

ANWENDUNG SIMULTANER LASERMESSTMETHODEN ZUR UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES ELEKTRISCHER FELDER AUF STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE BEI VORGEMISCHTEN FLAMMEN

F. Altendorfner, A. Leipertz

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) & Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Elektrische Felder, Verbrennung, Particle Image Velocimetry, Laser-Induzierte Fluoreszenz
Electric Fields, Combustion, Particle Image Velocimetry, Laser Induced Fluorescence

Zusammenfassung

In dieser vorliegenden Studie wurde die Anwendung simultaner, zweidimensionaler Lasermesstechniken zur Untersuchung des Einflusses elektrischer Felder auf vorgemischte Flammen demonstriert. Dazu kamen zum einen Laser-Induzierte Fluoreszenzmesstechniken am Formaldehydmolekül (CH_2O) und Hydroxylradikal (OH^*) zum Einsatz, um die Lage der Reaktionszone sowie die Veränderung dieser durch das elektrische Feld zu visualisieren. Zum anderen wurde die Particle Image Velocimetry genutzt, um zweidimensionale Geschwindigkeitsfelder im Frisch- und Abgasbereich zu erhalten, um damit Rückschlüsse auf evtl. Geschwindigkeitsänderungen der Flammenfront durch das elektrische Feld zu bestimmen. Durch die Kombination der erhaltenen Ergebnisse war es möglich, erste neue Einblicke in die Mechanismen zur elektrischen Feldbeeinflussung zu erhalten und damit in zukünftigen Arbeiten bestehende Modelle anzupassen und zu verbessern.

Einleitung

Die Beeinflussbarkeit von Strömungen durch den Einfluss elektrischer Felder basierend auf dem sog. „Ionischen Wind“ ist seit dem Anfang des 18. Jahrhunderts bekannt und wurde erstmals im Jahre 1708 wissenschaftlich erwähnt [s. Hauksbee]. Aufbauend auf diesem Prinzip wurden im letzten Jahrhundert diverse technische Anwendungen entwickelt, unter anderem Lüfterkonzepte ohne mechanische Komponenten, Ionenimpulstriebwerke und insbesondere die Steuerung bzw. Kontrolle von Verbrennungsvorgängen.

Während bei Strömungsvorgängen in Fluiden die elektrischen Ladungsträger erst durch Entladungsvorgänge erzeugt werden müssen, liegen diese bei Verbrennungsprozessen aufgrund von Chemo-Ionisation in der Flamme bereits vor. Der Wirkmechanismus des Einflusses elektrischer Felder auf Flammen liegt in einer hydrodynamischen Stabilisierung. Dabei werden die schon vorliegenden Ladungsträger mittels elektrischer Felder zunächst separiert, danach beschleunigt und anschließend durch Kollisionen mit Frischgasmolekülen bei gleichzeitigem Impulstransfer wieder abgebremst. Das anströmende Frischgas wird dabei ebenfalls verlangsamt, wodurch sich lokal das Strömungsfeld der Flamme verändern lässt. Dies kann bei geeigneter Anwendung die Stabilisierung der Flamme deutlich verbessern, dadurch die Emission von Schadstoffen minimieren und insgesamt die Betriebsgrenzen für einen sicheren Brennerbetrieb erweitern.

Jedoch existiert seit einiger Zeit eine Diskussion über den alleinigen Wirkmechanismus des Ionischen Windes zur Stabilisierung von Flammen. So wird als alternativer Mechanismus auch eine mögliche Veränderung der Reaktionspfade durch Radikalerzeugung unterhalb der aktuellen Flammenfront propagiert. Um diese offene Fragestellung abzuklären, wurden Versuchsreihen an vorgemischten, laminar betriebenen Bunsenflammen unter dem Einfluss elektrischer Felder durchgeführt. Als örtlich und zeitlich hochaufgelösende, zweidimensionale Messverfahren kamen dazu simultan die Particle Image Velocimetry (PIV) für Geschwindigkeitsprofile sowie die planare Laser-Induzierte Fluoreszenz-Technik (PLIF) zur Bestimmung der Lage der Reaktionszone zum Einsatz.

Theoretische Grundlagen zum Einfluss elektrischer Felder

In fast allen Verbrennungsvorgängen mit Ausnahme z.B. von Wasserstoffflammen findet während des Oxidationsvorganges von neutralen Edukten Chemo-Ionisation statt, bei welchen die Energie der Reaktanden zusammen mit der Reaktionsenthalpie groß genug ist, um einen Teil der Produkte zu ionisieren. Dabei entstehen positive und negative Ionen sowie Elektronen, wobei positive Ionen und negative Elektronen den Großteil an potentiellen Ladungsträgern stellen, da sich bei hohen Flammentemperaturen die negativen Ionen als instabil erweisen und rasch wieder zu einem Elektron und einem neutralen Molekül zerfallen [s. Lawton et al.].

Wird nun ein externes elektrisches Feld an eine Flamme angelegt, so spielen sich die wichtigen Prozesse im Bereich zwischen der Reaktionszone und den Elektroden ab [s. Payne et al.]. Durch das elektrische Feld werden zunächst die positiven von den negativen Ladungsträgern separiert und jeweils in Richtung der zugehörigen Elektroden beschleunigt. Es bewegen sich also unipolare Ionen- und Elektronenwolken in Richtung der korrespondierenden Elektrode. Der Einfluss eines elektrischen Feldes auf Flammen kann nun mit einem einfachen eindimensionalen Modell wie in Abbildung 1 veranschaulicht werden:

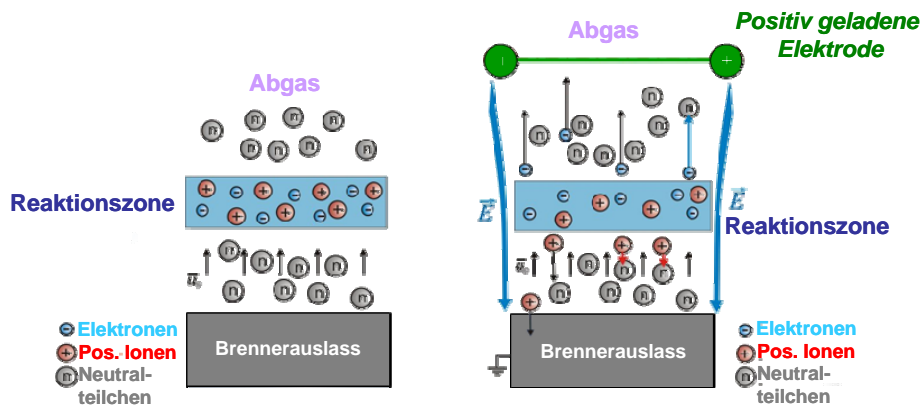


Abb. 1: Eindimensionales Schema des „Ionischen Wind“-Modells für vorgemischte Flammen ohne (links) und mit aktivem elektrischem Feld (rechts).

Dabei befindet sich ein positiv geladenes Drahtgitter oberhalb eines Vormischbrenners mit einer flachen Flamme. Das elektrische Feld separiert zunächst die Ladungsträger und bewegt die Ionen und Elektronen zu den korrespondierenden Elektroden. Die negativ geladenen Elektronen und Ionen werden zur positiven Elektrode beschleunigt, die positiven Ionen bewegen sich in Richtung des geerdeten Brenners in Gegenströmung zum anströmenden Frischgas. Statistisch kollidieren diese nach Zurücklegen der mittleren freien Weglänge mit den Neutralteilchen der anströmenden Mischung. Da die mittlere freie Weglänge klein ist und die positiven Ionen nach jeder Kollision erneut vom elektrischen Feld beschleunigt werden

können, kann jedes positive Ion für eine Vielzahl von Kollisionen mit Neutralteilchen verantwortlich sein. Keine nennenswerte Rolle spielen dagegen die Elektronen aufgrund ihrer geringen Masse und die negativen Ionen aufgrund ihrer geringen Anzahl. Als Resultat stellt sich eine sichtbare Verlagerung der Flammenfront ein, was durch zwei Mechanismen verursacht werden kann.

Der eine Mechanismus beruht auf einem Impulstransfer von den beschleunigten positiven Ionen auf die anströmenden Neutralteilchen, was auch als „ionischer Wind“ oder „elektrohydrodynamischer Effekt“ bezeichnet wird. Diese Verlangsamung der Neutralteilchen resultiert in einem veränderten Strömungsprofil oberhalb des Brennerauslasses, was dann in Folge zu einer Änderung der Reaktionszone führt, da die Flamme Richtung Brennerauslass verschoben wird. Der andere mögliche Wirkmechanismus basiert auf der Bildung von Radikalen während der Kollisionen zwischen den positiven Ionen und den Neutralteilchen. Diese Radikale würden unterhalb der aktuellen Reaktionszone produziert und das Gemisch reaktiver machen, was die Flammenchemie beschleunigen und somit in einer erhöhten Flammengeschwindigkeit resultieren würde. Die Flamme würde darauf ebenfalls mit einer Verlagerung der Reaktionszone reagieren. Einen guten Überblick über die bisherigen Grundlagenuntersuchungen und das bisherige Modellverständnis gibt [Bradley].

Experimenteller Aufbau

Der grundlegende Aufbau für die Experimente bestand aus einem Brennerversuchsstand mit Infrastruktur, der Erzeugung der elektrischen Felder sowie dem optischen Aufbau wie es in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist:

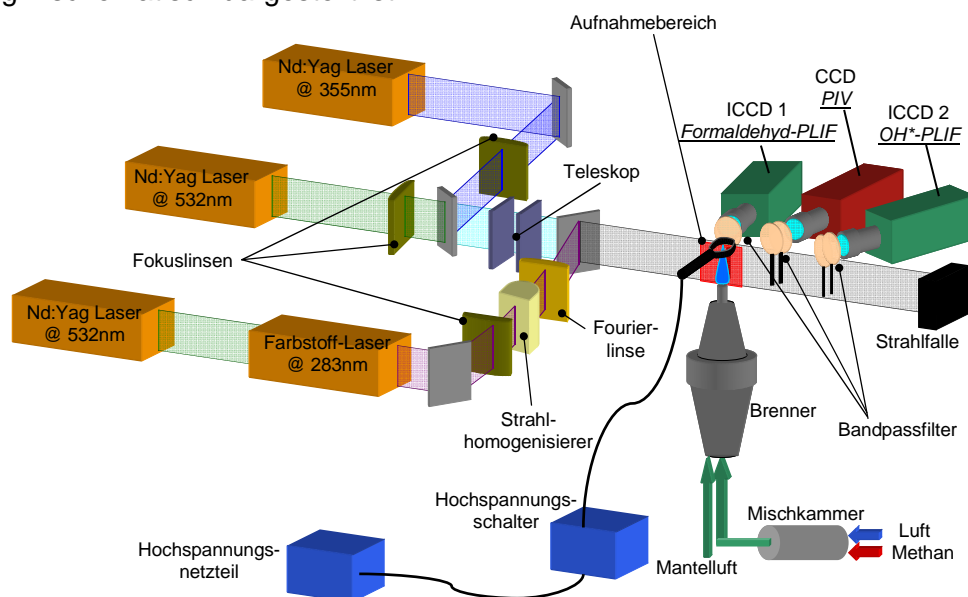


Abb. 2: Schema des experimentellen Aufbaus mit Laser, Kameras, Brenner sowie elektrischen Feld

Verbrennungsprüfstand:

Der eingesetzte Bunsenbrenner wurde bei verschiedenen Betriebsbedingungen wie Variation der Luftzahlen und Austrittsgeschwindigkeiten im laminaren Strömungsregime mit Methan als Brennstoff im Vormischbetrieb untersucht. Um die Flamme von Umgebungseinflüssen wie Staub oder Luftzug abzuschirmen, kam ferner ein koaxialer, Geschwindigkeitsangepasster Mantelluftstrom zum Einsatz. Die Massenströme von Brennstoff und Luft sowie Mantelluft wurden mittels Massenflussreglern kontrolliert und die verwendete Verbrennungsluft mit Hilfe eines Adsorptionslufttrockners auf einen Taupunkt von -80 °C entfeuchtet. Die Mischung von Brennstoff und Luft erfolgte in einer externen Mischkammer.

Erzeugung der elektrischen Felder:

Die Hochspannung für die elektrischen Felder wurde mit einem speziellen Hochspannungsnetzgerät generiert und an eine gekühlte Ringelektrode angelegt, welche in einem Abstand von 50 mm über dem Brennerauslass angebracht war. Die Kühlung der Elektrode erfolgte dabei mit entionisiertem Wasser, um parasitäre Stromflüsse zu vermeiden. Die Ringelektrode wurde als Anode mit positiver Spannung beaufschlagt, während der Brennerauslass geerdet war. Um evtl. auftretende Überschläge zu minimieren, wurde der maximal mögliche Stromfluss mittels eines Widerstandes von 12 M Ω auf 3,33 mA bei einer Netzspannung von 40 kV begrenzt. Während der Versuche wurde die angelegte Spannung zusammen mit dem sich einstellenden Stromfluss kontinuierlich mit einem 1:1000 Hochspannungstastkopf gemessen und auf einem Oszilloskop abgebildet. Bei den Versuchen zum gepulsten, transienten Verhalten von elektrischen Feldern kamen darüber hinaus noch ein Funktionsgenerator sowie ein Hochspannungsschalter zum Einsatz.

Optischer Aufbau:

Die Messung der Strömungsfelder erfolgte mittels der Particle Image Velocimetry. Dazu wurden von einem doppelimpulsfähigen Nd:Yag-Laser bei einer Wellenlänge von 532 nm zwei Lichtpulse in kurzem, zeitlichem Abstand generiert, mittels Fokusslinse und Teleskop zum Lichtschnitt aufgezogen und auf den Bereich über dem Brennerauslass fokussiert. Die Detektion der Mie-Streuung der Partikel erfolgte anschließend durch eine nicht-intensivierte double shutter CCD-Kamera. Um die anderen beiden Anregungslaser sowie Fluoreszenzsignale zu unterdrücken, wurde ein schmalbandiger Bandpassfilter um 532 nm verwendet.

Die simultane Messung der Konzentrationsfelder der beiden Spezies OH* und Formaldehyd wurde mittels Laser-Induzierter Fluoreszenz durchgeführt. Die Anregung von Formaldehyd geschah breitbandig bei 355 nm mittels eines frequenzverdreifachten Nd:Yag-Lasers, wohingegen die Detektion der Signale im Bereich von 380 nm bis etwa 500 nm mit einer intensivierten CCD-Kamera passierte. Dazu wurden der Anregungslaser mittels Bandpassfilter und die anderen Laser mittels Notchfiltern unterdrückt. Die Formung des Lichtschnittes erfolgte analog zum Nd:Yag-Laser für PIV, da die Fokussierung vorher, das Überlagern der beiden Lichtstrahlen sowie Aufziehen zum Lichtband jedoch simultan durchgeführt wurde.

Zur Anregung der OH*-Radikale wurde ein Farbstofflaser mit Hilfe eines weiteren Nd:YAG-Lasers bei einer Wellenlänge von 532 nm gepumpt. Im Farbstofflaser erfolgte die Verschiebung der Wellenlänge mittels eines geeigneten Farbstoffes zu 566 nm, welche dann in einem weiteren Schritt zu 283 nm verdoppelt wurde. Der Farbstofflaser war dabei schmalbandig und durchstimmbare, so dass vor den Messungen eine geeignete Anregungswellenlänge des OH*-Radikals bestimmt wurde. Nach dem Austritt des Lichtstrahls aus dem Frequenzverdoppler wurde der Lichtstrahl zunächst fokussiert, anschließend mit einem Homogenisierer und einer folgenden Fourierlinse vergleichmäßig und aufgezogen sowie mit den anderen beiden Lichtbändern bestmöglich über dem Brennerauslass überlagert. Die Detektion des OH*-Signals wurde um 308 nm ebenfalls mit einer intensivierten CCD-Kamera durchgeführt, wobei sowohl der Anregungslaser als auch die anderen Fluoreszenz- und PIV-Signale mittels Bandpassfilter unterdrückt wurden.

Um immer den gleichen Messbereich mit allen drei Kameras zu beobachten, wurden sowohl die PIV-Kamera als auch die Formaldehyd-Kamera leicht schräg positioniert und mittels Scheimpflugadapter zwischen Objektiv und Kamera der Bildausschnitt entsprechend angepasst. Nach der simultanen Aufzeichnung der drei Messsignale erfolgten die separate Auswertung der Einzelbilder sowie anschließend die Überlagerung mit Hilfe von Kalibrationsbildern und dem kommerziellen Software-Paket Davis 7.0.

Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

Die hier präsentierten Bilder sind in Falschfarben dargestellt und wurden bei einer mittleren Austrittsgeschwindigkeit von 2,0 m/s sowie einer Luftzahl von 1,0 aufgenommen, wobei die elektrische Spannung bei der Versuchreihe systematisch in Schritten von 1 kV bis zum Koronadurchbruch (Plasmaentladung) erhöht wurde. Exemplarisch wird im Folgenden der Grundzustand bei 0 kV ohne elektrisches Feld mit einem mittleren Betriebspunkt bei 3 kV sowie mit 6 kV als Betriebspunkt kurz vor dem Durchbruch verglichen. In Abbildung 3 sind zunächst die Ergebnisse der Formaldehyd-Messungen gegenübergestellt, in grau ist dabei der Brennerauslass markiert:

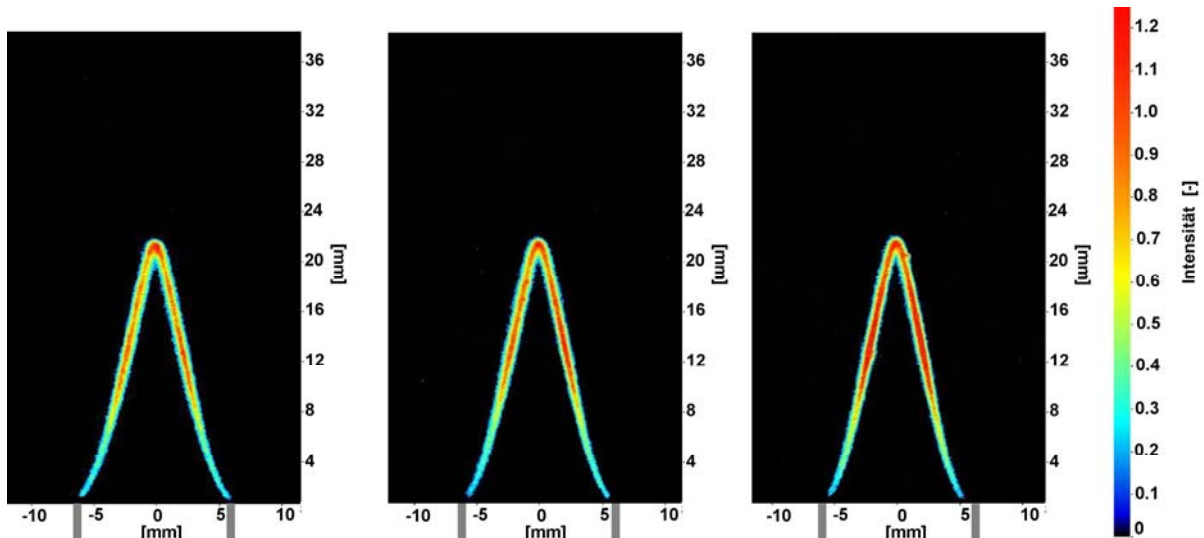


Abb. 3: Formaldehyd-LIF-Ergebnisse für zunehmende Spannung (links 0 kV, Mitte 3 kV, rechts 6 kV)

Mit zunehmender elektrischer Spannung von links nach rechts zeigt sich der Einfluss eines elektrischen Feldes auf eine laminare Bunsenflamme. Während gerade im unteren und mittleren Bereich die Flammenfront leicht eingeschnürt wird, erfolgt an der Flammenspitze eine geringe Verlagerung nach oben. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Intensität der Formaldehyd-Signale zunimmt, was auf eine mögliche Veränderung der Flammenchemie hindeutet. Jedoch fallen die Veränderungen beim Formaldehyd deutlich geringer aus als beim OH^* -Radikal, wie man anhand Abbildung 4 erkennen kann:

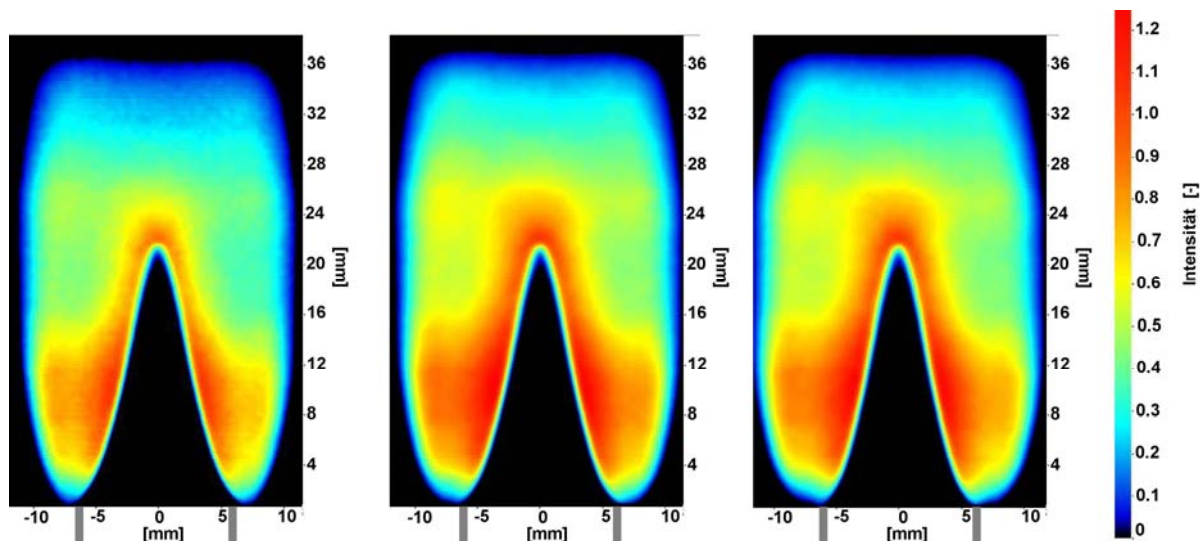


Abb. 4: OH^* -LIF-Ergebnisse für zunehmende Spannung (links 0 kV, Mitte 3 kV, rechts 6 kV)

Auch hier zeigt sich mit zunehmender elektrischer Spannung eine Zunahme der Signalintensität im Abgasbereich. Jedoch ist die Verteilung im Abgas nicht vollkommen homogen, was einer Abschwächung des Laserstrahlprofils im oberen Bildbereich geschuldet ist. Diese Zunahme der Signalintensität lässt sich nun entweder mit einer Erhöhung der OH*-Konzentration oder einer Zunahme der Abgastemperatur erklären, da die ausgewählte Anregungsbande ebenfalls temperaturabhängig ist. Noch deutlicher wird die Veränderung, indem man die Bilder differentiell darstellt und jeweils den 0 kV-Zustand ohne elektrisches Feld als Referenz abzieht, was in Abbildung 5 veranschaulicht wird:

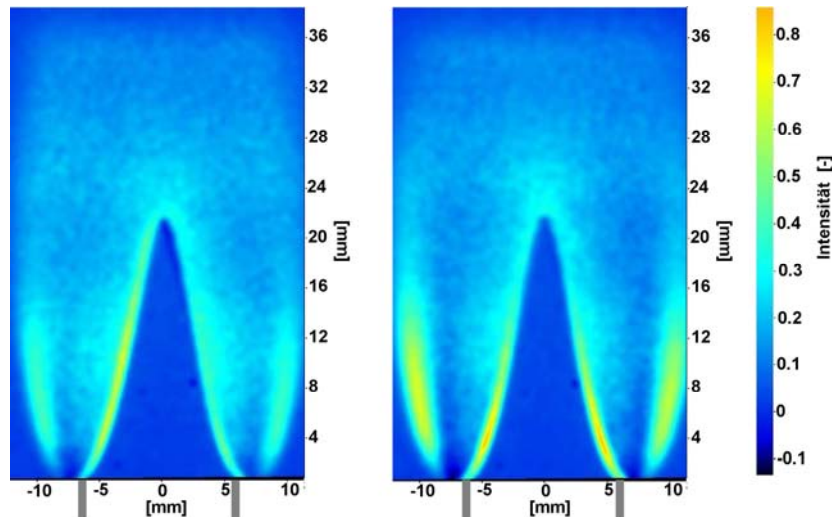


Abb. 5: Differentielle Darstellung der Änderung der OH*-LIF-Ergebnisse jeweils auf 0 kV referenziert (links 3 kV – 0 kV, rechts 6 kV – 0 kV)

Die Verlagerung der Flammenfront sowie auch eine Änderung des Abgasbereiches treten hier deutlich sichtbar hervor. Mit zunehmender Spannung verschiebt sich die Flammenfront nach innen Richtung Frischgas und der Abgasbereich wird breiter. Die Verbreiterung des Abgasbereiches lässt sich anschaulich mit Hilfe der Geschwindigkeitsfelder erklären, weshalb in Abbildung 6 die axiale Geschwindigkeit verglichen wird:

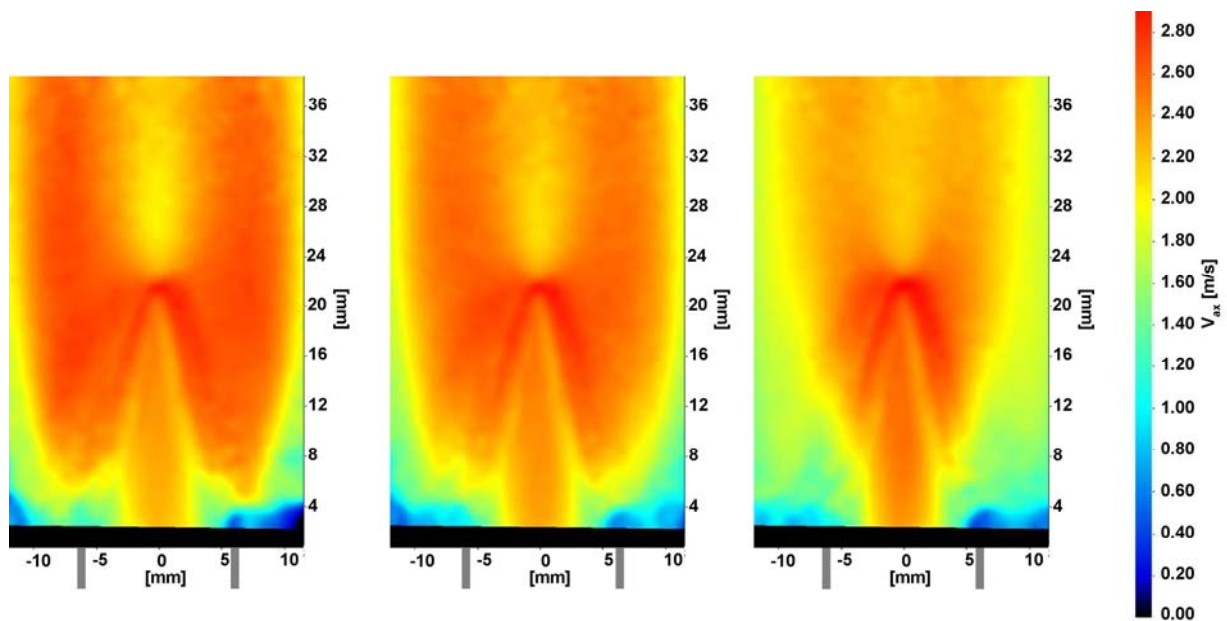


Abb. 6: Axiale Geschwindigkeit für zunehmende Spannung (links 0 kV, Mitte 3 kV, rechts 6 kV)

Im direkten Vergleich der axialen Geschwindigkeit zeigt sich, dass die Strömung stark abgebremst wird und sich auf den zentralen Kernbereich oberhalb der Flamme zusammenzieht. Besonders erkennbar wird dies wiederum in den Differenzbildern wie in Abbildung 7 zu sehen:

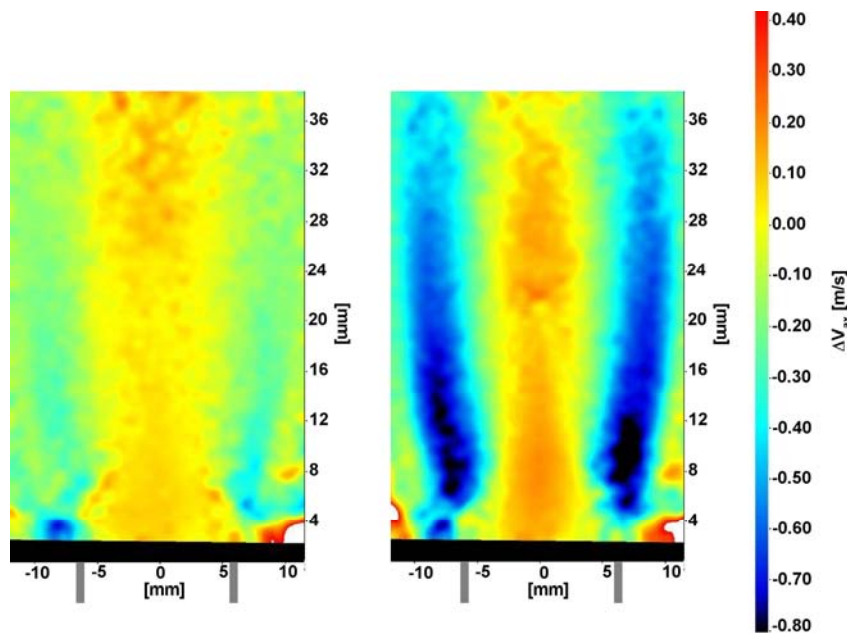


Abb. 7: Differentielle Darstellung der Änderung der axialen Geschwindigkeit jeweils auf 0 kV referenziert (links 3 kV – 0 kV, rechts 6 kV – 0 kV)

Während in gelben Bereichen keine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit stattfindet, wird in orangenen und roten Gebieten die Strömung beschleunigt und in grünen bis tiefblauen verzögert. Wie erkennbar ist, ergibt sich eine starke Beschleunigung im Kernbereich über und unter der Flammenfront, während in den äußeren Bereichen, gerade dort wo die Flamme am Brennrand stabilisiert wird, eine Verzögerung stattfindet. Dieser Verzögerungseffekt spricht daher für den bereits postulierten Impulsübertrag durch den ionischen Wind als wichtigen Einflussfaktor durch das elektrische Feld. Wie oben jedoch anhand der LIF-Bilder bereits gezeigt wurde, spricht auch viel für eine gleichzeitige Veränderung der Reaktionschemie. Von daher sind nun weitere Messphasen für eine breite Datenbasis geplant, um die Einflüsse zu quantifizieren.

Zusammenfassung

In dieser Studie wurden, anknüpfend an frühere Untersuchungen am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, simultane Messungen zum Einfluss elektrischer Felder auf vorgezündete Flammen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Kombination von Laser-Induzierter Fluoreszenzmesstechniken zur Vermessung von Spezieskonzentrationen zusammen mit der Particle Image Velocimetry zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern insbesondere in diesem Anwendungsfall prinzipiell geeignet ist. Dadurch konnten erstmalig zweidimensionale, örtlich und zeitlich hochauflösende und simultan erzielte Resultate zur Beeinflussung von Flammen mittels elektrischer Felder aufgenommen und neue Einblicke zum verbesserten Verständnis gewonnen werden.

Beispielhaft wurde in dieser Veröffentlichung ein Betriebspunkt herausgegriffen und die erzielten Ergebnisse diskutiert. So zeigte sich sowohl anhand der Formaldehyd- und OH*-Konzentrationsprofile in der Flamme und im Abgasbereich als auch der Geschwindigkeitsprofile, dass je nach Position in der Reaktionszone unterschiedliche, vom elektrischen Feld

induzierte Prozesse ablaufen. Darüber hinaus ergab sich, dass vermutlich der Ionische Wind nicht allein maßgeblich verantwortlich für den beobachteten Stabilisierungseffekt zeichnet, sondern auch ein Einfluss auf die Reaktionschemie vorhanden zu sein scheint.

Deshalb sind weitere vertiefende Untersuchungen mit einer größeren Datenbasis bei verschiedenen Betriebspunkten sowie dem Übergang zu gepulsten transienten elektrischen Feldern nötig, um die bestehenden Modelle weiterzuentwickeln bzw. anzupassen. In weiteren Untersuchungen wird ferner die CARS-Messtechnik (Coherent Anti-Raman Scattering) zum Einsatz kommen, um detaillierte Temperaturmessungen an verschiedenen Stellen im Verbrennungsprozess vorzunehmen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projektes sowie für die Finanzierung der Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT) im Rahmen der deutschen Exzellenzinitiative.

Literaturverzeichnis

Bradley, D. in Weinberg, F.J. (Ed.), 1986: "Advanced combustion methods", Academic Press Inc., New York, S. 331ff.

Hauksbee, F., 1708: "An account of some experiments, touching the electricity and light producible on the attrition of several bodies", Phil. Trans. Roy. Soc. London, 26, S. 87-92

Lawton, J., Weinberg, F. J., 1969: "Electrical aspects of combustion", 1. Edition, Clarendon Press, Oxford

Payne, K. G., Weinberg, F. J., 1962: "Measurements on field-induced ion flows from plane flames", Proc. Combust. Inst., 8, S. 207-217