

VERDAMPFUNG VON BIO- UND ALTERNATIVKRAFTSTOFFEN FÜR DIE LUFTFAHRT

Fabrice GIULIANI¹, Johannes FRITZER², Alain STRZELECKI³,
Virginel BODOC³

Abstract

Dieser Artikel behandelt grundsätzlich den Aufgaben- und Tätigkeitsbereich des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der TU-Graz im Bereich des FP7-Projekts (European Commission's 7th Frame Work Program) ALFA BIRD. Hauptaugenmerk der Untersuchungen der TU-Graz richtet sich auf die Zerstäubung und Verdampfung unter isothermen Bedingungen von im Vorfeld von Projektpartnern ausgewählten Bio- und Alternativkraftstoffe in Zusammenarbeit mit ONERA Toulouse.

Zu diesem Zweck wurde ein Verdampfungsprüfstand in die bestehende Versuchsanlage des ITTM integriert, bestehend aus einer Verdampfungskammer mit quadratischem Linerprofil und einem Airblast-Injector sowie einer nachgeschalteten Nachbrennereinheit mit drei Axialdrallerzeugern. Dieser dient der Oxidation des erzeugten Luft-Kraftstoffgemisches und wird mit Methan betrieben. Der großzügige optische Zugang in die Verdampfungskammer ermöglicht die Ermittlung der Geschwindigkeitsprofile, Tropfengrößenverteilung sowie der Dampfkonzentrationsgradienten im Spray mittels Laser-optischer Methoden. Hauptaugenmerk wird im Rahmen der Untersuchungen des Instituts für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik auf die Kraftstoffdampfkonzentration im Spray gerichtet. Für die Analyse der Dampfphase wird die Infrarot-Extinktions-Messmethode angewendet.

Einleitung

Aufgrund der Erhöhung des Ölpreises und des sehr wahrscheinlichen Einflusses der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen auf die globale Klima Veränderung einerseits, sowie der Erschöpfung der Erdölreserven und dem stetigen Anstieg des Mobilitätsanspruchs andererseits, ist es notwendig Alternativen zu Erdöl zu entwickeln, auch im Bereich der Aeronautik. Aus diesem Grund wurde im siebten Rahmenprogramm der Europäischen Kommission ein Forschungsprojekt namens Alfa Bird ins Leben gerufen, welches sich mit der Suche nach adäquaten Alternativen zu herkömmlichen Flugtreibstoffen und der Implementierbarkeit selbiger in, sich auf dem momentanen Stand der Technik befindlicher, Triebwerke beschäftigt. Alfa Bird steht für Alternative Fuels and Bio-fuels in Aircraft Development und umfasst ein internationales Konsortium von Industriepartnern aus der Luftfahrt und der Erdölindustrie sowie Forschungsgesellschaften welche sich mit der Thematik von Bio- und Alternativkraftstoffen für den Flugbetrieb beschäftigt. Diese möglichen Alternativen werden repräsentiert durch GTL (gas to liquid), CTL (coal to liquid), Naphtenic Cut und Blendings aus GTL und HVO (hydrogenated vegetable oil).

Besonders aufgrund der sehr langen Lebensdauer von Objekten der zivilen Luftfahrt und der extremen betrieblichen Randbedingungen (z.B. Flug bei sehr niedrigen Temperaturen) ist es eine große Herausforderung Bio- und Alternativkraftstoffe in Flugzeugtriebwerken zu verwenden.

Das Projekt Alfa Bird ist grundsätzlich in 3 Phasen unterteilt:

- Die Identifikation und Auswahl geeigneter Alternativkraftstoffe zu herkömmlichem Jet A1 Kraftstoff

¹ COMBUSTION BAY ONE e.U., Plüddemangasse 39 A-8010 Graz, www.CBOne.at

² ITTM TU-Graz, Inffeldgasse 25a, www.ttm.tugraz.at

³ ONERA -French Aerospace Lab, 2. Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse, www.onera.fr

- Untersuchung der Anwendbarkeit der ausgewählten Kraftstoffmatrix sowie Evaluierung der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit
- Infrastrukturelle Untersuchung und Perspektivenanalyse für die ‚besten‘ Alternativen

Das Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der TU-Graz ist aufgabenseitig nur an letzteren beiden Punkten beteiligt. Der Aufgabenbereich in Punkt 2 wird in Kooperation mit ONERA Centre de Toulouse und Fauga-Mauzac (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales – the French Aerospace Lab) durchgeführt und besteht in einer Analyse der Zerstäubung und Verdampfung der im Vorfeld ausgewählten Kraftstoffmatrix aus Alternativ und Biokraftstoffen im Vergleich zu herkömmlichem Jet A1. Während sich ONERA mit der Zerstäubung der Treibstoffe beschäftigt, sprich Partikelgeschwindigkeiten und Tropfengrößenverteilung mittels Laser Doppler Interferometrie ermittelt, bezieht sich die Arbeit der TU-Graz auf die Verdampfung selbiger. Für eine Analyse der Dampfkonzentrationsgradienten wird die Infrarot Extinktions Messmethode herangezogen, welche eine nicht-intrusive Messtechnik darstellt, mit welcher integrale Konzentrationen von Kraftstoffdampf im Spray ermittelt werden können. Im Rahmen des Eccomet - Programmes (Efficient and Clean Combustion Experts Training) wurde diese Messtechnik bezüglich ihrer Adaptierbarkeit für derartige Belange validiert und publiziert [3]. Diese Ergebnisse werden hier kurz zusammengefasst. Aufgabenbereich des ITTM in Punkt 3 umfasst eine Studie bezüglich Low-Nox Brenner-Technologien und deren Kombinierbarkeit mit Alternativkraftstoffen.

Kraftstoffe

Der erste Teilbereich des Alfa Bird Projektes der die Auswahl der geeigneten Ersatzkraftstoffe darstellt, ist wiederum unterteilt in 2 Auswahlphasen. Die erste besteht aus einer Selektion von 12 potentiellen Fluiden darunter FSJF, FT-SPK, Blendings von FT-SPK mit Naphtenic Cut, Hexanol oder Furan in unterschiedlichen Mengen. Diese wurden nach einer intensiven Analyse bezüglich ihrer Eignung als Flugtreibstoff in der zweiten Auswahlphase auf 4 reduziert.

Tabelle 1: Alfa Bird Kraftstoffmatrix

Name	Bezeichnung	Zusammensetzung
FSJT (CtL)	8040	100%
FT-SPK (GtL)	8069	100%
GtL + 50% naphthenic cut	8075	GtL + 50% naphthenic cut
GtL + 20% 1-hexanol	8074	GtL + 20% 1-hexanol

FSJT: Fully Synthetic Jet Fuel

FTSPK: Fischer Tropsch Synthetic Parafinic Compound

CTL: Coal To Liquid

GTL: Gas To Liquid

Diese 4 ausgewählten Kraftstoffe bestehen aus FSJF, einem Blending von FT-SPK mit 50 % Naphtenic Cut und einem Blending von FT-SPK mit 20 % Hexanol. Der Variantenreichtum von Jet A-1 Flugtreibstoff verursacht durch regional abhängigen unterschiedlichen Rohölqualitäten und Zusammensetzungen sowie Herstellungsprozessen (Entschwefelung, Hydroprocessing, etc.) resultiert in einer Schwankung des Aromaten- und Schwefelanteils. Aus diesem Grunde wurde FSJF als Referenzkraftstoff ausgewählt, da hierbei die Homogenität dadurch garantiert werden kann, daß es von ein und derselben Raffinerie stammt und einem kontrollierten Herstellungsverfahren unterzogen wurde.

Betriebspunkte

Die ausgewählten Betriebspunkte im Alfa Bird Projekt entsprechen realistischen Bedingungen in einer Gasturbinenbrennkammer und basieren auf Ähnlichkeitsgesetzen bezüglich des reduzierten

Massenstroms $WR = 0.3$ (siehe Nomenklatur), einer konstanten Referenzgeschwindigkeit $v_{ref} = 33,36$ m/s und einem konstantem Äquivalenzverhältnis $\Phi = 1$ bei gleichbleibender Temperatur von 750 K. Basierend auf diesen Ähnlichkeitsgesetzen werden die Druckniveaus variiert von atmosphärischem Druck über 3 bar bis 5 bar Absolutdruck. Jeder der 4 Ersatzbrennstoffe wird unter Zugrundelegung dieser Testmatrix untersucht.

Tabelle 2: Alfa Bird Testmatrix

Tests for 4 Fuels	P	T	Vref	Mair	Kero
	[Pa]	[K]	[m/s]	[g/s]	[g/s]
TESTS LP	1,00E+05	750	33,36	10,95	0,76
TESTS HP	3,00E+05	750	33,36	32,86	2,27
TESTS VHP	5,00E+05	750	33,36	54,77	3,78

Versuchsanlage

Das Test Rig im Labor des Instituts für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik wurde ursprünglich errichtet um experimentelle Untersuchungen in kalten subsonischen und transsonischen Strömungen durchzuführen. Um den Anforderungen eines modernen Strömungsprüfstands gerecht zu werden, wurde die Einheit um einen thermischen Lufterhitzer und einem damit verbundenen Rohrsystem erweitert. Der Hochdruck-Luftmassenstrom wird durch eine separate Hochdruckverdichteranlage bereitgestellt. Der maximale Durchsatz der Verdichter ist angegeben mit 3MW elektrischer Leistung, die maximale Leistung des Lufterhitzers mit 5 MW thermischer Leistung.

Die Versuchseinheit zur Untersuchung der Verdampfung wurde in die nun bestehende Testanlage des Institutes integriert. Die Kompressoren in Verbindung mit dem Lufterhitzer können zum Zwecke realitätsnaher Brennkammerbedingungen 3,5 kg/s Luft, verdichtet bis zu 10 bar bei einer Temperatur von 750 K bereitstellen [1].

Die in Abbildung 1 schematisch dargestellte Anlage kann über vorgeschaltete Ventile jeweils im Hochdruck sowie Niederdruckbereich betrieben werden, je nach Anforderung. Der Versorgungskreis ist unterteilt in einen heißen und einen kalten Pfad (Abbildung 1) welcher wiederum jeweils aus einer Haupt- und Bypasslinie besteht.

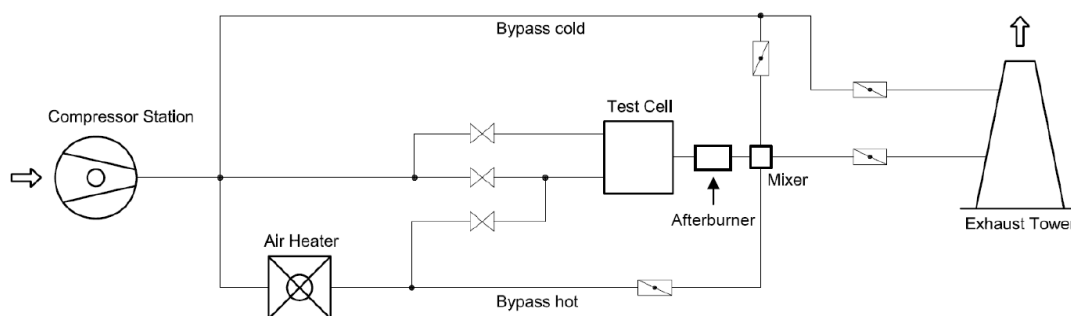


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung

Die verdichtete Luft kann nun über elektro-pneumatisch betätigte Ventile aufgeteilt werden in Heiss- und Kaltluftkreislauf. Über die Bypassleitungen kann die Luftmenge geregelt werden die zur Erhitzung bzw. Kühlung des Abgases in den Abluftturm geleitet wird. Die jeweiligen Luftmengen sind abhängig von dem geforderten Betriebspunkt in der Testzelle, einzig begrenzender Faktor wird durch die Temperatur im Abluftturm repräsentiert, die nicht über 350 °C liegen darf.

Für das Projekt Alfa Bird wurde der Testzelle zusätzlich ein Nachbrenner nachgeschaltet. Dieser dient der Oxidation des in der Verdampfungskammer erzeugten Luft-Kraftstoffgemischs, worauf im nächsten Kapitel näher eingegangen wird.

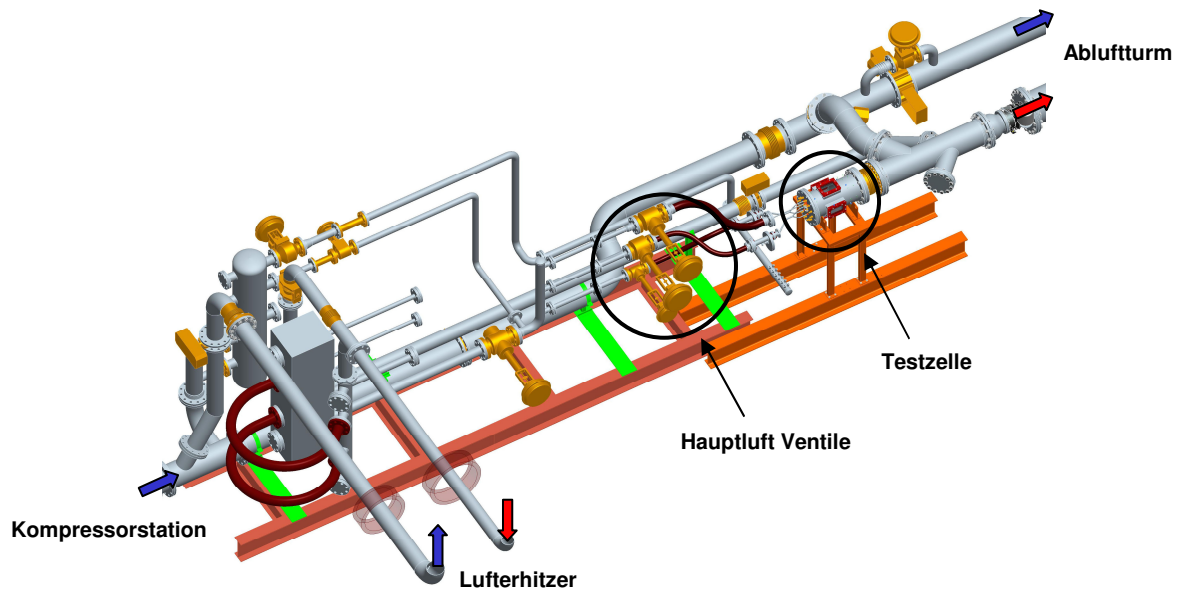
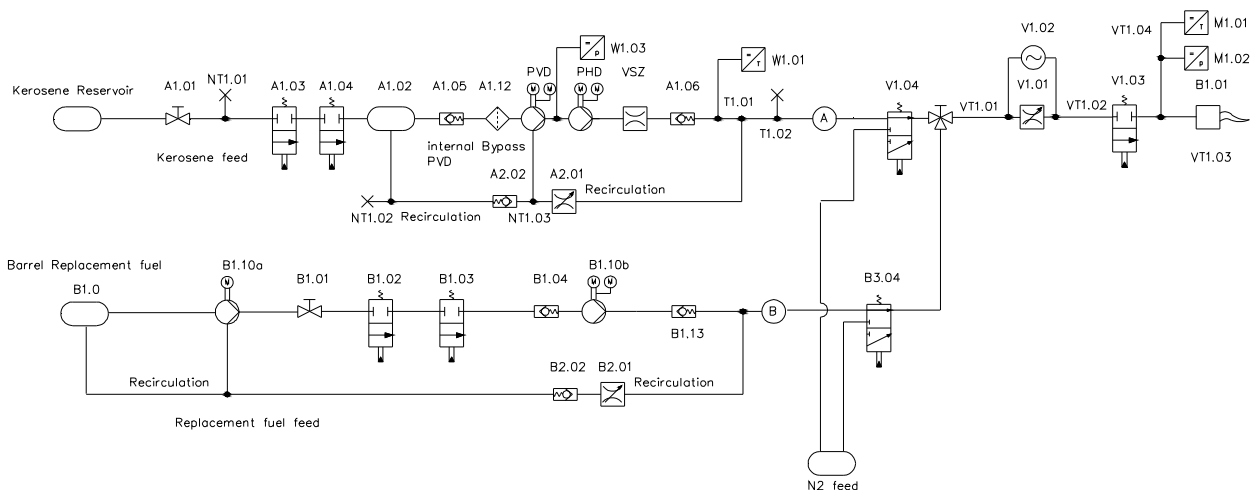


Abbildung 2: 3D Design der Versuchsanlage

Das Konzept der Kraftstoffanlage (Abbildung 3) besteht aus zwei unabhängigen Kreisläufen mit Vordruck- und Hochdruckpumpe, Ausgleichsbehältern und Rücklaufleitung sowie dazugehörigen elektromagnetischen Sperr- und Sicherheitsventilen. Die beiden Kreise können getrennt voneinander betrieben werden und sind über ein 3-Wege Ventil miteinander verbunden. Dadurch ist es möglich bei Bedarf zwischen unterschiedlichen Kraftstoffen umzuschalten. In diesem Fall werden die Leitungen vor der Umschaltung mit Stickstoff gespült. Die Stickstoffversorgung wird über den Haus-internen Kreislauf gewährleistet, die Zuschaltung in den Kraftstoffkreis erfolgt über schaltbare 3-Wege Ventile (siehe Abbildung 3). Das derartig konzipierte Kraftstoffsystem kann einen Massenstrom von bis zu 10 g/s bereitstellen bei einem Druck von bis zu 100 bar. Die regelung und die Massenstrommessung übernehmen 3 hochpräzise Coriolis-Massenstrommeter/Regler der Firma Brooks.



A/B1.01 Manuelles Sperrventil
 A/B1.02 Ausgleichsbehälter
 A/B1.03/4 Sicherheitsventil (elektromagnetisch)
 A/B1.05 Rückstossventil
 A/B1.12 Kraftstofffilter
 PVD/PHD Kraftstoffpumpe (Niederdruck/Hochdruck)
 W1.03 Drucksensor
 VSZ Volumenstrom-meter

W1.01 Temperatur Sensor
 A/B2.01 Druckregler (0-6.8 bar)
 A/B2.02 Rückstossventil
 V1.03 2-wege Ventil
 V1.04 Spülventil (elektromagnetisch)
 V1.01 Coriolis Massenstrommesser/Regler
 M1.01 Temperatur Sensor
 M1.02 Druck Sensor

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Kraftstoffanlage

Prüfling und Nachbrenner

Die Hauptzielsetzung des Aufgabenbereichs der TU-Graz im Alfa Bird Projekt liegt in einer qualitativen Vergleichsanalyse der Verdampfung unterschiedlicher Alternativkraftstoffe, aus diesem Grund wurde eine bereits erprobte Brenner Geometrie für diese Untersuchungen ausgewählt.

Dieses Injektor-Design (TIMECOP-AE) wurde von der Firma Turbomeca entwickelt und in die MERCATO (Moyen Expérimental de Recherche en Combustion Aérobique par Techniques Optiques) Setup-Geometrie integriert welche bei Onera Fauga Mauzac in Verwendung ist. Das Design besteht aus einem Hohlkegel-radial Swirler mit einer zentral positionierten Duckdüse.

Diese Druckdüse stammt von der Firma Parker und basiert auf einem Membran-Zerstäubungsprinzip. Die Durchflusszahlen wurden so ausgewählt, dass der Area Mean Diameter nicht unter 20 μm liegt, was als Randbedingung für die Messtechnik erforderlich ist. Darauf wird im nächsten Kapitel im Detail eingegangen.

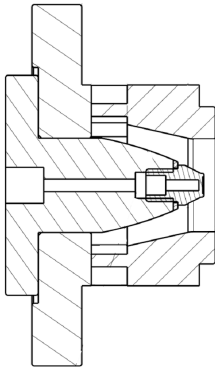


Abbildung 4:
Schnittdarstellung der Brennergeometrie

Das Flammrohr wurde in den bestehenden Druckmantel integriert, welcher durch den besonderen modularen Aufbau simultane Untersuchungen erlaubt. Die Brennkammer ist an einem Adapter-Flansch fixiert welcher mit relativ geringem Aufwand entfernt werden kann, um dadurch Platz zu schaffen für einen anderen Prüfling. Die Fixierung der Brennkammer ist unter Verwendung eines Axialkompensators derartig konzipiert, dass sie Wärmedehnungen bis zu 2 mm ausgleichen kann und dadurch die Genauigkeit des Messrasters erhöht.

Liner und Airbox wurden aus 2mm Edelstahl Blech (1.4301) gefertigt und sind jeweils vorder- und rückseitig an die Kopfplatte angeflanscht (siehe Abbildung 5). Der Prüfling besitzt 4 rechtwinklig angeordnete Zugangsfenster. Die Fenster im Liner (5 mm Wandstärke) sowie am Druckmantel (20mm) bestehen aus Quarzglas (Silux) welches hochtemperaturfest ist und eine ausreichende Transmission in einem weiten Wellenlängenbereich besitzt. Dies ermöglicht eine umfangreiche Laseroptische Analyse bis in der FIR Bereich.

Der Prüfling wurde an 6 axialen Positionen sternförmig mit Druck und Temperaturfühlern bestückt (Abbildung 5). Diese radialsymmetrisch angeordneten Sensoren werden an der jeweiligen axialen Position gemittelt und erlauben somit eine genaue Analyse der Betriebsbedingungen.

Der Prüfling wurde an 6 axialen Positionen sternförmig mit Druck und Temperaturfühlern bestückt (Abbildung 5). Diese radialsymmetrisch angeordneten Sensoren werden an der jeweiligen axialen Position gemittelt und erlauben somit eine genaue Analyse der Betriebsbedingungen.

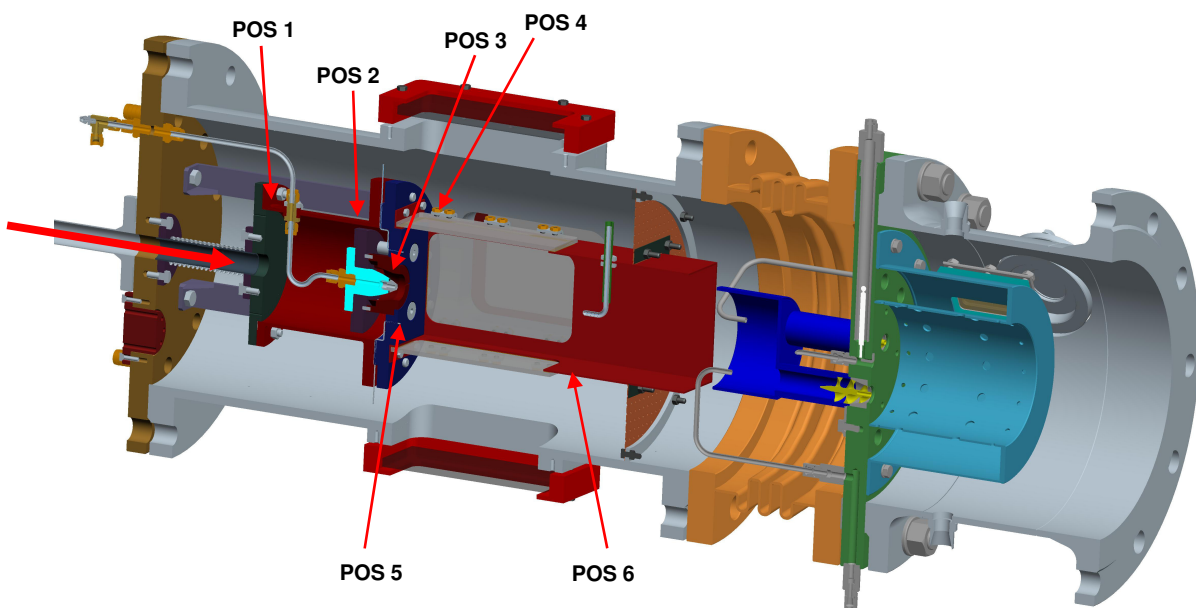


Abbildung 5: 3D Schnitt des ALFA BIRD Setups (Testzelle und Nachbrenner)

Da es sich bei dieser Untersuchung um eine isotherme Verdampfungsanalyse ohne Verbrennung handelt, und dabei ein zündfähiges Luft-Kraftstoffgemisch entsteht, welches nicht ohne weiteres in Abluftturm und Umgebung geleitet werden darf, ist es erforderlich einen Nachbrenner zur kontrollierten Pyrolyse zu installieren. In Abbildung 6 ist das Prinzip dieser Konfiguration schematisch skizziert dargestellt.

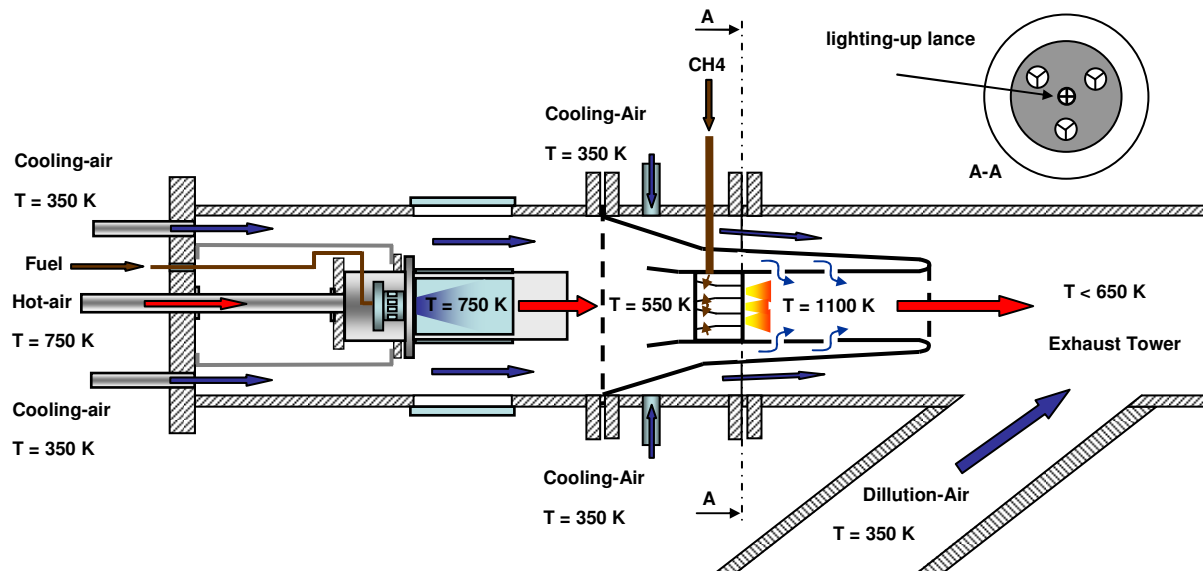


Abbildung 6: Schematische Übersicht des Alfa Bird Setups

Ausgehend von der technischen Strömungsrichtung wird die Vorgehensweise wie folgt erklärt: Die heisse verdichtete Luft (ca. 750 K) wird vom Luftherhitzer in die Brennkammer geleitet. Die Kühlluft (350 K) direkt von den Verdichtern kommend wird in den Druckmantel eingeleitet und an der Brennkammer vorbeigeführt. In der Verdünnungszone nach dem Liner in welchem ein globales Äquivalenzverhältnis von $\Phi = 1$ herrscht wird das Heisse Luft-Kraftstoffgemisch mit der Kühlluft zusammengeführt und in den Nachbrenner gedrückt. Das Verhältnis zwischen Kühlluft und Gemisch führt zu einem Globalen $\Phi = 0.3$ wodurch ein Rückzündung (Flashback) in die Verdampfungskammer verhindert wird. Der für ein zündfähiges gemisch im Nachbrenner fehlende Brennstoff wird durch Methan ersetzt welches vor den Axialdrallerzeugern des Nachbrenners eingeblasen wird. Das nun wieder zündfähige Gemisch wird über einen mit Wasserstoff betriebenen Pilotbrenner gezündet. Aufgrund der kontinuierlichen Zündung wird die Gefahr einer Detonation verhindert.

Die dabei entstehenden Verbrennungsgase haben eine Abgastemperatur von ca. 1100 K und müssen mit Mischluft verdünnt und dadurch auf mindestens 600 K abgekühlt werden, bevor sie in den Abluftturm geleitet werden. Diese Temperatur darf nicht überschritten werden.

Messtechnik

- **Aerodynamik:**

Zur Strömungs-Untersuchung des Versuchsbrenners im atmosphärischen Betriebspunkt der Versuchsmatrix wurde ein 2 Komponenten LDA System (Laser-Doppler-Anemometry) der Firma Dantec angewendet. Damit wurden die Geschwindigkeitskomponenten in x, y und z Richtung kreuzweise in 6 unterschiedlichn axialen Abständen von der Kopfplatte gemessen (Abbildung 7). Die Messungen wurden jeweils für eine Confined und Free-jet Konfiguration durchgeführt.

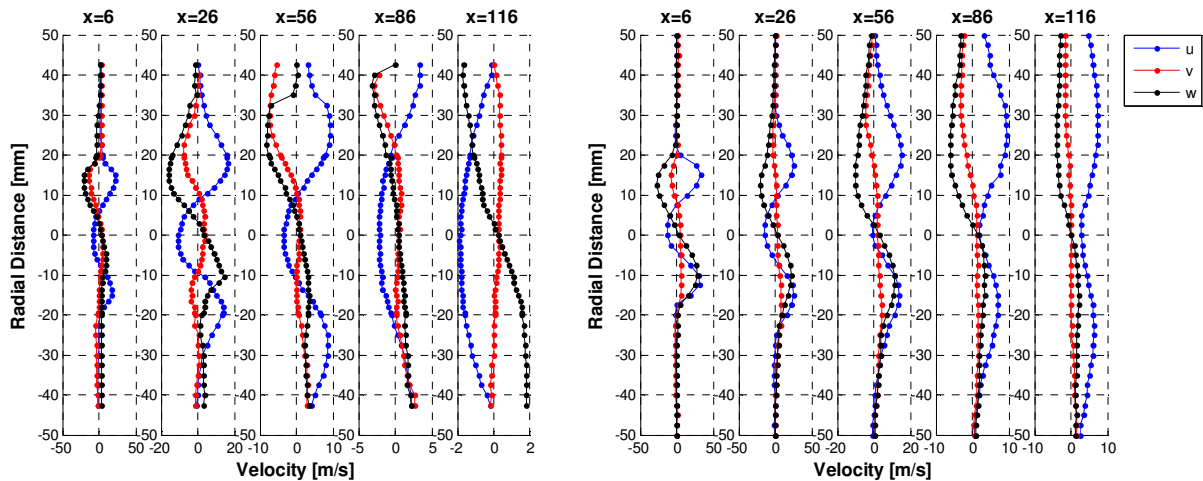


Abbildung 7: Darstellung der 3 Geschwindigkeitskomponenten (u, v, w) in 6 Ebenen für Confined (links) und Free-jet (rechts) bei 1 atm

- **Dampfkonzentration:**

Zur Bestimmung der Dampfkonzentrationsgradienten wird die Infrarotextinktions-Messmethode verwendet. Diese Methode wurde in den späten 80er Jahren entwickelt und massgebliche Validierungen Anfang der 90er Jahre publiziert (siehe [5]).

$$\frac{\bar{I}(x)}{I_0} = e^{-\int_0^L \alpha(\lambda, p, T) \cdot c_m(x) \cdot dx}$$

Formel 1: Beer-Brouguer-Lambert-Gesetz (BBL law)

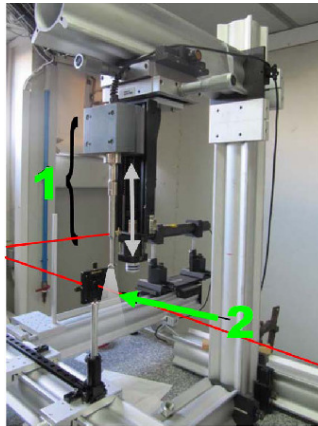
Die IRE Methode ist eine nichtinvasive integrale Messmethode mit der man die relative Dampfkonzentration in einer Zwei-Phasenströmung mit Verdampfung bestimmen kann. Dies geschieht durch den Vergleich von gemessenen Intensitätswerten zweier konzentrisch überlagerter Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlängen im infraroten (IR 3390 μm) und visuellen Bereich (VIS 633 nm), welche durch das Messvolumen geleitet und mit Photodioden detektiert werden (Abbildung 8). Das Prinzip basiert auf einer Erweiterung und Vereinfachung des Beer-Brouguer-Lambert-Gesetzes [5].

$$\bar{c}_m = \frac{1}{\alpha \cdot L} \left[-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{NA} \cdot R - \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_{ABS} \right]$$

Formel 2: Molare Dampfkonzentration mit dem Verhältnis der optischen Dichte

Diese Vereinfachung besteht darin, dass unter der Voraussetzung eines mittleren Tropfendurchmessers $D_{20} > 20\mu\text{m}$ die Annahme getroffen werden kann, dass das Verhältnis der optischen Dichten $R = 1$ (siehe Formel 2) angenommen werden kann und somit eine Ermittlung der Dampfkonzentration ausschliesslich durch den Vergleich beider Laser Signale bestimmt werden kann.

Abbildung 8 (rechts) zeigt den prinzipiellen Aufbau der Messtechnik. Der hier dargestellte Messaufbau wurde im Rahmen des Marie Curie Fellowships in Zusammenarbeit mit Onera Toulouse validiert. Dabei wurde ein Kraftstoffspray aus n-Oktan bei atmosphärischen Bedingungen vermessen und die daraus erzielten Ergebnisse mit den Werten aus einer vorangegangenen Simulation (CEDRE) verglichen [3].



- 1 IR He-Ne laser $\lambda=3.39 \mu\text{m}$, $P=2 \text{ mW}$
- 2 IR collimation lens $f=400 \text{ mm}$, CaF type
- 3 Semi-transparent mirror
- 4 Pin-hole $d=1.4 \text{ mm}$
- 5 Chopper
- 6 Semi-transparent mirror
- 7 IR collection lens $f=50 \text{ mm}$, CaF type
- 8 IR pin-hole $d=400 \mu\text{m}$
- 9 IR filter + photodetector PbS diode
- 10 VIS He-Ne laser $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $P=5 \text{ mW}$
- 11 VIS collection lens $f=100 \text{ mm}$
- 12 VIS pin-hole $d=150 \mu\text{m}$
- 13 VIS filter + photodetector Si diode

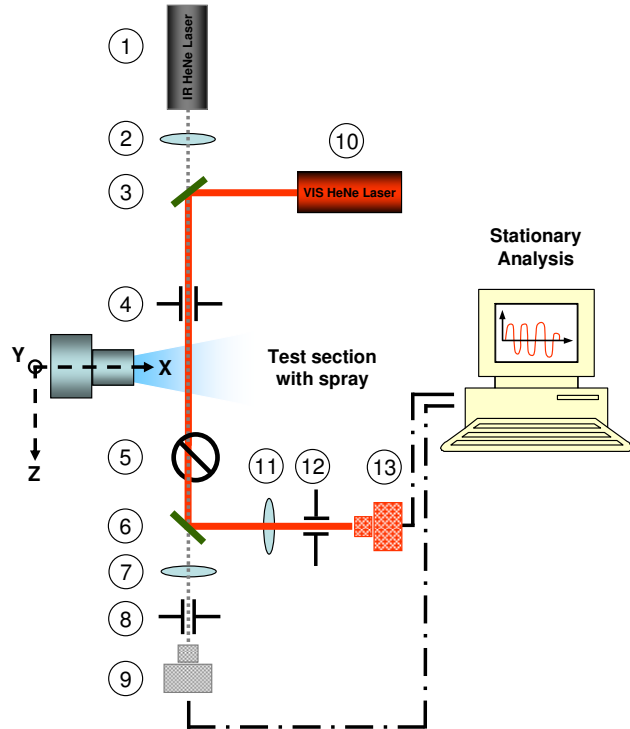


Abbildung 8: Schema des Messaufbaus bei Onera Toulouse rechts / Abbildung des ultrasonischen Injektors (1) mit pinhole (2) links

Diese Ergebnisse wurden im Journal for Engineering in Gasturbines and Power publiziert und bei der ASME Konferenz 2011 in Vancouver präsentiert

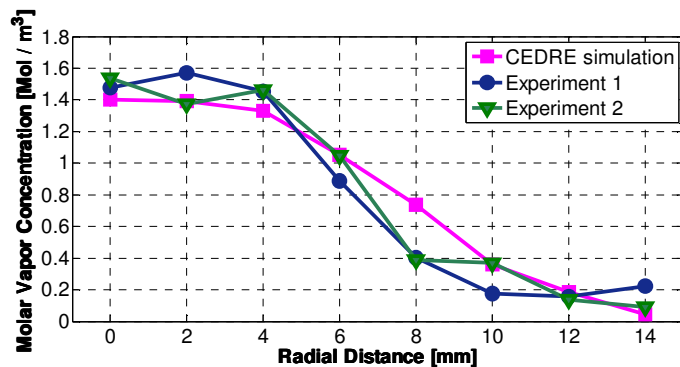


Abbildung 9: Vergleich der Dampfkonzentrationen aus Messungen mit der Simulation

Conclusion

Eine besonders wichtige Frage für die im Alfa Bird Projekt beteiligten OEMs, stellt die Kompatibilität aktueller Triebwerke mit zukünftigen Kraftstoffen dar. Die Zusammenarbeit von TU-Graz und ONERA fokussiert sich auf die Zerstäubung und Verdampfung ausgewählter Kraftstoffe (sog. Replacement Fuels) im Vergleich mit herkömmlichem Kerosin Jet A1. Zu diesem Zweck wurde ein Testprüfstand an der TU-Graz entwickelt auf welchem es möglich ist realitätsnahe Einspritzbedingungen zu reproduzieren und zu analysieren. In diesem Artikel wurden das Projekt, der Prüfstand, der Prüfling, die Betriebsbedingungen und die Messtechnik präsentiert. Die Testreihen der TU Graz starten im Frühling und die daraus erzielten Ergebnisse werden Ende 2012 veröffentlicht.

Nomenklatur

$\overline{C_n}$	Line-of-Sight Averaged Number Density
$N(D)$	Drop Diameter Distribution
$c_m(x)$	Integral Vapor Concentration
α_{IR}	Absorption Coefficient
L	Length of Laser Penetration through medium
λ_{abs} and λ_{na}	Absorbing and Non-absorbing Wavelength
f	Focal Length

$$D_{20} = \left[\frac{\sum N(D) \cdot D^2 \cdot dD}{\sum N(D) \cdot dD} \right] \quad \text{Area Mean Diameter}$$

$$WR = \dot{m}_L \cdot \sqrt{\frac{T_{t2}}{T_N} \frac{p_N}{p_{t2}}} \quad \text{Reduced Mass Flow}$$

p_N	Atmospheric Pressure (1.01325 Pa)
T_N	Atmospheric Temperature (288.15 K)
p_{t2}	Systempressure
T_{t2}	Systemtemperature

$$S = \frac{2}{D} \cdot \frac{\int_0^{x_{\max}} w \cdot u \cdot x^2 dx}{\int_0^{x_{\max}} u^2 x \cdot dx} \quad \text{Swirlnumber}$$

Acknowledgement

Diese Arbeit wurde von der Europäischen Kommission im Rahmen des Alfa Bird Projekts unterstützt (Alternative fuels and Biofuels in Aircraft Development, EU FP7: ACP/-6A-2008-213266)

Quellen

- [1] Leitgeb Th., et.al. , “Computer-aided Dimensioning and Validation of a versatile Test Facility for Combustion Chambers and Turbines“ ASME Turbo Expo 2009 GT-59592
- [2] F. Giuliani, U. Bhayaraju, and C. Hassa, “Analysis of air-blasted kerosene vapour concentration at realistic gas turbine conditions using laser infra-red absorption.” Proceedings of the European Combustion Meeting.
- [3] Fritzer J., et al , “Validation of the Infrared Extinction Method for fuel vapour concentration measurements towards the systematic comparison between alternative and conventional fuels for aviation“, ASME Journal for Engineering in Gas Turbines and Power 2011 GTP-11-1097
- [4] F. Giuliani, U. Bhayaraju, and C. Hassa, “Analysis of air-blasted kerosene vapor concentration at realistic gas turbine conditions using laser infra-red absorption.”, Proceedings of the European Combustion Meeting.
- [5] J. Drallmeier, “Hydrocarbon vapor measurements in fuel sprays: a simplification of the infrared extinction technique”, Applied Optics, vol. 33, No.30, pp. 7175–7179, 1994.