

Laser-optische Untersuchung der Selbstentzündung von Sprays in Vormischzonen (Laser based study of spray auto-ignition in premixing ducts)

**Dipl.-Ing. O. Hinkeldey¹; Dipl.-Ing. Peter Schober¹;
Dr.-Ing. R. Schießl²; Dipl.-Ing. M. Cano-Wolff¹; Dr.-Ing. R. Koch¹;
Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bauer¹; Prof. Dr. rer. nat. U. Maas²**

¹Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH);

²Institut für Technische Thermodynamik, Universität Karlsruhe (TH).

Kurzfassung

In zukünftigen Flugzeugtriebwerken soll die Emission von Stickoxiden (NO_x) weiter abgesenkt werden. Ein viel versprechendes Konzept ist das der vorverdampften vorgemischten Magerverbrennung (LPP). Die unerwünschte Selbstzündung von Kraftstoffsprays während der Vormischung stellt jedoch ein ernsthaftes Sicherheitsrisiko dar. Deshalb wurde das Phänomen der Selbstzündung von Kraftstoffsprays im technisch relevanten Temperaturbereich (800 K..1100 K) und bei einem Druck von 0,8 MPa untersucht. In einer optisch zugänglichen Vormischzone wurde der Zündvorgang einer tropfenbeladenen Strömung mit Laser- sowie Hochgeschwindigkeitsmesstechnik erfasst. Der Beginn der chemischen Reaktionen konnte durch planare Laser-induzierte Fluoreszenz (LIF) von Formaldehyd (CH_2O) detektiert werden, welcher als Zwischenprodukt der zur Selbstzündung führenden Reaktionen gebildet und in der folgenden heißen Flamme wieder abgebaut wird. Zur Untersuchung des Einflusses noch unverdunsteter Tropfen wurde simultan deren Mie-Streuung mit einem zweiten Laser (532 nm) / Kamera System aufgenommen. Zusätzlich wurden Hochgeschwindigkeits-Sequenzen des Flammen-Eigenleuchtens aufgezeichnet, wobei die Chemilumineszenz synchron sowohl breitbandig als auch durch entsprechende Filter erfasst wurde. Auf diese Weise konnte eine Differenzierung von Anteilen durch OH^* bzw. CH^* Radikale sowie von längerwelliger Strahlung durch „jungen Ruß“ ermöglicht werden.

Abstract

In future aero engine turbines, the NO_x emissions are to be reduced continuously. A promising concept is the premixed prevaporised lean combustion (LPP). However, inadmissible auto-ignition of the fuel sprays during premixing turns out to be a serious safety

issue. In this context, the auto-ignition phenomenon of sprays was studied in the technically relevant temperature regime (800 K..1100 K) at a pressure of 0.8 MPa. The ignition process in a droplet laden continuous flow was investigated in a premixing duct by laser- and high-speed-measurement techniques. The onset of the chemical reaction was detected by planar laser induced fluorescence (LIF) of formaldehyde (CH_2O), which is formed as an intermediate species during the reactions leading to auto-ignition and consumed subsequently in the hot flame. In order to study the influence of residual droplets, Mie-scattering was imaged simultaneously by a second laser (532 nm) / camera system. Additionally, high-speed sequences of the flame luminosity were taken. The chemiluminescence signal was also captured broadband and through different adequate spectral filters at the same time. With this method it was possible to discriminate between the fractions of OH^* and CH^* radicals as well as from radiation at longer wavelengths that was attributed to "young soot".

1. Einleitung

Die Reduktion der Spitzentemperaturen in Gasturbinenbrennkammern durch die vorgemischte Magerverbrennung (LPP) ist derzeit das viel versprechendste Konzept zur Verminderung der NO_x -Emissionen [1]. Das Auftreten von Selbstzündung in der Vormischzone stellt jedoch neben Flammrückschlag, Verbrennungsinstabilitäten und Magerverlöschung eine der großen Herausforderungen dar. Im Gegensatz zu industriellen Gasturbinen verhindern bei Flugzeugtriebwerken die transienten Betriebszustände sowie vor allem die Verwendung von Flüssigtreibstoff bisher den zuverlässigen und sicheren Einsatz dieses Verbrennungskonzeptes.

Die Zündverzugszeit des eingesetzten Kraftstoffs und deren Abhängigkeit von den globalen Bedingungen (vor allem von Druck p , Temperatur T , Äquivalenzverhältnis Φ) ist eine wesentliche Auslegungsgröße bei der Entwicklung zukünftiger Flugtriebwerksbrennkammern sowie auch für andere Maschinen, in denen Selbstzündung eine Rolle spielt (z. B. in Dieselmotoren). Mit dieser Motivation wurden in der Vergangenheit in zahlreichen Studien bereits die Zündverzugszeiten von homogenen Kraftstoff / Luft-Gemischen und von Einzeltropfen [2, 3] sowie die von teilweise vorgemischten Systemen umfangreich untersucht. Zum Einsatz kamen dabei Stoßwellenrohre [4, 5], schnelle Kompressionsmaschinen [6, 7] sowie auch kontinuierlich durchströmte Reaktoren [8 bis 11]. Im Vergleich zur Selbstzündung in einem homogenen Gasgemisch stellt sich der Zündvorgang bei einer tropfenbeladenen Heißgas-Strömung deutlich komplexer dar. Aufgrund der Verdunstung und der einsetzenden Reaktion liegen hier im Allgemeinen

inhomogene Bedingungen vor, welche zudem meist von Turbulenz überlagert sind. Dies bezieht sich sowohl auf die Temperaturverteilung als auch auf die lokale Konzentration der verschiedenen Spezies. Des Weiteren unterliegen die Reaktionspfade und die Kinetik der Zündreaktion einer maßgeblichen Abhängigkeit von Druck und Temperatur, insbesondere im technisch relevanten Temperaturbereich zwischen 800 K und 1100 K [12]. Eine Konsequenz daraus ist, dass ein Bereich mit ausgeprägter negativer Temperaturabhängigkeit (NTC), wie er für die Zündverzugszeit diverser homogener Kraftstoff / Luft-Gemische bekannt ist, nicht mehr zu beobachten ist. Bei inhomogener Zusammensetzung, wie z.B. bei Einzeltropfen und Kraftstoffsprays, setzt die Reaktion immer dort ein, wo lokal optimale Bedingungen bezüglich Temperatur und Konzentration vorliegen [2, 3, 13]. In einer tropfenbeladenen turbulenten Strömung überlagern sich die verschiedenen chemischen und physikalischen Zeitskalen jedoch so komplex, dass Sie bis heute für eine detaillierte Simulation unzugänglich sind.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Vorgang der Selbstzündung eines unvollständig verdunsteten Kraftstoffsprays in einer Heißgasströmung mit Hilfe optischer Messtechnik untersucht. Dazu wurde eine generische Vormischstrecke aus vorangehenden Parameterstudien [10] derart modifiziert, dass eine gute optische Zugänglichkeit unter realitätsnahen Bedingungen gewährleistet ist. Ziel war es, das Auftreten verschiedener Zündmodi (reine Gasphase, Einzeltropfen, Tropfengruppen) [14] unter Berücksichtigung der unverdunsteten Resttropfen über den gesamten Temperaturbereich zu untersuchen. So soll ein besseres Verständnis der lokalen Bedingungen und der Vorgänge in der reagierenden turbulenten Strömung erlangt werden, die schließlich zur Selbstzündung führen.

Um eine hohe zeitliche und örtliche Auflösung zu erreichen, wurde ein Hochgeschwindigkeits-ICCD-Kamerasystem eingesetzt, mit dem die einzelnen Zündkerne und die anschließende Flammenausbreitung visualisiert werden können. Das Chemilumineszenzsignal wurde breitbandig sowie simultan durch diverse Spektral-Filter aufgezeichnet, um eine Differenzierung der Anteile der OH* bzw. CH* Radikale zu ermöglichen, sowie von längerwelliger Strahlung, die mit hoher Wahrscheinlichkeit „jungem Ruß“ zuzuordnen ist. Mit Hilfe der planaren laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) von Formaldehyd (CH₂O) wurde zudem der Reaktionsfortschritt und Zündbeginn [15] zeitgleich mit dem Mie-Signal von Resttropfen in der selben Lichtschnittebene aufgezeichnet. Auf diese Weise konnte ein Zusammenhang zwischen vorhandenen Resttropfen und dem Zündmodus hergestellt werden.

2. Versuchsanlage

Die Versuchsstrecke ist in die Hochdruck-/Hochtemperaturanlage des Institutes für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) integriert. Diese liefert einen Frischluftmassenstrom von $\dot{m}=1.4\text{ kg/s}$ bei einem Druck von bis zu $p=1\text{ MPa}$ und einer Maximaltemperatur von $T=1123\text{ K}$. Der experimentelle Aufbau zur Untersuchung kontinuierlicher Spray-Selbstzündung ist in Bild 1 dargestellt. Er besteht im wesentlichen aus drei Teilen: Kraftstoffdüse, Vormischrohr und Plenum.

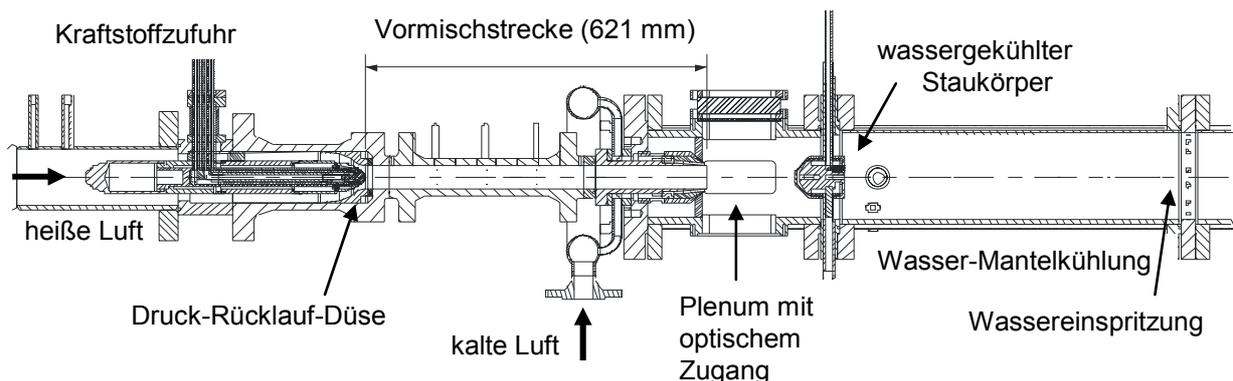


Bild 1: Skizze der generischen Vormischstrecke mit optischem Zugang

Das Heißgas umströmt die koaxial angeordnete Zerstäuberdüse von links nach rechts und gelangt durch die Vormischstrecke ($d = 40\text{ mm}$) in das optisch zugängliche Plenum. Kurz vor der Kraftstoffeindüsung wird die Referenztemperatur des Heißgases $T_{\text{heiß}}$ mittels Thermoelement gemessen. Aufgrund der kurzen Aufenthaltszeit ist der Wärmeverlust der isolierten Vormischstrecke vernachlässigbar gegenüber der Enthalpie der Strömung. Bei der Auslegung wurde darauf geachtet, dass keine Stabilisierung der Flamme möglich ist. Bei Eintritt in das Plenum, zu welchem über vier rechtwinklig zueinander angeordnete Quarzglasscheiben ein optischer Zugang realisiert ist, wird die reagierende Heißgasströmung von einem koaxialen Kaltluftmantel umströmt. Dadurch wird eine Stabilisierung der Flamme in den Eckwirbeln vermieden. Die mittlere

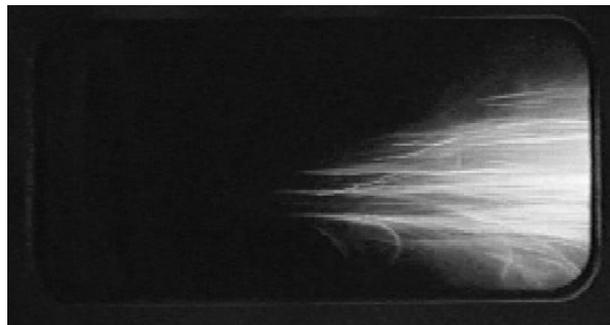


Bild 2: Blick in Plenum (Kerosin; $130 \times 160\text{ mm}^2$)

Strömungsgeschwindigkeit ($35\text{ m/s} < \bar{c}_{\text{hot}} < 120\text{ m/s}$) liegt um ein vielfaches über der turbulenten Flammengeschwindigkeit. Als Konsequenz bildet sich keine stabilisierte Flamme

aus, sondern es resultiert eine in das Strömungsfeld eingebettete Selbstzündung und nachfolgende Verbrennung. Diese ist als konusförmiges leuchtendes Gebilde im Plenum sichtbar (Bild 2). Die vorliegenden Untersuchungen wurden bei einem Plenumdruck von 0,8 MPa durchgeführt. Die verwendeten Kraftstoffe waren Kerosin (Jet-A1) und Heptan. Das globale Äquivalenzverhältnis betrug circa $\Phi \approx 0,6$, was bei maximaler Heißgas-Temperatur einer thermischen Leistung von 0,6 MW für Kerosin entspricht.

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungstechniken in zwei getrennten Unterkapiteln vorgestellt, wobei auch auf die jeweilige Messtechnik eingegangen wird. Zunächst werden die Erkenntnisse aus den Hochgeschwindigkeitsvisualisierung und die unterschiedlichen spektral gefilterten Chemilumineszenzsignale erläutert. Im zweiten Abschnitt wird auf die Ergebnisse der simultanen Lasermesstechnik mit LIF und Mie-Streuung eingegangen.

Chemilumineszenzvisualisierung

Das mit einer herkömmlichen Videokamera aufgenommene Bild 2 zeigt die für das menschliche Auge sichtbare Reaktionszone. Durch die lange Integrationszeit (15 ms) erscheinen Punkte hoher Intensität als Streifen. Diese weisen eine orangene Färbung auf, was im schwarz/weiß-Druck jedoch nicht erkennbar ist. Bei verbesserter Zerstäubung durch Anhebung des Zerstäubervordrucks verschwinden diese und die Reaktionszone erscheint als blaue Flamme.



Bild 3: Hochgeschwindigkeits-Sequenz (33x33 mm²; Kerosin; $\Delta t=100\mu s$)

Bild 3 zeigt beispielhaft eine mit der Hochgeschwindigkeitskamera (HSS 5 (LaVision)) aufgenommene Bildsequenz. Man erkennt gut, dass sich die Selbstzündung aus einzelnen räumlich isolierten Zündereignissen zusammensetzt. Die einzelnen Flammenkerne breiten

sich in das unverbrannte Gemisch aus, während sie stromab transportiert werden. Teilweise vereinigen sie sich dabei und erscheinen so als die bereits beschriebene „konusförmige Flamme“. Zudem sind innerhalb der Flammenkerne Gebiete sehr hoher Intensität festzustellen. Deren Anzahl verringert sich bei höherem Zerstäuberdruck, was einen Zusammenhang mit der Resttropfenmenge nahe legt. In einer weitergehenden Analyse wurde die Chemilumineszenzemission simultan unterschiedlich spektral gefiltert. Hierzu wurde ein bildverstärktes vierfach Kamerasystem (4x ICCD HSFC-Pro (pco)) in Kombination mit einer UV-fähigen ICCD-Kamera (DynaMight (LaVision)) eingesetzt. Durch die Verwendung geeigneter Bandpass-Filter sowie eines 600 nm-Langpass-Filters konnten die Anteile von OH* (308 nm; ± 20 nm @ 1%) und CH* (430 nm; ± 10 nm @ 1%) sowie von längerwelliger Strahlung separiert werden. Bild 4 zeigt ein Beispiel dieser Aufnahmen im Vergleich zum ungefilterten „Rohbild“.

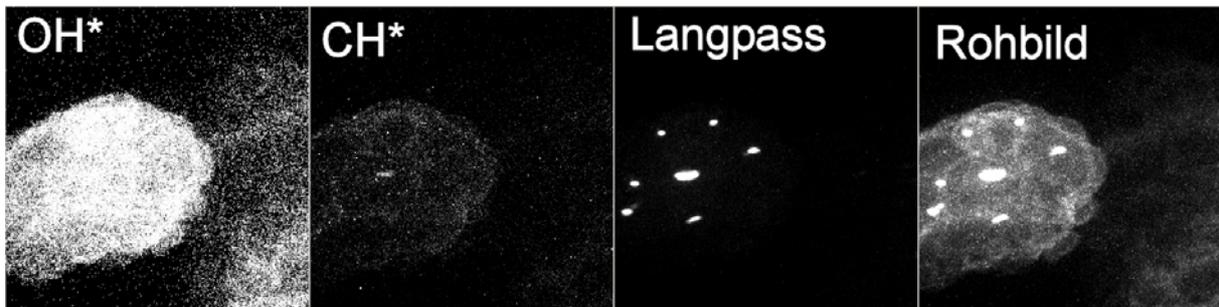


Bild 4: Chemilumineszenzsignal - teilweise spektral gefiltert (36x36 mm²; Kerosin)

Die Grauwerte der verschiedenen Aufnahmen sind nicht vergleichbar, da die Verstärkung der Kameras sowie der Einfluss der verschiedenen Filter nicht skaliert werden konnte. Vergleiche können daher nur innerhalb eines Bildes und über die Flammenstruktur hergestellt werden.

Die Signale von OH* und CH* korrelieren gut mit der Struktur des Rohbildes. Diese angeregten Radikale werden bei exothermen Reaktionen gebildet und charakterisieren daher die Gebiete der Wärmefreisetzung in der heißen Flamme [16]. Im Gegensatz dazu können die Stellen sehr hohen Intensität einer breitbandigen Strahlung im Spektralbereich 600 - 900 nm zugeschrieben werden. Diese stammt mit hoher Wahrscheinlichkeit von „jungem Ruß“, welcher bei der sauerstoffarmen Verbrennung von unverdunsteten Tropfen im heißen Restgas innerhalb der Flammenkerne entsteht. Die bereits angesprochenen Streifen und die orange Färbung der Reaktionszone in den Videoaufnahmen rühren folglich von fett verbrennenden Resttropfen in den Flammenzonen her. Eine Aussage über den Zündmodus kann jedoch mit dieser 3D-Technik nicht getroffen werden.

Planare LIF und simultane Mie-Streuung

Die möglichen Zündmodi sind eine bevorzugte Zündung entweder um einen einzelnen Tropfen, um ein Cluster bzw. eine ganze Gruppe von Tropfen oder jedoch aus der reinen Gasphase ohne einen Einfluss vorhandener Resttropfen. Wie in der Einleitung bereits erwähnt, wird die Zündverzugszeit und auch der Zündort in der Nähe von Tropfen durch die komplexe Überlagerung von Temperaturverteilung und Gemischzusammensetzung in deren Grenzschicht im Zusammenspiel mit den chemischen und physikalischen Zeitskalen bestimmt. Nach Tanabe sowie Stauch [2, 3] ist bei Heptan und mittleren globalen Temperaturen (um ca. 850 K) eine Zündung im fetteren tropfennahen Bereich zu erwarten. Dieser Temperaturbereich entspricht in etwa dem NTC-Gebiet der homogenen Gasphasen-Zündung. Eine Erklärung hierfür ist, dass durch die Verdunstungsenthalpie in Tropfennähe die Temperatur abgesenkt wird, und so aufgrund des negativen Temperaturkoeffizienten dort eine schnellere Selbstzündung begünstigt wird.

Unter Berücksichtigung der beschriebenen Zusammenhänge am Einzeltropfen sollte eine Veränderung des Zündmodus auch in der tropfenbeladenen Strömung bei Veränderung der Heißgastemperatur beobachtbar sein. Im zweiten Teil der Untersuchungen wurden daher Aufnahmen des mit LIF angeregten Formaldehyds (CH_2O) fast zeitgleich ($\Delta t = 1 \mu\text{s}$) mit dem Mie-Streusignal von unverdunsteten Resttropfen in der selben Laser-Lichtschneitebene aufgezeichnet. Auf diese Weise konnte der Einfluss der Resttropfen auf den Ort der Bildung von Selbstzündungskernen untersucht werden.

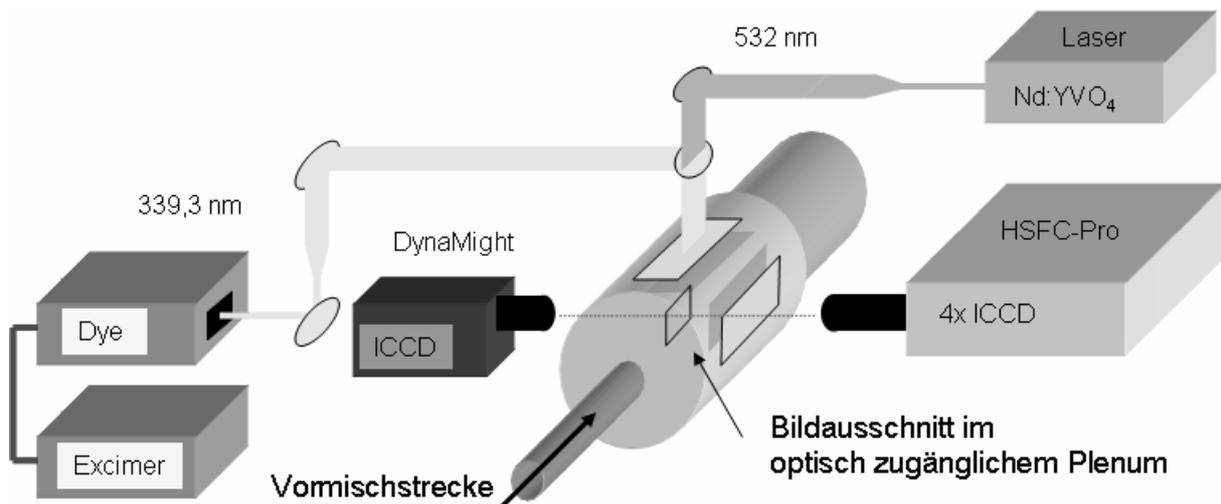


Bild 5: LIF / Mie-Aufbau an der Selbstzündungs-Versuchsstrecke

Der Aufbau der kombinierten LIF- / Mie-Messtechnik ist in Bild 5 dargestellt. Zur Anregung des CH_2O wird ein mit einem Excimer-Laser gepumpter Farbstofflaser (Lambda Physik) bei 339,3 nm verwendet. Die Mie-Streuung der Tropfen wird von einem Nd:YVO₄-Laser bei

532 nm angeregt und über einen Bandpassfilter detektiert. Es werden die beiden oben erwähnten bildverstärkten Kameras verwendet. Diese sind zu beiden Seiten des Plenums aufgestellt und so ausgerichtet, dass deren Bildausschnitt geometrisch identisch ist. Beide Laser sind je zu einem Lichtschnitt aufgeweitet und in der selben Ebene von oben in das Plenum eingekoppelt. Bisher wurde diese Konfiguration nur für Einzelschuss Aufnahmen verwendet, es ist jedoch geplant, Hochgeschwindigkeits-Sequenzen von LIF / Mie-Paaren zu realisieren, um die Zusammenhänge während der Reaktion zeitlich besser verfolgen zu können.

Während der ersten Reaktionen die zur Selbstzündung führen, werden große Mengen an CH_2O gebildet. Formaldehyd wurde als „Target Spezies“ für die Fluoreszenz gewählt, da er einen guter Indikator für die „Cool Flame“- / Selbstzündungsreaktion darstellt [17]. Bei einem zweistufigen Zündprozess trägt das CH_2O^* -Radikal auch maßgeblich zur Chemilumineszenz der sogenannten „Cool Flame“ bei. In der letzten Phase der Reaktion, der heißen Zündung, wird der CH_2O schließlich wieder abgebaut.

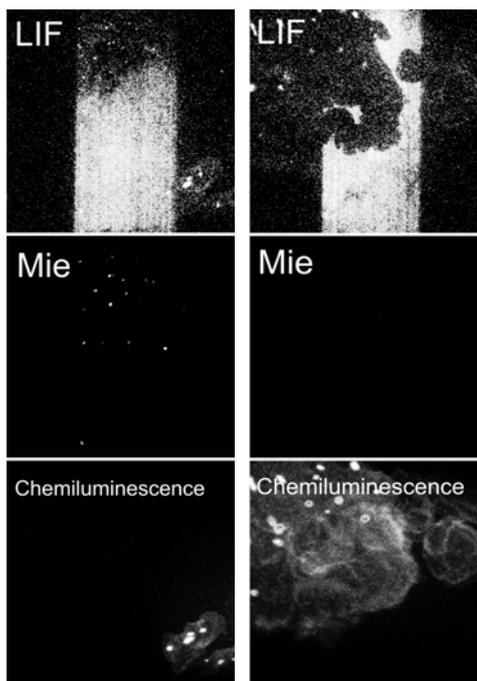


Bild 6: Simultane LIF / Mie- sowie Chemilumineszenz-Aufnahmen (36x36 mm², Kerosin; 850 K)

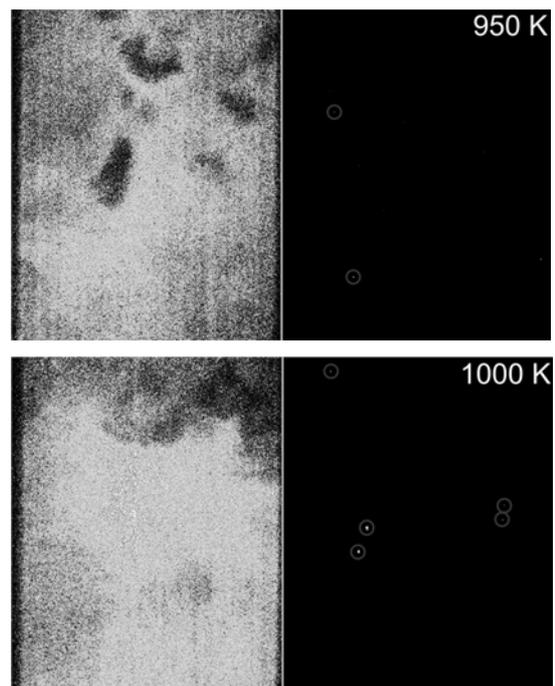


Bild 7: Simultane LIF / Mie-Aufnahmen – oben Heptan / unten Kerosin (14,7x18,2 mm²)

Bild 6 zeigt beispielhaft typische LIF / Mie-Aufnahmen mit einer zusätzlichen zeitgleichen Visualisierung des Eigenleuchtens. Der 18 mm breite Lichtschnitt ist gut zu erkennen. Die

Verteilung der Intensität des LIF-Signals zeigt ausgeprägte Gebiete höherer und geringerer CH_2O -Konzentration auf. Diese können vornehmlich einem mehr oder weniger ausgeprägten Stadium des Reaktionsfortschrittes zugeschrieben werden, obwohl die Aufnahmen nicht bezüglich der Laserintensität korrigiert sind. Bei der Interpretation sollte man jedoch auch bedenken, dass das LIF-Signal zwar abhängig von der CH_2O -Konzentration ist, diese aber wiederum sowohl vom Reaktionsfortschritt als auch von der Konzentration der Edukte abhängt. Zudem wird die Fluoreszenz durch den Einfluss anderer Moleküle zum Teil gelöscht. Dessen ungeachtet grenzen sich Gebiete, in denen CH_2O gänzlich verbraucht ist, durch scharfe Intensitätsübergänge ab. Die Aufnahmen des LIF-Signals wurden deshalb lediglich zur Lokalisierung der Zündkerne und für die statistische Korrelation der Resttropfen zum qualitativen Reaktionsfortschritt herangezogen.

Die Übereinstimmung der Flammenstruktur im LIF-Bild mit der Chemilumineszenz-Emission ist offensichtlich. Besonders deutlich ist dies in Bild 6 in der rechten Spalte. Dort schneiden sich Flamme und Lichtschnittebene. Im Mie-Signal sind keine Tropfen mehr auszumachen. Die in der Chemilumineszenzaufnahme sichtbaren brennenden Tropfen im 3D-Bild befinden sich folglich außerhalb der Laser-Ebene. In den Aufnahmen der linken Spalte von Bild 6 sowie in den LIF / Mie-Paaren in Bild 7 können die vorhandenen Tropfen mit dem lokalen Reaktionsfortschritt abgeglichen werden. In Bild 7 sind die Tropfen zusätzlich durch Kreise im Mie-Bild hervorgehoben, da insbesondere bei Heptan nur wenige Tropfen vorhanden sind. Die gezeigten Aufnahmen stehen beispielhaft für mehrere Hundert solcher Aufnahmen, die über den gesamten angegebene Temperaturbereich aufgenommen und analysiert wurden. Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass in dieser Untersuchung keine Korrelation zwischen dem Ort der Resttropfen und dem Reaktionsfortschritt bzw. dem Zündbeginn gefunden werden konnte.

Die Beobachtungen unserer Studie haben ergeben, dass der Ort der Selbstzündung in einer tropfenbeladenen Heißgasströmung nicht direkt von der Existenz oder der Position von Resttropfen beeinflusst wird. Es konnten Tropfen sowohl in Gebieten mit hoher als auch mit niedriger CH_2O -Konzentration nachgewiesen werden. In der turbulenten Heißgasströmung wird folglich der Ort mit optimalen Bedingungen für schnelle Selbstzündung nicht durch die Existenz von Tropfen und deren unmittelbarer Umgebung beeinflusst, wie dies für den Zündradius in Experimenten und Simulationen mit Einzeltropfen zu beobachten ist [2, 3]. Kraftstofftropfen spielen jedoch zu Beginn der Prozesskette Verdampfung-Mischung-Reaktion als Quellen für Kraftstoffdampf eine entscheidende Rolle.

4. Zusammenfassung

Mit Hilfe empfindlicher Lasermesstechnik konnte der Verlauf und das Verhalten der Selbstzündung von Kraftstoffsprays unter nahezu den thermodynamischen Bedingungen, die in Vormischzonen von zukünftigen LPP-Flugtriebwerksbrennkammern vorliegen, erfolgreich untersucht werden. Der Einfluss unverdunsteter Resttropfen auf den Zündort und die Flammenausbreitung stand dabei im Fokus der Untersuchungen.

Die wichtigsten Ergebnisse können wie folgt zusammen gefasst werden:

- Selbstzündung findet lokal „zufällig“ innerhalb der inhomogenen reagierenden Strömung statt, d.h. der Ort der Selbstzündung unterliegt räumlichen und zeitlichen Fluktuationen.
- Aus einzelnen Zündkerne entstehen Flammenzonen, die in das Frischgas expandieren, während sie mit hoher Geschwindigkeit stromab transportiert werden.
- Werden unverdunstete Resttropfen von expandierenden Flammenzonen erfasst, verbrennen sie relativ fett im heißen Abgas der Flammenkerne unter Aussendung langwelliger Strahlung, die wahrscheinlich Rußpartikeln zuzuordnen ist.
- Die LIF-Aufnahmen zeigen sanfte räumliche Übergänge verschiedener Konzentrationsniveaus von CH_2O , welche den Reaktionsfortschritt der Zündung repräsentieren. Bereiche der Flammenausbreitung grenzen sich durch scharfe Übergänge zu Gebieten ab, in denen CH_2O noch vorhanden ist.
- Im Temperaturbereich von 800 K bis 1100 K konnte in unseren Untersuchungen kein direkter Einfluss der Resttropfen auf den lokalen Fortschritt der Reaktion und letztlich auch auf den Zündort in der reagierenden Strömung festgestellt werden.

5. Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 606, Teilprojekt B5.

6. Literaturangaben

- [1] Bauer, H.-J.: New Low Emission Strategies and Combustor Designs for Civil Aeroengine Applications. Prog. Comp. Fluid Dyn. 4, Nr. 3-5, (2004) 130-142
- [2] Tanabe M. et al.: Two Stage Ignition of n-Heptane Isolated Droplets. Combust. Sci. Technol. 108 (1995) 103-119
- [3] Stauch R. u. Maas, U.: Different Ignition Modes of n-Heptane Droplets in Air. Proc. European Comb. Meeting, 2007

- [4] Ciezki, H.K. u. Adomeit, G.: Shock Tube Investigation of Self-Ignition of n-Heptan-Air Mixtures Under Engine Relevant Conditions. *Comb. Flame* 93 (1993) 421-433
- [5] Pfahl, U. et al.: Shock-Tube Investigations of Atomization, Evaporation, and Ignition of n-Dekane and α -Methylnaphthalene Droplets. *Proc. Combust. Inst.* 26 (1996) 781-789
- [6] Ohta, Y. u. Furutani, M.: Identification of Cool and Blue Flames in Compression Ignition. *Archivum Combustionis* 11 (1991) 43-52
- [7] Murase, E. et al.: Photographic Observation and Emission Spectral Analysis of HCCI Combustion. *Comb. Sci. Technol.* 177 (2005) 1699-1723
- [8] Spadaccini, L.J. u. TeVelde, J.A.: Autoignition Characteristics Of Aircraft Type Fuels. *Combust. Flame* 46 (1982) 283-300
- [9] Stringer, F.W. et al.: The Spontaneous Ignition of Hydrocarbon Fuels in a Flowing System, *Proc. Instn Mech. Engrs* 184 (1969-1970) 212-225
- [10] Cano-Wolff, M.; Koch, R.; Wittig, S.: Experimental and Numerical Investigation of the Autoignition of Fuel Sprays in Preheated Flows. *VDI-Berichte Nr. 1629* (2001) 301-306
- [11] Cano-Wolff, M.; Meisl, J.; Koch, R.; Wittig, S.: The Influence of Evaporation on the Autoignition-Delay of n-Heptane Air Mixtures Under Gas Turbine Conditions. *Proc. Combust. Inst.* 27 (1998) 2025-2031.
- [12] Griffiths, J.F. u. Scott, S.K.: Thermokinetic Interactions: Fundamentals of Spontaneous Ignition and Cool Flames. *Prog. Energy. Combust.* 13 (1987) 161-197
- [13] Stauch, R.; Lipp, S.; Maas, U.: Detailed numerical simulations of the autoignition of single n-heptane droplets in air. *Comb. Flame* 145 (2006) 533-542
- [14] Aggarwal, S. K.: A Review of Spray Ignition Phenomena - Present Status and Future Research. *Prog. Energy. Combust.* 24 (1998) 565-600
- [15] Bäuerle, B.; Hoffmann, F.; Behrendt, F.; Warnatz, J.: Detection of Hot-Spots in the Endgas of an Internal Combustion Engine Using Two-Dimensional LIF of Formaldehyde. *Proc. Combust. Inst.* 25 (1994) 135-141
- [16] Gaydon, A.G.: *The Spectroscopy of Flames*. 2. Aufl., Chapman and Hall, London, 1974
- [17] Schießl, R., Pixner, P.; Dreizler, A.; Maas, U.: Formaldehyde formation in the endgas of Otto engines: Numerical simulations and quantitative concentration measurements. *Comb. Sci. Technol.* 149 (1999) 339-360