

# UNTERSUCHUNGEN ZUM BETRIEBSVERHALTEN DES TRIEBWERKSMISCHERS IM NIEDRIGEN LASTBEREICH

B. Banzhaf, S. Staudacher  
 Universität Stuttgart, Institut für Luftfahrtantriebe  
 Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart

## 1. ÜBERSICHT

Moderne Turboluftstrahltriebwerke werden unter anderem mit Düsensystemen ausgerüstet, die eine interne Vermischung von heißem und kaltem Strahl vorsehen. Typische Vertreter solcher Triebwerke sind die Triebwerke Tay, BR710, BR715 und V2500. Eine solche Düsenkonfiguration hat Auswirkungen auf die Auslegung der Triebwerke und deren Betriebsverhalten. Um das Betriebsverhalten dieser Triebwerke beim Anlassen und im Windmilling zu beschreiben, ist es erforderlich, das Betriebsverhalten des Düsensystems auch in diesen Lastbereichen zu verstehen und heraus eine sinnvolle Modellbildung für die Anwendung in Leistungsrechnungsprogrammen abzuleiten. Zu diesem Zweck erfolgte am Institut für Luftfahrtantriebe in einem ersten Schritt eine phänomenologische Untersuchung der Mischung bei verschiedenen Randbedingungen am Wasserkanal. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

## 2. NOMENKLATUR

### Formelzeichen

H	Wasserhöhe
Hf	Flughöhe
MN	Machzahl
MNf	Flugmachzahl
U	Strömungsgeschwindigkeit
Pamb	Umgebungsdruck
Pt	Totaldruck
Re	Reynoldszahl
WF	Brennstoffmassenstrom
$\alpha$	Öffnungswinkel
$\beta$	Abströmwinkel
$\lambda$	Geschwindigkeitsparameter
$\nu$	Viskosität

### Indizes

1	schnelle Strömung
2	langsame Strömung
bez	bezogen
Byp	Nebenstrom
Core	Hauptstrom
m	mittlere

## 3. EINLEITUNG

In modernen Zweistrom - Turboluftstrahltriebwerken wird die interne Vermischung der kalten Nebenströmung mit der heißen Hauptströmung zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades und zur Verringerung des

Strahlärms eingesetzt. Die damit verbundene Kopplung von Haupt- und Nebenstrom beeinflusst die Auslegung und das Betriebsverhalten des Gesamttriebwerks wesentlich [1].

Bei der Triebwerksauslegung wird das Fan-Druckverhältnis bei gegebenem Nebenstromverhältnis so gewählt, dass ein möglichst optimaler Energietransport realisiert werden kann. Dies ist für ein Totaldruckverhältnis zwischen Neben- und Hauptstrom am Mischereintritt von ungefähr eins gegeben [2], [3]. Im niedrigen Teillastbereich und insbesondere im Windmilling weicht dieses Druckverhältnis erheblich von eins ab. Wird das Triebwerk im Windmilling betrieben, weicht das Komponentenverhalten stark vom Betrieb im Auslegungspunkt ab [4], [5]. Die Komponenten des Kerntriebwerks bilden im Windmilling einen großen Strömungswiderstand. Der Totaldruck des Kernstroms am Mischereintritt liegt folglich im Bereich des Umgebungsdruckes. Der Nebenstromkanal bietet einen vergleichsweise geringen Strömungswiderstand. Das Fan-Druckverhältnis liegt geringfügig unter eins. Der Totaldruck des Nebenstroms am Mischereintritt ist damit durch den Staudruck bestimmt. Das Totaldruckverhältnis zwischen Neben- und Kernstrom in der Mischungsebene liegt damit, abhängig von der Flugmachzahl deutlich über eins (siehe Bild 1).

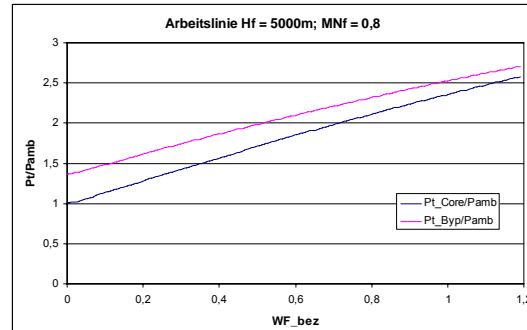


Bild 1: Druckverlauf am Mischereintritt

Wird basierend auf der lokal an der Hinterkante des Mischers geltenden Kutta'schen Abflussbedingung [10] angenommen, dass in der gesamten Ebene gleiche statische Drücke herrschen, ergeben sich im Windmilling große Differenzen in den Machzahlen von Kern- und Nebenstrom. In Bild 2 ist der Verlauf der Strömungsmachzahlen im Mischer eines gemischten Nebenstromtriebwerks bei festgehaltener Flughöhe und Flugmachzahl dargestellt. Der Brennstoffmassenstrom wird kontinuierlich vom Vollastpunkt bis zum Windmilling reduziert. Während die Strömungsmachzahlen im Bereich des Auslegungspunktes ( $WF_{bez} = 1$ ) auf gleichem Niveau liegen, steigt der Unterschied zwischen den

Strömungsmachzahlen der Kern- und Nebenströmung am Mischereintritt mit kleiner werdendem Brennstoffmassenstrom an.

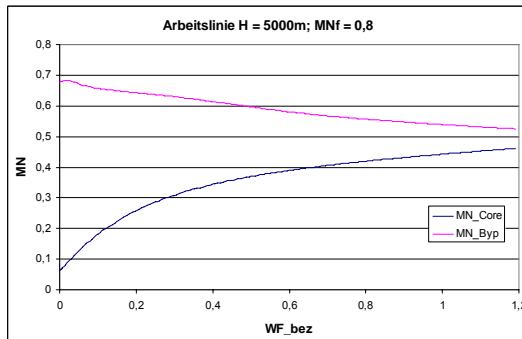


Bild 2: Machzahlen am Mischereintritt

Um das Verhalten der Einheit bestehend aus Mischer und Düse in diesen, stark von der Auslegung abweichenden Zuständen zu verstehen wird in einem ersten Schritt das Verhalten der Strömung im Mischer experimentell untersucht und phänomenologisch beschrieben.

#### 4. VERSUCHSAUFBAU

Die experimentellen Untersuchungen wurden am Wasserkanal durchgeführt. In Bild 3 ist der Aufbau des Wasserkanals schematisch dargestellt. Nach der Zuführung in die Messstrecke wird die Strömung durch eine Trennplatte in zwei parallele Teilströme aufgeteilt (Bild 4). Um das unterschiedliche Widerstandsverhalten von Kern- und Nebenstrom zu simulieren, werden die Teilströme über Siebe und Wehre unterschiedlich stark gedrosselt. Daraus resultieren eine Verschiebung der Trennstromlinie vor der Trennplatte und eine unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit der beiden Teilströme. Die Mischung der Teilströme erfolgt parallel über eine ebene Platte oder über einen abgewinkelten Blütenmischer. Die Einstellung des Geschwindigkeitsniveaus der Strömung und der Wasserhöhe erfolgt über eine variable Wehr-Siebkombination am Ende der Messstrecke bzw. über einen Bypasskanal zur Regelung des Massenstroms in der Zuleitung.

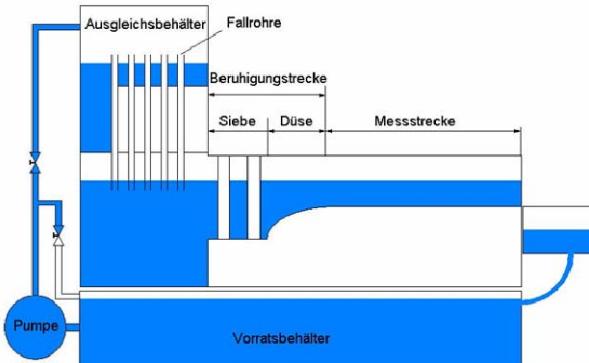


Bild 3: Schematischer Aufbau des Wasserkanals

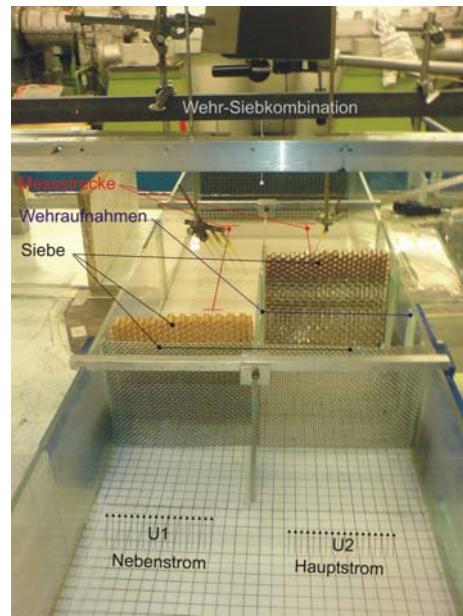


Bild 4: Messstrecke des Wasserkanals

Zur Visualisierung der Strömungsphänomene wurde Tinte durch feine Farbsonden eingebracht. Es ist zu bemerken, dass das erreichbare Geschwindigkeitsniveau daher begrenzt ist und somit eine Machähnlichkeit nach [11] nicht realisiert wird. Es wurde daher das den in Bild 2 dargestellten Machzahlverhältnissen zu Grunde liegende Geschwindigkeitsverhältnis eingestellt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist ferner das abweichende Reynoldszahlniveau zu beachten.

##### 4.1. Visualisierung der Strömung

Die mittels Farbsonden eingebrachte Tinte resultiert in einer Streichlinie. Die Form der Streichlinie ist auf Grund des instationären Charakters der Strömung zeitabhängig. Die Mischzone wird daher durch die graphische Überlagerung mehrerer Einzelaufnahmen dargestellt. So können die Ausbildung von Wirbeln, die Form der Mischzone und mögliche Rückströmungen visualisiert werden (Bild 5).

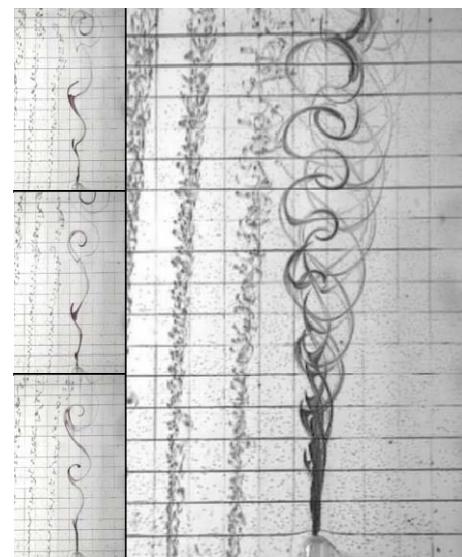


Bild 5: Überlagerung der Einzelbilder

Die Ausbreitung der Mischzone wird über den Öffnungswinkel des Mischkegels und über den Abströmwinkel der Strömung relativ zur Trennplatte beschrieben.

#### 4.2. Indirekte Messung des Geschwindigkeitsverhältnisses

Für die Bestimmung des in 4. eingeführten Geschwindigkeitsverhältnisses wird zur Berücksichtigung der Wandgrenzschichten eine Korrelation zwischen der Geometrie der Trennstromlinie und dem gemessenen Geschwindigkeitsverhältnis erstellt. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in den beiden Teilströmen erfolgt hierbei mittels Farbtröpfchen, die in die Strömung eingebracht werden. Bei konstanter Einstellung der Wasserhöhe und des Gesamtmassenstroms besteht somit eine Korrelation zwischen dem Geschwindigkeitsverhältnis der beiden Teilströme und der Massenstromaufteilung. Aus dem Verlauf der Trennstromlinie vor der Trennplatte (siehe Bild 6) kann folglich während des Versuches mit der im Voraus ermittelten Korrelationsfunktion auf das Geschwindigkeitsverhältnis der Teilströme geschlossen werden.

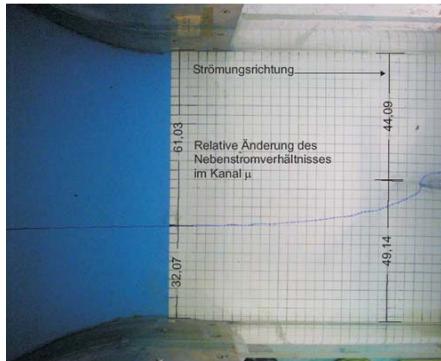


Bild 6: Trennstromlinie zur Ermittlung des Geschwindigkeitsverhältnisses

Die aufwändige Geschwindigkeitsmessung mittels Farbtröpfchen ist somit nur einmalig zur Ermittlung der Korrelationsfunktion notwendig.

### 5. AUSWERTUNG

#### 5.1. Kennzahlen zur Beschreibung der Strömung

Zur Beschreibung der Strömungsbedingungen dient der Geschwindigkeits- oder Scherschichtparameter  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}$$

Dieser Parameter beschreibt die in der Scherschicht herrschende Geschwindigkeitsdifferenz im Verhältnis zur mittleren Geschwindigkeit. Ausgehend von  $\lambda = 0$  für gleiche Strömungsgeschwindigkeit in beiden Teilströmen wächst  $\lambda$  mit zunehmender Geschwindigkeitsdifferenz an bis  $\lambda = 1$  für  $U_2 = 0$ . Nach Sabin [7] verhält sich die Wirbelausbreitung proportional zum Geschwindigkeitsparameter.

#### 5.2. Mischungsmechanismen

Bei der Vermischung zweier Teilströme sind zwei grundsätzliche Strömungsphänomene zu beobachten:

- Kelvin-Helmholtz Scherinstabilitäten
- Strömungsgerichtete Wirbel

Kelvin-Helmholtz Scherinstabilitäten werden durch den Geschwindigkeitsunterschied zweier Teilströme bei der Mischung hervorgerufen [8]. Diese Wirbelstruktur tritt bereits bei der ebenen zweidimensionalen Scherschichtkonfiguration auf. Modellhaft kann man sich vorstellen, dass eine äußere Störung die Strömung in Richtung des schnelleren Strahls auslenkt, wodurch sich im Gebiet der schnelleren Strömung statischer Unterdruck einstellt und analog im Gebiet der langsameren Strömung ein Überdruck. Hierdurch ergibt sich eine destabilisierende Kraft in Richtung des schnelleren Strahls, sowie durch die asymmetrische Geschwindigkeitsverteilung ein Drall, der zu einer Aufwicklung der Scherschicht führt (Bild 7).

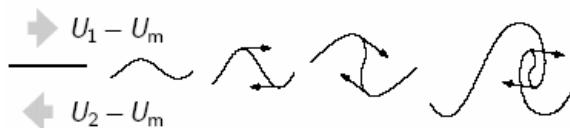


Bild 7: Aufwicklung der Scherschicht aus [8]

Aufgrund des Geschwindigkeitsgradienten quer zur Hauptströmungsrichtung und des sich daraus ergebenden Impulsaustausches verbreitert sich der Mischungsbereich zwischen den Teilströmen mit zunehmender Lauflänge. Die Ausbreitung der Mischzone in Strömungsrichtung ist dabei nach Sabin [7] proportional zum Geschwindigkeitsparameter  $\lambda$ .

Werden die beiden Teilströme nicht parallel, sondern gekreuzt gemischt, entsteht ein strömungsgerichteter Wirbel [9]. Auch der Einfluss der strömungsgerichteten Wirbel auf die Vermischung nimmt nach Belovich [6] mit größeren Geschwindigkeitsdifferenzen der Teilströme zu. Im Blütenmischer überlagern sich die durch die Kelvin-Helmholtz Scherinstabilität hervorgerufenen Wirbel mit den strömungsgerichteten Wirbeln. Die Überlagerung dieser Wirbelstrukturen ist hauptsächlich für die verbesserte Durchmischung im Blütenmischer verantwortlich.

#### 5.3. Parallele Strömungsmischung

Am Versuchsaufbau mit Mischung an der ebenen Platte wurden für verschiedene Geschwindigkeitsparameter  $\lambda$  die Strömungsphänomene der ebenen Scherschicht visualisiert. Weiterhin erfolgte eine quantitative Auswertung der Ausbreitung der Mischzone.

##### 5.3.1. Strömungsphänomene

Für gleiche Strömungsgeschwindigkeiten der beiden Teilströme ( $\lambda = 0$ ) bildeten sich wie zu erwarten keine einseitigen Wirbelstrukturen durch die Kelvin-Helmholtz Scherinstabilitäten aus (Bild 8). Ohne das Auftreten dieser Wirbelstruktur findet praktisch keine Durchmischung der Teilströme statt.

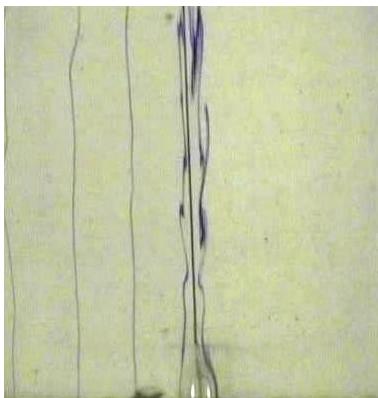


Bild 8: Streichlinien,  $\lambda = 0$

Dieser Strömungszustand erwies sich als sehr instabil. Bei Änderungen des Geschwindigkeitsniveaus oder kleinen Störungen der Strömung bildete sich eine durch gegenläufige Wirbel gekennzeichnete Kármánsche Wirbelstrasse aus (Bild 9). Das Auftreten dieser Wirbel bewirkte eine Intensivierung der Vermischung der Teilströme.

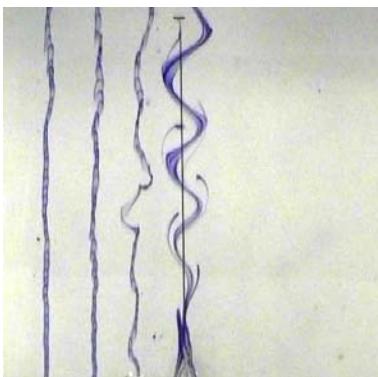


Bild 9: Kármánsche Wirbelstrasse,  $\lambda = 0$

Für Geschwindigkeitsverhältnisse  $\lambda > 0$  stellte sich eine Kelvin-Helmholtz Scherinstabilität mit gleichgerichteten Wirbeln ein (Bild 10). Mit steigendem Geschwindigkeitsverhältnis  $\lambda$  konnte eine Zunahme der Intensität der Wirbel und eine Ablenkung des Mischkegels in Richtung der langsameren Teilströmung festgestellt werden.

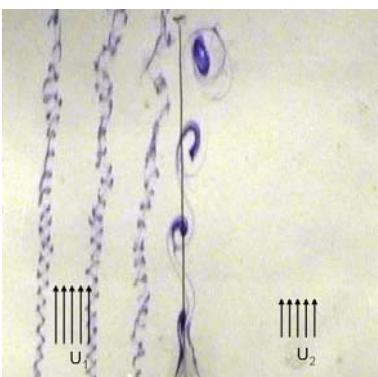


Bild 10: Kelvin-Helmholtz Scherinstabilität,  $\lambda = 0,5$   
Eine Umströmungen der Hinterkante oder lokale Rückströmungen im Bereich der langsameren

Teilströmung treten auch bei starker Drosselung eines Teilstroms nicht auf (Bild 11). Dies unterstreicht die Gültigkeit der Kutta'schen Abflussbedingung.

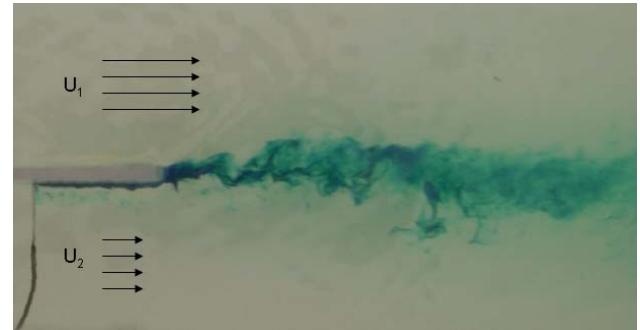


Bild 11: Abströmung von der Hinterkante,  $\lambda = 0,70$

### 5.3.2. Quantitative Auswertung

Der entstehende Mischungskegel (Bild 12) wird durch zwei Parameter geometrisch beschrieben. Der Öffnungswinkel beschreibt die Ausbreitung der Mischzone und ist somit ein Maß für die Intensität der Mischung. Der Abströmwinkel ist der Winkel zwischen der Winkelhalbierenden des Öffnungswinkels und der Verlängerung der Trennplatte. Er beschreibt die Ablenkung der Strömung relativ zur Hauptströmungsrichtung.



Bild 12: Ausbreitung der Mischzone und Ablenkung der Strömung

Es wurden vier Messreihen aufgenommen, bei denen jeweils fünf Geschwindigkeitsparameter  $\lambda$  durch stufenweise Drosselung in der einen Kanalhälfte eingestellt wurden. Während einer Messreihe wurde der Wasserkanal so geregelt, dass der Gesamtmassenstrom und die Wasserröhre in der Messstrecke konstant blieben. Folglich stellte sich für alle Geschwindigkeitsverhältnisse innerhalb einer Messreihe die selbe mittlere Strömungsgeschwindigkeit

$$U_m = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

ein. Messreihe 1, Messreihe 2, und Messreihe 3 unterschieden sich durch unterschiedlich Werte der Viskosität  $\nu$  des Wassers aufgrund unterschiedlicher

Wassertemperaturen. Bei Messreihe 4 wurde zusätzlich die Grundgeschwindigkeit der Strömung gegenüber den ersten drei Messreihen erhöht. In Tabelle 1 sind die resultierenden Reynoldszahlen der jeweiligen Messreihe bezogen auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit angegeben. Charakteristische Länge für die Berechnung der Reynoldszahl ist die Wasserhöhe  $h = 0,1$  m in der Messstrecke.

	$U_m$ [m/s]	$\nu$ [mPa s]	$Re_m$ [-]
Messreihe 1	0,056	1,208	4635,8
Messreihe 2	0,056	1,082	5175,6
Messreihe 3	0,056	1,030	5544,6
Messreihe 4	0,084	1,036	8108,1

Tabelle 1: Strömungsgeschwindigkeit, Viskosität und Reynoldszahlen der Messreihen

Der Verlauf des Öffnungswinkels  $\alpha$  des Mischkegels über dem Geschwindigkeitsparameter  $\lambda$  ist in Bild 13 dargestellt. Ab Werten des Geschwindigkeitsparameters  $\lambda > 0,4$  erfolgt die Zunahme des Öffnungswinkels wie nach [7] erwartet annähernd linear mit steigendem  $\lambda$ . Das Niveau des Öffnungswinkels ist für die vier Messreihen unterschiedlich. Der Öffnungswinkel ist somit von weiteren Parametern abhängig. Eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl scheint gegeben, da mit zunehmender Reynoldszahl der Messreihen 1 – 4 (Tabelle 1) auch das Niveau des Öffnungswinkels kontinuierlich steigt.

Für den Bereich  $\lambda < 0,4$  sind erhebliche Unterschiede im Verlauf des Öffnungswinkel für die verschiedenen Messreihen erkennbar. Bei Messreihe 1 nimmt der Öffnungswinkel auch in diesem Bereich kontinuierlich mit steigendem  $\lambda$  zu. Bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit der Teilströme ( $\lambda = 0$ ) findet keine nennenswerte Mischung statt. Messreihe 3 und Messreihe 4 zeigen dagegen für kleine Werte des Geschwindigkeitsparameters große Öffnungswinkel des Mischkegels, d.h. eine ausgeprägte Mischung der Teilströme.

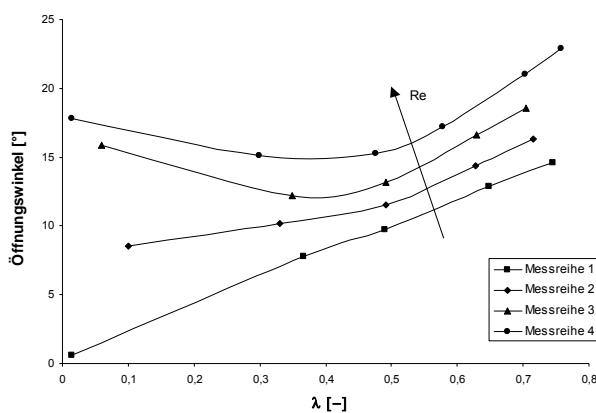


Bild 13: Öffnungswinkel des Mischkegels

Diese große Streuung bei niedrigen Geschwindigkeitsparametern ist auf die in 5.3.1 beschriebenen Strömungsphänomene zurückzuführen. Bei den Messreihen 3 und 4 traten bei gleichem Geschwindigkeitsniveau der Teilströme von der Hinterkante der Trennplatte abgehende Wirbel der Kármánsche Wirbelstrasse auf (Bild 9). Die

Ausbildung einer Kármánsche Wirbelstrasse hängt folglich stark von den gegebenen Strömungsbedingungen ab. Ein Einfluss lokaler Störungen und des Reynoldszahlniveaus ist nahe liegend.

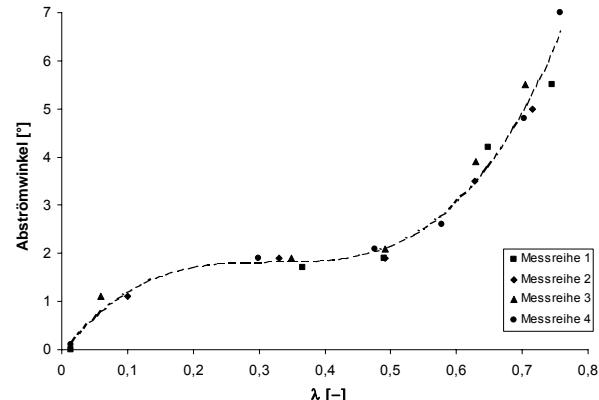


Bild 14: Abströmwinkel des Mischkegels

Der Verlauf des Abströmwinkels  $\beta$  über dem Geschwindigkeitsparameter  $\lambda$  ist in Bild 14 dargestellt. Mit steigendem Geschwindigkeitsparameter ist eine stetige Zunahme des Abströmwinkels zu erkennen. Die Messpunkte aller vier Messreihen kommen dabei auf einer Kurve zu liegen. Eine Abhängigkeit des Abströmwinkels von der Reynoldszahl oder anderen Strömungsgrößen ist nicht gegeben. Der Verlauf des Abströmwinkels wurde in Bild 14 durch eine Trendlinie in Form eines Polynoms dritten Grades angenähert.

#### 5.4. Blütenmischer

In einem weiteren Versuch wurde beispielhaft ein Blütenmischer untersucht. Es wurde eine sinusförmige Endkantengeometrie mit einem Verhältnis von doppelter Amplitude zu Gangweite von eins gewählt. Der Öffnungswinkel des Blütenmischers beträgt  $25^\circ$ . In Bild 15 ist der sich ausbildende strömungsgerichtete Wirbel zu erkennen, der durch die gekreuzten Teilströme entsteht.

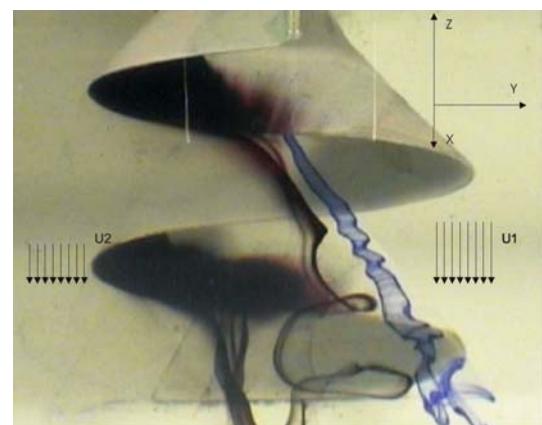


Bild 15: Strömungsgerichtete Wirbel am Blütenmischer

Die Betrachtung der Strömung von Seite der langsameren Teilströmung zeigt die Überlagerung des strömungsgerichteten Wirbels mit der auf Grund der Kelvin-Helmholtz Scherinstabilität entstehenden Wirbelstruktur.

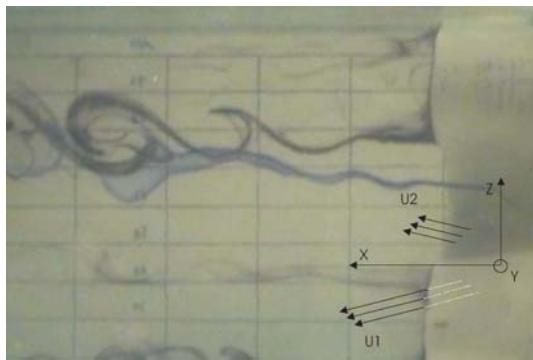


Bild 16: Wirbelstruktur am Blütenmischer

Eine quantitative Auswertung der Mischzone wie bei der parallelen Strömungsmischung an der ebenen Platte ist aufgrund der dreidimensionalen Strömung im Blütenmischer nicht möglich. In Bild 17 ist die Überlagerung mehrerer Einzelbilder bei einem Geschwindigkeitsparameter  $\lambda = 0,05$  bzw.  $\lambda = 0,65$  dargestellt. Für den Blütenmischer ist analog zu den Ergebnissen der parallelen Mischung bei großen Werten des Geschwindigkeitsparameters eine Ablenkung der Strömung hin zu der langsameren Teilströmung zu erkennen. Die stärkere Ausbreitung der eingefärbten Gebiete im rechten Bild zeigt eine intensivere Mischung der Teilströme bei steigenden Werten des Geschwindigkeitsparameters.

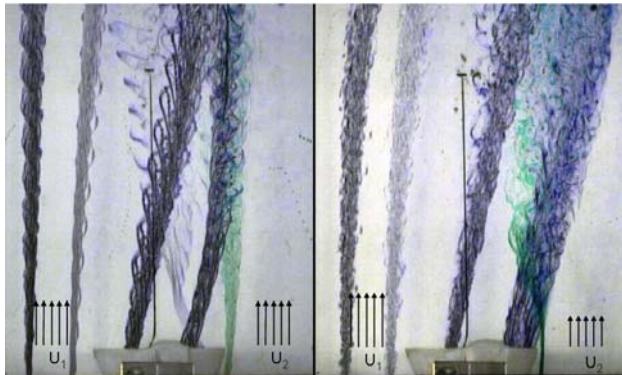


Bild 17: Vergleich der Mischung am Blütenmischer für  $\lambda = 0,05$  (linkes Bild) und  $\lambda = 0,65$  (rechtes Bild)

## 6. LEISTUNG DES TRIEBWERKSMISCHERS IM NIEDRIGEN LASTBEREICH

Die Untersuchungen der Strömungsmischung an einer ebenen Platte zeigen einen erheblichen Einfluss des Geschwindigkeitsverhältnisses der Teilströme auf die auftretenden Wirbelstrukturen und damit die Intensität der Mischung. Mit zunehmendem Geschwindigkeitsgradienten nehmen die Ausbreitung der Mischzone und die Ablenkung der Strömung in Richtung der langsameren Teilströmung zu.

Übertragen auf den Strömungszustand im Triebwerksmischer bedeutet dies, dass die in der Leistungsrechnung häufig verwendete Annahme eines konstanten Mischwirkungsgrades über den gesamten Betriebsbereich des Mischers nicht der Realität entspricht. Der Mischwirkungsgrad muss vielmehr als Funktion des

Geschwindigkeitsverhältnisses zwischen Kern- und Nebenstrom am Mischereintritt abgebildet werden.

Das Nichtauftreten einer Umströmung der Hinterkante sowie lokaler Rückströmungen selbst bei sehr großen Geschwindigkeitsverhältnissen der Teilströme unterstreicht die Gültigkeit der Kutta'schen Abflussbedingung. Die in Bild 14 dargestellte Variabilität der Ablenkung des Abströmwinkels des Mischkegels lässt darauf schließen, dass die in der Leistungsrechnung übliche Annahme eines gleichen statischen Druckes in der Eintrittsebene des Mischers über den gesamten Betriebsbereich kleinen Abweichungen unterliegt.

## 7. LITERATUR

- [1] F. Fett. *Besonderheiten in der Regelcharakteristik von Zweikreistriebwerken mit und ohne Mischung*. Zeitschrift für Flugwissenschaften, 20.Jahrgang, Heft 1/2, 1972
- [2] P.T. Millhouse, S.C. Kramer, P.I. King, E.F. Mykytka. *Identifying Optimal Fan Compressor Pressure Ratios for the Mixed-Stream Turbofan Engine*. Journal of Propulsion and Power, Vol.16, No.1, Seite 79-86, 2000
- [3] A. Hartmann. *Untersuchung über die Mischung bei Zweikreissturboluftstrahltriebwerken*. Dissertation RWTH Aachen, 1966.
- [4] R. Köhli, S. Staudacher, H. Schulte, K.-J. Schmidt. *Validierung eines Performancemodells für ein Turbofantriebwerk im tiefen Teillastbereich*. DGLR-2004-180, 2004, Dresden
- [5] W. Braig, H. Schulte, C. Riegler. *Comparative Analysis of the Windmilling Performance of Turbojet and Turbofan Engines*. Journal of Propulsion and Power, Vol.15, No.2, Seite 326-333, 1999.
- [6] V.M. Belovich, M. Samimy. *Mixing Process in a Coaxial Geometry with a Central Lobed Mixer-Nozzle*. AIAA Paper 96-0118, 1996
- [7] C.M. Sabin. *An Analytical and Experimental Study of the Plane Incompressible, Turbulent Free-Shear Layer with Arbitrary Velocity Ratio and Pressure Gradient*. Journal of Basic Engineering, June 1965
- [8] R. Spieweg. *Beschreibung dreidimensionaler Kohärenter Strukturen in turbulenten Scherschichten mit schräger Abströmkante*. Dissertation, TU Berlin, 2002
- [9] B. Deinert. *Mischungsverstärker in konstant gekreuzten Scherschichten und im Abgasblütenmischer*. Dissertation, TU Berlin, 2006
- [10] J.D. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics, Second Edition*. McGraw-Hill International Editions, 1991
- [11] E. Preiswerk. *Anwendung gasdynamischer Methoden auf Wasserströmungen mit freier Oberfläche*. Promotionsarbeit, ETH Zürich, 1938

# 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
$a_T$	$m/s$	Gesamtschallgeschwindigkeit
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

$\alpha$	°	Neigungswinkel
$\delta$	m	Grenzschichtdicke
$\eta_{mix}$		Mischungsgrad
$\rho$	$kg/m^3$	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.