Einblasung soll ebenso möglich sein wie die aktive Stabilisierung und die Ejektoreinblasung. Daher ist eine möglichst flexible Konstruktion vorzusehen. Dazu soll das Gehäuse in mehrere, leicht austauschbare Baugruppen

zerlegbar sein. Zusätzliche Flexibilität soll durch einen stufenlos einstellbaren Düsenquerschnitt der Einblasedüse geschaffen werden. Eine Einblasedüse, die sowohl über einen Verstellquerschnitt als auch einen verstellbaren Einblasewinkel verfügt, erscheint allerdings konstruktiv nur schwer umsetzbar. Die Ergebnisse von Kefalakis et al. [8] zeigten, dass mit einer winkligen Einblasung nur geringfügige Verbesserungen im Vergleich zur axialen Einblasung erreicht werden können. Daher wird zugunsten des verstellbaren Querschnitts auf einen einstellbaren Düsenwinkel verzichtet und nur in axialer Richtung eingeblasen.

Bei einer Untersuchung des Einblasegehäuses 1.2 wurden von Bindl et al. [2, 3] verschiedene Verbesserungspotentiale der Strömungsführung identifiziert. Die starke Umleitung in den Einblasekanälen hat erhöhte Verluste im Einblasesystem selbst zur Folge. Die Einblasekanäle ihrerseits ragen in den Hauptströmungskanal hinein und verursachen so eine Anströmstörung, die sich vor allem bei abgeschalteter Einblasung negativ auf das Stabilitätsverhalten des Verdichters auswirkt. Daher soll die Strömung im neuen Einblasegehäuse sanfter umgelenkt und durch noninversive Einblasekanäle unter Nutzung des Coanda-Effekts eingeblasen werden.

Eine Hauptanwendung des Einblasegehäuses ist die aktive Verdichterstabilisierung. Bedingt durch die kurzen Vorwarnzeiten bei hohen Laststufen, ist hierbei die Lauflänge der Strömung zwischen Ventil und Verdichter von entscheidender Bedeutung. Außerdem soll der Einblasemassenstrom möglichst wenig mit der Hauptströmung interagieren. Daher sollen sowohl die Entfernungen zwischen Ventil und Verdichter, als auch zwischen Einblasedüse und Verdichter minimiert werden.

Abschließend muss hier noch die Forderung an die Einhaltung der Bauraumgrenzen Erwähnung finden. Diese erscheint zwar trivial, schränkt jedoch die konstruktive Freiheit erheblich ein. Insbesondere in direkter Nähe zum Verdichter ist die maximale radiale Ausdehnung des Gehäuses stark eingeschränkt. Der zur Verfügung stehende Bauraum wird in Kapitel 5.2 detailliert betrachtet.

Zusammenfassend lauten die Anforderungen:

- Betriebssicherheit
- Nutzung des Ejektoreffekts
- Messbarkeit aller Massenströme
- Hohe Flexibilität
- Stufenlos einstellbarer Düsenquerschnitt
- Axiale Einblasung
- Sanfte Strömungsführung
- Noninversive Bauweise
- Minimaler Abstand zwischen Ventilen und Verdichtereintrittsebene
- Einhaltung der Bauraumgrenzen

## 5.2 Bauraum

Das Triebwerk Larzac 04 bietet gute Voraussetzungen für die Montage des Einblasegehäuses, welches in möglichst geringer Entfernung zum Niederdruckverdichter positioniert werden soll. Dem kommt die Bauweise des Triebwerksgehäuses entgegen. Es ist in das Niederdruckverdichtergehäuse und das sogenannte Zwischengehäuse gegliedert. Abbildung 4 zeigt den Niederdruckverdichter des Larzac 04 und die beschriebene Bauweise mit gelb hervorgehobenem Zwischengehäuse. Dieses kann ohne Beeinflussung

des Triebwerks entfernt werden. In vielen anderen Turbostrahltriebwerken bilden Zwischengehäuse, Gehäuse und Statorn des Niederdruckverdichters ein integrales Bauteil und lassen so keine einfache Integration zu [2].

Durch das demontierbare Zwischengehäuse ist eine Positionierung des Einblasegehäuses direkt vor dem Niederdruckverdichter möglich. In diesem Bereich ist jedoch der Bauraum in radialer Richtung stark eingeschränkt. Wie in Abbildung 4 dargestellt, sind über den Umfang verteilt verschiedene Anbaugeräte angebracht. Dazu gehören Triebwerksregler, Startergenerator sowie Teile des Ölsystems und der Treibstoffzufuhr. Mit Ausnahme des Reglers können diese Baugruppen nicht entfernt werden, da sie fest mit dem Geräteträger verbunden sind.

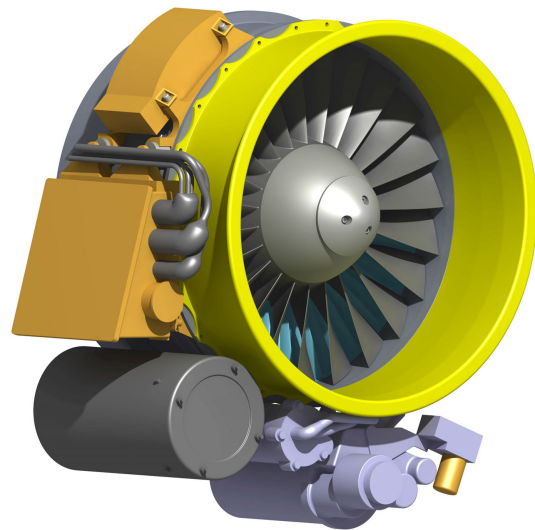


BILD 4: Larzac 04 mit Anbaugeräten und Zwischengehäuse (gelb)

Im gewöhnlichen Aufbau bildet die Vorderkante des Zwischengehäuses die Schnittstelle zum Triebwerkeinlauf, der auf diese Geometrie angepasst ist. Um den Einlauf weiterhin nutzen zu können, muss das Einblasegehäuse an der Vorderseite genau diese Schnittstelle aufweisen. Daher wird das Zwischengehäuse demontiert und soll stromauf des Einblasegehäuses wieder angebracht werden.

Eine weitere Bedingung für den Einbau des Einblasegehäuses ist die Schwingungsentkoppelung vom Triebwerk. Eine feste Verschraubung mit dem Niederdruckverdichtergehäuse ist damit ausgeschlossen. Es kommt eine Gummidichtung zum Einsatz, die bereits für die Baureihe 1 des Gehäuses eingesetzt wurde. Diese besteht aus dem Dichtungsträger, der mit dem Triebwerk verschraubt ist und dem darin platzierten Dichtring, an den das Einblasegehäuse von vorne herangeschoben wird.

Das Einblasegehäuse soll weitestgehend umfangssymmetrisch aufgebaut sein. Daher ist es zweckmäßig die Bauraumgrenze auf den Gesamtumfang zu beziehen. Folglich wird die maximale, über den gesamten Umfang verfügbare, radiale Ausdehnung ermittelt. Abbildung 5 zeigt eine Darstellung des resultierenden Bauraums. Darin ist die genannte umfangsbezogene Begrenzung grün hervorgehoben. Die Innenkontur des Einblasegehäuses ist rot dargestellt.

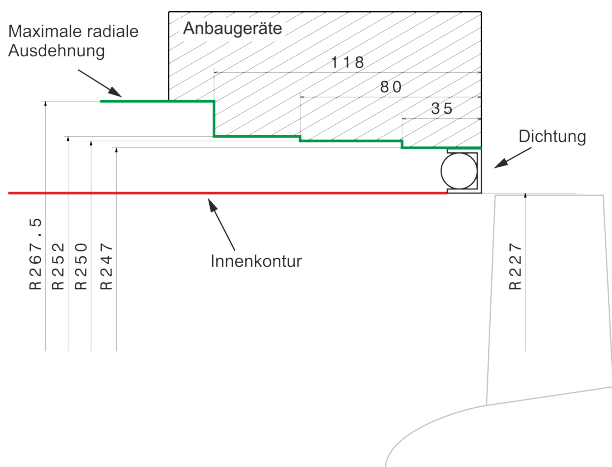


BILD 5: Verfügbarer Bauraum

### 5.3 Konzept

Nach der Klärung der Anforderungen und Randbedingungen wurden verschiedene Konzepte entwickelt und hinsichtlich Anforderungen, Umsetzbarkeit und erwarteter Leistungsfähigkeit bewertet. Auf eine detaillierte Beschreibung des Konzeptfindungsprozesses wird an dieser Stelle jedoch verzichtet und lediglich das in Abbildung 6 gezeigte Ergebnis vorgestellt.

Im Mittelpunkt steht der Ejektor als maßgebendes Element für Bauform und Abmaße des Einblasegehäuses. Über die Ejektordüse wird der Primärmassenstrom in die Mischstrecke geführt und fördert durch den Impuls- und Energieübertrag in der Scherschicht den Sekundärmassenstrom. Wie bereits beschrieben, ist der verfügbare Bauraum in radialer Richtung stark eingeschränkt. Da die Leistungsfähigkeit des Ejektors bezüglich des Zumischverhältnisses stark vom Verhältnis der Mischrohrfläche zur Ejektordüsenfläche  $DNAR$  abhängt, entsteht hier ein Zielkonflikt zur Bauraumrandbedingung. Mit diskreten Einblasekanälen, wie im Einblasegehäuse 1.2E könnte das angestrebte Zumischverhältnis voraussichtlich nicht erreicht werden. Daher kommt eine umfangssymmetrische, ringförmige Düse zum Einsatz.

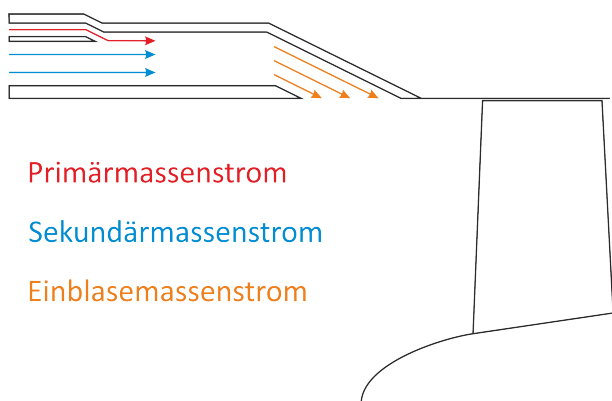


BILD 6: Konzept ringförmige Ejektordüse

Die Ringdüse bietet im Vergleich zu diskreten Düsen gleicher Fläche entscheidende Vorteile. Wie bereits angedeutet, lässt sich ein weitaus günstigeres Flächenverhältnis  $DNAR$  erreichen, da die umlaufende Mischstrecke

eine weitaus größere Fläche besitzt als diskrete Einblasekanäle. Außerdem wird eine deutlich größere Scherschichtfläche erreicht, obwohl eine Seite des Primärstrahls an der Wand anliegt. Damit darf ein großes Zumischverhältnis bei vergleichsweise kurzer Mischstreckenlänge erwartet werden.

Eine denkbare Variation des Konzepts wäre, die Ejektordüse auf der Innenseite anzubringen. Ein Strahl auf der Innenseite des Mischrohrs könnte jedoch in manchen Betriebszuständen innerhalb der Einblasedüse ablösen und zu einer Verblockung des Strömungskanals führen. Daher wird diese Variation verworfen.

Durch die ringförmige Ejektordüse entfällt das Konzept der diskreten Einblasekanäle, da kontinuierlich über den gesamten Umfang eingeblasen wird. Die Ergebnisse von Kefalakis et al. [8] zeigen, dass sich mit einer erhöhten Anzahl von Einblasestellen die Effizienz der Einblasung verbessert. Die kontinuierliche Einblasung darf als eine unendlich große Anzahl von Einblasedüsen betrachtet werden. Daher wird von diesem Konzept eine verbesserte Effizienz im Vergleich zu Lösungen mit diskreten Einblasestellen erwartet.

Nach dem Konzept für den Ejektor müssen abschließend nun die verschiedenen Baugruppen festgelegt werden. Dabei steht die Forderung nach Flexibilität im Mittelpunkt. Abbildung 7 zeigt eine Prinzipskizze des Einblasegehäuses in der Einbauposition vor dem Niederdruckverdichter des Larzac 04. Es ist in vier Hauptbaugruppen gegliedert. Primär- und Sekundärmassenstrom werden über ein Zuführgehäuse vom Kreisquerschnitt der angeschlossenen Rohre auf den Ringquerschnitt des Ejektors überführt. Um zukünftige Optimierungen des Ejektors zu ermöglichen, werden Zuführgehäuse und Ejektor nicht als integrales Bauteil ausgeführt. Der Ejektor wird in einer separaten Baugruppe, Ejektorgehäuse genannt, untergebracht. Vorläufige numerische Berechnungen zeigten die Notwendigkeit einer langen Mischstrecke auf. Um auch hier spätere Optimierungen zuzulassen, wird die Mischrohrverlängerung als weitere Baugruppe hinzugefügt. Über das Düsengehäuse wird die Luft schließlich vor dem Verdichter in die Hauptströmung eingeblasen. Das Düsengehäuse enthält auch die Mechanik zur Veränderung des Düsenquerschnitts.

Die genannten vier Hauptbaugruppen werden in den nächsten Kapiteln detailliert beschrieben.

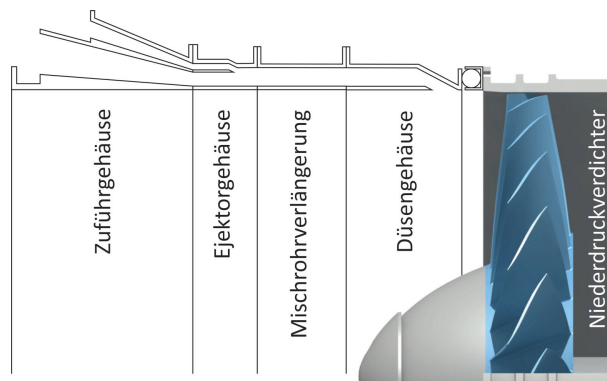


BILD 7: Prinzipskizze

### 5.4 Zuführgehäuse

Die Bereitstellung sowohl der Primär-, als auch der Sekundärluft erfolgt über Rohre und Schläuche. Dies ist nicht nur den technischen Randbedingungen geschuldet, sondern dient auch zur präzisen Bestimmung der Massenströme unter vertretbarem Aufwand. Dem Grundkonzept aus Abschnitt 5.3 folgend, verfügt der Ejektor über eine Düse mit Ringquerschnitt, die sich nahezu über den gesamten Umfang erstreckt. Dadurch definiert sich die Aufgabe des Zuführgehäuses. Sowohl Primär-, als auch Sekundärmassestrom müssen von jeweils 12 Kreisquerschnitten der Zuleitungen mit möglichst geringen Verlusten auf einen Ringquerschnitt überführt werden. Die Abströmung aus dem Zuführgehäuse sollte dabei möglichst homogen und drallfrei erfolgen.

Dazu kommt ein System aus drei ineinander liegenden Ringen zum Einsatz, welches in Abbildung 8 vereinfacht dargestellt ist. Die Ringe werden ihrer Lage nach als Innen-, Zwischen- und Außenring bezeichnet und bilden mit den eingebrachten Konturen den Primär- und Sekundärkanal. Der Anschluss an die Luftzuführung wird über die orange eingefärbten Adapterstücke hergestellt, von denen jeweils nur eines gezeigt wird.

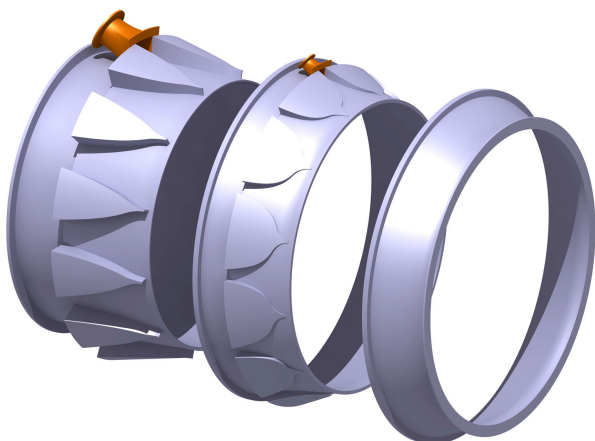


BILD 8: Vereinfachte Darstellung des Zuführgehäuses

Die Strömungskanäle des Zuführgehäuses sind prinzipiell gleich aufgebaut und bestehen aus vier Abschnitten, die zur Vermeidung von Ablösungen gezielt konvergent oder flächengleich ausgelegt wurden und in Abbildung 9 dargestellt sind. Zunächst wird die Strömung von einem Kreisquerschnitt mittels einer leicht konvergenten Freiformkontur auf einen Querschnitt in Ringsegmentform überführt, dessen Bogenlänge etwa der seiner Höhe entspricht. Somit ergibt sich am Austritt aus der Freiformkontur eine quasi-quadratische Form. Dies ist wichtig, da sich somit ein gut kontrollierbarer Verlauf der Querschnittsfläche innerhalb der Freiformfläche erreichen lässt. Im weiteren Verlauf folgt der analytisch flächengleich ausgelegte Abschnitt des Gehäuses, in dessen Verlauf das Ringsegment breiter und flacher wird. Im Bereich des Übergangskreises wird die Strömung axial ausgerichtet, wodurch sich wiederum ein konvergenter Abschnitt ergibt. Der Übergangskreis endet in einem Ringsegment, dessen Segmentbreite dem angestrebten Anteil des vollständigen Rings entspricht, in diesem Fall 30°. Zusammen mit den 12 anderen Kanälen ergibt sich schließlich ein vollständiger Ring.

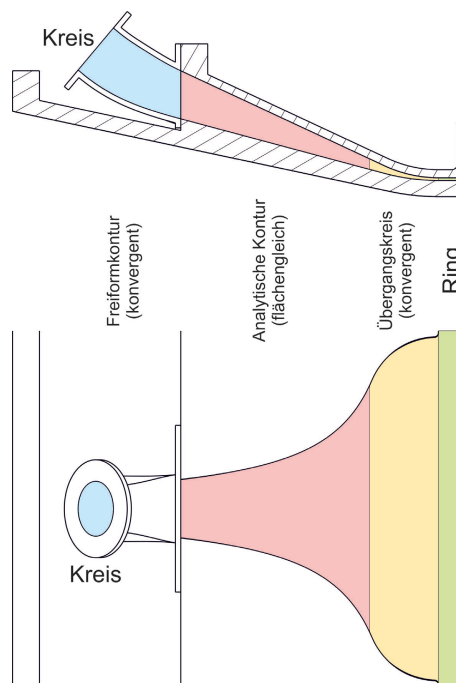


BILD 9: Flächenverlauf im Zuführgehäuse

Die beschriebene Auslegung der Kanengeometrien findet sowohl für den Primär- als auch den Sekundärkanal Anwendung. Zur Bestätigung der analytischen Auslegung wurde eine vorläufige CFD Analyse durchgeführt. Die dabei vorgegebenen Massenströme wurden bei der Vorauslegung des Ejektors ermittelt. Das Ergebnis der Studie ist in Abbildung 10 für den Primärkanal dargestellt. Bei Betrachtung der Stromlinien fällt auf, dass die Strömung der Kontur gut folgen kann und keine Ablösungen zu erkennen sind. Auch die erwünschte Gleichförmigkeit der Abströmung ist zufriedenstellend.

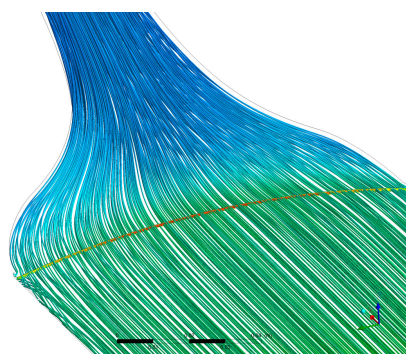


BILD 10: Numerische Untersuchung des Zuführgehäuses

### 5.5 Ejektor

Die Luft aus dem Primär- und Sekundärkanal des Zuführgehäuses mündet in den Ejektor. Dieser entlässt den Primärmassestrom durch die Ejektordüse in die Mischstrecke wodurch der Sekundärmassestrom gefördert wird. Um die Zugänglichkeit der Ejektordüse zu gewährleisten und eine maximale Flexibilität sicherzustellen, wird der Ejektor in zwei separaten Baugruppen Ejektorgehäuse und Mischrohrverlängerung ausgeführt, die jedoch gemeinsam ausgelegt

werden. Ziel ist hierbei die Bestimmung der charakteristischen Parameter des Systems, welche in Abbildung 11 skizziert sind.

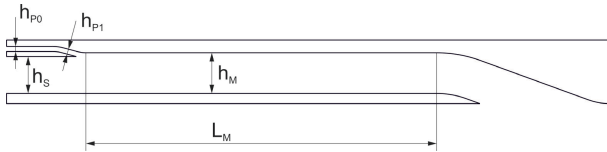


BILD 11: Charakteristische Parameter des Ejektors

Zunächst wird die Höhe des Sekundärkanals  $h_S$  festgelegt. Stöbel et al. [15] zeigen, dass ein großer Drosselgrad eine hohe Zumischung begünstigt. Diesen Ergebnissen entsprechend, wäre ein möglichst großer Querschnitt hier zweckmäßig. Entscheidend ist jedoch, dass auch stromauf des Ejektors keine weitere Drosselstelle liegt, also der Querschnitt etwa konstant bleibt. Damit werden die konstruktiven Einschränkungen deutlich. Hinzu kommt, dass keine Erweiterung des Querschnitts nach Innen möglich ist, da dies die Bauraumgrenzen verletzen würde. Aus diesen Gründen wird für die Höhe des Sekundärkanals  $h_S = h_M$  gewählt.

Die Höhe des Primärkanals wird analytisch bestimmt, sodass eine Machzahl  $Ma > 0,5$  im Kanal nicht überschritten wird. Die Auslegung des Düsenquerschnitts  $h_{P1}$  und der Mischrohrlänge  $L_M$  gestaltet sich deutlich komplexer. Der statische Druck in der Düse ist von der Strömungsgeschwindigkeit der Sekundärluft abhängig. Diese wird vom Ejektoreffekt und vom Lastzustand des Triebwerks bestimmt, da alleine durch den Unterdruck vor dem Verdichter bereits ein Massenstrom im Sekundärkanal gefördert wird. Es wird deutlich, dass sich eine analytische Auslegung der Parameter schwierig gestaltet. Daher wurden diese in einer Parameterstudie mit Hilfe einer numerischen Strömungssimulation anhand einer vorläufigen Kontur bestimmt.

## 5.6 Düsengehäuse

Grundsätzlich wird für das Einblasegehäuse eine Verstelldüse gefordert. Für das gewählte Gesamtkonzept bietet sich ein Ring an, der in axialer Richtung verschoben werden kann. Damit ergibt sich der Aufbau des Düsengehäuses aus Außenring, Innenring und Verstellring. Der verstellbare Ring soll aus Sicherheitsgründen im maximal ausgefahrenen Zustand die Düse komplett verschließen, wodurch der Verstellring nicht in das Triebwerk gelangen kann. Die verschließbare Düse bietet weiterhin den Vorteil einer minimalen Strömungsbeeinflussung durch das Gehäuse bei abgeschalteter Einblasung.

Wird die beschriebene Düse mit einem Aktuator verstellt, so lässt sich der Düsenquerschnitt während des Betriebs verändern. Dies vereinfacht nicht nur die Versuchsdurchführung, sondern ermöglicht auch ein Anpassen der Düse auf den Betriebszustand des Triebwerks. Mit der vollständig verstell- und verschließbaren Düse liegt der Gedanke nahe, den beschriebenen Mechanismus gleichzeitig als Ventil zu nutzen. So lässt sich die geforderte minimale Entfernung zwischen Ventil und Verdichter realisieren. Das Funktionsprinzip der verschließbaren Düse ist in Abbildung 12 im geöffneten Zustand dargestellt.

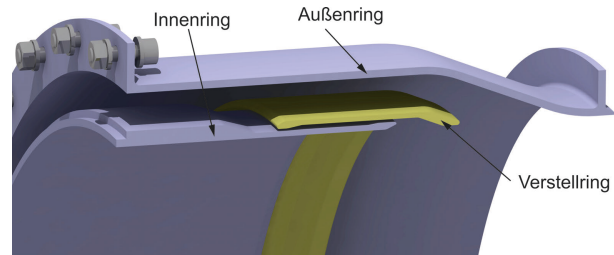


BILD 12: Verstell- und verschließbare Einblasedüse

Für die verstell- und verschließbare Düse muss nun ein passendes Antriebssystem gefunden werden. Zentrale Anforderung an das System ist die Erreichung der hohen Dynamik für eine Nutzung des Einblasegehäuses zur aktiven Verdichterstabilisierung. Neben der Agilität des Aktuators ist auch die Summe der Reaktionszeiten aller Komponenten ein entscheidendes Kriterium. Es müssen mehrere Aktuatoren zum Einsatz kommen, da diese nur auf dem Umfang des Einblasegehäuses positioniert werden können. Eine sicherheitskritische Anforderung ist somit der synchrone Lauf der Aktuatoren, damit es nicht zu einem Verkanten des Verstellrings kommen kann. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen kommt als Ergebnis eines Top-Down Auswahlverfahrens das Antriebssystem LinMot® der Firma NTI zum Einsatz. Dieses ist in Abbildung 13 dargestellt.



BILD 13: Aktuator (© NTI)

Für die Auslegung der Düsenkontur ist die Forderung nach einer noninversiven Einblasedüse maßgeblich. Da die Strömung in axialer Richtung aus dem Mischrohr austritt, muss sie in der Düse zunächst nach innen umgelenkt und anschließend wieder axial ausgerichtet werden. Dies soll durch die Nutzung des Coanda-Effekts erreicht werden. Dafür ist die Gestaltung der Düsenkontur entscheidend. In Kapitel 4 wurden die charakteristischen Geometriekennwerte für den Coanda-Effekt erörtert, die sich wie in Abbildung 14 dargestellt gut auf die Düsenkontur übertragen lassen. Wie bereits erläutert, sind aufgrund der zweidimensionalen Strömung in der umfangssymmetrischen Einblasedüse auch die zitierten Versuchsergebnisse auf diesen Anwendungsfall gut übertragbar.

Per Definition der noninversiven Einblasedüse ist das Verhältnis  $q/h > 1$ . Mit dieser Eintauchtiefe kann nach Fernholz für alle Verhältnisse von  $r/h \geq 1$  mit einem Anlegen der Strömung an die Kontur gerechnet werden. Der Verrundungsradius wird so gewählt, dass dieses Kriterium selbst bei maximal geöffneter Düse erfüllt ist.

Mit der anliegenden Strömung könnten nach Fernholz [6] und Neuendorf et al. [12] Umlenkwinkel zwischen  $160^\circ$  und  $220^\circ$  erreicht werden. Mason et al. [10] erreichten in ihren Versuchen mit einem Verhältnis von  $r/h = 0,5$  noch Umlenkwinkel von etwa  $30^\circ$ . Da in der vorliegenden Publikation lediglich Umlenkwinkel von  $\beta \approx 25^\circ$  benötigt werden



und ein Verhältnis  $r/h > 1$  gewählt wurde, darf jederzeit mit einer ablösefreien Strömung in der Düse gerechnet werden. Zusätzlich wird das Anlegen der Strömung bei laufendem Triebwerk durch die Bewegung des Hauptmassenstroms unterstützt.

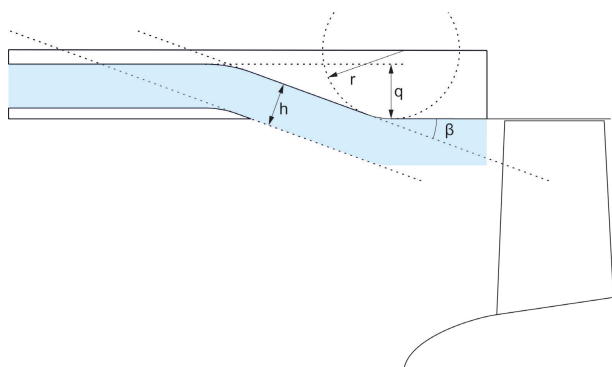


BILD 14: Prinzipskizze des Coanda-Effekts in der Düse

### 5.7 Gesamtsystem

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Entwicklung und Konstruktion der Subsysteme beschrieben. Abschließend wird das Einblasegehäuse als Gesamtsystem betrachtet, wobei dies Konstruktionsaspekte betrifft, welche sich nicht eindeutig einer Unterbaugruppe zuordnen lassen. Abbildung 15 zeigt die zuvor diskutierten Komponenten Zuführgehäuse, Ejektorgehäuse, Mischrohrverlängerung und Düsengehäuse als montierte Baugruppe. Zur Montage vor dem Triebwerk benötigt das System weiterhin eine Aufhängung, die ebenfalls im Bild dargestellt ist.

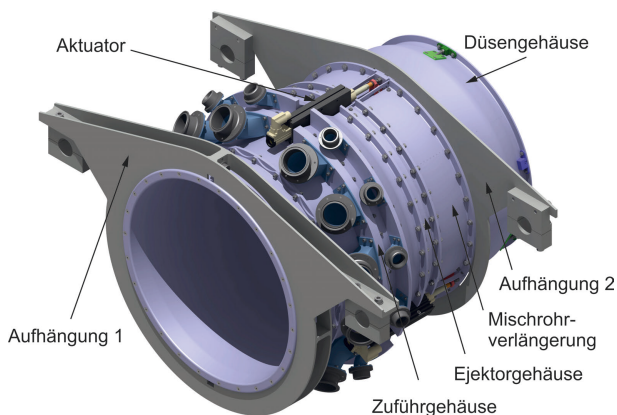


BILD 15: Gesamtansicht des Einblasegehäuses

Zur Auslegung des Zuführgehäuses und des Ejektors wurden Strömungssimulationen an den jeweiligen Subsystemen durchgeführt. Die Interaktion der einzelnen Unterbaugruppen wurde ebenfalls untersucht. Insgesamt ist das Ergebnis der Simulation voll zufriedenstellend. Neben einem hohen Zumischverhältnis darf vom Einblasegehäuse der Baureihe 2 eine verlustarme, ablösefreie Strömung bei guter Homogenität der Einblaseströmung erwartet werden.

Um Verständnis über die Strömungsvorgänge im Einblasegehäuse zu erlangen und die CFD-Simulation zu verifizieren, wird das Gehäuse instrumentiert. Werden entsprechenden Bohrungen bereits in der Konstruktion vorgesehen, können sie direkt während der Herstellung ins Gehäuse eingebracht

werden. So kann im Vergleich zur nachträglichen Instrumentierung eine hohe Genauigkeit bei reduzierten Kosten erreicht werden. Die Positionen der statischen Druckbohrungen wurden anhand der vorläufigen Strömungssimulation festgelegt. Weiterhin wird stromab der verschleißbaren Düse ein Hochfrequenzdruckaufnehmer positioniert.

Immer wieder im Verlauf der Konstruktion rückt das Thema Betriebssicherheit in den Fokus. Auch bei der Betrachtung des Gesamtsystems muss noch einmal sichergestellt werden, dass es während der Versuche zu keinen Schädigungen kommt. Mit der Einblasung wird in die Strömung im Triebwerk eingegriffen und es könnte zur Anregung einer Resonanzfrequenz der drehenden Bauteile kommen. In diesem Fall versagt das schwingende Bauteil nach sehr kurzer Zeit, im wahrscheinlichsten Fall eine Schaufel des ersten Rotors. Daher wurde schon für den Betrieb des Einblasegehäuses der Baureihe 1.2 eine Untersuchung der Eigenformen dieser Schaufeln durchgeführt.

Die Anregung der Schaufeln ist immer ein Vielfaches der Rotordrehzahl, das als Erregerordnung (EO) bezeichnet wird. Im Campbell-Diagramm wird die Frequenz der Eigenmoden und der EO eingetragen. Abbildung 16 zeigt das Diagramm für den betrachteten Anwendungsfall, wobei nur der Betriebsbereich, das heißt der Drehzahlbereich zwischen 30% und 100% Niederdruckwellendrehzahl, betrachtet wird. An Schnittpunkten zwischen den Engine Orders und den Eigenfrequenzen wird mit Resonanzfrequenz angeregt. In diesen Bereichen ist kein dauerhafter Betrieb des Triebwerks oder der Quelle der Anregung zulässig. Als problematischste Anregung wird EO 3 identifiziert. Da der Anschluss jedes Aktuators einen Nachlauf erzeugt und drei Aktuatoren vorhanden sind, werden diese Frequenzen mit großer Wahrscheinlichkeit angeregt. Gleiches gilt für EO 12, da zwölf Luftzuführungen vorhanden sind. Die Ergebnisse für die Schnittpunkte sind im Diagramm durch Rechtecke hervorgehoben.

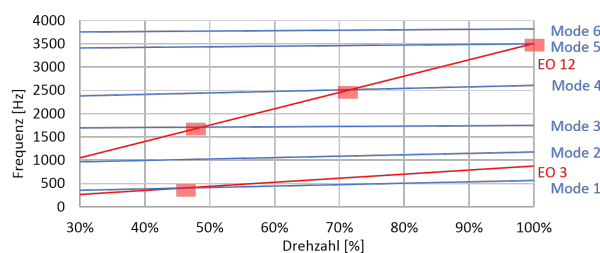


BILD 16: Campbell-Diagramm

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aktive Verdichterstabilisierung mittels Lufteinblasung im Schaufelspitzenbereich wird an der Triebwerksversuchsanlage des Instituts für Strahlantriebe seit vielen Jahren erforscht. Als Versuchsträger kommt das Zweistromtriebwerk Larzac 04 zum Einsatz, dessen transsonischer Niederdruckverdichter sich gut für die Untersuchungen eignet. Der Einblasemassenstrom wird dem Verdichter über ein Einblasegehäuse zugeführt, das vor dem Triebwerk angebracht ist. In den vorangegangenen Arbeiten konnten mit der Baureihe 1 dieses Gehäuses vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Ziel war hierbei, durch größtmögliche Flexibilität des Einblasegehäuses eine optimale Konfiguration zu identifizieren. Es konnte außerdem ein System zur

aktiven Bekämpfung von Instabilitäten sowie eine Methode zur Erhöhung des Einblasemassenstroms mit Hilfe des Ejektoreffekts entwickelt werden.

Auf Basis dieser Erfahrungen wurde das Einblasegehäuse der Baureihe 2 entwickelt. Zunächst wurden die Anforderungen an das Gesamtsystem geklärt und der zur Verfügung stehende Bauraum analysiert. Anschließend erfolgte die Erarbeitung und Bewertung verschiedener Konzepte für den Ejektor, der das zentrale Element der Konstruktion darstellt. Außerdem lag ein besonderes Augenmerk auf der aktiven Stabilisierung. Sehr kurze Vorwarnzeiten erfordern ein hochdynamisches Ventil, das in möglichst geringem Abstand zum Verdichter positioniert werden muss.

Aus den erarbeiteten Konzepten wurde anschließend ein CAD-Modell entwickelt. Es erfolgte die Auslegung des Ejektors und des Ventil-Mechanismus. Nach der detaillierten Betrachtung der Subsysteme erfolgte zum Abschluss eine Analyse des Gesamtsystems. Dabei wurde die Instrumentierung des Einblasesystems mit Messtechnik vorbereitet. Während der gesamten Konstruktion genoss die Betriebssicherheit höchste Priorität. In diesem Zusammenhang wurden auch die Betriebspunkte ermittelt, bei denen eine Schwingungsanregung des Verdichters mit Resonanzfrequenz möglich wäre.

Aktuell befindet sich der Versuchsaufbau in der Fertigung. Nach der Fertigstellung sind zunächst Versuche ohne Triebwerk zur Untersuchung der Ejektor Performance geplant. In diesem Zusammenhang soll ebenfalls die Betriebssicherheit des Systems überprüft werden. Anschließend sollen Versuche mit Triebwerk und aktiver Stabilisierung durchgeführt werden.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. für die Auszeichnung dieser Arbeit mit dem Willy Messerschmitt - Studienpreis. Ebenso geht Dank an Gero Madelung für die Auslobung des Preises.

## LITERATUR

- [1] Bergner, Jörg: Experimentelle Untersuchung der Strömung im Blattspitzenbereich eines transsonischen Axialverdichters nahe der Stabilitätsgrenze. Doktorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2006.
- [2] Bindl, Stefan: Realisierung einer autarken Applikation zur Erkennung und Unterdrückung von Verdichterstabilitäten am Turbostrahltriebwerk Larzac 04. Dr. Hut, München, 2010.
- [3] Bindl, Stefan, Bastian Muth und Reinhard Niehuis: Active stall elimination by air injection onto the tip region of compressor blades: ISABE-2009-1105. Proceedings of the XIV. International Symposium on Air Breathing Engines, Montreal, Canada, September 7-11, 2009.
- [4] Camp, T. R. und I. J. Day: A Study of Spike and Modal Stall Phenomena in a Low-Speed Axial Compressor. Journal of Turbomachinery, 120(3):393, 1998.
- [5] Day, I. J.: Stall Inception in Axial Flow Compressors. Journal of Turbomachinery, 115(1):1-9, 1993.
- [6] Fernholz, Hans-Herman: Zur Umlenkung von Freistrahlen an konvex gekrümmten Wänden (Coanda-Effekt). Zentralstelle für Luftfahrtokumentation und -information (ZLDI), 1966.
- [7] Greitzer, E. M., Choon Sooi Tan und M. B. Graf: Internal flow: Concepts and applications, Band 3 der Reihe Cambridge engine technology series. Cambridge University Press, Cambridge and U.K and New York, 2004.
- [8] Kefalakis, M. und K. D. Papailiou: Active Flow Control for Increasing the Surge Margin of an Axial Flow Compressor: GT2006-90113. Proceedings of ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air, Barcelona, Spain, May 8-11, 2006.
- [9] Leinhos, Dirk Christian: Aktive Stabilisierung der Verdichterströmung in einem Zweikreis-Turbostrahltriebwerk. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr München, München, 2003.
- [10] Mason, Mark S. und William J. Crowther: Fluidic thrust vectoring of low observable aircraft. CEAS Aerospace Aerodynamic Research Conference, Cambridge, UK, 10-12 June, 2002.
- [11] Muth, Bastian, Marcel Stöbel, Sebastian Beth, Stefan Bindl und Reinhard Niehuis: Basic Study of the Ejector Effect, Part 1: CFD: AIAA-2011-5529. Proceedings of the 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Diego, California, San Diego, California, 31 July - 03 August, 2011.
- [12] Neuendorf, R. und I. Wygnanski: On a turbulent wall jet flowing over a circular cylinder. Journal of Fluid Mechanics, vol. 382:1-25, 1999.
- [13] Scheidler, Stephan Georg: Untersuchung der Systemaspekte stabilitätsverbessernder Maßnahmen in Gasturbinen: Dissertation. Dr. Hut, München, 2005.
- [14] Stöbel, Marcel, Stefan Bindl und Reinhard Niehuis: Ejector Tip Injection for Active Compressor Stabilization: GT2014-25073. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf, Germany, June 16 - 20, 2014.
- [15] Stöbel, Marcel, Bastian Muth, Stefan Bindl und Reinhard Niehuis: Basic Study of the Ejector Effect, Part 2: Experimental Approach: AIAA-2011-5530. Proceedings of the 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Diego, California, San Diego, California, 31 July - 03 August, 2011.
- [16] Wilke, I. und H.-P. Kau: A Numerical Investigation of the Flow Mechanisms in a HPC Front Stage With Axial Slots: GT2003-38481, Proceedings of ASME Turbo Expo 2003. Proceedings of ASME Turbo Expo 2003: Power for Land, Sea, and Air, Atlanta, Georgia, USA, June 16-19, 2003.
- [17] Zhang, J., F. Lin, J. Chen und C. Nie: The Flow Mechanism of How Distorted Flows Deteriorate Stability of an Axial Flow Compressor: GT2007-27628. Proceedings of ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, Montreal, Canada, May 14-17, 2007.