

MISCHUNGSVERSTÄRKER IN KONSTANT GEKREUZTEN SCHERSCHICHTEN UND IM ABGASBLÜTENMISCHER

B. Deinert
Technische Universität Berlin
ILR Luftfahrtantriebe
Marchstraße 14, D-10587 Berlin

1. ÜBERSICHT

Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen ist die Mischungsverbesserung durch Mischungsverstärker in konstant gekreuzten Scherschichten und im Abgasblütenmischer. Eine schnelle Vermischung zweier Stoffe ist im Flugtriebwerk heutzutage aus Treibstoffverbrauchs- bzw. Schubsteigerungsgründen sowie aufgrund von ständig steigenden Lärmanforderungen von sehr großer Bedeutung. Hierbei ist neben dem Mischungsgrad beider Ströme der Druckverlust, der durch die Vermischung entsteht, wichtig, da hierdurch die Gewinne durch die Mischung zum Teil wieder aufgezehrt werden. Ziel der Untersuchungen war einerseits die Untersuchung der Wirkung von Mischungsverstärkern in konstant gekreuzten und mischerähnlichen Scherschichten sowie zu prüfen, ob der Einsatz von Mischungsverstärkern in Abgasblütenmischern die Möglichkeit einer Schubsteigerung bietet.

2. DANKSAGUNG

Ich möchte an dieser Stelle noch einmal meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Jean Hourmouziadis für die Betreuung dieser Arbeit danken. Die fachlichen Diskussionen mit ihm haben mich zum Nachdenken und Weiterdenken angeregt.

3. NOMENKLATUR

A	m ²	Fläche
a _T	m/s	Gesamtchallgeschwindigkeit
BPR		Nebenstromverhältnis
b	m	Breite
c _p		Druckverlustbeiwert
F	N	Schub
F _{dim}		dimensionsloser Schub
F _{dim_{Gewinn}}	[%]	Schubgewinn durch MV
h	m	Höhe
h _{Proj.}	m	projizierte Höhe
MV		Mischungsverstärker
Mz		Mischungsverstärkerzahl
M		Machzahl
M _T		Gesamtmachzahl
\dot{m}	kg/s	Massendurchsatz
T	K	Gesamttemperatur
P	N/m ²	Gesamtdruck
p ₀	N/m ²	statischer Druck
v	m/s	Anströmgeschwindigkeit
v _x	m/s	Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung

x,y,z	m	Ortskoordinaten
α	°	Neigungswinkel
δ	m	Grenzschichtdicke
η _{mix}		Mischungsgrad
ρ	kg/m ³	Dichte

Indizes:

mix	ausgemischter Zustand
Kern	Zustand des Kernstromes
Neben	Zustand des Nebenstromes
Schnell	Zustand des schnelleren Strahles
Langsam	Zustand des langsameren Strahles

4. EINLEITUNG

Für viele technische Anwendungen ist die verlustarme Mischung von Strömungen von sehr großer Bedeutung. In Flugtriebwerken mit Nebenstrom verbessert die Vermischung der kalten Nebenströmung mit der heißen Kernströmung in Abgasmischern den Wirkungsgrad und verringert den Lärm. Die in heutigen Triebwerken gebräuchlichste Form von Abgasmischern ist der Zwangsmischer, der aufgrund seiner Form häufig auch als Blütenmischer bezeichnet wird. Hierbei werden die Strahlen durch die sogenannten Blüten jeweils in etwa 20° Schrägströmung zusammengeführt. Da aber auch dieser Mischer in Flugtriebwerken keine vollständige Mischung beider Strahlen realisiert, wird versucht der Mischungsgrad bei kleinem Gesamtdruckverlust unter Veränderung der Mischerform oder unter Verwendung von Mischungsverstärkern zu verbessern.

Zur Mischungsverbesserung mit Hilfe von Mischungsverstärkern (passive Wirbelgeneratoren, die in der Literatur auch häufig als Tabs bezeichnet werden), werden kleine Vorsprünge am Ende einer Trennplatte zwischen zwei Strahlen oder zwischen einem Strahl und seinem Umgebungsfluid in die Strömung eingeführt. Aufgrund der im Nachlauf der Mischungsverstärker entstehenden Wirbelstrukturen werden die beiden Strahlen besser vermischt. Hierbei ist bei der Formgebung und Anbringung der Mischungsverstärker darauf zu achten, dass der Gewinn durch die Mischungsverstärker durch ihren Gesamtdruckverlust nicht wieder verloren geht.

Bradbury und Khadem waren 1974 die ersten, die ihre Untersuchungen bezüglich der Effekte durch sogenannte Tabs in Unterschallströmungen veröffentlichten. Sie führten für die Veränderung in der Strahlentwicklung die Ablenkung der Strömung über einem Tab an, wodurch der Strömungswinkel geändert wird. Damit entsteht eine Verformung des Strahls durch die Umfangsvariation im Strömungswinkel.

Ahuja et. al. 1989 und Zaman begannen 1991 mit der systematischen Untersuchung der Mischungsverbesserung durch mechanische Tabs. Sie zeigten, dass diese Mischungsverstärker nicht nur die Mischung bei kleinen Geschwindigkeiten steigern, sondern auch bei hohen Geschwindigkeiten und Temperaturen.

Samimy, Reeder und Zaman 1991 zeigten, dass jedes Tab durch die Wirkung der strömungsgerichteten Wirbel, von der Tabgrundseite ausgehend, eine Einkerbung in der Scherschicht produziert und dass ein einfacher Tab die Verdichtungsstoss / Expansionsstruktur stromab eines Überschallstrahls drastisch verändert. Die Verdichtungsstöße werden abgeschwächt und ihr Abstand wird verkleinert. Da diese durch Tabs produzierte Störung bei Unterschall- und Überschallbedingungen sehr ähnlich sind, vermuteten Samimy, Reeder und Zaman, dass der primäre Bildungsmechanismus unabhängig von der Kompressibilität ist. Des weiteren zeigten Samimy, Reeder und Zaman 1994, dass Tabs in Strahlen mit anfänglicher laminarer und turbulenter Grenzschicht gleich effektiv sind.

Das Tabkonzept wurde von Bohl und Foss 1996 weiter modifiziert, indem Sekundärtabs zu beiden Seiten des Primärtabs angebracht wurden. Diese sekundären Mischungsverstärker stehen orthogonal zu dem Primären. Damit schaffen sie eine zusätzliche Fläche für die Strahlkernströmung, welche dem Strahl erlaubt bei größeren Winkeln auszuströmen. Das gesteigerte Eindringen der Strahlströmung war bei Bohl und Foss mit einer verstärkten Krümmung des Umgebungsfluids in die Strahlströmung begleitet.

1998 fassten Yu, Hou und Low zur Wirbelbildung stromab der Tabs zusammen, dass jeder Tab zwei ausgeprägte Typen von Strömungsstrukturen erzeugt. Die erste besteht aus einem Paar langgestreckter entgegengesetzt drehender strömungsgerichteter Wirbel, die sich bilden, indem sich die Strömung, die über einen Tab strömt, wegen der Druckdifferenz zwischen der stromauf und der stromab Tabseite um die Kanten des Tabs aufwickelt und eine spiralförmige Bewegung beginnt. Die zweite Strömungsstruktur besteht aus einer periodischen Abfolge normaler Wirbel. Ab einer stromab Entfernung von einem Düsendurchmesser treten beide Typen miteinander in Wechselwirkung, wobei die strömungsgerichteten Wirbel die normalen zusammendrücken und diese in eine sogenannte abgeklemmte Struktur verformen. Mi und Nathan zeigten 1999, dass sich bei einer dicken Grenzschicht stromauf des Tabs ein weiteres zusätzliches Wirbelpaar mit entgegengesetztem Drehsinn zum Hauptwirbelpaar bildet, welches dem Hufeisenwirbel entspricht.

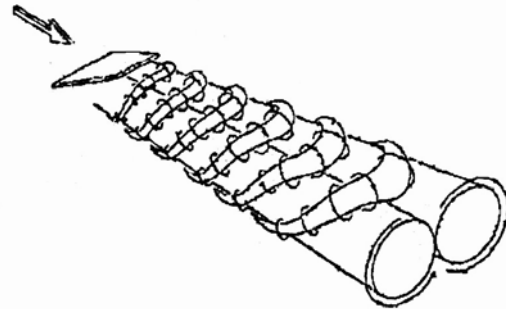


BILD 1. Wirbelstrukturen stromab eines Tabs nach Gretta und Smith 1993 ohne Hufeisenwirbel

Über den Ursprung der kleinskaligen Strukturen stromab eines Tabs wurde viel spekuliert und Huang und Ho nahmen 1990 an, dass die steigende Verformung aufgrund der Wechselwirkung der großskaligen Wirbelbewegungen für die kleinskaligen Strukturen verantwortlich ist. Hu schrieb 1996, dass die strömungsgerichtete Vorticity die Instabilität der normalen beschleunigt. Viskose Diffusion beschleunigt dann den Transport von Energie und Vorticity zu kleineren Skalen.

Neben dem Mischungscharakter haben diese passiv arbeitenden Wirbelgeneratoren noch eine weitere fundamentale Bedeutung, weil deren großskalige Strukturen im Nachlauf strukturelle Gleichheit mit denen, die in der natürlichen Grenzschicht vorkommen, besitzen. Diese großskaligen Strukturen induzieren in ähnlicher Weise quer zur Strömungsrichtung einen Austausch von Masse und Impuls wie ihre Gegenstücke in der natürlichen turbulenten Grenzschicht. In einer natürlichen turbulenten Grenzschicht ist es schwer diese Strukturen aufgrund ihrer geringen Größe zu untersuchen, weshalb zu diesem Zweck auch Tabnachläufe herangezogen werden.

Wie dargestellt, sind die Mischungsverstärker in gerader Scherschicht schon recht gut untersucht worden. Dies trifft auf gekreuzte Scherschichten nicht zu. Bezüglich einer gekreuzten Scherschicht führten DalBello und Steffen 2001 eine Computersimulation durch, in welcher sie die Wirkung eines Mischungsverstärkers in einem Blütenmischer untersuchten. Der Einfachheit halber wurden von ihnen jedoch die in der Realität gerundeten Blüten durch einfachere rechteckige Blüten ersetzt und es wurden keine Grenzschichten in der Eintrittsebene berücksichtigt. Weiterhin simulierten sie die Mischungsverstärker ausschließlich durch jeweils zwei in das Rechenmodell eingearbeitete Wirbel, deren Drehrichtung mit durch Wirbelgeneratoren eingebrachte Wirbeln korrespondieren, die in die hochgeschwinde Seite mit einem Neigungswinkel von 45° eingebracht werden. Hieraus folgt, dass sie weder den Gesamtdruckverlust durch die Wirbelgeneratoren noch deren Blockade und die sich daraus ergebenden Effekte betrachten können. Ihre Untersuchungen ergaben, dass diese von ihnen eingebrachten Wirbel die Strömungsstruktur stark änderten, woraus sich auch eine spürbare Verbesserung in der Durchmischung beider Strahlen ergab.

Deinert und Hourmouziadis 2003 zeigten erste Ergebnisse zum Strömungsverhalten bei Mischungsverstärkern in konstant gekreuzten Scherschichten. 2005 wurden von Deinert und Hourmouziadis hierzu weitere Untersuchungen vorgestellt, wobei einerseits experimentell und andererseits numerisch auch mit der Simulation der realen Blüte und eines dort eingebauten Mischungsverstärkers gearbeitet wurde.

5. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

5.1. Versuchsaufbau

5.1.1. Der Niedergeschwindigkeits-Windkanal

Ein Teil der experimentellen Untersuchungen und Visualisierungen wurde an einem Niedergeschwindigkeits-Windkanal durchgeführt, der in der horizontalen Ebene geteilt ist und verschiedene Geschwindigkeitsverhältnisse und Kreuzungswinkel zwischen den beiden Strahlen zulässt.

Die Luftversorgung wird über zwei Radialgebläse gleicher Baugröße gewährleistet. Der Messstreckenaustritt hat eine Größe von 0,6 x 1 m.

Am Messstreckenaustritt können einerseits wie im Bild 2 dargestellt eine ebene Trennplatte zwischen beiden Strahlen für eine konstant gekreuzte Scherschicht mit Blechen mit verschiedenen Mischungsverstärkerformen eingebracht werden. Zum anderen kann die im Bild 2 gezeigte ebene Trennplatte durch einen abgewinkelten Blütenmischer ersetzt werden. Hieran können die Mischungsverstärker befestigt werden.



BILD 2. Niedergeschwindigkeits-Windkanal am ILR

In den Experimenten wurden bei den konstant gekreuzten Scherschichten die jeweils 20°-gekreuzte Scherschicht untersucht, da diese Scherwinkel denen in der Flankenmitte im Blütenmischer entsprechen. Für beide Fälle wurden Strahlgeschwindigkeiten von 10 m/s und 5 m/s gewählt.

5.1.2. Der Hochgeschwindigkeits-Windkanal

Neben den Messungen am Niedergeschwindigkeits-Windkanal wurden auch Messungen am Hochgeschwindigkeits-Zweistromwindkanal des ILR der TU Berlin durchgeführt, da hier eine Temperaturdifferenz und triebwerksähnliche Machzahlen simuliert werden können.

Die Messstrecke ermöglicht die Simulation des Kern- und Nebenstromes eines Flugtriebwerkes mit einem Nebenstromverhältnis von ungefähr 1, einem Geschwindigkeitsverhältnis von 2 und einem

Temperaturverhältnis in °C von 4. Hierbei ergeben sich Machzahlen von 0,35 bzw. 0,17. Die Austrittsquerschnitte haben jeweils eine Höhe von 250 mm und eine Breite von 50 mm für den Kernstrom bzw. 100 mm für den Nebenstrom.



BILD 3. Hochgeschwindigkeits-Windkanal am ILR

Zur Luftversorgung der Messstrecke stehen drei Radialverdichter zur Verfügung. Jeder dieser Verdichter liefert einen Nennmassenstrom von 1,5 kg/s bei einem Druck von 2 bar und kann über Vordrallrosseln geregelt werden. Zur Simulation der Temperaturdifferenz wird die Nebenstromluft mit einem in die Verdichteranlage integrierten Durchlaufkühler gekühlt.

Beide Massenströme werden am Beginn der Messstrecke über einen abgewinkelten Blütenmischer, an dessen Flanke sich ein Mischungsverstärker befindet, zusammengeführt.

5.1.3. Der Flachwasserkanal

Der Flachwasserkanal wurde 1996 am Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Berlin konstruiert und ausgelegt. Er wurde modular aufgebaut wie im Bild 4 zu erkennen ist.

In diesem Wasserkanal wurden die Strömungsvorgänge sichtbar gemacht. Der Kanal besitzt eine Messstrecke mit einer freien Oberfläche und Abmaßen von 1000x1000 mm. Zur Realisierung der gekreuzten Scherschicht wurden die Wassermassen in zwei sich kreuzende Strahlen aufgeteilt, so dass eine gekreuzte Scherschicht in einem Winkel von zweimal 20° entstand (Bild 4).

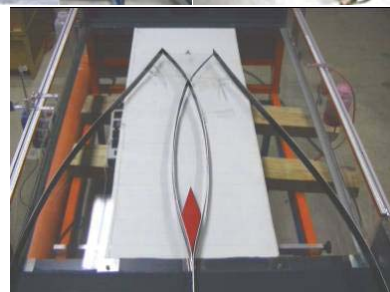


BILD 4. Wasserkanal am ILR und Simulation der gekreuzten Scherschicht

Zur Visualisierung der Strömungsvorgänge wurde Farbe in die Strömung eingebracht. Ein Farbrechen ist in Bild 4 oben rechts dargestellt. Er enthält 15 Kanülen, die einen Austrittsdurchmesser von 0.3 mm haben.

5.2. Messtechnik

Zur Vermessung des Strömungsfeldes stromab der Mischungsverstärker wurden pneumatische Fünflochsonden und eine Vorticitysonde verwendet. Diese Sonden wurden mit Hilfe einer Isel 3-Achsen Traversiereinrichtung im Nachlauf der Mischungsverstärker verfahren und die Daten von einem Datenspeicher aufgenommen. Des weiteren wurde die Strömung mit Hilfe der Laser-Lichtschnitt-Technik visualisiert.

6. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

6.1. Die Mischungsverstärker

In dieser Arbeit wurden die in der Literatur als Tabs bekannten Mischungsverstärker untersucht. Diese dreieckigen Mischungsverstärker sind mit ihrer Grundseite an der Hinterkante der Trennplatte zwischen beiden Strahlen befestigt und stehen in einem Neigungswinkel von ca. 45° zu ihr. Die folgende Abbildung zeigt die Bezeichnungen am Mischungsverstärker und das Koordinatensystem für den Niedergeschwindigkeits-Windkanal.

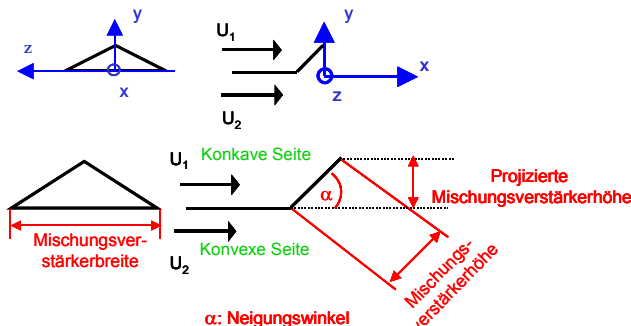


BILD 5. Bezeichnungen am Mischungsverstärker

Bei der Auslegung der Mischungsverstärker ist von großer Bedeutung wie weit die Mischungsverstärker außerhalb der Grenzschicht liegen. Dies wird durch die Mischungsverstärkerzahl berücksichtigt, die folgendermaßen definiert ist. Sie stellt eine Ähnlichkeitskennzahl dar und eine ausführliche Herleitung hierzu befindet sich in der Arbeit.

$$(1) \quad Mz = \frac{h_{Proj.}}{\delta}$$

Bei einer Auslegung ein und des selben Mischungsverstärkers für verschiedene Grenzschichten muss die Mischungsverstärkerzahl und das Höhen-Breiten-Verhältnis eingehalten werden. Da in beiden Windkanälen die Grenzschichten unterschiedlich dick sind,

ist ein und der selbe Mischungsverstärker in beiden Kanälen unterschiedlich groß, da die Mischungsverstärkerzahl eingehalten wird.

6.2. Mischungsverstärker in konstant gekreuzter Scherschicht

Um einen qualitativen Einblick in die Strömungsphänomene stromab eines tabförmigen Mischungsverstärkers in gekreuzter Scherschicht zu erhalten, wurde dieser Strömungsfall im Wasser- und im Windkanal visualisiert. Bild 6 zeigt einen Mischungsverstärker in konstant gekreuzter Scherschicht im Windkanal bzw. im Wasserkanal. Durch die weißen Pfeile werden die Anströmrichtungen angedeutet, wobei der durchgezogene Pfeil die Anströmungsseite kennzeichnet, in welche der Mischungsverstärker geneigt ist und der gestrichelte Pfeil die Anströmungsrichtung des anderen Strahls darstellt.



BILD 6. Mischungsverstärker in gekreuzter Scherschicht im Windkanal (links) und im Wasserkanal (rechts)

In der Einleitung wurde das Strömungsverhalten stromab eines Mischungsverstärkers in gerader Scherschicht beschrieben. Wird ein Mischungsverstärker in einer konstant gekreuzten Scherschicht angeströmt, so verstärkt sich der eine strömungsgerichtete Wirbel bei gleichzeitiger Schwächung des anderen. In beiden Visualisierungen ist zu erkennen, dass der Wirbel, der an der Mischungsverstärkerseite abgeht, die zur relevanten Anströmung (Strömung, in die der Mischungsverstärker geneigt ist) einen kleineren Winkel bildet, geschwächt wird. In den Visualisierungen im Windkanal ist dieser Wirbel so schwach, dass er zwar beobachtet werden konnte, in den Aufnahmen jedoch nicht zu erkennen ist.

Weiterhin ist in den Visualisierungen im Wasserkanal zu sehen, dass der schwächere Wirbel sehr viel schräger verläuft und über den starken Wirbel hinwegströmt. Dies konnte auch in entsprechenden numerischen Untersuchungen bestätigt werden.

Da der Vorticityvektor, der aus der Grenzschicht resultiert, senkrecht zur Geschwindigkeit steht, ergeben sich die im Bild 7 dargestellten Vorticityvektoren.

Im Fall der gekreuzten Scherschicht zeigte schon Bild 6, dass die Umströmung des Mischungsverstärkers aufgrund der zusätzlichen Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung unsymmetrisch ist. Der Vorticityvektor besitzt bereits vor der Störung durch den Mischungsverstärker eine z- und x-Vorticitykomponente. Dies kann in den Messungen links und rechts des Mischungsverstärkers erkannt werden. Die zusätzliche positive z-Komponente der Anströmung „unterstützt“ die Seite, welche auch durch die Mischungsverstärkerumströmung eine zusätzliche positive z-Komponente erzeugt und „behindert“ die andere Seite. Dadurch ist der Wirbel, der durch die positive Vorticity entsteht stärker als der negative. Dieser Zusammenhang ist in Bild 7 dargestellt.

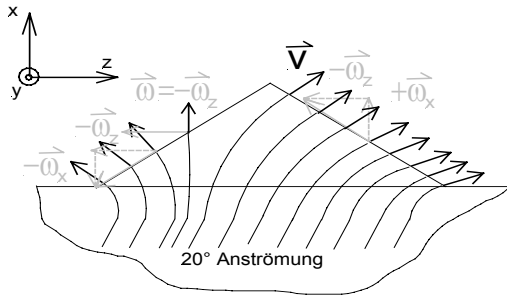


BILD 7. Mischungsverstärker in gekreuzter Scherschicht

Das Verhalten der Umströmung eines Mischungsverstärkers wird im Folgenden noch einmal anhand von Messungen mit der Vorticitysonde gezeigt.

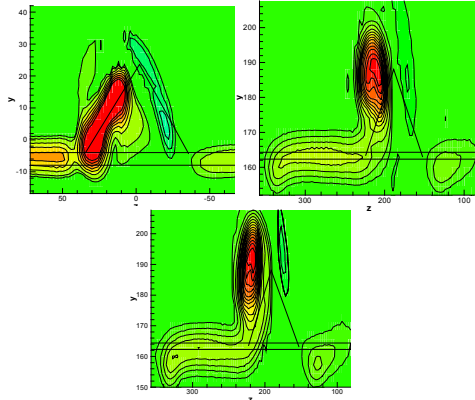


BILD 8. strömungsgerichtete Vorticity für drei stromab Entfernungen (5-68-105m); y-z-Ebene

Im Bild 8 ist die stromab Entwicklung der Strömung hinter einem Mischungsverstärker in gekreuzter Scherschicht dargestellt. Hierbei wurden für den gleichen Strömungsfall drei Stromabebenen vermessen (10mm, 68mm und 105 mm stromab). Es ist in allen Bildteilen zu sehen, dass sich neben dem Mischungsverstärker eine positive strömungsgerichtete Vorticity aufgrund der Scherung der beiden Strahlen und der eingangs gemachten Erklärungen bildet. Weiterhin bilden sich wie in den Visualisierungen gezeigt zwei Bereiche mit strömungsgerichteter Vorticity entgegengesetzten Vorzeichens, die unterschiedlich stark sind.

Es ist weiterhin festzustellen, dass die Bereiche mit hoher

strömungsgerichteter Vorticity beim stromab wandern diffundieren und sich aufgrund von gegenseitiger Beeinflussung nach oben bewegen.

6.3. Mischungsverstärker in mischerähnlicher Scherschicht

Wie gezeigt, dreht sich bei dem Paar strömungsgerichteter Wirbel, welches durch den Mischungsverstärker entsteht, der schwache Wirbel in einer konstant gekreuzten Scherschicht mit steigender stromab Entfernung um den starken herum in der Drehrichtung des starken Wirbels. Dies zeigt sich auch im Falle der mischerähnlichen Scherschicht. Eine Laserlichtschnitt-Visualisierung am Niedergeschwindigkeits-Windkanal soll dies verdeutlichen.

5 mm: 18 mm: 40 mm: 58 mm:

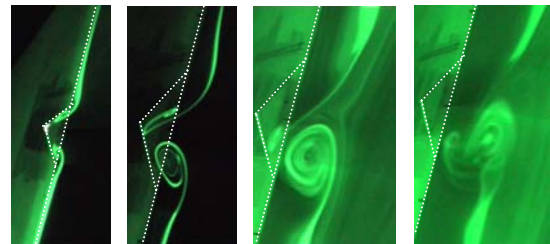


BILD 9. Mischungsverstärker im Blütenmischermodell bei versch. Stromab Entfernungen

Es sind beide Wirbel deutlich zu erkennen. Es ist zu sehen, wie sich der schwache Wirbel mit steigender stromab Entfernung um den starken herum bewegt. Bei der konstant gekreuzten Scherschicht wurde gezeigt, dass sich dadurch die Wirbel aus ihrer Entstehungsebene heraus bewegen. Damit verbessert sich die Mischung.

6.4. Mischungsgrad und Schubgewinn im Abgasblütenmischer

Als Mischungsgrad für den Hochgeschwindigkeits-Windkanal wurde eine Definition nach Strecker, 2003 verwendet.

$$(2) \quad \eta_{mix} = \frac{1}{A} \int_A \left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{Kern} - T}{T_{Kern} - T_{mix}} \text{ für } : T \geq T_{mix} \\ \frac{T - T_{Neben}}{T_{mix} - T_{Neben}} \text{ für } : T < T_{mix} \end{array} \right\} dA$$

Hierbei bildet sich die ausgemischte Temperatur über den Energieerhaltungssatz.

$$(3) \quad T_{mix} = \frac{BPR}{BPR + 1} T_{Neben} + \frac{1}{BPR + 1} T_{Kern}$$

Diese Definition kann nur für Strahlen mit unterschiedlichen Temperaturen angewendet werden, wie es zum Beispiel am Hochgeschwindigkeits-Windkanal der Fall ist. Für den Niedergeschwindigkeits-Windkanal, bei dem beide Strahlen die gleiche Temperatur besitzen, wurde eine Definition über die strömungsgerichtete Geschwindigkeit als Maß für den Massentransport gewählt.

$$(4) \eta_{mix} = \frac{1}{A} \int_A \left\{ \begin{array}{l} \frac{v_{x,schnell} - v_x}{v_{x,schnell} - v_{x,mix}} \text{ für } : v_x \geq v_{x,mix} \\ \frac{v_x - v_{x,langsam}}{v_{x,mix} - v_{x,langsam}} \text{ für } : v_x < v_{x,mix} \end{array} \right\} dA$$

Hierbei bildet sich die ausgemischte Geschwindigkeit über den Impulserhaltungssatz.

$$(5) v_{mix} = \frac{BPR}{BPR+1} v_{x,langsam} + \frac{1}{BPR+1} v_{x,schnell}$$

Als Definition für den Druckverlust wird eine leicht modifizierte Variante der Definition nach Kreskovsky, 1984 verwendet.

$$(6) c_p = \frac{\int_A \frac{P_{Kern} - P}{P_{Kern} - p_0} \rho v dA}{\int_A \rho v dA}$$

Im Falle des Hochgeschwindigkeits-Windkanals wurde jeweils ein Messbereich mit der kompletten Mischerkanalhöhe und der Breite einer halben Blüte vermessen. Im Falle des Niedergeschwindigkeits-Windkanals war dies aufgrund der sehr großen Abmaße des Kanals nicht möglich. Hier wurde nur ein kleiner Bereich um den Mischungsverstärker vermessen.

Mit Hilfe der Impulserhaltung lässt sich der Schub F bei angepasster Düse allgemein nach der Bezeichnungweise der ARP 1257 wie folgt schreiben:

$$(7) F = \dot{m} v_9 - \dot{m}_{Neben} v_{Neben} - \dot{m}_{Kern} v_{Kern}$$

Durch Umstellen lässt sich hieraus der dimensionslose Schub herleiten.

$$(8) F_{dim} = \frac{F}{\dot{m} a_{T,Neben}} = \frac{1}{A} \int_A M_{T,9} \sqrt{\frac{T_9}{T_{Neben}}} dA - \dots$$

$$\dots - \frac{BPR}{BPR+1} M_{T,Neben} - \frac{1}{BPR+1} M_{T,Kern} \sqrt{\frac{T_{Kern}}{T_{Neben}}}$$

Da die Versuchsanlage keine Düse stromab des Mischerkanals besitzt, wird diese „rangerechnet“. Hierbei handelt es sich um eine einfache konvergente, kritische Düse, deren Wirkungsgrad einen üblichen Wert von 0.97 annimmt.

Der Schubgewinn kann nun durch Betrachtung des Schubes eines abgewinkelten Mischers mit Mischungsverstärker zu einem ohne wie folgt ermittelt werden.

$$(9) F_{dim_{Gewinn}} [\%] = \frac{F_{dim_{mit_MV}} - F_{dim_{ohne_MV}}}{F_{dim_{ohne_MV}}}$$

Die folgende Tabelle zeigt die Randbedingungen der Untersuchung für den Hochgeschwindigkeits-Windkanal.

Machzahl des Kernstroms M_{Kern}	0.35
Machzahl des Nebenstroms M_{Neben}	0.17
Geschwindigkeitsverhältnis v_{Kern}/v_{Neben}	2.1
Gesamtdruckverhältnis P_{Neben}/P_{Kern}	0.97
Temperaturverhältnis T_{Kern}/T_{Neben} (bzgl. °C)	4
Bypassverhältnis BPR	1.1

TAB 1. Randbedingung der Messungen

Im Triebwerk herrschen aufgrund der sehr hohen Temperaturen bei Geschwindigkeitsverhältnissen um 2 ähnlich große Machzahlen für Kern- und Nebenstrom. Da im Versuch bei weitem nicht die Temperaturen, die in Triebwerken üblich sind, herrschten, konnte hier nur Machzahl- oder Geschwindigkeitsverhältnis eingehalten werden. Da die Scherschicht sehr stark vom Geschwindigkeitsverhältnis abhängig ist, wurde im Versuch das Geschwindigkeitsverhältnis triebwerksähnlich gewählt.

Für die so gewählten Randbedingungen wurden im Hochgeschwindigkeits-Windkanal mit Blütenmischer jeweils mit und ohne Mischungsverstärker 4 stromab Entfernungen vermessen. Das folgende Bild stellt diesen Zusammenhang noch einmal bildlich dar.

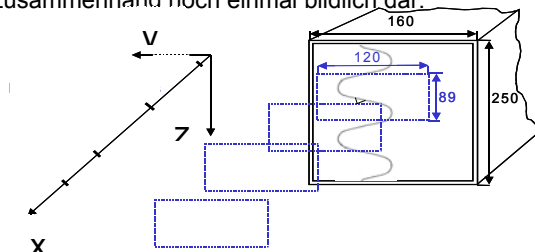


BILD 10. Anordnung der vermessenen Ebenen

Bild 11 zeigt die Wirkung eines Mischungsverstärkers im Blütenmischer, indem es die Temperaturverläufe der Fälle mit und ohne Mischungsverstärker gegenüberstellt.

Die Bilder ohne Mischungsverstärker zeigen die im Blütenmischer übliche Mischung. Zwischen beiden Strahlen bildet sich eine Mischungsschicht aus, die sich nach und nach aufdickt.

Im Falle des Mischers mit Mischungsverstärker zeigt sich schon die Wirkung des Mischungsverstärkers 5 mm stromab durch eine noch sehr kleine Beule in der Mischungsschicht. Diese wird mit steigender stromab Entfernung immer größer und vergrößert dadurch den ausgemischten Bereich. Der Grund warum die Mischungsschicht eher im Bereich des heißeren Strahls liegt, ist der, dass der Mischungsverstärker in den heißen Strahl geneigt ist.

In Folgenden sollen die einzelnen Ebenen bezüglich ihres Mischungsgrades und Druckverlustes ausgewertet und verglichen werden.

In Bild 12 ist die Stromabentwicklung für die Fälle Blütenmischer mit und ohne Mischungsverstärker dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass der Mischungsverstärker zu einem Zuwachs im Mischungsgrad und im Druckverlust führt und dass beides, Mischungsgrad und Druckverlust, mit steigender stromab Entfernung zunimmt.

Die Zuwächse für den Mischungsgrad und den Druckverlust aufgrund des Mischungsverstärkers sind ähnlich groß. Ob der Einsatz von Mischungsverstärkern jedoch zu einem Schubgewinn führt, kann nur durch die Berechnung des Schubes geklärt werden. Hierfür wird der dimensionslose Schub und dessen Schubgewinn nach den Gleichungen 8 und 9 bestimmt.

Die Eintrittsdaten sind in der Tabelle 1 dargestellt. Wie besprochen, entsprechen die Temperaturen beider Strahlen nicht denen im Triebwerk.

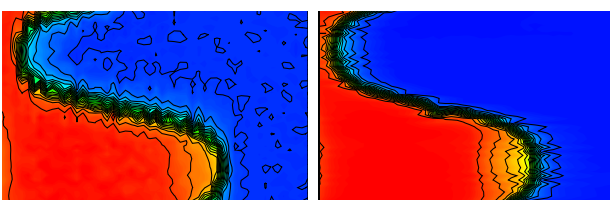
Die Gesamttemperatur des Nebenstromes war 298 K und die des Kernstromes 368 K. Die Düse wurde mit einem Gegendruck von 55 000 N/m² berechnet. Für die Ebene 250 mm stromab der Mischerhinterkante errechnete sich so ein Schubgewinn von 0.23%. Da der maximal mögliche Fehler jedoch hier in gleicher Größenordnung lag, müssen die Werte mit Vorsicht betrachtet werden und bedürfen noch einer messtechnischen Überprüfung.

T / T_{max} :

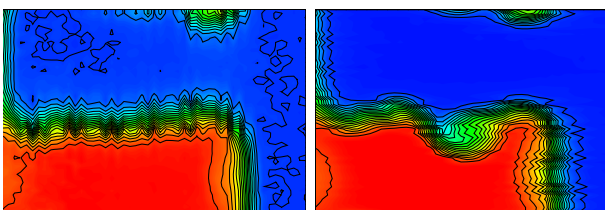
0,23	0,27	0,31	0,35	0,39	0,43	0,47	0,51	0,55	0,59
0,63	0,67	0,71	0,75	0,79	0,83	0,87	0,91	0,95	0,99

ohne Mischungsverstärker mit Mischungsverstärker

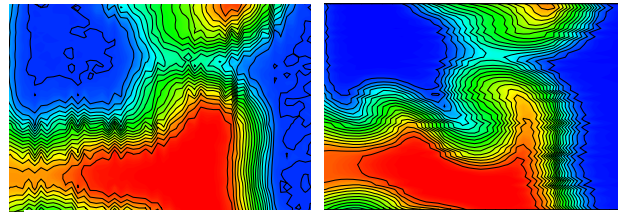
5 mm stromab der Blütenmischerhinterkante



100 mm stromab der Blütenmischerhinterkante



200 mm stromab der Blütenmischerhinterkante



250 mm stromab der Blütenmischerhinterkante

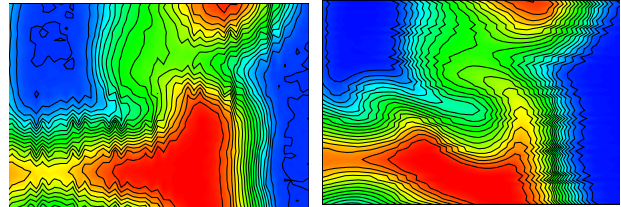


BILD 11. T / T_{max} bei verschiedenen stromab Entfernungen

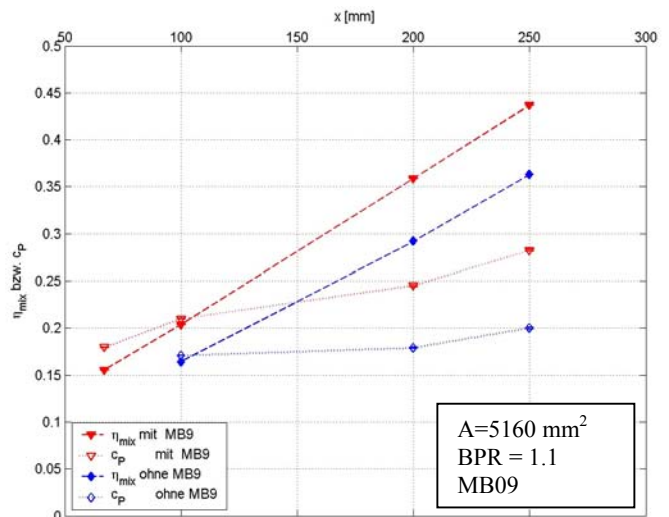


BILD 12. Stromabentwicklung des Mischungsgrades und Druckverlustes

Darüber hinaus steht jedoch fest, dass der Schubgewinn im Triebwerk aufgrund der sehr viel höheren Temperaturen auch höher ausfallen muss als im vermessenen Fall.

7. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse der Vermessung des Strömungsfeldes stromab tabförmiger Mischungsverstärker mittels der Fünflochsonde und Vorticitysonde in der konstant gekreuzten und der mischerähnlichen Scherschicht vorgestellt. Darüber hinaus wurde der Mischungsgrad und der Druckverlust bestimmt. Es wurde versucht eine Aussage über den durch einen Mischungsverstärker zu erreichenden Schubgewinn zu machen. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich mit folgenden Punkten zusammenfassen:

- Es konnte in Visualisierungen in der Luft und im Wasser und in Messungen mit der Fünflochsonde und der Vorticitysonde gezeigt werden, dass sich bei der Umströmung eines Mischungsverstärkers in gekreuzter Scherschicht ein Wirbel verstärkt bei gleichzeitiger Schwächung des anderen. Dabei wird der Wirbel geschwächt, der an der Mischungsverstärkerkante abgeht, die mit der Richtung der relevanten Strömung (Strömung, in die der Mischungsverstärker geneigt ist) einen kleineren Winkel bildet.
- Bei der Scherschicht im Blütenmischer bilden sich durch einen Mischungsverstärker, wie im Falle der konstant gekreuzten Scherschicht, ein Paar strömungsgerichteter, entgegengesetzt drehender Wirbel. Hierbei ist wieder der eine stärker als der andere. Der schwächere dreht sich mit steigender stromab Entfernung um den stärkeren in der Drehrichtung des stärkeren.
- Bei der stromab Entwicklung des Strömungsfeldes um einen Mischungsverstärker in einem abgewinkelten Blütenmischer zeigt der Mischungsverstärker schon 5 mm stromab eine Wirkung in Form einer noch sehr kleinen Beule in der Mischungsschicht. Diese wird mit steigender stromab Entfernung immer größer und vergrößert dadurch den ausgemischten Bereich. Der Grund warum die Mischungszone eher im Bereich des heißeren Strahls liegt, ist der, dass der Mischungsverstärker in den heißen Strahl geneigt ist.
- Aus den Messwerten wurde der Schub nach „heranrechnen“ einer Schubdüse berechnet. Dieser zeigte einen Schubgewinn durch den Mischungsverstärker. Da der maximal mögliche Fehler allerdings in gleicher Größenordnung liegt, muss dieses Ergebnis mit äußerster Vorsicht betrachtet werden und bedarf einer messtechnischen Überprüfung. Darüber hinaus steht jedoch fest, dass der Schubgewinn im Triebwerk aufgrund der sehr viel höheren Temperaturen auch sehr viel höher ausfallen muss als im vermessenen Fall.

8. LITERATUR

- K.K.Ahuja, W.H.Brown, 1989
Shear flow control by mechanical tabs
AIAA Paper No 89-0994, 1989
- D. Bohl, J.Foss, 1996
Enhancement of passive mixing tabs by the addition of secondary tabs
AIAA 96-0545, 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit Januar 15-18, 1996, Reno,NV
- L.J.S.Bradbury, A.H.Khadem, 1974
The distortion of a jet by tabs
J.Fluid Mech.,Vol.70, part4, Seiten 801-813
- B. Deinert, J. Hourmouziadis, 2003
Mischungsverstärker in gerader und gekreuzter Scherschicht
DGLR-2003-102, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2003, München, 17.11-20.11.2003
- B. Deinert, J. Hourmouziadis, 2003
Mischungsverbesserung in Abgasmischem von Turbostrahltriebwerken
DGLR-2005-163, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2005, Friedrichshafen, 26.09-29.09.2005
- J.K. Foss, K.B.M.Q Zaman, 1997
Optimal Configuration of an Array of Tabs for mixing enhancement in a shear layer
AIAA Paper 1997-0301
- H.Hu, S.S.Wu, G.X.Shen, E.Yagoda, 1996
Effect of tabs on the vortical and turbulent structures of jet flows
ASME FED Vol. 237, Seite 77-84
- L.S.Huang, C.M.Ho, 1990
Small-scale transition in a plane mixing layer
Journal of Fluid Mech., 210, seite 475-500
- J.P. Kreskovsky, W.R. Briley, H. McDonald, 1984
Investigation of mixing in a turbofan exhaust duct Part I+II
AIAA Journal 22, 3&4,pp.374-382 & 518-525
- J.Mi, G.J.Nathan, 1999
Effect of small vortex-generators on scalar mixing in the developing region of a turbulent jet
International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.42, Issue 21, Seiten 3919-3926
- M.Samimy, M.F.Reeder, K.B.M.Q.Zaman, 1991
Supersonic jet mixing enhancement by vortex generation
AIAA Paper No 91-2263, 1991
- N. Schröder, 2000
Die gekreuzte Scherschicht
Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 7, Nr.380

U. Strecker, 2003
Untersuchung der Mischungsvorgänge an einem
abgewickelten Zwangsmischer
Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 7, Nr.452

S.C.Yu, Y.X.Hou, S.C.Low, 1998
The flow characteristics of a confined square jet with
mixing tabs
Proceedings of the I MECH E Part G Journal of
Aerospace Engineering, Seite 63-76

K.B.M.Q.Zaman, M.F.Reeder, M.Samimy, 1991
Effect of tabs on the evolution of an axisymmetric jet
NASA Lewis Research Center, NASA-TM-104472

K.B.M.Q.Zaman, M.F.Reeder, M.Samimy, 1994
Control of an axisymmetric jet using vortex generators
Phys. Fluids, Vol.6, Issue 2, Seite 778-793