

# UNTERSUCHUNG EINES NEUARTIGEN BRENNSTOFF- AUFBEREITUNGSSYSTEMS FÜR GASTURBinen

N. Spyra, A. Hupfer, W. Erhard, H.-P. Kau, Technische Universität München, Lehrstuhl für  
Flugantriebe, 85747 Garching, Deutschland  
M. Schmidt, M. Simon, Voss Normalien GmbH&Co.KG, 59557 Lippstadt, Deutschland

## Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines neuartigen Brennstoffaufbereitungssystems (BAS) für Gasturbinen, das über einen weiten Betriebsbereich ein mageres, vorverdampftes Luft-Brennstoff-Gemisch erzeugt und in die Brennkammer einleitet. Mit diesem BAS lassen sich ein hoher Ausbrand bei gleichzeitig niedriger Rauch- und NOx-Bildung und hoher Flammstabilität erreichen. Der vom Hauptverdichter der Gasturbine kommende Luftmassenstrom wird vor dem Eintritt in die Brennkammer in zwei Teilströme aufgeteilt. Ein Teil wird zur Gemischaufbereitung genutzt, während die Restluft wie bei konventionellen Gasturbinen zur Kühlung der Brennkammer verwendet wird. Durch eine Drosselstelle lässt sich das Verhältnis der beiden Teilströme einstellen, so dass die Luftmenge in der Gemischaufbereitung und somit das Äquivalenzverhältnis in der Primärzone der Brennkammer auf den jeweiligen Betriebspunkt der Gasturbine angepasst werden können. Aus einer rotierenden Tasse, welche von der Welle der Gasturbine angetrieben wird, wird Brennstoff in die Vormischstrecke eingespritzt. Dadurch entfallen komplexe Einspritzdüsen. Ein zusätzlicher kleiner Verdichter im BAS gleicht die auftretenden Druckverluste aus und unterstützt zusätzlich die Vermischung. Da das Gemisch mit entsprechendem Überdruck in die Brennkammer strömt, wird die Gefahr eines Flammenrückschlags minimiert. Am Lehrstuhl für Flugantriebe (LFA) der Technischen Universität München wurde das Vormischsystem als Einzelkomponente am Prüfstand aufgebaut. Mit Lasermessmethoden wurden die Verdampfungsrate und die Homogenität des Luft-Brennstoff-Gemischs in Abhängigkeit von den Eintrittsbedingungen untersucht. Aus den Messergebnissen werden Anforderungen an den Einbau des Systems in eine Gasturbine abgeleitet. Geplant ist der Einbau des Systems in eine Hubschraubergasturbine, um die Funktionalität des BAS nachzuweisen. Die Untersuchungen finden in Kooperation mit der Firma Voss Normalien GmbH&Co.KG statt und werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Förderprogramms PROINNO unterstützt.

## 1. EINLEITUNG

Die Gestaltung des Verbrennungsprozesses hat großen Einfluss auf die Brennstoffausnutzung und die Schadstoffemissionen von Gasturbinen. An Brennkammern werden hohe Anforderungen gestellt, die besonders in Fluggasturbinen über einen breiten Druck- und Temperaturbereich erfüllt werden müssen. So müssen die Brennkammer und die Brennstoffeinbringung so gestaltet sein, dass schnelle Lastwechsel und auch in großen Flughöhen ein Wiederzünden möglich sind. Beim Übergang in den Sinkflug wird die Triebwerksdrehzahl verringert und damit einhergehend sinken die Temperatur und der Druck in der Brennkammer. Auch unter diesen Bedingungen muss eine stabile Verbrennung sichergestellt werden. Am anderen Ende des Schubbereichs bei hohem Druck und hoher Brennkammereintrittstemperatur muss ein hoher Ausbrand bei geringen NOx-Emissionen erreicht werden. Daraus ergeben sich anspruchsvolle Herausforderungen für den Auslegungsprozess, da viele Lösungen für das eine Ende des Betriebsbereichs negative Auswirkungen auf den Betrieb am anderen Ende des Leistungsspektrums haben [1].

Das Luft-Brennstoff-Verhältnis (AFR – Air Fuel Ratio) in der Primärzone der Brennkammer hat einen

entscheidenden Einfluss auf den Ausbrenngrad und die Schadstoffemissionen, die in einer Gasturbine entstehen. Bei einem stöchiometrischen AFR liegen die Reaktionspartner Luft und Brennstoff in genau dem Verhältnis vor, dass nach einer vollständigen Reaktion weder Restsauerstoff noch unverbrannter Brennstoff vorliegen. Ein mageres AFR bedeutet Luftüberschuss, ein fettes AFR Brennstoffüberschuss. Um Verbrennungsorgänge unterschiedlicher Brennstoffe besser vergleichen zu können, wird das Mischungsverhältnis oft als Äquivalenzverhältnis  $\Phi$  angegeben. Es beschreibt das stöchiometrische Mischungsverhältnis bezogen auf das tatsächliche Mischungsverhältnis (Gl. 1).

$$(1) \quad \Phi = \frac{AFR_{stöchiometrisch}}{AFR_{tatsächlich}}$$

Unabhängig von der Brennstoffart beschreibt somit ein Äquivalenzverhältnis  $\Phi = 1$  ein stöchiometrisches Gemisch, ein  $\Phi > 1$  ein fettes Gemisch und ein  $\Phi < 1$  ein mageres Gemisch. Die Einflüsse des Äquivalenzverhältnisses in der Primärzone der Brennkammer auf die Verbrennungseigenschaften werden in Tabelle 1 dargestellt.

$\Phi = 1$	+ geringe Rauchbildung + keine Verkokung  - hohe Flammtemperatur - hohe thermische Belastung der Brennkammer - hohe NOx-Emissionen
$\Phi > 1$	+ gute Zündeigenschaften + hohe Flammstabilität  - starke Rauchbildung - Kohlenstoffablagerungen - Bildung unverbrannter Kohlenwasserstoffe
$\Phi < 1$	+ geringe Rauchbildung + geringe NOx- Emissionen + keine Verkokung  - geringe Flammstabilität - geringer Abstand zur Magerverlöschenzgrenze - schlechtere Zündfähigkeit

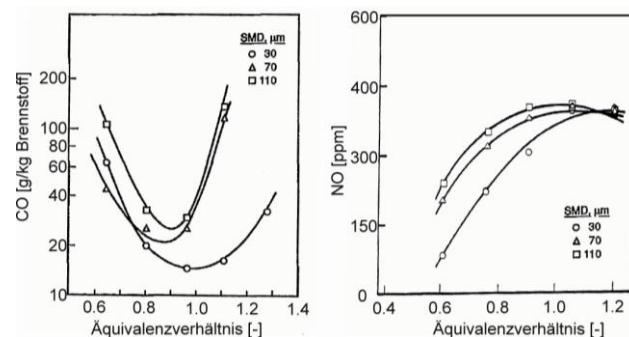
TAB 1. Einfluss des Mischungsverhältnisses  $\Phi$  in der Primärzone [3].

Eine magere Verbrennung in der Primärzone ermöglicht niedrige Emissionsraten von NOx und Rauch bei einem dennoch hohen Ausbrenngrad. Aus diesem Grund hat eine magere Verbrennung das größte Potenzial, den Schadstoffausstoß zu mindern. In stationären Gasturbinen wird diese Technik schon seit Jahren eingesetzt. Für Fluggasturbinen sind die Anforderungen an die Dynamik, den weiten Betriebsbereich und an die Sicherheit so hoch, dass es bisher noch nicht möglich war, Brennkammern mit magerer Verbrennung in Volllast auszulegen.

Ein weiterer wichtiger Einflussparameter auf die Verbrennungsqualität ist die Verteilung des Brennstoffs in der Luft. Da in Fluggasturbinen fast ausschließlich flüssige Brennstoffe eingesetzt werden, müssen diese zerstäubt werden, bevor sie in die Verbrennungszone gelangen. Zur Beschreibung der Zerstäubungsqualität wird oft der mittlere Sauterdurchmesser (SMD - Sauter mean diameter) verwendet. Definiert ist er als der Durchmesser eines Tropfens, bei dem das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche gleich dem Verhältnis von Gesamtvolumen zur gesamten Oberfläche aller Tropfen des Gemisches ist (Gl. 2):

$$(2) \quad SMD = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2}$$

Brennstoff kann nur verbrennen, wenn er verdampft ist und sich mit Luft gemischt hat. Ein Flüssigkeitstropfen, der in die Verbrennungszone gelangt, verdampft an der Oberfläche, vermischt sich mit der umgebenden Luft und verbrennt in den Bereichen um das Tröpfchen, in denen ein brennbares Luft-Brennstoff-Gemisch vorliegt. Das lokale Äquivalenzverhältnis reicht von unendlich in den flüssigen Bereichen des Tröpfchens bis Null in der Luft weit weg vom Tröpfchen. Für Gemische mit großen Tröpfchen bedeutet das, dass in der Flamme alle Äquivalenzverhältnisse aus Tabelle 1 auftreten. Eine solche Flamme wird Diffusionsflamme genannt. Der Einfluss des Sauterdurchmessers und des Äquivalenzverhältnisses auf die Emissionen von CO und NO wird in Bild 1 ersichtlich.

BILD 1. Einfluss von  $\Phi$  und SMD auf die Emission von CO und NO [2].

Um geringen Schadstoffausstoß zu erreichen, müssen die Tröpfchen, die die Verbrennungszone erreichen, so klein wie möglich und gleichmäßig in der Luft verteilt sein. Die geringsten Emissionen werden erreicht, wenn vollständig verdampfter Brennstoff homogen mit der Luft vermischt ist. Eine solche Flamme wird Vormischflamme genannt.

Um das Ziel einer homogenen Brennstoffeinspritzung mit kleinen Tröpfchendurchmessern zu erreichen, wurden im Laufe der Entwicklungsgeschichte unterschiedliche Einspritzsysteme entwickelt. Alle nutzen den gleichen physikalischen Effekt einer hohen Relativgeschwindigkeit zwischen dem Brennstoff und der umgebenden Luft um den Brennstoff fein zu zerstäuben. Einige Systeme spritzen den Brennstoff mit hoher Geschwindigkeit in langsam strömende Luft ein und andere Systeme setzen den Brennstoff einer schnellen Luftströmung aus. Die meisten Systeme können einer der Gruppen in Tabelle 2 zugeordnet werden.

Einspritzsystem	Eigenschaften
Druck-zerstäubung	+ weiter Stabilitätsbereich + einfache Auslegung und Modifizierbarkeit + robuste Bauweise  - Kraftstoffverteilung und Flammlage vom Brennstoffmassenstrom abhängig - lastzustandsabhängige Zerstäubungsqualität - hoher Brennstoffförderdruck notwendig
Luft-zerstäubung	+ Flammlage unabhängig vom Brennstoffmassenstrom + geringe Rauchbildung + robuste Bauweise + befriedigendes Betriebsverhalten bei Teillast  - sehr schmaler Stabilitätsbereich - schlechte Gemischqualität bei geringer Brennkammerströmung
Verdampfer-systeme	+ geringe Kosten + geringer Brennstoffdruck notwendig + magere Verbrennung möglich + geringe Rauchbildung + einfache Anpassung an unterschiedliche Brennstoffe

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufwärmphase beim Start erfordert Permanentzündung</li> <li>- Probleme bei schneller Erhöhung der Brennstoffmenge (Beschleunigung)</li> <li>- Zündung in Verdampfungsstrecke muss verhindert werden</li> <li>- aufwendige Auslegung und Entwicklung</li> </ul>
Rotierende Zerstäubung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringer Brennstoffdruck notwendig</li> <li>+ Zerstäubungsqualität unabhängig vom Lastzustand</li> <li>+ robuste Bauweise</li> <li>- radiale Einspritzung erfordert spezielle Brennkammerformen</li> <li>- hoher Entwicklungs- und Fertigungsaufwand</li> <li>- nur für kleine Kraftstoffmengen geeignet</li> </ul>

TAB 2. Vergleich unterschiedlicher Einspritzsysteme für Flugtriebwerke [3].

Um die Vorteile unterschiedlicher Systeme zusammenzufassen, werden Kombinationen aus den unterschiedlichen Einspritzarten untersucht. Bei Einspritzsystemen mit magerer Direkteinspritzung (Lean Direct Injection, LDI) wird der Brennstoff direkt in die Brennkammer eingespritzt, im Gegensatz zu herkömmlichen Konfigurationen jedoch mit hohem Luftüberschuss. Unter der Voraussetzung einer feinen, homogenen Zerstäubung und hoher Lufttemperaturen verdampft der Brennstoff zu großen Teilen, bevor er in die Verbrennungszone gelangt. Es ergeben sich niedrigere Flammtemperaturen mit geringerem Schadstoffausstoß. Da für eine schnelle Verdampfung der Brennstofftröpfchen eine hohe Lufttemperatur benötigt wird, kann diese Technologie nur bei großen Gasturbinen mit hohem Druckverhältnis eingesetzt werden. Bei kleineren Gasturbinen und bei großen Triebwerken im Teillastbetrieb sind die Eintrittstemperaturen der Luft in die Brennkammer niedriger, die Zeit für die Verdampfung der Brennstofftröpfchen steigt an und ein Teil des Brennstoffs erreicht die Flammenfront als flüssige Tröpfchen. Dadurch ergeben sich lokale Bereiche mit stöchiometrischem Gemisch mit dem Nachteil von höheren Schadstoffemissionen. Die Gefahr des Magerverlöschen (lean blow out, LBO) stellt ein weiteres Problem bei diesem Verbrennungskonzept dar. Um möglichst niedrige NOx-Schadstoffemissionen zu erreichen, werden LDI-Systeme so ausgelegt, dass bei Vollast ein mageres Gemisch entsteht. Im Vergleich zu Vollast sinken bei einer Lastreduktion die Lufttemperaturen am Brennkammereintritt, das Äquivalenzverhältnis in der Primärzone durch die Reduktion des Brennstoffmassenstroms und bei einer Druckzerstäubung die Zerstäubungsqualität aufgrund des niedrigeren Brennstoffdrucks. Diese Effekte verringern den Abstand zur Magerverlöschgrenze und können somit zu einer instabilen Verbrennung bis hin zum Verlöschen der Flamme führen.

Bei der mager vorgemischten und vorverdampften (lean premixed prevaporized, LPP) Verbrennung wird ein Druck- oder Luftzerstäuber in Kombination mit einem Verdampferrohr verwendet, um ein homogenes mageres Gemisch in die Brennkammer einzubringen. Da die Länge der Verdampferrohre und damit die Verweilzeit des Gemisches in den Rohren Auslegungsparameter sind, kann

das System so angepasst werden, dass auch bei kleineren Gasturbinen mit geringeren Brennkammer-eintrittstemperaturen ein homogen vorgemischtes und vorverdampftes Gemisch in die Brennkammer eingeleitet wird. Bei dieser Konfiguration besteht die Gefahr, dass das zündfähige Gemisch bereits vor der Brennkammer in den Verdampferrohren brennt. Ursachen hierfür können Selbstzündung oder ein Zurückbrennen der Flamme aus der Brennkammer sein. Letzteres geschieht, wenn das Druckgefälle über die Brennkammer zu gering wird und die Luftströmung durch die Verdampferrohre langsamer strömt als die Flammausbreitungsgeschwindigkeit im Gemisch ist, oder wenn sich eine langsam strömende Grenzschicht in den Verdampferrohren ausbildet, über die ein Rückzünden erfolgen kann [6]. Die Luftmenge, die in die Vormischung geleitet wird, ist bei aktuell untersuchten LPP-Systemen auf einen Betriebspunkt ausgelegt und kann nicht auf die Betriebsbedingungen angepasst werden. Somit ergibt sich bei LPP-Systemen eine ähnliche Problematik wie bei LDI-Systemen.

## 2. ANFORDERUNGEN AN NEUE EINSPRITZSYSTEME

Hauptziele für neue Einspritzsysteme sind geringe Schadstoffemissionen bei hohem Wirkungsgrad. Während einer Flugmission wird die Fluggasturbine bei unterschiedlichen Laststufen betrieben. Die Eintrittsbedingungen der Luft in die Brennkammer ändern sich mit der Drehzahl des Triebwerks, mit den Umgebungsbedingungen und mit der Fluggeschwindigkeit. Bild 2 zeigt das Verhalten der Eintrittstemperatur (T3) und des Eintrittsdrucks (p3) in die Brennkammer, des Brennstoffmassenstroms (mBr) und des AFRs für das Kerntriebwerk einer typischen Fluggasturbine bei den verschiedenen Betriebszuständen Start (TO), Reiseflug (CR), Leerlauf am Boden (GI) und Leerlauf im Flug (FI). Die Werte der einzelnen Betriebszustände sind auf den jeweiligen Wert bei TO bezogen. Im transienten Betrieb treten noch größere Streuungen auf, so dass der wahre Betriebsbereich noch größer ist als in Bild 2 angegeben.

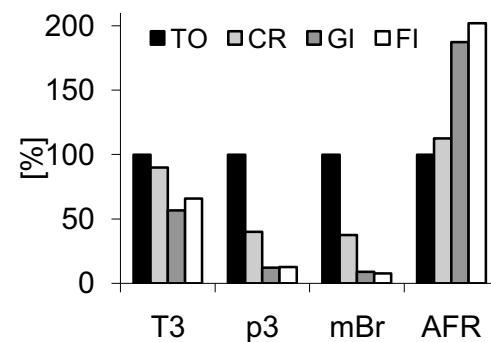


BILD 2. Betriebsbereich einer Fluggasturbine.

Eine weitere wichtige Anforderung an das Einspritzsystem einer Fluggasturbine ist der Sicherheitsaspekt. Für alle dynamischen Änderungen (Beschleunigen, Verzögern), Umgebungsbedingungen (Regen, heißes/kaltes Klima und niedriger Luftdruck auf hochgelegenen Flughäfen) und über den gesamten Lebenszyklus muss eine sichere,

stabile Verbrennung mit gleichbleibender Flammelage sichergestellt sein. Brennt die Flamme stromab der gewünschten Lage, würde die Turbine zerstört werden, eine Flamme stromauf der gewünschten Position würde das Einspritzsystem beschädigen. Falls es zum Erlöschen der Flamme kommt, muss ein Wiederzünden gemäß den Vorschriften möglich sein [7].

Durch verstärkte Forderungen nach CO<sub>2</sub>-Reduzierung, der Förderung erneuerbarer Energien und den massiven Preisanstieg von Kerosin werden alternative und regenerative Brennstoffe gesucht. Da diese Brennstoffe unterschiedliche Viskositäten und Verdampfungskurven aufweisen können, werden Einspritzsysteme benötigt, deren Gemischqualität nicht sehr stark von den Brennstoffeigenschaften abhängig ist und die mit unterschiedlichen Brennstoffen betrieben werden können.

### 3. AUFBAU DES NEUARTIGEN BRENNSTOFFAUFBEREITUNGSSYSTEMS

Das neue BAS, das in dieser Arbeit vorgestellt wird, besteht aus drei Hauptteilen. Der Luftstrom, der vom Verdichter der Gasturbine kommt, wird an einer Luftverzweigung aufgeteilt (Bild 3). Ein Teil der Luft dient der Kühlung, der andere strömt in das BAS. Mit letzterem wird das Luft-Brennstoff-Gemisch gebildet, das in die Primärzone der Brennkammer gelangt.

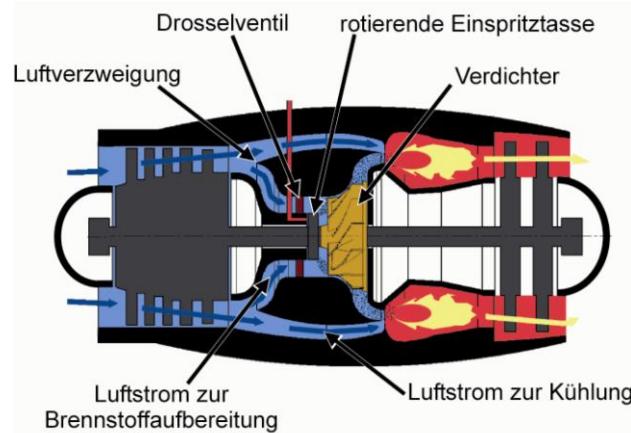


BILD 3. Neues Brennstoffaufbereitungssystem in einer Gasturbine.

Über ein Drosselventil im Strömungskanal zur Primärzone kann die Luftmenge, die zur Primärzone strömt, beeinflusst werden. Verglichen mit konventionellen Systemen erhält das BAS dadurch einen weiteren Freiheitsgrad in der Triebwerkssteuerung und das AFR in der Primärzone kann unabhängig vom Lastzustand aktiv beeinflusst werden. Eine magere Verbrennung innerhalb der Zündgrenzen kann über den gesamten Betriebsbereich sichergestellt werden. Das führt zu niedrigeren Verbrennungstemperaturen und damit zu geringerem NO<sub>x</sub>-Ausstoß. Da das Luft-Brennstoff-Gemisch im BAS vorgemischt und vorverdampft wird, ist es ähnlich dem Gemisch, das mit einem LPP-System erzeugt wird. Damit besitzen beide Systeme das gleiche Potenzial für niedrige Schadstoffemissionen. Für bessere Zünd- und Wiederzündegenschaften kann das

Drosselventil im BAS weiter geschlossen werden, der Luftmassenstrom verringert und damit ein fetteres Gemisch in der Primärzone erreicht werden. Auch die Dynamik des Triebwerks kann verbessert werden, da sich das AFR in der Primärzone nicht aus dem Brennstoffmassenstrom und den sich daraus einstellenden Strömungsbedingungen ergibt, sondern da durch die unabhängige Einstellung der Luft- und Brennstoffmenge immer ein Gemisch innerhalb der Zündgrenzen sichergestellt werden kann.

Stromab des Ventils spritzt die Tasse eines Rotationszerstäubers Brennstoff in den Luftstrom zur Primärzone. Die Tasse rotiert mit derselben Geschwindigkeit wie die Welle der Gasturbine. Der Brennstoff wird vom Rand der Tasse in radiale Richtung verteilt und durch die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen der Luft und dem Brennstoff zerstäubt. Die an der Tasse vorbeiströmende Luft nimmt die Tröpfchen mit. Die Gemischqualität ist nahezu unabhängig vom Brennstoffmassenstrom und deshalb unabhängig vom Lastzustand der Gasturbine. Zusätzlich sind Rotationszerstäuber vergleichsweise unempfindlich gegen Schwankungen in der Viskosität der Brennstoffe und deshalb für den Einsatz mit erneuerbaren Brennstoffen geeignet. Da Rotationszerstäuber keine kleinen Bohrungen oder Düsen aufweisen, sind sie robust und unempfindlich gegen Verkoken und Verstopfen. Die Einspritzung ist vergleichsweise einfach aufgebaut, wartungsarm und günstig zu fertigen. Zusätzlich kann der Brennstoff unter verringertem Druck und somit mit kleineren Pumpen gefördert werden.

Über einen Verdichter gelangt das Luft-Brennstoff-Gemisch zum Einlass in die Brennkammer. Der Verdichter überwindet die Druckverluste, die im Rohrsystem, am Drosselventil und an den Drallerzeugern am Brennkammereintritt entstehen. Ein im Vergleich zur Brennkammer höheres Druckniveau am Austritt des BAS stellt sicher, dass das Gemisch immer mit ausreichend hoher Geschwindigkeit in die Brennkammer strömt, damit ein zuverlässiger Schutz gegen Flammenrückschlag gegeben ist. Der Verdichter erzeugt Turbulenzen und unterstützt damit auch eine homogene Brennstoff-Luft-Verteilung. Die Enthalpiezufuhr im Verdichter unterstützt den Verdampfungsprozess. Da die Drallerzeuger am Eintritt zur Brennkammer Druckverluste erzeugen, wirken sie als Dämpfer für mögliche Verbrennungsschwingungen. Damit wird der Einfluss der Brennkammerschwingungen auf die Gemischaufbereitung reduziert.

Die Möglichkeit, Druckverluste im Luftstrom zur Primärzone ausgleichen zu können, erweitert die Einsatzmöglichkeiten von Wärmetauschern. Der Luftmassenstrom für die Primärzone könnte vorgewärmt und damit der Gesamtwirkungsgrad der Gasturbine erhöht werden. Der zweite Luftmassenstrom für die Kühlung wird nicht vorgewärmt und ermöglicht so weiterhin eine effiziente Kühlung. Der Einsatz eines Wärmetauschers könnte auch den Bereich der im BAS einsetzbaren Brennstoffe erweitern. Brennstoffe mit höherem Siedepunkt könnten durch die vorgewärmte Luft verdampft werden. Damit kann mit unterschiedlichen Brennstoffen ein homogenes vorverdampftes Gemisch erzeugt werden, das in der Brennkammer mit hohem Ausbrand und geringen Emissionen verbrannt werden kann.

## 4. AUFBAU DES KOMPONENTENPRÜFSTANDS

### 4.1. Aufbau des BAS am Prüfstand

Um die Gemischqualität und die Anwendungsgrenzen zu untersuchen, wurde am Verbrennungsprüfstand des Lehrstuhls für Flugantriebe das BAS als Einzelkomponente aufgebaut. Der Prüfstand ist so konzipiert, dass

Bedingungen nachgebildet werden, wie sie in einer Kleingasturbine auftreten. Als Basis dient ein geeigneter Turbolader. Bei diesem wird der Verdichter mit Druckluft über die Turbine angetrieben. Vor dem Verdichter wird die rotierende Tasse auf der Welle angebracht. Die Brennstoffversorgung erfolgt wie in Bild 4 gezeigt.

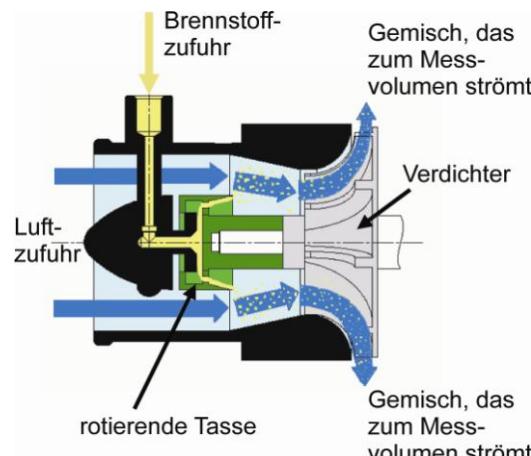


BILD 4. Neues Brennstoffaufbereitungssystem am Komponentenprüfstand.

Die Tasse dreht mit gleicher Geschwindigkeit wie der Verdichter und spritzt den Brennstoff in den Luftstrom. Durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit der Luft wird der Brennstoff zerstäubt und zum Verdichter hin mitgerissen. Die Drehzahl, der Brennstoffmassenstrom, die Androsselung nach dem Verdichter und Druck und Temperatur am Einlass des BAS können unabhängig voneinander eingestellt werden.

### 4.2. Luft- und Brennstoffversorgung

Bild 5 zeigt schematisch die Luftversorgung des Prüfstands. Die fest im Gebäude installierte Luftversorgung liefert den benötigten Luftmassenstrom mit einem Druck von bis zu 10 bar. Durch den elektrischen Luftvorwärmer kann die Luft auf maximal 670 K erwärmt werden. Ein Teil des Luftmassenstroms strömt in das Hauptrohr und gelangt von dort in das BAS. Nach dem BAS wird die Gemischqualität in einem Messvolumen bestimmt, das von vier Seiten optisch zugänglich ist. Der Druck am Eintritt in das BAS und das Druckverhältnis über den Verdichter können durch die Ventile im Hauptrohr und durch die Drossel hinter dem Messvolumen gesteuert werden. Als Brennstoff wird Kerosin Jet A-1 verwendet. Der Luft- und der Brennstoffmassenstrom werden mit

einer computergestützten Messwerterfassung gesteuert, gemessen und aufgezeichnet.

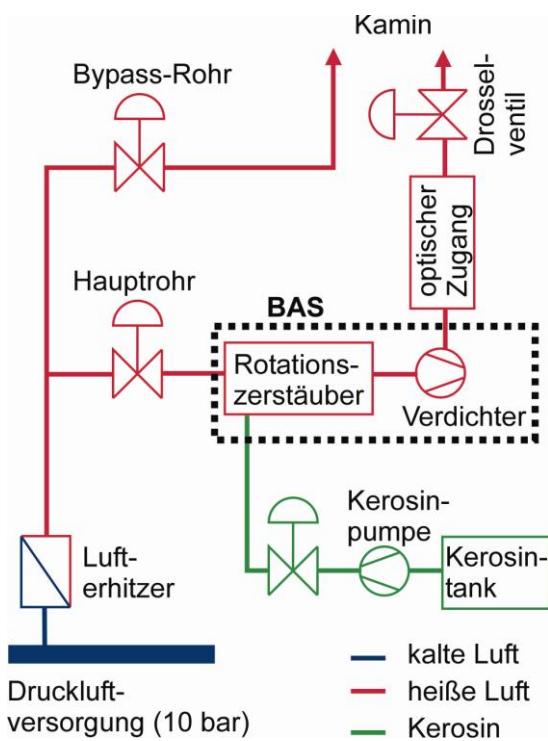


BILD 5. Schema der Brennstoff- und Luftversorgung.

### 4.3. Antriebsystem für das BAS

Wie bereits erwähnt ist eine hohe Relativgeschwindigkeit zwischen der Luft und dem Brennstoff von entscheidender Bedeutung für eine feine Zerstäubung. Kleine Gasturbinen haben kleine Durchmesser. Dadurch werden hohe Drehzahlen benötigt, um auf dem kleinen Durchmesser am Rand der rotierenden Tasse hohe Geschwindigkeiten zu erreichen. Beim verwendeten Turbolader erfolgt der Antrieb über die Druckluftversorgung. Es werden Drehzahlen von bis zu 120.000 1/min erreicht.

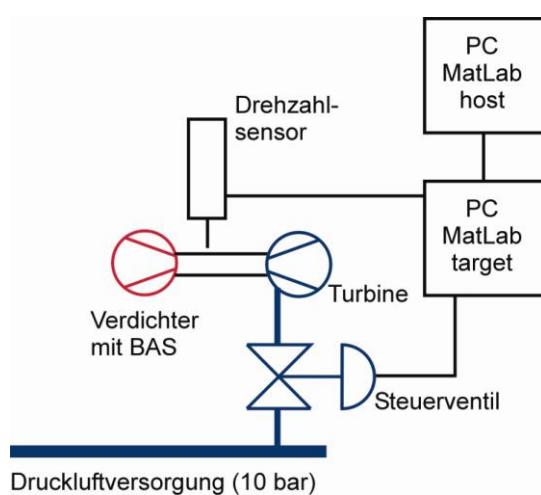


BILD 6. Regelkreis für die Drehzahlkontrolle

Ein Sensor mit einer hohen Abtastrate wird verwendet, um die Drehzahl der Welle zu messen. In Verbindung mit einem real-time PC-System und dem Steuerventil ist es möglich, die Luftmenge zur Turbine so zu steuern, dass die Drehzahl des Verdichters genau geregelt und stationäre Betriebsbedingungen erreicht werden können.

#### 4.4. Lasermessungen basierend auf Mie-Streuung

Eine Visualisierung von flüssigem Brennstoff ist mit Hilfe der Mie-Streuung möglich. Der Lichtstrahl des Lasers tritt in das Messvolumen ein und wird durch die Brennstofftröpfchen von seiner geradlinigen Ausbreitung abgelenkt. Da die Mie-Streuung eine elastische Streuung ist, bleibt die Wellenlänge des Originallichts auch nach der Streuung erhalten. Die Signalintensität bei Mie-Streuungsmessungen ist im Vergleich zu anderen Lasermessmethoden hoch [3]. Das gestreute Licht wird von einer CCD-Kamera aufgefangen und aufgezeichnet. Die Kamera zeichnet die Intensität des ankommenen Lichts auf. Das bei diesem Versuchsaufbau gewählte Messverfahren lässt keine direkten Rückschlüsse auf die Größe der Tröpfchen zu, aber je geringer die Signalintensität ist, desto kleiner sind die Größe oder die Anzahl der Tröpfchen im Messvolumen. Bei konstantem Brennstoffmassenstrom bedeutet dies, dass bei geringerer Signalintensität mehr Brennstoff verdampft ist.

#### 4.5. Aufbau des Lasermesssystems

Zur Erzeugung des Laserstrahls wird ein Excimerlaser verwendet. In diesem Versuch wird als Edelgas Krypton und Fluor als Halogen verwendet. Das so entstehende Laserlicht liegt mit einer Wellenlänge von 248 nm im ultravioletten Spektrum. Der Laserstrahl wird gepulst emittiert mit einer Pulsdauer von ca. 17 ms. Bild 7 zeigt den schematischen Aufbau des Lasermesssystems.

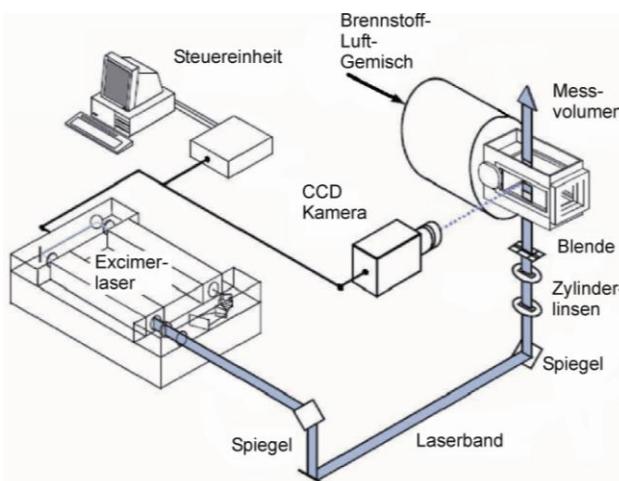


BILD 7. Aufbau der Lasermesstechnik

Der Strahl verlässt den Laser und wird mit Spiegeln zum Messvolumen geführt. Zwei Zylinderlinsen erzeugen ein schmales, paralleles Lichtband, das durch eine Blende auf eine Breite von 20 mm und in der Dicke auf 0,5 mm

beschnitten wird. Der Laseraufbau kann senkrecht zur Strömungsrichtung des Gemisches verschoben werden, um die Gemischqualität in unterschiedlichen Ebenen untersuchen zu können. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, werden von der CCD-Kamera bei jeder Messung 50 Einzelbilder mit einer Frequenz von 10 Hz aufgenommen. Die Bilder werden anschließend am Rechner verarbeitet. Aus den 50 Einzelbildern wird ein gemitteltes Bild erstellt. Anschließend wird die Signalintensität über die 77.220 Pixel des gemittelten Bildes berechnet. Einflüsse von lokalen Intensitätsmaxima und Schwankungen, die durch instationäre Strömungsphänomene auftreten, können durch die Mittelung über den gesamten Strömungsquerschnitt reduziert werden.

#### 4.6. Messvolumen mit optischem Zugang

Für laserbasierte Messverfahren muss ein optischer Zugang zur Strömung geschaffen werden. Um hohe Durchgängigkeit des UV-Laserlichts durch die Fenster zu ermöglichen, werden Quarzglasscheiben verwendet. Da der Lichtstrahl am Messfenster weder gebeugt noch gestreut werden soll, müssen die Fenster zur Messkammer eben sein und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lasers liegen. Da der Austritt des Verdichters einen runden Querschnitt besitzt, muss ein Übergang zum quadratischen Querschnitt im optisch zugänglichen Bereich geschaffen werden. Ein stetiger Übergang mit gleichbleibender Querschnittsfläche, der keine Turbulenzen in die Strömung einbringt, würde eine längere Wegstrecke nötig und somit eine Messung nahe am Austritt des Verdichters unmöglich machen. Turbulenzen sollen vermieden werden, da sich dadurch Tröpfchen, die sich in der Strömung befinden, an die Scheiben anlegen, einen Brennstofffilm an den Scheiben bilden und damit den optischen Zugang beeinträchtigen. Um dies zu verhindern, wurde ein Aufbau gewählt, wie er in Bild 8 dargestellt ist.

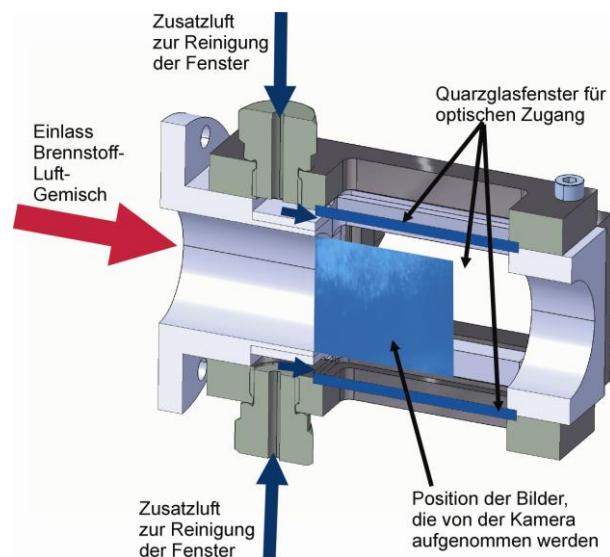


BILD 8. Messvolumen mit optischem Zugang

Zusätzliche Luft wird auf die Innenseite der Scheiben geblasen, bildet einen Luftfilm, verhindert, dass Tröpfchen

an die Scheibe gelangen, und reinigt gleichzeitig die Scheiben während der Versuche. Für eine aussagekräftige Mie-Streuungsmessung ist ein gleichbleibender guter optischer Zugang erforderlich.

## 5. VERSUCHSERGEBNISSE

Mit den Untersuchungen am Komponentenprüfstand wurde der Einfluss unterschiedlicher Eintrittsbedingungen in das BAS auf die dabei entstehende Gemischqualität bestimmt. Es wird erwartet, dass die Eintrittstemperatur den größten Einfluss hat, da der Verdampfungsgrad und die Verdampfungszeit stark temperaturabhängig sind. Vorversuche haben gezeigt, dass bei Eintrittstemperaturen von unter 393 K keine sinnvollen Messungen mit diesem Versuchsaufbau möglich sind, da sich auf den Scheiben trotz Zusatzluft ein Brennstofffilm ausbildet und einen ungestörten optischen Zugang verhindert. Ein weiterer untersuchter Parameter ist die Drehzahl (n) der Tasse und damit auch des Verdichters. Die Drehzahl beeinflusst die Zerstäubung, die Luftmenge und damit die Luftgeschwindigkeit durch das BAS und die Enthalpie, die dem Gemisch über den Verdichter zugeführt wird. Der Druck (p) am Eintritt des BAS beeinflusst die Verdampfung des Brennstoffs und die Dichte der Luft am Eintritt. Dadurch können sich die Wechselwirkung des Brennstoffs mit der Luft und die Zerstäubung verändern. Das AFR wird bei allen Versuchsserien variiert. Tabelle 3 zeigt die Bereiche, in denen die Parameter verändert und untersucht wurden.

Parameter	Minimum	Maximum
Eintrittstemperatur BAS [K]	393	473
Eintrittsdruck BAS [bar]	1,1	3
Drehzahl [ $1/\text{min}$ ]	90000	120000
Druckverhältnis BAS [-]	1,1	1,3
AFR [-]	8	40
Brennstoffmassenstrom [g/s]	0	7

TAB 3. Betriebsparameter am Komponentenprüfstand

Die Ergebnisse der Messungen bei gleichen Bedingungen in unterschiedlichen Ebenen senkrecht zur Strömungsrichtung zeigten identisches Verhalten. Um den Versuchsaufwand zu begrenzen, werden deshalb im Folgenden nur Ergebnisse der Messungen aus der Mittelebene diskutiert. Bild 9 zeigt Aufnahmen der CCD-Kamera bei unterschiedlichen Eintrittstemperaturen. Aufgenommen wurden die vier Bilder bei einer Drehzahl von 90.000  $1/\text{min}$ , einem Eintrittsdruck von 2,0 bar und einem AFR von 13, was einem Äquivalenzverhältnis von etwa 1,1 entspricht. Die Bilder sind Falschfarbenbilder, d.h. blaue Farben bedeuten geringe Signalintensität, hellere Farben höhere Signalintensität und damit einen höheren Anteil flüssigen Brennstoffs im Gemisch. Mit steigender Temperatur nimmt die Signalintensität ab. Um die Veränderungen zu quantifizieren, werden in den Bildern 10 bis 13 die mittleren Signalintensitäten für die einzelnen Messreihen abgebildet.

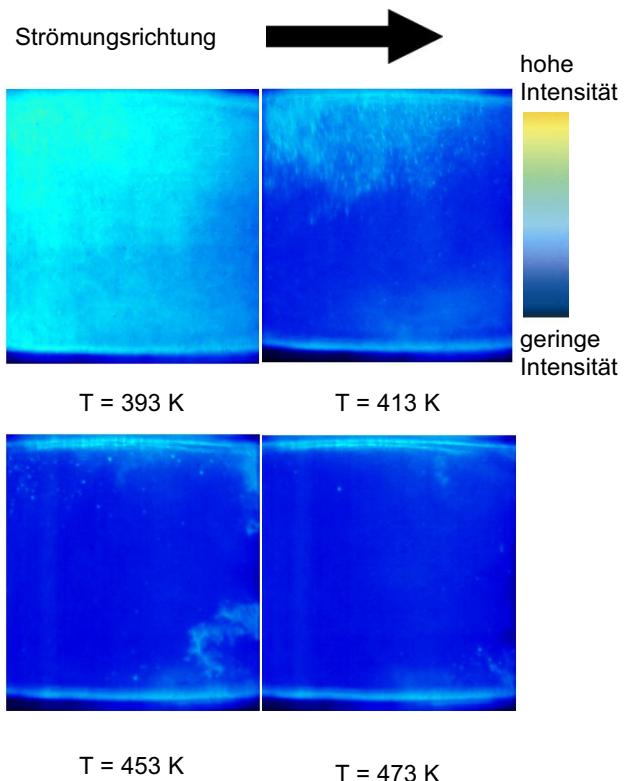


BILD 9. Signalintensitäten bei unterschiedlichen Eintrittstemperaturen

### 5.1. Einfluss der Eintrittstemperatur

In Bild 10 ist die Signalintensität der Mie-Streuung für unterschiedliche Eintrittstemperaturen T über dem AFR aufgetragen. Der Eintrittsdruck mit 2,0 bar und die Drehzahl von 90.000  $1/\text{min}$  wurden konstant gehalten.

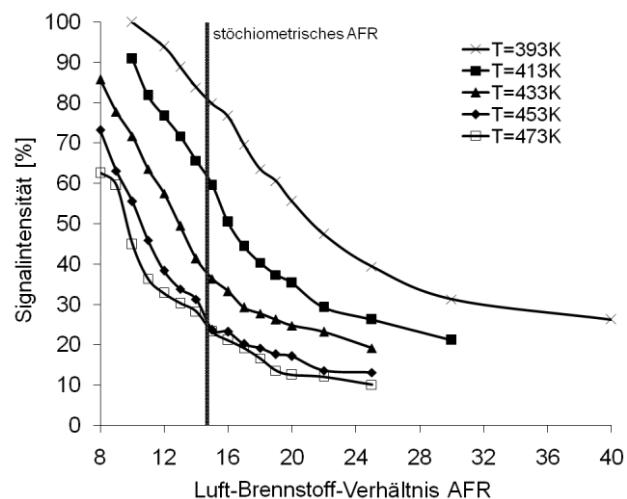


BILD 10. Einfluss von Temperatur und AFR auf die Signalintensität.

Eine ausschließliche Temperaturerhöhung, d.h. alle weiteren Parameter wurden konstant gehalten, führt zu einer geringeren Signalintensität. Das deckt sich mit den

Erwartungen, da mit höherer Temperatur der Energiegehalt in der Luftströmung steigt und dadurch mehr Kerosin verdampfen kann. Bei mageren AFR sind die Signalintensitäten bei den Temperaturen 453 K und 473 K ähnlich und schon nahe an den Intensitäten der Referenzmessungen ohne Brennstoff, die bei ca. 4% liegen. Das bedeutet, dass unter den Versuchsbedingungen bei Temperaturen größer als 453 K das Gemisch größtenteils gasförmig vorliegt.

## 5.2. Einfluss der Wellendrehzahl

In Bild 11 ist die Signalintensität der Mie-Streuung für unterschiedliche Wellendrehzahlen  $n$  über dem AFR aufgetragen. Die Eintrittsgrößen wurde mit  $T = 433$  K und  $p = 2,0$  bar konstant gehalten.

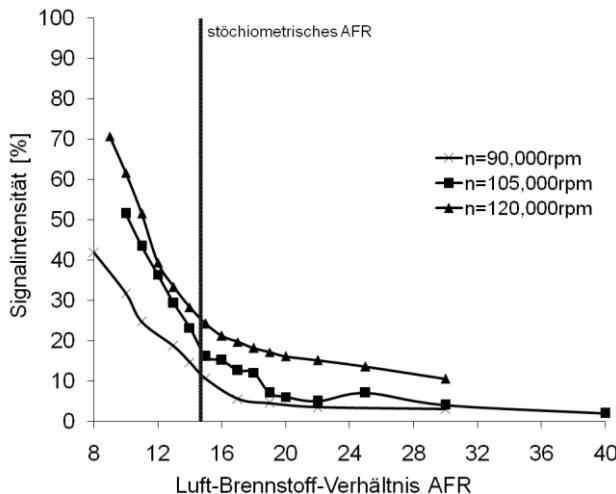


BILD 11. Einfluss von Wellendrehzahl und AFR und auf die Signalintensität.

Werden sonstige Parameter konstant gehalten, so bewirkt ein Anstieg der Drehzahl auch einen Anstieg der Signalintensität. Im Gegensatz dazu steht die Annahme, dass eine höhere Wellendrehzahl eine höhere Relativgeschwindigkeit zwischen Brennstoff und Luft bewirkt und damit zu einer besseren Zerstäubung führt. Das Verhalten lässt sich jedoch dadurch erklären, dass durch die höheren Zentrifugalkräfte mehr Brennstofftröpfchen die Wand des Verdichters erreichen und sich an der Verdichterwand ein Brennstofffilm bilden kann. Dadurch wird die Kontaktfläche Luft-Brennstoff kleiner, weniger Brennstoff kann verdampfen und das Gemisch enthält insgesamt mehr flüssigen Brennstoff. Ein weiterer Grund ist darin zu sehen, dass durch den höheren Volumenstrom und die höheren Strömungsgeschwindigkeiten sich die Verweilzeit des Kerosins im BAS verringert und dadurch das Kerosin weniger Zeit zum Verdampfen hat.

## 5.3. Einfluss des Eintrittsdrucks

In Bild 12 ist die Signalintensität der Mie-Streuung für unterschiedliche Eintrittsdrücke  $p$  über dem AFR aufgetragen. Die Drehzahl war konstant 105.000 1/min und die Eintrittstemperatur 433 K. Eine Erhöhung des

Eintrittsdrucks ohne weitere Parameter zu ändern führt zu einer leichten Erhöhung der Signalintensität. Das entspricht den Erwartungen, da der Kerosinmassenstrom erhöht werden muss, um bei steigendem Druck ein konstantes AFR beibehalten zu können. Es ist mehr Brennstoff im Messvolumen und die Intensität der Mie-Streuung steigt. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wurden in Bild 13 die Signalintensitäten bei unterschiedlichen Eintrittsdrücken über den Brennstoffmassenstrom aufgetragen.

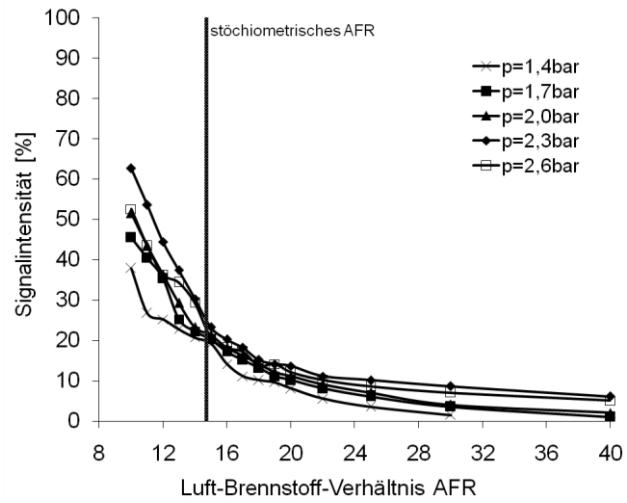


BILD 12. Einfluss von Eintrittsdruck und AFR auf die Signalintensität.

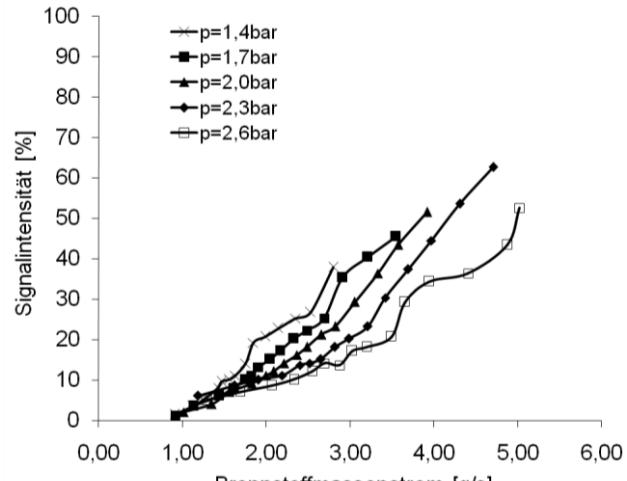


BILD 13. Einfluss des Brennstoffmassenstroms bei verschiedenen Drücken auf die Signalintensität.

Dem Bild kann man entnehmen, dass ein höherer Druck zu einer besseren Vermischung führt. Der anteilmäßig größere Luftmassenstrom führt zu höherer Verdampfung.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Am Lehrstuhl für Flugantriebe der Technischen Universität München wird ein neuartiges Brennstoffaufbereitungssystem für Gasturbinen untersucht. Es besteht im

Wesentlichen aus einer Drosselstelle, einem Rotationszerstäuber und einem kleinen Verdichter. Theoretische Überlegungen zeigen ein hohes Potenzial für schadstoffarme Verbrennung über einen weiten Betriebsbereich. Experimentelle Untersuchungen an einem Komponentenprüfstand zeigen, dass mit dem BAS bei Temperaturen oberhalb der minimalen untersuchten Eintrittstemperatur von 393 K ein vorgemischtes und vorverdampftes Gemisch mit hoher Güte erzielt werden kann. In einem nächsten Schritt ist geplant, das Brennstoffaufbereitungssystem in eine Gasturbine zu integrieren, um die Funktionalität des Gesamtsystems zu untersuchen.

## 7. DANKSAGUNG

Die vorgestellten Ergebnisse sind Teil einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Förderprogramms PROINNO, Förderkennzeichen KF 0214501PK5, unterstützten Forschungsarbeit. Für diese Unterstützung möchten wir uns bedanken.

## 8. ABKÜRZUNGEN

AFR	Luft-Brennstoff-Verhältnis
$D_i$	Tröpfchendurchmesser, m
$m_{Br}$	Brennstoffmassenstrom, kg/s
$n$	Drehzahl der Welle des BAS, 1/min
$n_i$	Anzahl der Tröpfchen
$p$	Eintrittsdruck BAS, bar
$p_3$	Eintrittsdruck Brennkammer, bar
SMD	mittlerer Sauterdurchmesser, m
T	Eintrittstemperatur BAS, K
T <sub>3</sub>	Eintrittstemperatur Brennkammer, K
$\Phi$	Äquivalentverhältnis

## 9. LITERATUR

- [1] Penner, J. E. (1999): "Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press.
- [2] Lefebvre, A. H. (1998): "Gas Turbine Combustion". 2<sup>nd</sup> Edition, Taylor & Francis.
- [3] Hupfer, A. (2006): "Kraftstoffeinspritzsysteme für Vormischbrenner kleiner Fluggastturbinen". Doktorarbeit, Technische Universität München.
- [4] Lefebvre, A. H. (1995): "The Role of Fuel Preparation in Low-Emission Combustion". ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 117, pp. 617-654.
- [5] Rink K. K., Lefebvre, A. H. (1989): "Influence of Drop Size and Combustor Operating Conditions on Pollutant Emissions". International Journal of Turbo and Jet Engines, Vol. 6(2), pp. 113-122.
- [6] Hupfer A., Rott C., Kau H.-P. (2006): "Experimental Investigations on Lean Premixed Prevaporized Combustors for Small Aeroengines". ISROMAC-11.
- [7] EASA (2003): "Certification Specifications for Large Aeroplanes" CS-25.