

LASER-SPEKTROSKOPISCHE CHARAKTERISIERUNG DER PILOTZONE EINES GESTUFTEN MAGERMODULS

U. Meier, S. Freitag, J. Heinze, L. Lange, E. Magens, M. Schroll, C. Hassa
DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, D-51147 Köln, Deutschland
I. K. Bagchi, W. Lazik
Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG Eschenweg 11, Dahlewitz
15827 Blankenfelde-Mahlow, Deutschland

Zusammenfassung

Bei der Entwicklung von Flugtriebwerken mit deutlich verringerten Emissionen auf der Grundlage der Magerverbrennungstechnologie spielt die Pilotstufe des Brenners eine entscheidende Rolle im Hinblick auf Stabilität, Betriebsverhalten, sowie NO_x- und Rußproduktion. Zu den Faktoren, die die Leistungsmerkmale eines Pilot-Brenners beeinflussen, gehören Mischungsgüte in der Pilotzone, Kraftstoff-Platzierung, Struktur des Strömungsfeldes und Wechselwirkung mit der Hauptstufe. Die Charakterisierung und das Verständnis dieser Prozesse sind daher von besonderem Interesse.

Pilot-Brenner mit Druck- und Luftstromzerstäubung wurden in einem optisch zugänglichen Einzelsektor unter Verwendung unterschiedlicher optischer Messverfahren untersucht. Das Ziel der Versuche bestand in der Interpretation und einem verbesserten Verständnis des globalen Emissionsverhaltens in einer Brennkammer. Da dieses in hohem Maße von der Einbringung und Platzierung des flüssigen Kraftstoffes abhängt, wurde die räumliche Verteilung des Kerosin-Sprays für unterschiedliche Brennerkonfigurationen und Betriebszustände unter Einsatz der ebenen Mie-Streuung untersucht. Dabei wurden Eindringtiefe und Spraywinkel gemessen. Im Falle von Druckzerstäubern wurde eine Zunahme des Spray-Kegelwinkels mit dem Brennstoff-Durchfluss festgestellt, während er im Falle von Luftstrom-Zerstäubern konstant blieb. Mittels Phasen-Doppler-Anemometrie wurden Tropfengrößen und Geschwindigkeiten gemessen. Für Luftstromzerstäuber ergaben sich kleine Tropfengrößen, mit Axialgeschwindigkeiten ähnlich denen der Luftströmung. Die Dynamik der Brennstoff-Strömung wurde mittels Hochgeschwindigkeits-Schattenaufnahmen untersucht. Die Daten zeigen eine schnelle Ausbildung turbulenter Mischungsstrukturen mit örtlich hohen Konzentrationen von flüssigem Kraftstoff, sowie eine schraubenförmige Umfangsbewegung. Die räumliche Rußverteilung und ihre Abhängigkeit vom Luft/Brennstoff-Verhältnis (LBV) wurden unter Leerlauf- und Teillast-Bedingungen mittels ebener Laser- Induzierter Inkandescenz (LII) untersucht. Die Daten zeigen unterhalb eines bestimmten LBV einen steilen Anstieg des Ruß-Volumenanteils bei weiterer Verringerung des LBV. Dies Ergebnis ist in Übereinstimmung mit Messungen der Rußzahl in einem Einzelsektor ohne optischen Zugang, liefert jedoch weitergehende Informationen über Lage und Form der Rußverteilung in der Brennkammer. Das Strömungsfeld wurde mittels PIV vermessen; die Daten für isotherme und reagierende Strömungen sind vergleichbar mit CFD-Rechnungen. Diese und weitergehende Resultate, etwa die Untersuchung modifizierter Brennstoffzerstäuber oder Einsatz kombinativer optischer Messtechniken, bilden Grundlagen für eine Entwicklung von Strategien zur Verringerung von Rußemissionen, insbesondere bei höheren Lastzuständen bei Pilotbetrieb.

1. EINLEITUNG

Die Forderung nach Nachhaltigkeit im zivilen Luftverkehr ist bei einem erwarteten Wachstum von jährlich 3% während der nächsten 20 Jahre nur zu erfüllen, wenn es gelingt, die Umweltverträglichkeit der Antriebe zu verbessern. Neben den zunehmend strengeren gesetzlichen Auflagen in Bezug auf Lärm und NO_x-Emissionen wird eine verbesserte Umweltfreundlichkeit von Luftfahrtantrieben auch durch Kundenanforderungen und damit durch den Markt vorangetrieben. Zu den Anforderungen hinsichtlich Kraftstoffverbrauchs und damit CO₂-Emissionen, die in der Vergangenheit treibende Kraft für Verbesserungen der Triebwerkstechnik waren,

kommen nun Verringerung der NO_x-Emissionen und des Lärms hinzu. Ein erfolgreiches technisches Konzept für ein Flugtriebwerk muss diese Forderungen in Einklang bringen. Die gängige Praxis bei der Motorisierung neuer Flugzeugtypen, die in der Vergangenheit auf inkrementellen und evolutionären Verbesserungen bereits existierender Triebwerke beruhte, stößt dabei an ihre Grenzen. Neue Ansätze bei der Entwicklung sind durch grundlegend neue Konzepte gegenüber bestehenden Technologien und Triebwerksarchitekturen gekennzeichnet.

Die Brennkammerentwicklung dieser Antriebe der nächsten Generation wird hauptsächlich von zukünftigen NO_x-Anforderungen getrieben. Neben den derzeitigen NO_x-Grenzwerten gemäß CAEP/6 seit Januar 2008, und

CAEP/8 ab Januar 2014, ist eine weitere Verringerung im Rahmen zukünftiger CAEP-Initiativen zu erwarten. Konfrontiert mit steigenden CAEP-Anforderungen und höheren Landegebühren, erwarten die Fluglinien von den Triebwerksherstellern deutliche NO_x-Einsparungen gegenüber der derzeitigen Gesetzgebung, um Umweltverträglichkeit und damit auch wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit längerfristig sicherzustellen. Bislang konnte durch deutliche Verbesserungen der konventionellen, jedoch hochgradig optimierten fett/mager-Brennkammern eine NO_x-Zunahme aufgrund erhöhter Kreisprozess-Daten vermieden werden. Dieses Vorgehen hat jedoch langfristig ein begrenztes Potenzial für die Befriedigung der Forderungen zur Schadstoffminderung durch Gesetzgebung und Kunden, da gleichzeitig weiter steigende Anforderungen an die Kreisprozesse zur Senkung von Treibstoffverbrauch und CO₂-Produktion abzusehen sind. Ein technologischer Paradigmenwechsel hin zur Magerverbrennungs-Technologie ist mithin unausweichlich.

In enger Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Rolls-Royce wurde die Messstrecke BOSS (Big Optical Single Sector) [1] für detaillierte Untersuchungen in der Primärzone schadstoffarmer Magerbrenner entwickelt und hergestellt. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen an skalierten Brennern [2] werden hier moderne Magerbrenner von Rolls-Royce in Originalgröße untersucht. In [3] wurde bereits ein Überblick über das Verbrennungsverhalten eines Magerbrenners unter Betonung der für die NO_x Emission relevanten Eigenschaften gegeben, die sich bei der Stufung von Pilot- und Hauptbrenner und der Gestaltung des Kraftstoffplatzierung der Hauptstufe ergeben. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf Untersuchungen an einem gestuften Magerbrenner im reinen Pilotbetrieb bis zum Stufungspunkt. In diesem Betriebsbereich müssen neben der Erfüllung betrieblicher Anforderungen wie Magerstabilität, Zündfähigkeit sowie transienter Zustände auch niedrige Schadstoffemissionen erreicht werden, da der

Teillastbetrieb über den ICAO-Zyklus auch stark in die Emissionsbewertung eingeht. CO und unverbrannte Kohlenwasserstoffe im Leerlauf, aber auch Ruß- und NO_x Emission im oberen Lastbereich des Pilotbetriebs müssen niedrig werden. Hierfür stehen als Einflußgrößen die Einbringung des Kraftstoffs, und die Gestaltung des Strömungsfeldes in seinem Zusammenspiel mit der Hauptbrennerströmung zur Verfügung, aus denen sich die Mischungsprozesse und Form der Reaktionszonen ergeben. Wegen der Nichtlinearität der Reaktion, aber auch insbesondere der Bildungsprozesse der dispersen Tropfen- und Rußpartikelphase, sind numerische Vorhersagen schwierig und daher experimentelle Daten über diese Vorgänge von besonderem Interesse.

2. MAGERVERBRENNUNGS-TECHNOLOGIE

Magerverbrennungs-Systeme arbeiten mit einem Luft-Überschuss in der Primärzone; dies erlaubt eine deutliche Absenkung der lokalen Flammentemperaturen und damit der NO_x-Bildung. Bis zu 70% der gesamten Brennkammerluft können vor Eintritt in die Reaktionszone mit dem Kraftstoff vermischt werden (Abb. 1). In dem Mischungsgebiet ist eine möglichst optimale Mischungsgüte der entscheidende Faktor für das tatsächliche Erzielen einer verringerten Verbrennungstemperatur. Zur Vermeidung hoher Flammentemperaturen muss die Brennstoffdüse den Kraftstoff zerstäuben und mit Luft vor Eintritt in die Brennkammer vermischen.

Zur Abdeckung des gesamten Leistungsbereichs eines Magerbrenners ist eine Kraftstoff-Stufung mittels eines Pilotbrenners für Teillast- und Leerlaufbetrieb erforderlich (Abb. 2). Die Pilotstufe ist über den gesamten Leistungsbereich der Maschine in Betrieb. Nur die Kraftstoff-Aufteilung zwischen Pilot- und Hauptstufe ist variabel. Dem reinen Pilotbetrieb folgt bei Steigerung der Leistung die Zuschaltung aller oder auch nur eines Teils der Hauptstufen, d.h. eine Umfangs-Stufung der Hauptbrenner. Bei Vollast sind alle Pilot- und

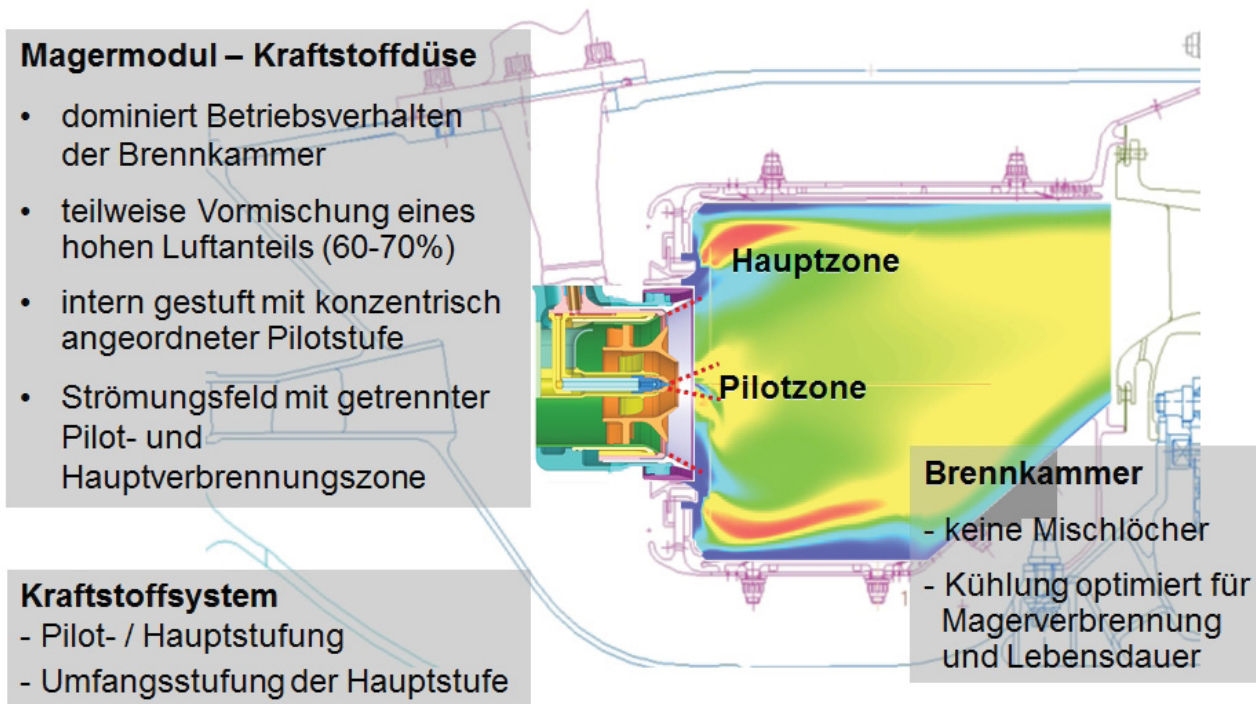


Abb. 1: Gestufte Magerbrennkammer

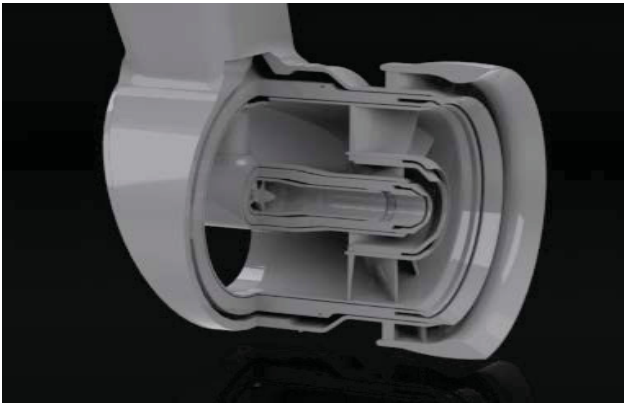


Abb. 2: Modell eines gestuften Magerbrenners

Hauptbrenner in Betrieb. Eine Stufung der Injektor-Module erfordert zur Verhinderung von Verkokung eine Temperaturkontrolle der Gebiete mit ruhendem Kraftstoff innerhalb des Moduls. Hierfür wird der Kraftstoff im Hauptbrenner durch den permanent fließenden Pilotkraftstoff-Strom gekühlt. Alternativ kann der verbliebene Hauptmodul-Kraftstoff durch einen Differenzdruck über die Kraftstoff-Passagen ausgeblasen werden.

Kraftstoff-Stufung wird durch einen intern gestuften Magerbrenner erzielt, der eine gleichmäßige Kraftstoff/Luft-Mischung innerhalb eines definierten Brennkammervolumens herstellt und dadurch Verbrennung mit reduzierten Spitzentemperaturen unter mittleren bis hohen Lastbedingungen ermöglicht. Der Kraftstoffinjektor besteht aus der konzentrischen Anordnung einer Hauptstufe, die ihren Brennstoff in verdrallte Luftströme mit dem Hauptanteil der Brennkammerluft einbringt, und einem eingebetteten Pilot-Injektor auf der Brennerachse (Abb. 2).

Die magere Gemischbildung wird auf einer kurzen Strecke zwischen der Brennstoff-Einbringung und dem Stabilisierungspunkt der Hauptflamme innerhalb des Brennkammer-Kopfes erreicht. Die magere Hauptstufen-Einspritzung (LDI, Lean Direct Injection) kann als ein Luftstrom-Zerstäuber mit Filmleger ausgeführt werden. Auf dem Filmleger wird der Kraftstoff auf einer großen Oberfläche verteilt und bildet einen dünnen Film in Kontakt mit einer Luftströmung hoher Geschwindigkeit. Dabei zerfällt der Kraftstoff-Film in kleine Tröpfchen, die stromab transportiert und dabei verdampft werden. Mit zunehmender Injektor-Größe wird dieses Konzept wegen des ungünstiger werdenden Verhältnisses von Kraftstoffmenge zu Oberfläche (Beladung) schwieriger umsetzbar. Die brennstoffreichere Pilotstufe ist erforderlich für die Zündung (Triebwerksstart) sowie den Betrieb bei niedriger Last und zur Stabilisierung der Hauptstufe zur Sicherstellung des vollen Regelbereichs, insbesondere bei Lastwechsel während widriger Wetterbedingungen durch Hagel oder Regen.

Bei der Auslegung eines Pilotinjektors sind zunächst die Anforderungen zu erfüllen, die sich aus dem Leistungsbereich des Triebwerks ergeben. Dies wird in Abb. 3 veranschaulicht; hier ist das Brennkammer-bezogene Luft/Brennstoff-Verhältnis (AFR, air/fuel ratio) als Funktion der Brennkammer-Eintrittstemperatur für den gesamten Lastbereich eines Triebwerks gezeigt. Mit steigendem Schub, und damit zunehmender Temperatur, wird das Gemisch brennstoffreicher, und das AFR nimmt dementsprechend ab.

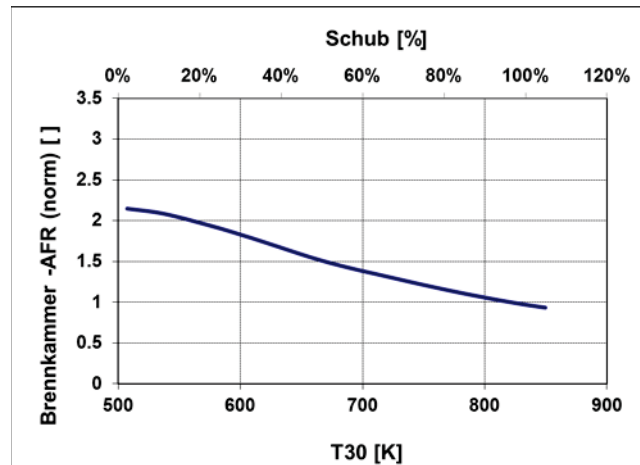


Abb. 3: Luft/Brennstoff-Verhältnis der Brennkammer über den Leistungsbereich des Triebwerks

Mit dieser Vorgabe verbleibt für den Betrieb des Pilotbrenners noch der Anteil des Kraftstoffs als wählbarer Parameter, dem jedoch durch die Anforderungen an Stabilität, NOx- und Ruß-Emissionen Grenzen gesetzt sind. Weitere konstruktive Freiheitsgrade, die zur Optimierung des Pilotinjektors eingesetzt werden können, sind Injektortyp, Brennstoff-Hydraulik, Anordnung (etwa axiale Position) und Aerodynamik, hierbei insbesondere der Anteil des Pilotinjektors an der gesamten Brenner-Luft.

3. TESTSTRECKE BOSS

Die Versuche wurden im Brennkammer-Prüfstand BOSS (Big Optical Single Sector) durchgeführt, der in enger Zusammenarbeit zwischen dem DLR und Rolls-Royce Deutschland (RRD) entworfen und gebaut wurde. Er dient zu Untersuchungen der Prozesse in der Primärzone von schadstoffarmen Magerbrennkammern unter Verwendung moderner optischer Messverfahren und wird beim DLR-Institut für Antriebstechnik in Köln betrieben. Besondere Leistungsmerkmale sind

- Großer optischer Zugang zur Primärzone
- Betriebsbedingungen entsprechend einem realen Triebwerk
- Betrieb von Brennern in Originalgröße
- Flexibilität bei Kühlungsparametern und volle Kontrolle über individuelle Betriebsparameter

Details zur Messstrecke und ihrem Betrieb finden sich in [1,4] Hier seien lediglich die wesentlichsten Eigenschaften beschrieben.

Abb. 4 zeigt die Brennkammer schematisch und als Foto. Das optische Segment ist von drei Seiten zugänglich und reicht 90 mm stromab vom Brenneraustritt. Es hat einen Querschnitt von 140 x 140 mm. Die Innenseite der Flammrohr-Fenster (a) wird mit einem Kühlluft-Film mit variabler Temperatur und Massenstrom gegen direkte Einwirkung der Flamme geschützt. Die vierte Seite (b) dient zur Aufnahme der Zündanlage auf Basis einer kleinen Wasserstoff-Diffusionsflamme. Der konvergente Teil der Brennkammer (c) wird mit Luft bei Umgebungstemperatur mit variablem Massenstrom effusionsgekühlt. Eine Durchführung im Bereich der Sekundärzone von Flammrohr und Druckgehäuse (d)

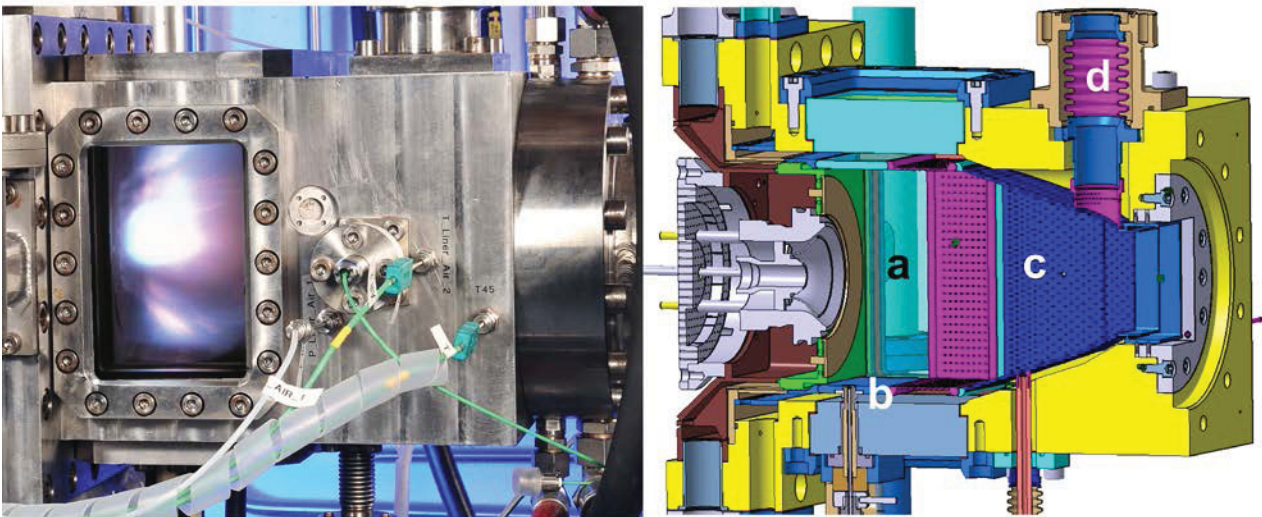


Abb. 4: Aufbau der Messstrecke BOSS

dient zum Einführen einer optischen Sonde mit einer digitalen Miniatur-Videokamera, die eine kontinuierliche Beobachtung des gesamten Flammrohr-Querschnitts bis zum Brenner erlaubt.

Das Ende der Brennkammer bildet eine statische Drossel, die als akustischer Abschluss dient und damit die Ausbildung thermoakustischer Schwingungen verhindert. Stromab dieser Drossel befindet sich eine Probenentnahme-Sonde für Abgasanalysen. Der Brennkammerdruck ist mittels einer hydraulisch betriebenen variablen Drossel am Ende der Messstrecke einstellbar.

Der Prüfstand wird mit elektrisch vorgeheizter Druckluft versorgt; das System ist für den Betrieb von Brennern bei 20 bar und 900K bei einem maximalen Luftmassenstrom von 2,3 kg/s für Brenner und Fensterkühlung ausgelegt. Weitere 1,3 kg/s Luft bei Umgebungstemperatur stehen für die Effusionskühlung des Flammrohres zur Verfügung.

4. MESSMETHODEN

Die folgenden optischen Untersuchungsmethoden wurden für die hier beschriebenen Versuche eingesetzt:

- Planare Mie-Streuung: Verteilung des flüssigen Kraftstoffes
- Planare Laser-induzierte Fluoreszenz (PLIF) an Kerosin: Qualitative Verteilungen von flüssiger und verdampfter Kraftstoff-Phase
- PLIF am OH-Radikal: Mischung, Flammenfronten und Temperaturverteilungen
- Chemilumineszenz des OH-Radikals („OH*“): Form und Lage der Reaktionsgebiete
- Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA): Charakterisierung des Kraftstoff-Sprays
- Laser-induzierte Inkandeszenz (LII): räumliche Verteilung des Ruß-Volumenbruches
- Particle Imaging Velocimetry (PIV): Strömungsfeld

Details über die Messverfahren und ihre Anwendung in Brennkammerprüfständen finden sich in der Literatur [5,6]. In Abb. 5 ist der schematische Aufbau für die flächenhaften spektroskopischen Verfahren dargestellt. Richtlinien für die Auslegung waren ein kompakter, robuster Aufbau und die Möglichkeit, mehrere

Messgrößen zeitgleich erfassen zu können, um Messzeit und damit Betriebskosten einzusparen. Drei Lasersysteme erzeugen sichtbare Strahlung für Mie-Streuung, UV-Strahlung für PLIF an OH und Kerosin, sowie nahes Infrarot für LII. Eine gemeinsam genutzte Lichtschnittoptik formt ein Lichtband und fokussiert es in die Brennkammer. Vor und hinter der Brennkammer wird ein kleiner Teil des Lichtschnitts abgetrennt und erzeugt Fluoreszenz in zwei Referenzzellen. Dieses Signal wird mit Kamera 3 registriert und dient zur Normierung der Intensitätsverteilung im Lichtschnitt sowie zur Berücksichtigung von Absorption in der Brennkammer. Kameras 1 und 2 erfassen die eigentlichen Messsignale. Die Nutzung zweier Kameras erlaubt das gleichzeitige Erfassen von jeweils zwei Signalen.

Das Verfahren der Laser-induzierten Inkandeszenz (LII) ist - mit besonderem Bezug auf Anwendungen in Hochdruckflammen - zusammenfassend in [7] beschrieben. Der Nachweis von Rußpartikeln beruht auf einer schnellen Aufheizung durch einen Impulslaser. Die zugeführte Energie bringt die Partikel auf Temperaturen bis etwa 5000°C. Ein Teil dieser Energie wird in Form von Strahlung wieder abgegeben. Die Intensität dieser Strahlung ist proportional zur Teilchendichte. Entsprechend der hohen Temperaturen liegt das Maximum der emittierten Strahlungsleistung im sichtbaren

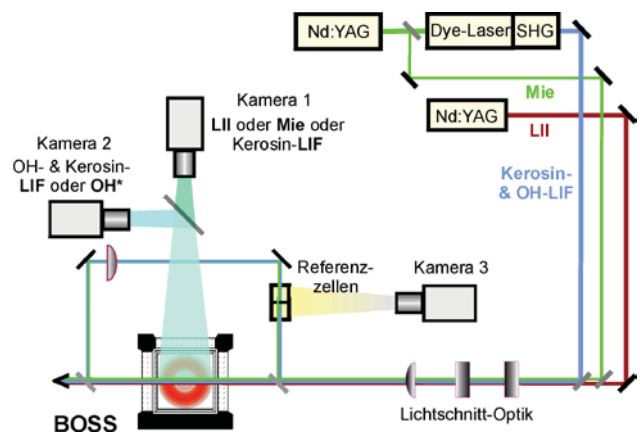


Abb. 5: Schematischer Aufbau der optischen Messverfahren am BOSS-Prüfstand

Spektralbereich und kann damit leicht von der anregenden Laserstrahlung spektral getrennt werden, da hierfür bevorzugt nahes Infrarot verwendet wird, um Interferenzeffekte - etwa durch Fluoreszenzanregung von Kraftstoffbestandteilen - zu unterdrücken. Bei Kenntnis des Brechungsindex der Rußpartikel kann aus einer simultanen Absorptionsmessung ein quantitativer Volumenbruch abgeleitet werden.

Für die Untersuchung des Strömungsfeldes in der reagierenden Strömung war eine Weiterentwicklung konventioneller PIV-Technik erforderlich. Für die Messungen kam ein angepasstes Doppelkamarasystem zum Einsatz. Dieses trägt dem erheblichen Hintergrundleuchten der Flamme Rechnung, wodurch das PIV Signal gegenüber dem Flammenleuchten nicht mehr nachzuweisen wäre. Die Ursache dafür liegt in der Kamera-Technologie: In üblichen PIV-Systemen kommen „Double-Shutter“ Kameras zum Einsatz, die auf einem „Interline Transfer“ CCD-Sensor (ILT) basieren. Der Vorteil dieses Sensortyps liegt in der Fähigkeit, die für PIV benötigten, sehr kurz aufeinander folgenden Doppelbilder aufzunehmen (im Abstand von wenigen Mikrosekunden). Dabei ist allerdings nur die erste Aufnahme eines Doppelbildes in der Belichtungszeit einstellbar, während die zweite Aufnahme solange belichtet wird, bis das erste Teilbild aus dem „Interline Transfer“-Bereich des Sensors ausgelesen wurde (entsprechend einer Belichtungszeit von ca. 30 Millisekunden). Obwohl der Kameralinse ein entsprechender Bandpassfilter vorgeschaltet ist, der nur das erwünschte Partikelstreulicht im Bereich der Wellenlänge des verwendeten Lasers durchlässt, sammelt der Sensor in diesem Zeitraum viel Licht aus der Flamme, sodass die zweite Aufnahme des PIV-Doppelbildes im Bereich der Flamme überbelichtet wird. Um diese nachteilige Eigenschaft der Kameras zu überwinden, greift das angepasste Doppelkamarasystem die „Multi Sensor“ Systematik auf:

Das für den vorliegenden Fall eingesetzte System nutzt zwei kommerzielle PIV Kameras, die über einen kubischen Strahlteiler im Verhältnis 50/50 und eine gemeinsames Objektiv auf denselben Beobachtungsbereich ausgerichtet werden. Jede Kamera wird nun im Einzelbild-Modus betrieben, sodass keine zusammenhängenden Doppelbilder, sondern zwei separate PIV Bilder aufgenommen werden, deren Belichtungszeit unabhängig voneinander eingestellt werden kann. Beide Kameras sind über einen Feinstelltisch zueinander traversierbar. Somit können der Fokus und die horizontalen Position zueinander justiert werden. Es ist unwahrscheinlich, nur mithilfe des mechanischen Aufbaus eine vollständige Kongruenz der beiden Kamerabilder zu erreichen. Daher wird ein Referenzbild aufgezeichnet, anhand dessen der Versatz im Bild bestimmen wird, der ausschließlich auf der Dejustage der beiden Kameras zueinander beruht und somit in jeder Auswertung berücksichtigt werden muss.

Unter der Annahme einer im zeitlichen Mittel zylindersymmetrischen Flammenstruktur erlaubt eine Abel-Inversion der OH-Chemilumineszenz-Aufnahmen [8] die Rekonstruktion der Reaktionsgebiete in einer Ebene durch die Brennerachse. Alle im Folgenden gezeigten Messgrößen stellen Mittelwerte dar; bei den laserbasierten Verfahren PLIF, Mie-Streuung, PIV und LII wurde typischerweise über 200 Laserpulse gemittelt. OH-Chemilumineszenz-Verteilungen entstanden aus 200 Einzelbildern mit einer Belichtungszeit von je 20 μ s.

Neben den in situ Messmethoden wurde zur Bestimmung von globalen Rußzahlen im Abgas ein optisches

Smokemeter (ROTADATA OSM) [9] in Verbindung mit einer Probenentnahmesonde im Abstrakt eingesetzt. Das Messprinzip dieses Gerätes basiert auf der Messung einer Partikeldichte durch Schwächung von Licht beim Durchgang durch eine Probe in einer Extinktionszelle bei definierter Temperatur und kontrolliertem Druck. Die Messung dient zur Ermittlung eines Äquivalents zur Rußzahl, die bei der Triebwerkszertifizierung zur Charakterisierung der Rußemission verwendet wird. Die Messung mit dem Smokemeter wird über die Betriebsgrenzen der BOSS Brennkammer hinaus an einer weiteren, der sogenannten HPSS Brennkammer, eingesetzt, um die Trends der Rußemission im gesamten Betriebsbereich des Triebwerks festzustellen und kann hier zur Überprüfung der Konsistenz der Rußemission an den beiden Prüfständen benutzt werden.

5. ERGEBNISSE

5.1. Vergleich von Injektortypen

Die Bauweise des Pilotzerstäubers wirkt sich in verschiedener Hinsicht auf die Leistungsmerkmale aus; so wurde etwa im reinen Pilot-Betrieb bei Teillastbedingungen ein unterschiedliches Verhalten der globalen Rußbildung als Funktion des AFR für Luftstromzerstäuber (wie in Abb. 2 dargestellt) im Gegensatz zu Druckzerstäubern festgestellt. Für letzteren Typ erkennt man in Abb. 6 eine langsamere Zunahme der Rußzahl bei Übergang zu brennstoffreicheren Gemischen als für Luftstromzerstäuber. Bei geringerer Leistung wurde dieser Effekt nicht beobachtet.

Die Ursache für dieses Verhalten wird in der unterschiedlichen Platzierung und ihrer Abhängigkeit vom Lastfall vermutet. In Abb. 7 sind Verteilungen des flüssigen Kraftstoffes für Druckzerstäuber (oben) und Luftstromzerstäuber (unten) für Leerlaufbedingungen (links) und Teillast (rechts) zusammengestellt. In beiden Fällen nimmt die Eindringtiefe des Sprays mit dem Kraftstoff-Massenstrom zu. Während jedoch der Spraywinkel beim Luftstromzerstäuber praktisch konstant ist, nimmt er beim Druck-Zerstäuber mit steigender Last zu. Dieses Verhalten ergibt sich aus dem unterschiedlichen Funktionsprinzip der beiden Zerstäuber-Typen. Der

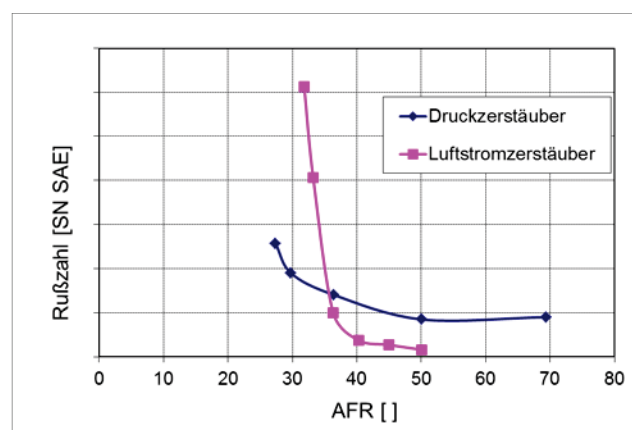


Abb. 6: AFR-Abhängigkeit der Rußzahl für Luftstrom- und Druck-Drallzerstäuber

Kraftstoff-Impuls des Luftstromzerstäubers ist nahezu unabhängig vom Lastpunkt gering, und der Spray-Winkel wird durch den konstanten Impuls des Luft-Massenstroms bestimmt. Der Druckzerstäuber dagegen besitzt ein

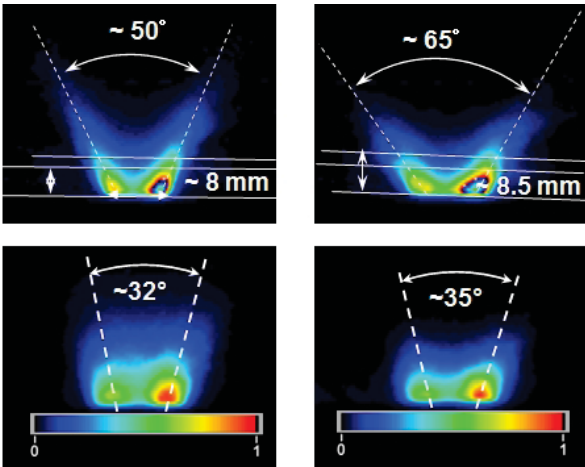


Abb. 7: Verteilung des flüssigen Kerosins für Luftstrom- (unten) und Druck-Drallzerstäuber (oben). Links: Leerlauf, rechts: Teillast

lastabhängiges Impulsverhältnis (Kraftstoff/Luft), was zu einem lastabhängigen Spraywinkel führt. Mit zunehmender Leistung steigt das Impulsverhältnis und damit Eindringtiefe und Spraywinkel.

Abb. 8 illustriert die Abhängigkeit des Impulsverhältnisses vom Lastpunkt für die beiden Zerstäubertypen. Der plötzliche Abfall bei steigender Last kennzeichnet den Stufungspunkt, an dem der Pilot-Kerosin-Massenstrom und damit der Impuls deutlich sinkt.

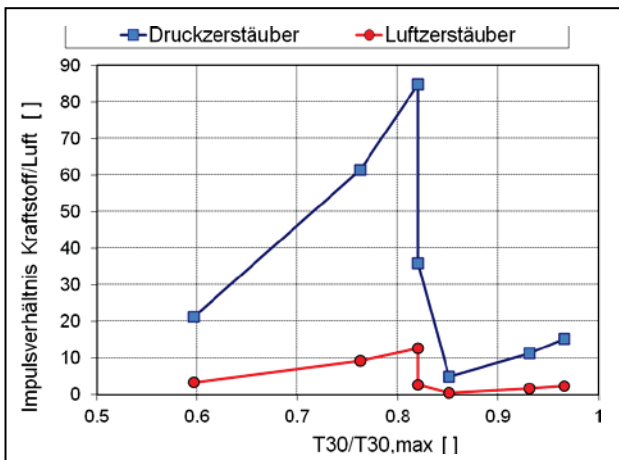


Abb. 8: Kraftstoff/Luft-Impulsverhältnis für Druckzerstäuber und Luftstromzerstäuber

Die Aufweitung des Spraywinkels bei höherer Last im Falle des Druckzerstäubers vergrößert die Kontaktfläche zur Brennerluft und führt dadurch zu lokal mageren Gemischen und damit zu einer geringeren Rußbildung. Dies mag ein Grund für die langsamere Zunahme der Rußzahl mit zunehmender Last sein.

Die beiden betrachteten Zerstäuber-Typen unterscheiden sich neben den Spray-Verteilungen im zeitlichen Mittel auch in der dynamischen Struktur. Diese konnte durch Hochgeschwindigkeits-Schattenaufnahmen im Hinblick auf Morphologie und zeitliche Entwicklung untersucht werden. Abb. 9 zeigt ein Standbild aus einem

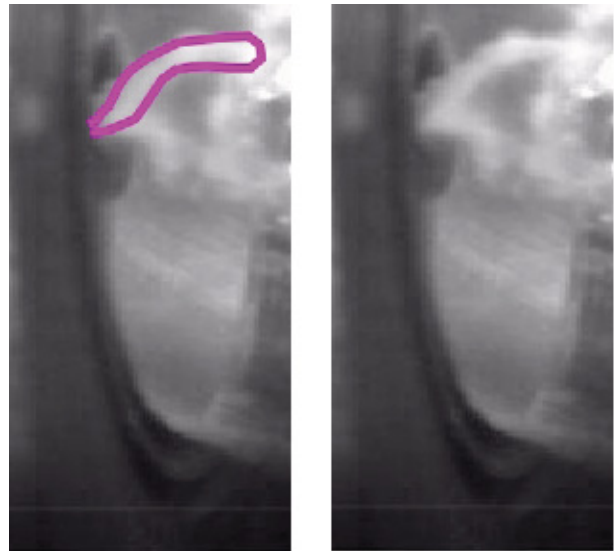


Abb. 9: Momentaufnahme des Kraftstoff-Sprays aus einem Hochgeschwindigkeits-Video. Links ist zur Verdeutlichung die helikale Struktur des Pilot-Sprays hervorgehoben

Hochgeschwindigkeitsfilm mit einer Bildfolgefrequenz von 30 kHz. Es handelt sich um eine Aufnahme des Pilot-Sprays aus einem Druckzerstäuber. Dabei wurde das intensive Leuchten des stromab gebildeten Rußes zur Beleuchtung des Sprays genutzt. Man erkennt eine helikale Struktur dichteren Sprays, die um die Brennerachse rotiert; sie ist zur Verdeutlichung im linken Bild durch eine Konturlinie hervorgehoben. Dynamische Spray-Dichteverteilungen können lokal fluktuierende Stöchiometrien und damit auch Temperaturverteilungen zur Folge haben, die ihrerseits die globale NOx- und Rußbildung beeinflussen können.

Auf den in Abschnitt 2 erwähnten Einfluss des Design-Parameters „Luftanteil des Pilotinjektors“ wird im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Rußbildung in Abschnitt 5.4 noch näher eingegangen werden.

5.2. Spray-Charakterisierung

Eine effiziente Zerstäubung ist Grundvoraussetzung für eine schnelle Verdampfung mit nachfolgender Bildung eines mageren Gemisches. Daher wurden unter Einsatz von PDA radiale Profile von Tropfengrößen und Geschwindigkeiten bei verschiedenen axialen Abständen vom Brenneraustritt zur Charakterisierung der Spray-Entwicklung gemessen. Als ein Beispiel zeigt Abb. 10 Profile der drei Geschwindigkeitskomponenten sowie des Sauterdurchmessers der Tropfen unter Leerlauf-Bedingungen bei einem axialen Abstand von 20 mm. An dieser Position ist der größte Teil des Sprays bereits verdampft; dies ist aus den Aufnahmen der Mie-Streuung (Abb. 7) ersichtlich. Die verbliebenen Tropfen sind klein mit Sauterdurchmessern überwiegend unter 15 µm und haben einen nahezu einheitlichen Durchmesser über den radialen Abstand. Vergleiche mit LDA-Messungen (hier nicht aufgeführt) zeigen, dass die Geschwindigkeit der kleinen Tropfen, wie zu erwarten, sich der Luftströmung angepasst haben. Abgesehen von Axialgeschwindigkeiten bei größeren radialen Abständen, sind die Geschwindigkeiten von Tröpfchen unterschiedlicher

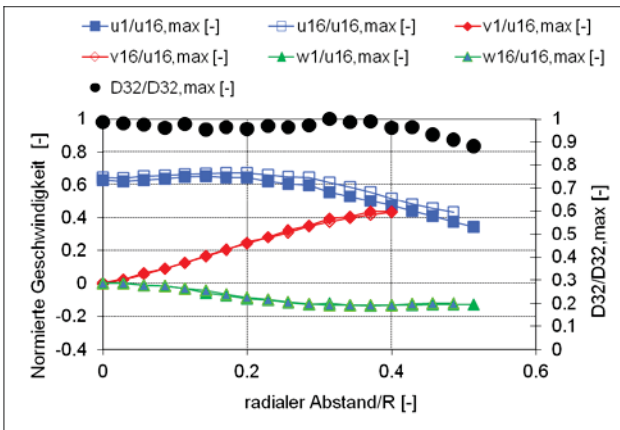


Abb. 10: Radiale Profile der drei Geschwindigkeitskomponenten des Sprays und Sauter-Durchmesser in 20 mm Brennerabstand. Zusätze "1" und "16" bezeichnen Teilchen-Größenklassen in μm . Radialer Abstand auf Brennkammer-Radius normiert

Größenklassen (1 μm und 16 μm) praktisch identisch. Die Partikelströmung ist also weitgehend relaxiert.

5.3. Brennkammer-Strömungsfeld

Flächenhafte Verteilungen der Reaktionszonen und des Rußes, wie sie im nächsten Abschnitt gezeigt werden, sind nur bei Kenntnis des Strömungsfeldes interpretierbar. Daher wurde mit Hilfe von PIV in einer Zentralebene durch die Brennerachse das Strömungsfeld vermessen. Ergebnisse für den Leerlauf-Betrieb sowie die isotherme Strömung zeigt Abb. 11. Die isotherme Brennerströmung ist charakterisiert durch die ausgeprägte Vorwärtsströmung des Pilotinjektors (A) und des Hauptbrenners (B), sowie ein inneres (C) und äußeres (D) Rezirkulationsgebiet. Dieses Strömungsfeld unterscheidet

sich von der üblichen Topologie der Primärzone einer Fett-Mager Brennkammer im Wesentlichen durch die Existenz der zentralen verdrallten Zone (A). In Fett-Mager Brennkammern wird eine schnelle Aufweitung des Strömungsfeldes wie in der Zone (B) häufig als vorteilhaft für schnelle Mischung und Kontrolle der Emission bei Vollast gesehen, während eine geringe Aufweitung mit einem kleinen inneren Rezirkulationsgebiet bessere Stabilitätswerte ermöglicht. Für den gewählten Aufbau des Magerbrenners mit separaten Drallerzeugern für den Pilot- und Hauptbrenner sowie dem Strömungsteiler zwischen den Brennern ist hier so Gebrauch von beiden Strömungskonfigurationen gemacht worden, dass die günstigste Konfiguration für den jeweiligen Betriebsbereich der beiden Brenner verwirklicht wird. Es ergibt sich dadurch das große Rezirkulationsgebiet (C) mit zwei toroidalen Wirbeln zwischen den Brennern, das eine stabile Trennung der Hauptreaktionszonen herbeiführt, die mit einfacheren Pilotierungen nicht darstellbar ist, vgl. [2]. Im Stromlinienbild der Abbildung 11 entsteht eine typische S-Form. Dieser Verlauf der Pilotströmung wird in [10] als hilfreich für die Zündfähigkeit der Magerbrenner angesehen, da hierdurch der radiale Transport von Kraftstoff vom Pilotzerstäuber durch die während der Zündung nicht mit Kraftstoff beaufschlagte Hauptströmung zu der an der Außenwand befindlichen Zündkerze gefördert wird. Der Einfluss der Wärmefreisetzung in der reagierenden Strömung wird am deutlichsten sichtbar in der Beschleunigung der zentralen Strömung im Bereich der Pilotdüse, die den Staupunkt der Pilotströmung weiter stromab verschiebt. Die verstärkte radiale Expansion der Pilotströmung durch die Wärmefreisetzung in Brennernähe führt zu einer Änderung der Druckverteilung, die den Staupunkt der durch die Hauptströmung getriebenen, in der x-r Ebene linksdrehenden Rezirkulation in eine Position stromab des Bildauschnitts verschiebt.

5.4. Rußbildung

Zur Vermeidung der eingangs erwähnten Umfangsstufung

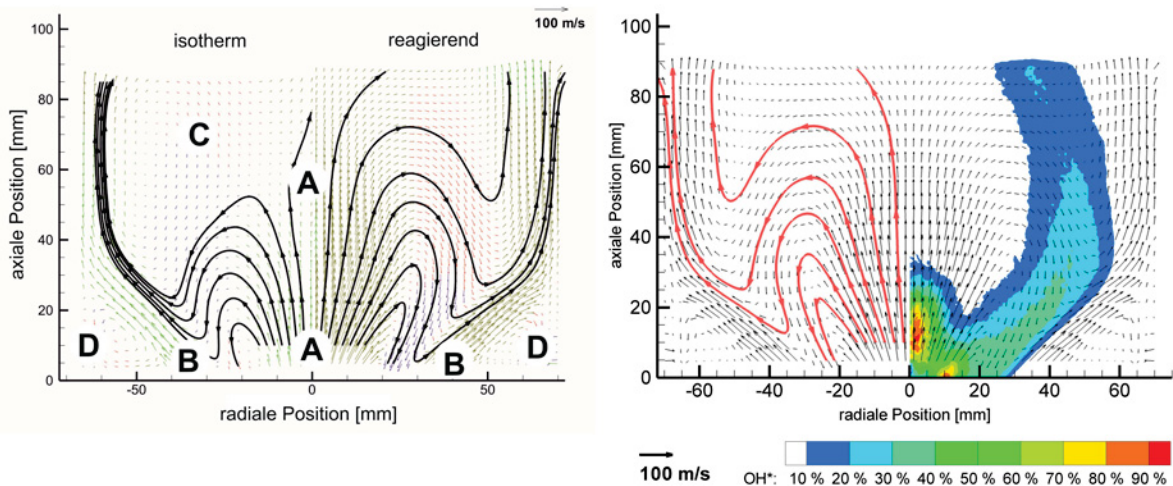


Abb. 11: Strömungsfeld eines gestuften Magerbrenners. Linkes Bild: isotherme Strömung (linke Hälfte) und reagierende Strömung (rechte Hälfte). Farben der Vektorpfeile charakterisieren Strömungsrichtung. Rechtes Bild: Linke Hälfte Strömungsfeld, rechte Hälfte Strömung überlagert mit Reaktionsgebiet als Falschfarben-Darstellung

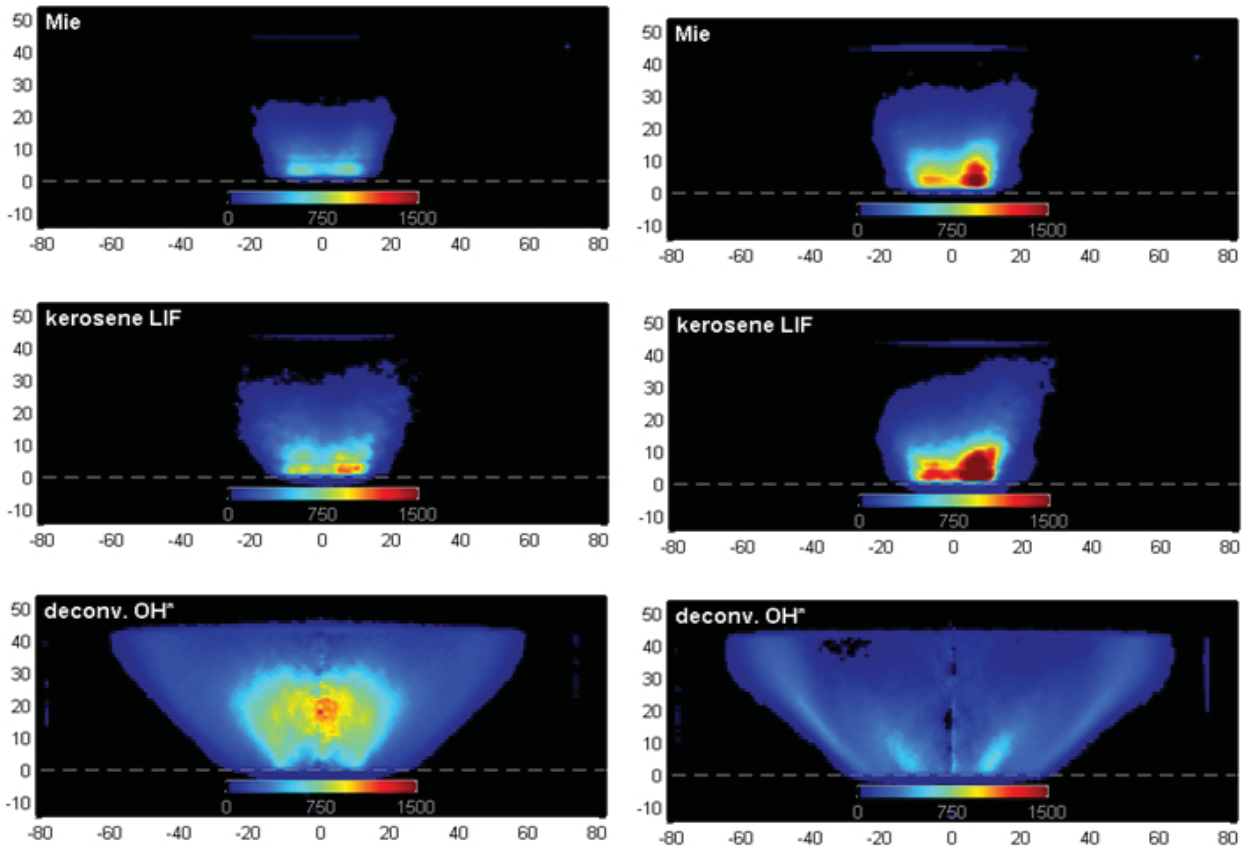


Abb. 12: Verteilungen von flüssigem Kerosin (oben), flüssigem und gasförmigem Kerosin (Mitte) und Reaktionszonen (unten) im Leerlauf-Betrieb für den Luftstromzerstäuber. Rechts AFR um Faktor 0,6 geringer als links

und der damit verbundenen Komplexität der Regelung und möglicher Risiken für die Turbine ist es wünschenswert, den Leistungsbereich des Pilotinjektors nach oben soweit zu erweitern, dass er den gesamten Betrieb bis zur Stufe auf sämtliche Hauptbrenner abdecken kann. Da jedoch der Pilotinjektor allein, bezogen auf seinen Luftanteil, überstöchiometrisch betrieben wird und damit die Hauptquelle für Ruß bildet, ist angesichts des steilen Anstieges der Rußzahl mit sinkendem AFR (vergl. Abb. 6) das Verständnis der Rußbildungs- und Abbrand-Mechanismen von besonderem Interesse. Daher wurden mit Hilfe von LII und OH-Chemilumineszenz die räumlichen Verteilungen von Ruß und Reaktionszonen sowie deren Abhängigkeiten von Parametern wie Luftanteil des Pilotmoduls oder AFR untersucht. In Verbindung mit der Kenntnis des Strömungsfeldes sollen solche Daten das Verständnis der Rußbildungs-Mechanismen verbessern und damit die Entwicklung von Strategien zur Verminderung der Rußbildung fördern.

Zum besseren Verständnis der räumlichen Verteilungen des Rußes und ihrer Abhängigkeiten von den Betriebsparametern des Brenners soll zunächst anhand von Abb. 12 die Topologie der Kraftstoffeinbringung und die daraus resultierende Flammenstruktur erläutert werden. Die Abbildung zeigt für den Leerlauf-Betrieb die Verteilungen des flüssigen Kerosins („Mie“), der flüssigen sowie der gasförmigen Phase („kerosene LIF“) und der aus der OH-Chemilumineszenz gewonnenen Wärmefreisetzung („deconv. OH*“) für zwei verschiedene Stöchiometrien. In der rechten Spalte wird der Brenner mit

einem um den Faktor 0,6 kleineren AFR betrieben. Für die Anregung der Kerosin-Fluoreszenz wurde der gleiche Laser wie für PLIF an OH verwendet, jedoch bei einer leicht geänderten Wellenlänge [11].

Analog zum unteren Teil in Abb. 7 führt die Erhöhung des Kerosin-Massenstroms zu einer geringfügig höheren Eindringtiefe des Sprays und des verdampften Kraftstoffes. Abgesehen von der größeren Menge, verändert sich die Verteilung des Kerosins nur wenig. Dagegen ändert sich die Form der Reaktionsgebiete deutlich. Bei geringer Kraftstoff-Beladung stabilisiert sich die Flamme im Wesentlichen bei ca. 20 mm Abstand vom Brenneraustritt; in diesem Gebiet hat das turbulente, verdrallte Strömungsfeld ein zündfähiges Gemisch hergestellt. Bei brennstoffreicherem Betrieb ist für die Oxidation des Kraftstoffes mehr Luft erforderlich, als durch die reine Pilotströmung zur Verfügung gestellt wird; die Pilotflamme stabilisiert sich hier eher am Brenneraustritt in der Grenzschicht zur Innenrezirkulation sowie nahe dem Strömungsgebiet des Hauptbrenners.

Die Brenner-Aerodynamik übt einen starken Einfluss auf die Rußbildung aus. Dies wird in Abb. 13 illustriert, die Verteilungen des Ruß-Volumenbruches bei zwei Brennern mit identischem Betriebsbedingungen, insbesondere gleichem AFR, jedoch unterschiedlicher Aufteilung des Luftströme für Pilot- und Hauptbrenner zeigt.

Ein geringerer Anteil der Pilot-Luft führt zu einer Ausweitung der Reaktionszone in Richtung der Hauptbrenner-Strömung. Wegen der veränderten zonalen Stöchiometrie des Pilotbrenners (fetteres Gemisch) bei gleichem globalen AFR nimmt die

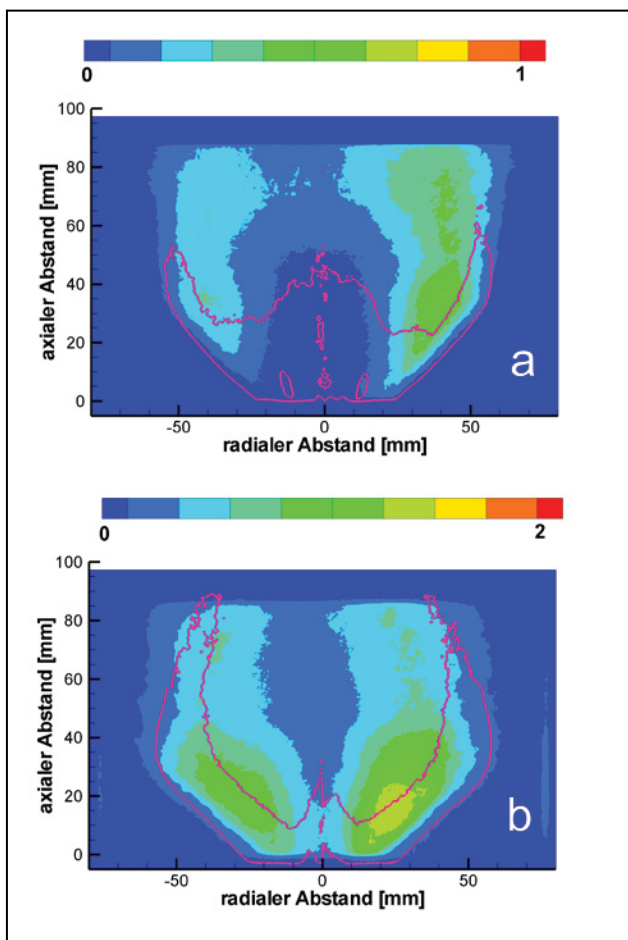


Abb. 13: Verteilung des Ruß-Volumenbruchs für Brenner mit unterschiedlicher Luftaufteilung und identischen Betriebsbedingungen. Luftanteil der Pilotdüse in Abb. 13b um einen Faktor 0.73 kleiner als in 13a

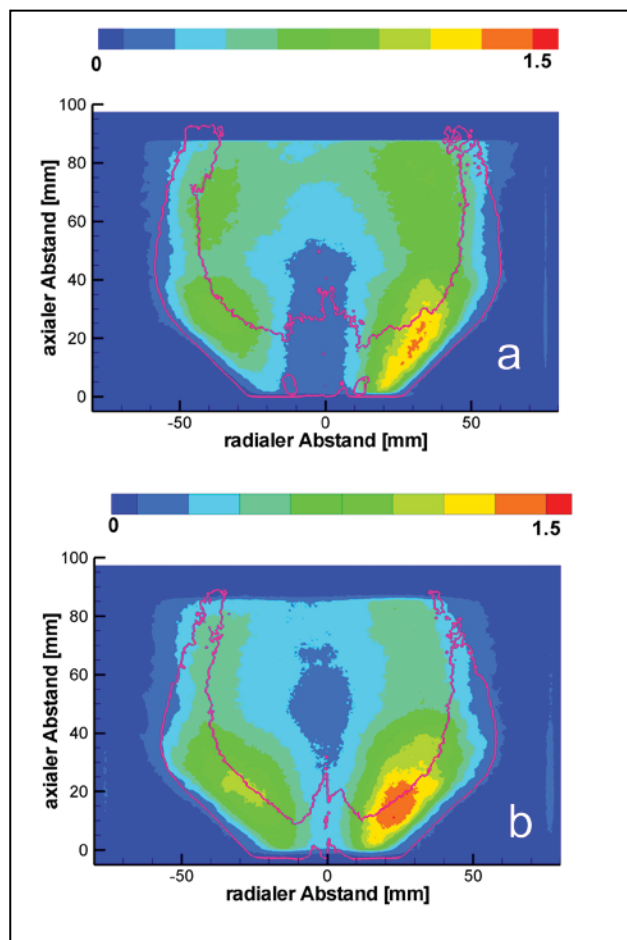


Abb. 14: Verteilung des Ruß-Volumenbruchs für Brenner mit unterschiedlicher Luftaufteilung und identischem Pilotbrenner-bezogenem AFR. Globales AFR in 14b um einen Faktor 1,4 größer als in 14a

Rußbildung deutlich zu. Man beachte die unterschiedliche Skalierung der Falschfarben-Darstellung. Dies ist in Einklang mit Messungen der integralen Rußzahl, die bei einem Brenner mit höherem Pilotluft-Anteil einen steilen Anstieg erst bei kleineren AFR-Werten zeigt. Die naheliegende Schlussfolgerung, die Rußproduktion durch Erhöhung des Pilotluft-Anteils deutlich zu senken und damit gleichzeitig den Lastbereich des Pilotbrenners nach oben zu erweitern, lässt jedoch außer acht, dass diese Vorteile ohne weitere Maßnahmen durch Einbußen bei der Stabilität im Niederlast-Bereich und der NOx-Performance erkauft werden müssen.

Betrieibt man die beiden Brenner mit unterschiedlicher Luftaufteilung so, dass beide das gleiche zonale AFR für den Pilotbrenner aufweisen, so sind die Form der Rußverteilung sowie die maximalen Volumenbrüche sehr ähnlich. Dies ist in Abb. 14 dargestellt.

Die Form der Reaktionszone ist in diesem Fall ebenfalls sehr ähnlich. Ein Unterschied im Rußvolumenbruch zeigt sich am Ende der Primärzone. Der Brenner mit kleinerem Pilotluft-Anteil (14b) hat zur Erreichung des gleichen zonalen AFR im Pilotbereich notwendigerweise ein höheres globales AFR. Dies scheint den Abbrand zu begünstigen und führt zu einer schnelleren Abnahme des Volumenbruches stromab.

Abschließend soll in Abb. 15 der Einfluss der Vorheiztemperatur auf die Rußbildung illustriert werden.

Die Konkurrenz der kinetischen Mechanismen für Rußvorläufer-Produktion und Ruß-Abbrand führt zur Bildung eines „Temperaturfensters“, in dem verstärkte Rußbildung auftritt [13]. Diese Untersuchung hat bereits gezeigt, dass eine Temperaturerhöhung im Falle vorverdampften Kerosins dadurch zu verstärkter Rußbildung führen kann. Der umgekehrte Trend zeigt sich jedoch bei Sprayflammen. Hier wird die Rußproduktion nicht nur kinetisch, sondern auch durch die verzögerte Verdampfung des Sprays bei tieferen Temperaturen kontrolliert. Dies führt zu lokal brennstoffreicheren Gemischen; die Folge sind die in Abb. 15 erkennbaren deutlich höheren Ruß-Volumenbrüche bei Absenkung der Temperatur um – in diesem Fall – 90 Grad.

6. SCHLUßFOLGERUNGEN

Die vorliegende Untersuchung der Pilotzone einer Magerbrennkammer betrachtet Aspekte der Zweiphasenströmung der Brennstofftropfen und der Rußpartikel vor dem Hintergrund von Messungen des Strömungsfeldes und der Bereiche der Wärmefreisetzung. Für Magerbrenner in Originalgröße war dies bei realistischen Betriebsbedingungen bislang nicht möglich. Das messtechnische Hindernis der Rußstrahlung im Betrieb der Pilotzone wurde in den

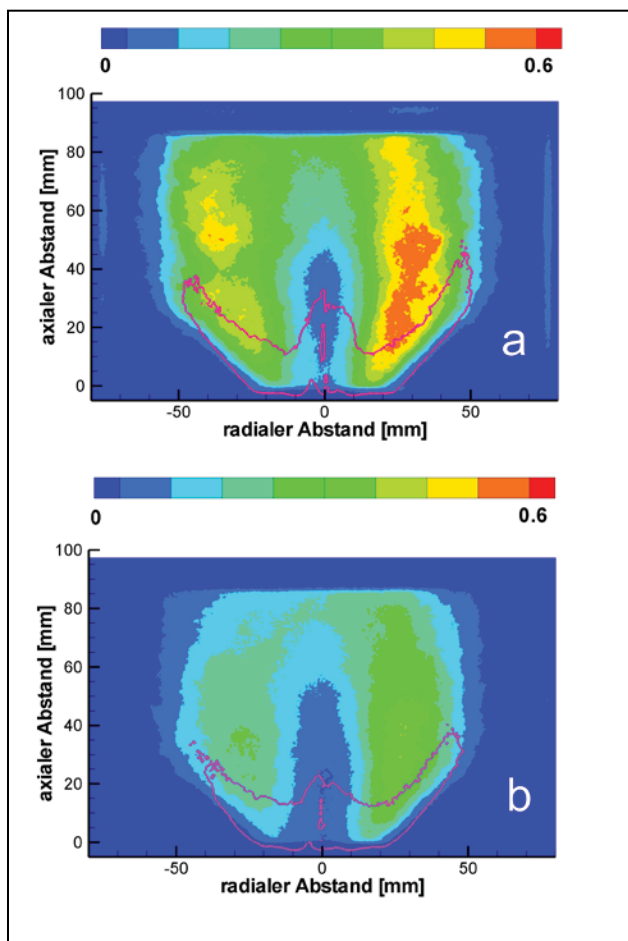


Abb. 15: Verteilung des Ruß-Volumenbruchs unter Leerlauf-Bedingungen bei Änderung der Vorheiztemperatur. T30 ist im Bild 15b um 90 Grad höher als in 15a

Vorarbeiten durch ein PIV System mit zwei Kameras und ein auf die Bedürfnisse der vergleichsweise großen Brennkammer hin optimiertes LII System weitgehend überwunden.

Die Messung der Eigenschaften der Brennstofftropfen zeigte eine gute Zerstäubung und Homogenität des luftstromzerstäubten Pilotsprays auch für Leerlaufbedingungen. Für den Pilotbrenner mit Druckerstäuber wurde eine helikale Struktur des brennernen Sprays beobachtet, die wegen der starken Abhängigkeit der Rußkinetik vom lokalen Mischungsbruch Auswirkungen auf die globale Rußproduktion haben kann. Beim Vergleich der Injektortypen wurde eine Korrelation zwischen der Charakteristik des Anstiegs der Rußemissionen mit höherem Brennstoffstrom und der Entwicklung des Spraywinkels für die verschiedenen Zerstäubertypen festgestellt. Beide Phänomene weisen auf die Möglichkeit hin, in zukünftigen Arbeiten die Möglichkeit der Betrachtung der Rußkonzentrationen in der Brennkammer in Abhängigkeit der Charakteristika der Kraftstoffaufbereitung systematisch zu nutzen, um in die Gestaltung der Kraftstoffaufbereitung den Aspekt der Minderung der Rußproduktion mit einzubeziehen.

Das Strömungsfeld der Primärzone wird durch die Wärmefreisetzung stark verändert, wodurch auch Veränderungen des Mischungsverlaufs vermutet werden müssen. Der Einsatz der LII in Verbindung mit den

Strömungsfeldmessungen eröffnet Interpretationsmöglichkeiten des Konzentrationsfeldes im Hinblick auf die räumliche Abfolge von Rußbildung und Abbrand. Weitere auf die Untersuchung von Turbulenzstruktur und Mischung im Bereich hoher Rußkonzentrationen gerichtete Arbeiten sind notwendig, um die Ergebnisse zur zielgerichteten Optimierung der konstruktiven Parameter zu nutzen, die die Rußemission beeinflussen, jedoch zeigen die vorhandenen Ergebnisse bereits das Potenzial der experimentellen Methode auf.

7. DANKSAGUNG

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 20T0802 (EffMaTec) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

8. LITERATUR

- [1] D. Schneider, T. Aumeier, T. Behrendt, A. Langfeld, J. Koopman, U. Meier, W. Quade, C. Hassa, L. Rackwitz: "A New Test Rig for Laser Optical Investigations of Lean Jet Engine Burners", ICAS 2010-4.3.3, 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Nice, France, 19-24 September 2010.
- [2] C. Hassa, J. Heinze, L. Rackwitz, T. Doerr: "Validation methodology for the development of low emission fuel injectors for aero-engines". In: International Society for Air Breathing Engines [Hrsg.]: Proceedings XVII International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE), American Institute of Aeronautics and Astronautics, S. 1 - 10, XVII International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE), München, 2005-09-04, ISBN 1-56347-790-4.
- [3] U. Meier, J. Heinze, L. Lange, C. Hassa, L. Rackwitz; T. Dörr: "Characterisation of the combustion performance of low emission fuel injectors with laser measurements", CEAS Aeronautical Journal, 2012
- [4] http://www.dlr.de/at/desktopdefault.aspx/tabid-1509/2443_read-3809/
- [5] J. Heinze, U. Meier, T. Behrendt, Ch. Willert, K.P. Geigle, O. Lammel, R. Lückerrath: „PLIF Thermometry based on measurements of absolute concentrations of the OH-radical" Z. Phys. Chem. **225**, 1315-1341 (2011)
- [6] S. Freitag, T. Behrendt, J. Heinze, L. Lange, U. Meier, L. Rackwitz, C. Hassa: „Study of an airblast atomizer spray in a lean burn aeroengine model combustor at engine conditions" ILASS-Europe, Estoril, Portugal (2011)
- [7] M. Hoffmann, W.G. Bessler, C. Schulz, H. Jander: „Laser-induced incandescence for soot diagnostics at high pressures", Appl. Opt., **42**, 2052-2082 (2003)
- [8] C.J. Dasch: "one dimensional tomography: a comparison of Abel- onion peeling, and filtered backprojection methods", Appl. Opt. **31**, 1146-1152 (1992)
- [9] <http://www.rotadata.com/pages/products/Optical-Smoke-Meter-OSM.php>
- [10] D.A. Nickolaus, D.S. Crocker, D.L.Black, C.E. Smith: „Development of a lean direct fuel injector for low emission aero gas turbines", ASME Turbo Expo GT 2002-30409 (2002)
- [11] F. Grisch, M. Orain, B. Rossow, E. Jourdanneau, C.

Guin: „Simultaneous Equivalence Ratio and Flame Structure Measurements in Multipoint Injector Using PLIF“ und Zitate darin, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 21-23.July 2008, Hartford CT, Paper AIAA 2008-4868 (2008)

- [12] M. Huth, W. Leuckel: "Soot formation from Hydrocarbons in a Plug Flow Reactor: Influence of Temperature, in "Soot Formation in Combustion", Ed. H. Bockhorn, Springer Series in Chemical Physics 59, 1994
- [13] U. Meier, C. Hassa, K.-P. Geigle, O. Lammel, P. Kutne: „Parametric study of soot formation in an aeroengine model combustor at elevated pressures by Laser-induced incandescence: Effect of the fuel phase“, CEAS European Air and Space Conference, Berlin (2007)