

# MISSIONSABHÄNGIGE ANPASSUNG DES SEKUNDÄRLUFTSYSTEMS ZUR VERBESSERUNG DER TRIEBWERKSLEISTUNG

Dieter Peitsch  
Fachgebiet Luftfahrtantriebe, Institut für Luft- und Raumfahrt,  
Technische Universität Berlin

## Zusammenfassung

Das Sekundärluftsystem von Gasturbinen übernimmt sehr wichtige Funktionen, ohne die der Betrieb bei den heutigen Randbedingungen im Bezug auf Drücke und Gastemperaturen nicht möglich wäre. Dazu gehören unter anderem die Kühlung der Turbinenbaugruppen, Lagerkammerabdichtung und Sicherung gegen Heißgaseinzug in den Innenbereich des Triebwerks entlang des gesamten Heißgaskanals.

Gegenüber stationär betriebenen Gasturbinen besteht bei Luftfahrtantrieben die besondere Herausforderung, dass diese Funktionen über einen weiten Betriebsbereich und sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen sicher gewährleistet werden müssen. Aus diesem Grund wird das Sekundärluftsystem an verschiedenen Auslegungspunkten untersucht und daraus die Definitionen im Bezug auf Gestaltung und Dimensionierung der erforderlichen Dichtungs- und Strömungsführungselemente abgeleitet. Bei dieser Vorgehensweise wird konventionell eine ‚build and forget‘-Philosophie betrieben, in der keinerlei Eingriff in die Funktionalität dieser Elemente erfolgt. Damit resultiert die Anforderung, mit einer einzigen Gesamtkonfiguration alle Betriebspunkte abzudecken, womit zwangsläufig der ‚worst case‘ ausschlaggebend wird. Es wird in Kauf genommen, dass bei allen anderen Betriebspunkten die eigentlich vorliegenden Anforderungen zum Teil deutlich übererfüllt werden. Die resultierenden Luftmassenströme stellen aber einen direkten Verlust für den thermodynamischen Kreisprozess des Triebwerks dar. Es muss also das Ziel der Auslegung sein, diese Massenströme soweit wie möglich zu reduzieren.

In der vorliegenden Arbeit werden die prinzipiellen Möglichkeiten dargestellt, durch welche Maßnahmen und Elemente die Luftmassenströme für verschiedene Flugfälle angepasst werden könnten, um so die resultierende Performance des Triebwerks für die jeweilige Flugmission zu optimieren. Das Paper wird sowohl die Vorgehensweise wie auch die zum Einsatz in Frage kommenden Bauelemente erläutern. Wichtig ist dabei vor allem auch die Untersuchung, wie sich die gasdynamischen Randbedingungen innerhalb des Strömungskanals über der Flugmission verändern. Dies ist genauso ausschlaggebend für die effektive und effiziente Auswahl der Elemente wie die Positionierung innerhalb der internen und externen Strömungsführungen innerhalb des Luftsystems.

## 1. EINLEITUNG

Zur Erreichung der durch das ‚Advisory Council for Aeronautics Research in Europe‘ (ACARE) definierten Ziele zur Treibstoffeinsparung zukünftiger Luftfahrtantriebe ist es unabdingbar, alle Komponenten eines Antriebs auf ihre Verbesserungsmöglichkeiten zu untersuchen. Dabei konzentrieren sich die Arbeiten im Wesentlichen auf die Triebwerke der zivilen Verkehrsluftfahrt, da hier wegen des Flottenumfanges das größte Einsparpotential vorhanden ist. Während die Forschung im Bereich der Turbokomponenten und Brennkammer weit fortgeschritten ist, bieten auch die funktionalen Systeme eine weitere Möglichkeit, den Wirkungsgrad des zugrunde liegenden thermodynamischen Zyklus zu verbessern.

Ein sowohl für die prinzipielle wie auch sichere Betriebsfähigkeit außerordentlich wichtiges System stellt dabei das interne Luftsystem dar, auch Sekundärluftsystem oder englisch ‚Secondary Air System‘ (SAS) genannt. Dieses System umfasst alle Luftmassenströme, die nicht dem vollständigen Zyklus zur Verfügung stehen und somit sehr negative Auswirkungen auf den thermischen Wirkungsgrad des Kreisprozesses haben. Sie werden aus dem Kerntriebwerk entnommen und den jeweiligen

‚Verbrauchern‘ entweder triebwerksintern oder –extern über Rohrleitungen zugeführt. Je nachdem, an welchen Positionen die Luft entnommen wird, wurde bereits mehr oder weniger Leistung in die Verdichtung der Luft aufgewendet. Hochverdichtete Luft, die also weit hinten im Verdichter entnommen wird, ist also sehr ‚teuer‘. Die Reduzierung der für die verschiedenen Funktionalitäten des Luftsystems erforderlichen Luftmassenströme führt damit sofort zu einer erheblichen Steigerung der Leistungsfähigkeit und Effizienz des Antriebs [1].

## 2. DAS SEKUNDÄRLUFTSYSTEM EINES LUFTFAHRTANTRIEBES

### 2.1. Aufgaben des Sekundärluftsystems

Das Sekundärluftsystem erfüllt zahlreiche Funktionen. Zunächst sind diese kundenbezogen wie etwa die Versorgung der Kabine sowie der Enteisierungssysteme des Flugzeuges mit Frischluft. Die Größenordnung der hierfür erforderlichen Massenströme, die aus dem Kerntriebwerk entnommen werden müssen, wird vom Kunden definiert und kann daher nicht beeinflusst werden. Allerdings spielt

die Gestaltung der Entnahmepositionen sowie der zum Flugzeug führenden Leitungen eine wichtige Rolle für den sicheren Betrieb. Sollte es z.B. zu einem Leitungsbruch oder signifikanter Leckage kommen, muss sichergestellt sein, dass das Triebwerk trotzdem sicher betrieben werden kann und eine gewisse Leistungsfähigkeit behält. Dasselbe gilt für außerhalb des Kerntriebwerks verlaufende Leitungen, die Luft zwischen den Entnahmestellen und internen Verbrauchern der Maschine selbst führen. Hierzu zählen vor allem die Lagerkammern, die gegen Ölaustritt abgedichtet werden müssen.

Im Bezug auf die Effizienzsteigerung des Antriebs selbst muss sich auf interne Massenströme konzentriert werden. Das größte Potential bieten dabei offensichtlich die Bereiche mit hohen Anforderungen an Sekundärluft. So machen die heutigen Temperaturniveaus am Turbineneintritt beispielsweise zwingend eine Kühlung der ersten Leit- und Laufradschaufeln erforderlich (vgl. Bild 1 aus [2]).

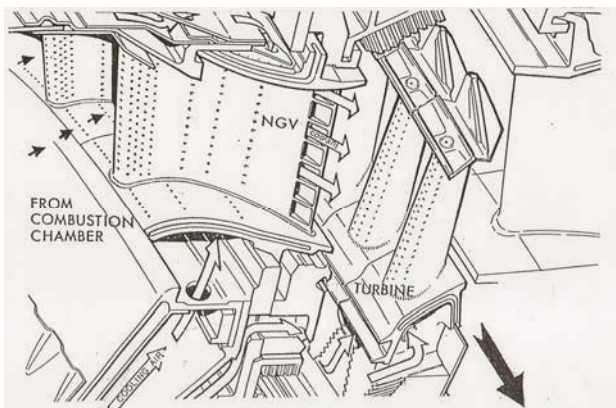


Bild 1: Kühlkonfiguration einer Hochdruckturbinen

Dies liegt darin begründet, dass die eingesetzten, metallischen Werkstoffe aktuell noch nicht in der Lage sind, die hohen Anforderungen an die Agilität des Triebwerks ohne bereitgestellte Kühlluft zu erfüllen. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu stationären Gasturbinen zur Energieerzeugung, bei denen bereits Materialien wie Keramiken eingesetzt werden können und so der Bedarf an Kühlluft minimiert werden kann. Die im Triebwerk schnell wechselnden Betriebszustände setzen im Gegensatz dazu eine große Flexibilität der Komponenten im Bezug auf thermische und strukturelle Änderungen der Randbedingungen voraus. Die Menge der für die Kühlung von Turbinenbaugruppen benötigten Sekundärluft kann bis zu 20% des Massenstroms des Kerntriebwerks betragen und stellt somit einen signifikanten Posten dar.

Weitere Aufgaben des SAS ergeben sich aus der Notwendigkeit der Abdichtung gegen Heißgaseinzug. Durch die Abfolge von statischen und rotierenden Komponenten besteht prinzipiell die Möglichkeit, dass heißes Gas in das Innere des Turbinenbereichs eintritt. Dadurch würden die strukturelle Integrität sowie die Lebensdauer der als kritisches Bauteil zu betrachtenden Turbinenscheibe drastisch reduziert. Dieser Bereich ist in Bild 2 dargestellt. Auf der rechten Seite befindet sich der Rotor, auf der linken der Stator. Die Pfeile verdeutlichen beispielhaft, wie die Luftführung verwirklicht wird. Der eigentliche Dichtungsmassenstrom wird durch die Größe des Spaltes (III) bestimmt, während akzeptiert wird, dass

im Bereich (IV) eine Mischung zwischen dem Dichtungsmassenstrom und der heißen Luft aus dem Annulus erfolgt. Dies ist deswegen erforderlich, weil hinter den Leiträdern aufgrund der reibungsbedingten Nachlaufdellen ein ungleichförmiges Totaldruckniveau in Umfangsrichtung besteht. Es wird schon hier deutlich, wie komplex das Sekundärluftsystem ist und wie schwierig sich demzufolge eine sichere Auslegung des Gesamtsystems gestaltet.

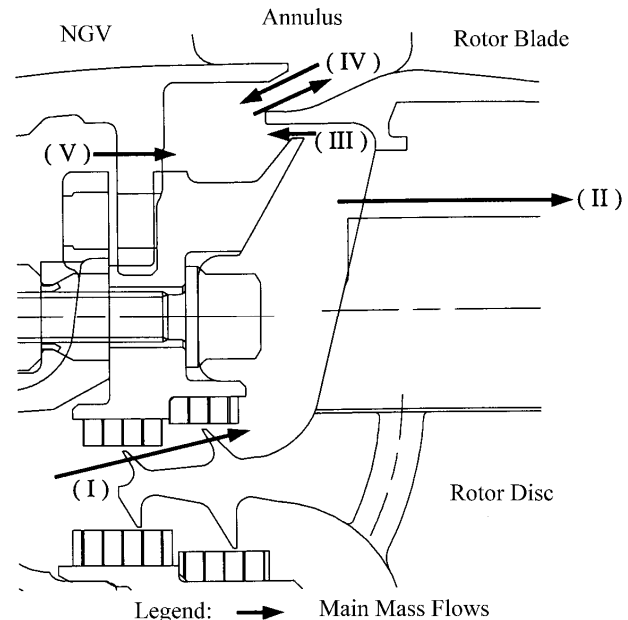


Bild 2: Luftführung vor einer Turbinenscheibe zur Verhinderung von Heißgaseinzug [3]

## 2.2. Aufbau und Auslegung des Sekundärluftsystems

Das Prinzip des Sekundärluftsystems beruht auf der Entnahme von Luft an verschiedenen Positionen entlang des Verdichters, die dann entlang externer und interner Strömungspfade den jeweiligen Verbrauchern zugeführt wird. Zur Festlegung der erforderlichen Entnahmepositionen wird ist die Kenntnis der zu erwartenden Randbedingungen an den Rückführpositionen der Luft z.B. in den Turbinenringraum oder die Lagerkammer unabdingbar. Bei der Beurteilung der Auswirkungen auf den Wirkungsgrad des Triebwerks ist ebenso zu beachten, dass Massenströme, die am Anfang der Turbine wieder zugemischt werden, zumindest noch zu einer Vergrößerung der Leistungsumsetzung in der Turbine selbst beitragen, während Luftmassenströme, die weit hinten in den Ringraum entlassen werden, als rein parasitär anzusehen sind.

Entlang dieser Strömungspfade werden verschiedenartige Komponenten durchströmt, die mit genau definierten Eigenschaften die Massenströme und Druckunterschiede zwischen den verschiedenen Kavitäten bestimmen. Dies sind z.B. Düsen und Dichtungen verschiedenster Bauart. Jedem Bauelement werden im Auslegungsprozess Charakteristika zugewiesen, die das Dichtungs- bzw. Strömungsverhalten so genau wie möglich reflektieren. Zur Ermittlung dieser Charakteristika wurden und werden zahlreiche Forschungsvorhaben mit Detailstudien

durchgeführt (z.B. [4]). Wichtig ist dabei auch, die Änderung der Temperatur durch den Wärmeaustausch mit den umgebenden statischen und rotierenden Komponenten zu berücksichtigen. Druckverluste und Steigerung der Lufttemperatur können sehr gut in einem Enthalpie-Entropie-Diagramm dargestellt werden, wie es in Bild 3 qualitativ für den Durchfluss von Sekundärluft durch ein Kerntriebwerk verdeutlicht wird. Die Luft tritt an Position 26 in das Innere des Triebwerks ein und tritt zwischen den Positionen LS1 und LS2 durch die Welle hindurch. Hierdurch wird die Temperatur nicht verändert, wohl aber ein Druckverlust kreiert. Im Vergleich dazu führt die Strömung entlang der Welle zwischen LS2 und LS3 zu einer Wärmeaufnahme bei gleichem Druckniveau. Diese Wärmeaufnahme kann signifikant sein und ist daher bei der Beurteilung der möglichen Kühlleistung an den Turbinenbaugruppen keinesfalls vernachlässigbar.

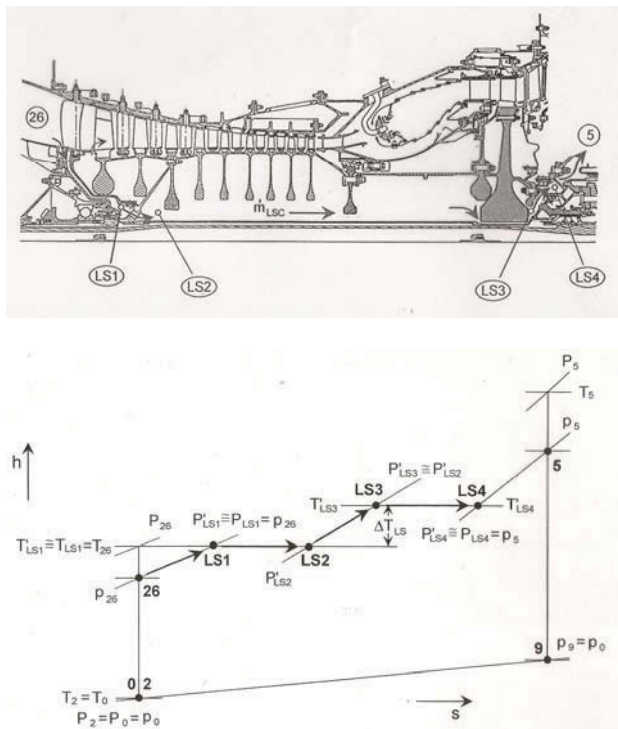


Bild 3: Darstellung der Veränderung thermischer Größen der Sekundärluft

Die Modellierung des Gesamtsystems mit realistischer Darstellung aller durchströmten Komponenten erfolgt letztlich mit kommerziellen oder firmenspezifischen Netzwerkprogrammen, mit denen eine eindimensionale Abbildung des extrem komplexen Aufbaus erfolgen kann (vgl. Bild 4).

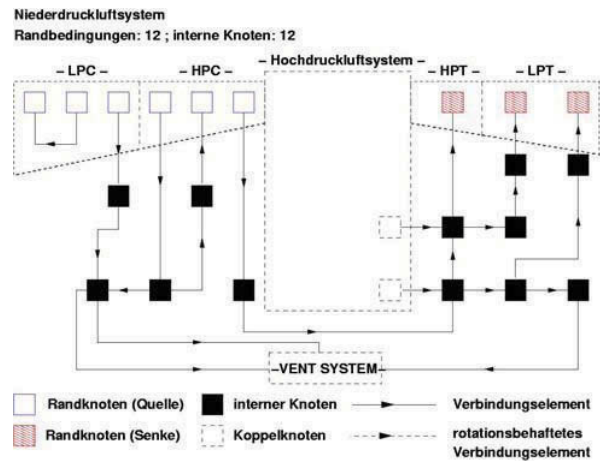


Bild 4: Eindimensionale Netzwerkmodellierung eines Sekundärluftsystems

Zur Abdeckung aller Aufgaben des Sekundärluftsystems muss eine Analyse der für die Quellen-Senken Beziehungen ausschlaggebenden Randbedingungen innerhalb des Annulus erfolgen. Dazu werden verschiedene Punkte innerhalb der typischen Flugmission des Flugzeuges definiert, die charakteristisch für die verschiedenen Belastungsstufen des Antriebes sind. Typischerweise gehören dazu Leerlauf sowie Startbedingungen am Boden, der Reiseflug und ggf. maximale Steigflugbedingungen. Je nach Anwendung können bzw. müssen noch mehr Punkte definiert werden. An diesen Betriebspunkten wird in Zusammenarbeit mit den entsprechenden Fachabteilung überprüft, ob mit der beabsichtigen Konfiguration des Luftsystems bei den dann anliegenden Drücken und Temperaturen alle Senken mit akzeptablen Luftmassenströmen und thermodynamischen Bedingungen bedient werden können. Wichtig ist hierbei die Beachtung der Nichtlinearitäten zwischen den Wellendrehzahlen von Mehrwellentriebwerken und den damit verbundenen Verschiebungen im Druckaufbau entlang des Verdichtungssystems. Dasselbe gilt für den Leistungsabbau innerhalb der Turbinenstufen, die je nach Drehzahl und Eintrittszuständen zwischen den Betriebspunkten nicht ähnlich bleiben.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich eine Vielzahl von veränderlichen Druckverhältnissen zwischen den Entnahmestellen und den damit bedienten Verbrauchern. Da das Luftsystem ohne jede Regelung auskommen muss, gleichzeitig aber verschiedene Betriebspunkte, Verschlechterung der Triebwerkskomponenten durch Verschleiß und Beschädigungen sowie Fehlerfälle usw. abdecken muss, wird die Auslegung meist sehr konservativ betrieben. Damit kann zwar sichergestellt werden, dass ein sicherer Betrieb über die gesamte Lebensdauer des Triebwerks erfolgen kann, gleichzeitig muss das System bei diesem Ansatz für den schlimmsten Fall ausgelegt werden. Hieraus resultiert unter Umständen eine übermäßige Zumessung von Sekundärluft an bestimmten Betriebspunkten, die unnötig ist und zwangsläufig zu einer Wirkungsgradsenkung der Gesamtmaschine führt. Genau hier setzen die Untersuchungen in Richtung von Effizienzverbesserungen an.



### 3. AUTARKE STRÖMUNGSREGELUNGSELEMENTE

Die übergeordnete Zielsetzung einer gezielten Beeinflussung des Sekundärluftsystems zur sicheren **und** effizienten Abdeckung aller Aufgaben muss in der Bereitstellung von Elementen liegen, die sehr zuverlässig arbeiten, einen extrem kleinen Bauraum haben, gewichts- und kostenoptimiert sowie wartungsfrei sind. Eine weitere Grundvoraussetzung ist, dass sie vollkommen autark in selbstregulierender Art und Weise arbeiten können. Eine aktive Steuerung würde eine zu große Belastung des ohnehin schon sehr komplexen Regelungssystems darstellen und darüber hinaus eine größere Fehleranfälligkeit nach sich ziehen. Die bereitgestellten Elemente sollten ferner sowohl für die Absicherung gegen Leitungsbruch wie auch für die Effizienzsteigerung durch Anpassung auf den aktuell anliegenden Lastfall einsetzbar sein. Verschiedene Wirkmechanismen kommen je nach Anforderung der Luftversorgung in Frage. Daraus resultieren der benötigte Bauraum und somit die Anforderungen an die Integration.

#### 3.1. Elemente und Funktionsweisen

Als gute Kandidaten, die die o.g. Anforderungen erfüllen, kommen als *Fluidic Devices* oder kurz *Fluidics* bekannte Strömungselemente in Betracht. Diese sind nicht neu und umfassen nach Definition [5] neben rein strömungsmechanischen Steuerelementen auch miniaturisierte Ventile, sofern nur Signalspeicherung und Signalverknüpfung im Vordergrund stehen. Diese Elemente arbeiten mit verschiedenen Effekten, die im Folgenden beschrieben werden. Eine sehr gute Übersicht über die Vielzahl der Bauarten und Charakteristika solcher Elemente geben [6], [7] und [8], so dass hier nur auf die für uns relevanten Elemente eingegangen wird.

##### 3.1.1. Kategorisierung der Strömungselemente

Im Wesentlichen werden die Fluidics in drei Kategorien eingeteilt.

- **Statische Elemente:**  
Bei statischen Fluidik-Elementen ist der Signalparameter der anliegende statische Druck. Die einzelnen Leitungsabschnitte sind gegeneinander abgesperrt und in keiner Schaltstellung ein Fluidstrom notwendig. Nur während der Schaltvorgänge tritt eine kurzzeitige Strömung auf. Durch das rückwirkungsfreie Trennen der einzelnen Stufen wird ein problemloses Zusammenschalten mehrerer Elemente ermöglicht.
- **Semistatische/quasistatische Elemente:**  
Sie stellen den Übergang von statischen zu dynamischen Elementen dar. Auch hier ist der Signalparameter der statische Druck. Deshalb sind sie rein nach ihrem Schaltverhalten statische Elemente. Beim Zusammenschalten verhalten sie sich aber wie dynamische Elemente. In mindestens einer Schaltstellung ist kein Fluidstrom nötig.
- **Dynamische Elemente:**  
Bei dynamischen Elementen ist in jeder

Schaltstellung ein Fluidstrom vorhanden. Die Leistungsabschnitte sind nicht gegeneinander abgesperrt. Signalparameter kann der statische Druck, aber auch der Durchfluss sein. Beim Zusammenschalten mehrerer Elemente müssen diese aufeinander abgestimmt werden. Das Schaltverhalten kann analog oder digital sein, wobei digitale Elemente durch Verluste eine gewisse Hysterese aufweisen, analoge demgegenüber das Risiko mit sich bringen, auf jede Änderung der Eingangsgröße auch eine Änderung der Ausgangsgröße zu bewirken.

#### 3.1.2. Zugrunde liegende physikalische Effekte

Den einzelnen Elementen zur Strömungskontrolle liegen unterschiedliche physikalische Effekte zugrunde.

- Der *Coanda-Effekt* (Bild 5) oder auch Haftstrahleffekt ist nach seinem Entdecker, dem rumänischen Ingenieur Henri Coanda, benannt. Ein turbulenter Freistrahle tritt aus einer Düse aus und trifft auf ein ruhendes Medium. Dabei reißt er zwangsläufig das umgebende Medium mit sich. Es resultiert ein Nachströmen der Teilchen aus der Umgebung. Wird nun eine Wand, entweder parallel oder leicht vom Strahl weg geneigt, in die Nähe des Freistrahls gebracht, behindert diese das Nachströmen auf Grund des nun eingeschränkten Querschnitts zwischen Wand und Strahl. Dies führt zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit und einer Absenkung des statischen Drucks an der wandseitigen Strahlseite. Auf der wandabgewandten Seite des Strahls herrscht demgegenüber der Umgebungsdruck. Diese Druckdifferenz führt zum Abknicken des Strahls zur Wand hin und somit zu einer weiteren Verengung zwischen Wand und Strahl. Das Nachströmen des Umgebungsmediums wird weiter behindert. Dieser sich selbstverstärkende Effekt sorgt dafür, dass der Strahl an die Wand gedrückt wird. Zwischen Wand, Strahl und Anlegepunkt des Strahls an der Wand beendet sich nun eine Unterdruckblase mit einem Wirbel, da auch weiterhin Fluid vom Strahl mitgerissen wird [6].

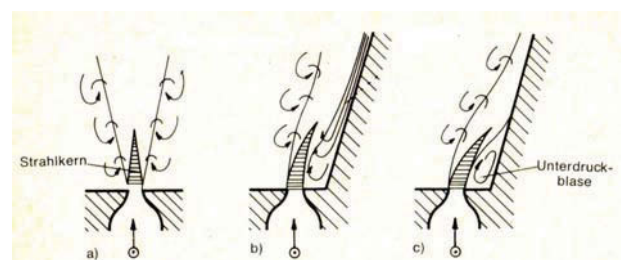


Bild 5: Coanda-Effekt [6]

- Bei den drall- und impuls-gesteuerten Elementen beruht der Effekt auf der Strömungsbeeinflussung durch Trägheits- bzw. Zentrifugalkräfte des beteiligten Fluides. Daraus resultieren in beiden Fällen Ablenkungen eines Primärstroms durch einen durch externe Faktoren gesteuerten Sekundärstrom.
- Drehungsbehaftete und drehungsfreie Kreisströmungen bzw. starr rotierende und potentialwirbelähnliche Strömungen (Bild 6) führen zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten innerhalb des

Wirbels und können so ebenfalls zur Steuerung der Primärströmung verwendet werden.

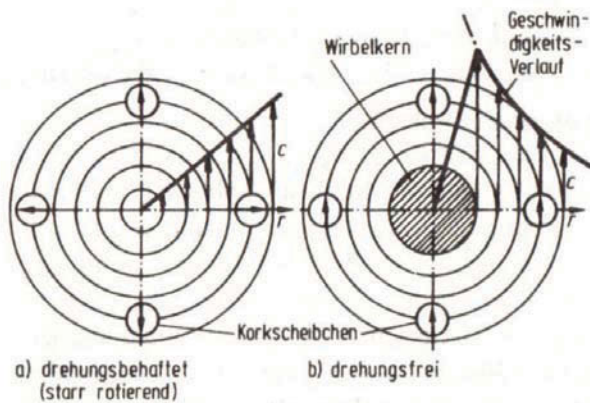


Bild 6: Drehungsbehaftete und drehungsfreie Strömung [7]

### 3.1.3. Anwendungsbeispiele

Anhand von drei Beispielen soll kurz auf die Leistungsfähigkeit der Fluidics eingegangen werden. Beim ersten Element handelt es sich um eine einfache Wirbelkammer, die als Drossel eingesetzt werden kann und je nach Radius (und damit Bauraum) verschiedene Wirbelstärken (und damit Geschwindigkeiten bzw. Massenströme) erzeugen kann (Bild 7). Die Einströmung erfolgt tangential am Außenradius, während die Ausströmung axial in der Mitte des Elementes liegt. Auf der rechten Seite sind numerische und experimentelle Daten über dem bezogenen Radius aufgetragen. Es wird deutlich, dass vor allem im Wirbelkern Verbesserungsbedarf bei der Auslegung besteht.

Eine Weiterentwicklung dieser Elemente verwendet poröse Einbauten, die Größenordnung und Gestalt des Wirbels erheblich beeinflussen können (Bild 8). Ähnliche Konfigurationen, die z.B. als Sicherung gegen eine Umkehr der Strömungsrichtung eingesetzt werden können, sind sogenannte Strömungsdiolen (Bild 9).

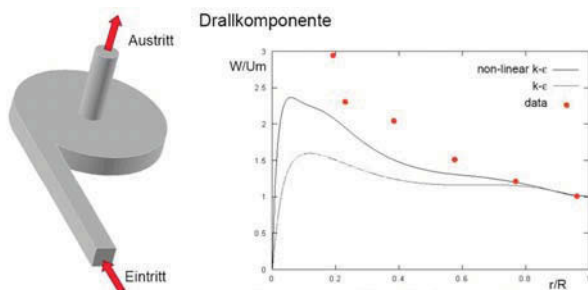


Bild 7: Durchströmung einer Wirbelkammer-Drossel

Eine komplexere, aber sehr vielversprechende Anwendung wurde in [9] vorgestellt. Die Untersuchung bezog sich auf den Einsatz im Bereich der Luftentnahme für das Flugzeug zur Abdeckung eines Leitungsbruches, könnte aber ebenso bei entsprechender Gestaltung für die internen Luftmassenströme entwickelt werden. Der prinzipielle Systemaufbau ist in Bild 10 dargestellt.

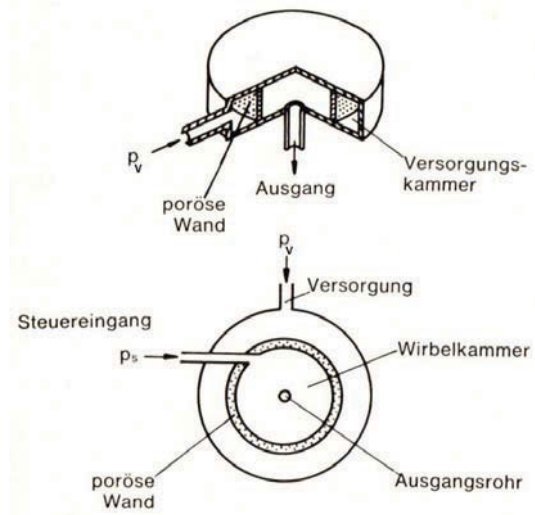


Bild 8: Wirbelverstärker mit poröser Wand [6]

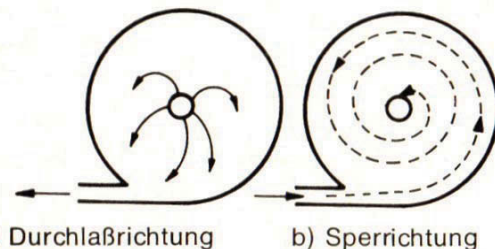


Bild 9: Strömungsdiode [6]

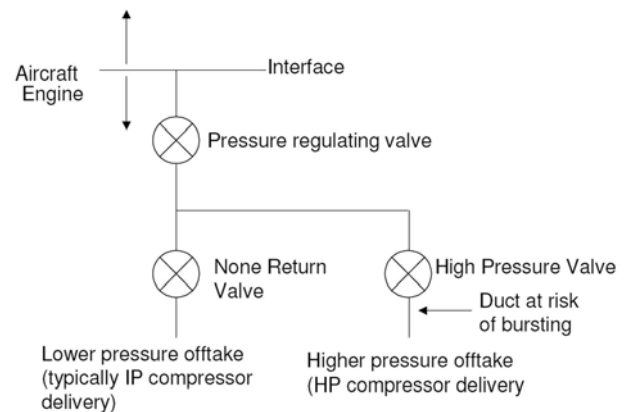


Bild 10: 'Pressure Ratio Sensing Switched Vortex Valve' (PRSSV), [9]

Es handelt sich um die Kombination aus einem Coanda-Umlenkungselement und einem Wirbeldrosselventil, was zur prinzipiellen Möglichkeit führt, je nach Druckniveau das Ventil in einen hohen oder niedrigen Widerstandsstatus zu bringen. Die Untersuchung dieses Systems wurde sowohl numerisch wie experimentell durchgeführt. Bild 11 zeigt den gewonnenen Durchflusskoeffizienten  $C_d$ . Die deutlichen Unterschiede zwischen Numerik und Experiment zeigen, dass auch hier noch erheblicher Entwicklungsbedarf besteht, um die Auslegung solcher Systeme früh im Entwicklungsprozess zu ermöglichen.

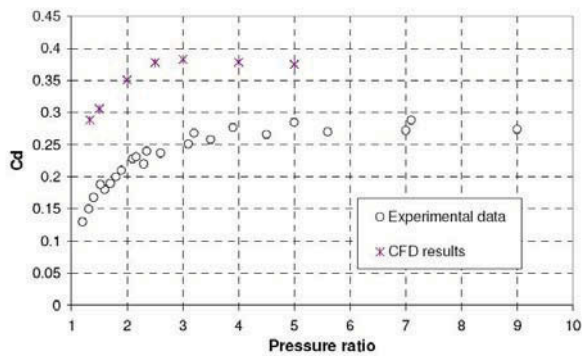


Bild 11: Durchflusskoeffizient für das PRSSVV Konzept, [9]

#### 4. POSITIONIERUNG VON AUTARKEN ELEMENTEN IM SEKUNDÄRLUFTSYSTEM

Der gewinnbringende Einsatz von fluidischen Elementen ergibt sich in Strömungspfaden, in denen zum einen sicherheitskritische Aspekte abzudecken sind (Leitungsbruch, Leckage) und zum anderen die veränderlichen Druckdifferenzen zwischen den Quellen und Senken des Systems für verschiedene Betriebspunkte innerhalb der Flugmission zu einer zu konservativen Auslegung führen. Während der erste Fall vergleichsweise einfach z.B. durch Strömungsdioden abgedeckt werden kann, gestaltet sich der zweite Fall zur Effizienzsteigerung schwieriger. Der Einsatz sollte also nur dort erfolgen, wo zum einen der Gewinn ausreichend groß ist und zum anderen Montage und Wartungsmöglichkeiten nicht kompromittiert werden.

Wie dargestellt, resultieren aus den Wirkmechanismen der einzelnen Elemente der erforderliche Bauraum und Installationsmöglichkeiten. Weiterhin ist die Unterbringung in statischen Komponenten vorteilhaft, aber nicht zwangsläufig. Die Auslegung einer Elementstruktur im Rotorsystem würde zwar zu einer deutlichen Vergrößerung führen, könnte aber sicher bei einem entsprechenden Einsparpotential innerhalb der geplanten Flugmission gerechtfertigt werden.

Der offensichtlichste Bereich für den Einsatz von Fluidics ist der heiße Turbinenteil, da hier die Menge der nötigen Kühl- und Dichtluft am größten ist. Wegen der Temperaturverträglichkeit der Elemente könnte eine mögliche Position z.B. direkt vor den Eintrittsleiträdern der Hochdruckturbinen liegen. Dieser Bereich ist für ein typisches Triebwerk in Bild 12 gezeigt. Durch konstruktive Veränderungen müsste der Durchtritt durch die Brennkammerstruktur in seiner Ausdehnung vergrößert werden. Gleichzeitig erfordert der Einbau von Fluidics in diesem Bereich die Entwicklung sehr kleiner Elemente.

Eine weitere Möglichkeit besteht bei der Luftentnahme in das Innere des Triebwerks, z.B. im Bereich des Wirbelgleichrichters (Bild 13). Dieser ist mit einzelnen Röhrchen versehen, die die Luft in einem Zwangswirbel auf den kleineren Austrittsradius führen. Es wäre denkbar, auch hier miniaturisierte Elemente zu verwenden, die je nach Druckdifferenz zwischen der Quelle am Verdichterringraum und den Senken am Turbinenannulus bzw. den internen Drücken der Lagerkammern mehr oder weniger

Luft passieren lassen und so den thermodynamischen Zyklus weniger belasten. Dies kann an dieser Position und noch viel mehr am Verdichteraustritt wegen der vergleichsweise 'teuren' Luft als sehr gewinnbringend angesehen werden.

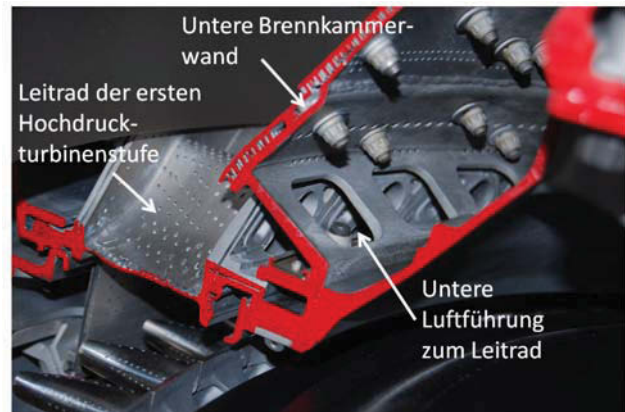


Bild 12: Potentielle Positionierung zur Anpassung der Kühlluft des ersten Leitrades (V2500)

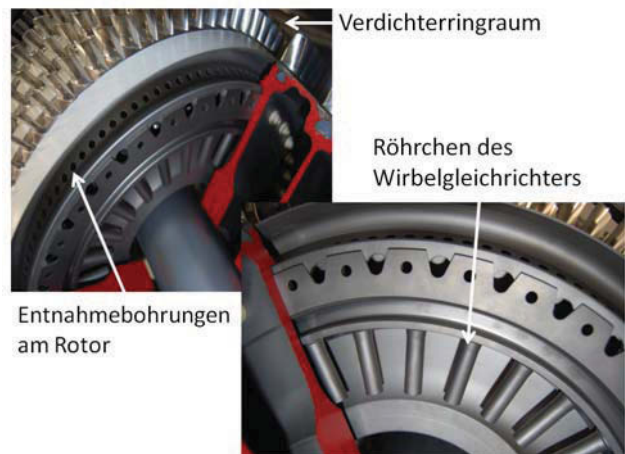


Bild 13: Luftentnahme am Verdichterrotor (V2500)

#### 5. AUSBLICK

Es erscheint vorteilhaft, die Anwendbarkeit autarker Elemente zur selbstregelnden Anpassung eines Sekundärluftsystems weiter zu untersuchen. Damit dies effektiv und aus Sicht des Triebwerkherstellers sinnvoll erscheint, ist es zwingend erforderlich, die folgenden Punkte zu klären:

- Ist die Technologie in der für die Luftfahrt erforderlichen Reife vorhanden?
- Sind Zuverlässigkeit und Sicherheit der Elemente ausreichend?
- Ist die Integration der Elemente in das vorhandene System möglich?
- Wie hoch sind die Kosten der Bauteile?
- Wie sind die Auswirkungen auf Wartungsaufwand und -zyklen sowie Lebensdauer des Antriebs zu bewerten?

Zusammenführen lässt sich dies in der Frage: Wird der zusätzliche Aufwand durch die Einführung autarker Elemente durch einen Business Case über die



Lebensdauer eines Triebwerks hinweg gedeckt? Die Beantwortung dieser Frage ist abhängig von der jeweiligen Anwendung und den geplanten Missionen und daher nicht pauschal möglich. Es sollten aber Möglichkeiten erarbeitet werden, zu Beginn einer Triebwerksentwicklung diese Fragestellung bereits durch die Bereitstellung entsprechender Berechnungstools zu adressieren. Dazu ist die weitere Untersuchung bzw. Weiterentwicklung der Fluidics vor allem im Hinblick auf Systemauswirkung und Integration erforderlich.

## 6. SCHRIFTTUM

- [1] P. Zeller: ‚Effizienzsteigerung von Turboluftstrahltriebwerken durch Optimierung des sekundären Luftsystems‘, Dissertation, Universität Stuttgart, 2008
- [2] D. Schulz: ‚The Effect of wake passing on turbine blades‘, VKI LS ‚Convective heat transfer and film cooling‘
- [3] I. Förster, E. Martens, W.-H. Friedl, D. Peitsch: ‚Numerical Study of Hot Gas Ingestion into an Engine Type High-Pressure Turbine Rotor-Stator Cavity‘, ASME TURBO EXPO 2001, ASME-2001-114
- [4] J. Denecke, M. Dittmann, S. Kim, S. Wittig, D. Peitsch, W.-H. Friedl: ‚Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung von innovativen Hochdruckturbinen-Kühlungssystemen‘, DGLR-2001-156
- [5] R. Ritter: ‚Einführung in die fluidische Steuerungstechnik‘, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1977
- [6] V. Multus: ‚Pneumatische Logikelemente und Steuerungssysteme‘, Band 14 ‚Ölhydraulik und Pneumatik‘, Krausskopf-Verlag, 1970
- [7] K. Foster, G. Parker: ‚Fluidics, Components and Circuits‘, Wiley Interscience, London, 1970
- [8] H. Sigloch: ‚Technische Fluidmechanik‘, Springer, Berlin, 2008
- [9] T. Scanlon, P. Wilson, G. Priestman, J. Tippetts: ‚Development of a novel flow control device for limiting the efflux of air through a failed pipe‘, ASME TURBO EXPO 2009, GT2009-59662
- [10] M. Wilczok: ‚Abschätzung der Einsatzfähigkeit autarker Strömungsregelungselemente in Sekundärluftsystemen von Luftfahrtantrieben‘, BSc, TU Berlin, 2010
- [11] S. Jaworski: ‚Untersuchung kritischer Flugbereiche für die Aufgaben des Sekundärluftsystems von Luftfahrtantrieben‘, BSc, TU Berlin, 2010