

GRUNDLEGENDE UNTERSUCHUNGEN ZUR BESTIMMUNG DER LADUNGSTEMPERATUR IN VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINEN

R. Müller, V. Beushausen

Laser-Laboratorium Göttingen e.V.
Hans-Adolf-Krebs-Weg 1
D-37077 Göttingen

Abstract

Um der politischen Forderung nach einer Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Verbrennungskraftmaschinen nachkommen zu können, muss eine Verringerung der derzeitigen Schadstoffemissionen erzielt werden. Dies kann entweder durch die technische Optimierung der bestehenden, oder durch die Entwicklung neuer Brennverfahren ermöglicht werden. Dabei ist die Kenntnis der bei der Verbrennung stattfindenden physikalischen Vorgänge unerlässlich. Die Erfassung der relevanten Messgrößen direkt im Brennraum von Motoren ist allerdings immer noch eine große Herausforderung. Einen entscheidenden Einfluss auf das Zünd- und Brennverhalten eines Verbrennungsmotors besitzt die Temperatur der Ladung. Sie ist damit ein wichtiger Faktor bei der Analyse des Verbrennungsvorgangs. In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die mit Hilfe Laser-induzierter Zwei-Linien-Fluoreszenz von Formaldehyd eine berührungslose Bestimmung der Ladungstemperatur ermöglicht und das im Gegensatz zu herkömmlichen 2-Linien LIF-Verfahren mit wesentlich geringerem technischen Aufwand.

Die unter motorisch relevanten Bedingungen durchgeführten Untersuchungen zeigen eine ausschließlich temperaturabhängige Relation der detektierten Fluoreszenzsignale. Die dabei gewonnenen Resultate bilden die analytische Grundlage für die messtechnische Erfassung der Ladungstemperatur direkt im Brennraum von Motoren.

Einleitung

Es ist eine bekannte Tatsache, dass die Kenntnis der Temperaturverteilung im Brennraum ein wichtiger Parameter bei der Optimierung und der Entwicklung neuer Brennverfahren darstellt. Besonders bei der Realisierung des so genannten HCCI-Motors (HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition) ist dies von entscheidender Bedeutung, da hier eine Selbstzündung durch kompressionsgetriebene Temperaturerhöhung stattfindet. Durch die genaue Kenntnis der Temperaturverteilung im Brennraum können wichtige Aussagen über das Zündverhalten und den anschließenden Verbrennungsvorgang abgeleitet werden.

Eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Erfassung dieser physikalischen Größe stellt allerdings nach wie vor eine große Herausforderung dar.

In der Vergangenheit wurden bereits einige berührungslos arbeitende spektroskopische Verfahren zur Temperaturbestimmung im Brennraum entwickelt. Eine Methode ist die Verwendung der Rayleigh-Streuung, wie sie z. B. von Schulz et al. (1996) experimentell durchgeführt wurde. Ein Nachteil ist hierbei allerdings die geringe Intensität des gestreuten Laserlichtes, sodass aufgrund des starken Hintergrundsignals, das durch Streuung an den Brenn-

raumwänden und Kraftstofftröpfchen bzw. Staubpartikeln hervorgerufen wird nur ein sehr geringes Signal-zu-Rausch-Verhältnis erzielt werden kann und die Anwendung erschwert. Auch die Anwendung der Raman Spektroskopie an Verbrennungsmotoren, wie sie z.B. von Zur Loye et al. (1983) verwendet wurde, steht vor dem Problem der geringen Intensitäten und den extrem geringen Abständen der Stokes- und Antistokes-Linien, was zusätzlich eine hohe spektrale Auflösung erfordert.

Laser induzierte Fluoreszenz von NO- bzw. OH-Radikalen wurde ebenfalls zur Temperaturbestimmung herangezogen. Erstere wurde unter anderem von Palmer et al. (1995) im Stoßrohr und letztere von Arnold et al. (1992) in Flammen ausführlich untersucht. Diese Moleküle entstehen jedoch erst während des Verbrennungsvorgangs, sodass mit diesem Verfahren die Ladungstemperatur vor der Zündung nicht zugänglich ist.

Die Temperaturbestimmung auf Basis der gleichzeitigen Abfrage der Besetzung zweier Energieniveaus des elektronischen Grundzustandes macht den gleichzeitigen Einsatz von zwei Lasern notwendig und ist somit experimentell sehr aufwendig. Einecke et al. (2000) nutzte dieses Verfahren unter Verwendung von 3-Pentanon und erzielte eine gute Verifizierung der Temperatur. Im Gegensatz zu den bekannten LIF-Methoden, bei denen die thermisch angeregten Zustandsbesetzungen im elektronischen Grundzustand detektiert werden, wird in dieser Arbeit eine Zwei-Linien-Fluoreszenzmethode eingesetzt, die auf der Messung der Vibrationszustandsbesetzungen des Tracermoleküls Formaldehyd im elektronisch angeregten Zustand basiert.

Im Fluoreszenzspektrum von Formaldehyd lassen sich im Gegensatz zu vielen anderen Tracersubstanzen einzelne Vibrationsübergänge auflösen. Mittels einer simultanen Detektion der Fluoreszenzintensität von zwei verschiedenen Vibrationsübergängen lässt sich unter Zugrundelegung einer thermischen Besetzung der Vibrationszustände im angeregten elektronischen Quantenzustand auf die Vibrationstemperatur des Moleküls zurückschließen. Bereits Shibuya et al. (1978) wiesen nach, dass eine thermische Besetzung der Vibrationsniveaus durch stoßinduzierte Umverteilung innerhalb weniger Pikosekunden stattfindet, sodass bereits während der Fluoreszenzemission eine Boltzmannbesetzung der Energieniveaus stattgefunden hat. Die Möglichkeit, das Emissionsspektrum des Formaldehyds als Temperaturinformationsträger zu nutzen, hat im Gegensatz zu herkömmlichen 2-Linien-Temperaturmessverfahren die auf der simultanen Abfrage der Besetzung zweier Niveaus im Grundzustand beruhen, den Vorteil, dass hier nur ein einziger Laser eingesetzt werden muss, was den technischen Aufwand erheblich verringert.

Formaldehyd hat den Vorteil, dass es mit einer Laserwellenlänge von 355nm angeregt werden kann, sodass auch die Notwendigkeit des Einsatzes von teurem Quarzglas als Fenstermaterial entfällt.

Desweiteren besteht die Möglichkeit, relativ einfach Kraftstoff mit Formaldehyd anzureichern. Formaldehyd eignet sich auch hervorragend für die Analyse der Entflammung, da es in der Vorreaktionszone in relativ hoher Konzentration gebildet wird.

Das in dieser Arbeit angewandte Verfahren der Zwei-Linien-Fluoreszenz nutzt die Emission des angeregten Formaldehydmoleküls, um eine Temperaturinformation zu erhalten. Es werden dabei drei Emissionslinien simultan detektiert. Mit Hilfe der Arrheniusgleichung kann durch die Verhältnisbildung zweier Linien eine Relation zwischen den gemessenen Fluoreszenzintensitäten und der Temperatur gebildet werden. Daraus kann eine Kalibrationsfunktion abgeleitet werden, die einen direkten Bezug zwischen Fluoreszenzintensitätsverhältnis und der Temperatur herstellt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die grundlegende Untersuchung der Einsatzfähigkeit des geschilderten Temperaturmessverfahrens unter motorischen Umgebungsbedingungen. Zu diesem Zweck wurden die Parameter Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung systematisch variiert. Es wurde insbesondere untersucht, ob Querempfindlichkeiten des Messverfahrens hinsichtlich Druck und Gaszusammensetzung existieren.

Experimentelles

Um Motor-relevante Umgebungsbedingungen zu generieren, wurde eine temperierbare Druckzelle mit drei optischen Zugängen verwendet. Die Zelle ist evakuierbar und bis 30bar druckfest. In der Zelle kann eine Gastemperatur von bis zu 200°C erzielt werden.

Da Formaldehyd unter Normalbedingungen in der polymerisierten Form Para-Formaldehyd vorliegt, wurden zur Befüllung mit einer definierten Formaldehydkonzentration sowohl die Zelle, als auch die Rohrleitungen auf einer Temperatur von ca. 120°C gehalten. Da Paraformaldehyd bei einer Temperatur von ca. 80°C zu gasförmigem Formaldehyd zerfällt, konnte damit eine Re-Polymerisation und damit eine undefinierte Veränderung der Formaldehydkonzentration vermieden werden. Über ein ebenfalls geheiztes Drosselventil wurden anschließend die in der realen Ladung vorkommenden Gaskomponenten O₂, N₂, bzw. synthetische Luft in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen eingefüllt und homogen mit dem Formaldehyd vermischt. Beim Einfüllen der entsprechenden Gaskomponenten besaß die Druckzelle eine Temperatur von ca. 90°C. Nachdem das Gasmisch in der Zelle erzeugt wurde und sich ein thermisches Gleichgewicht eingestellt hatte, wurde die Zelle kontinuierlich bis zu einer Temperatur von 200°C aufgeheizt. Während der Aufheizphase wurde das im Gasmisch befindliche Formaldehyd mit Hilfe eines frequenzverdreifachten Nd:YAG-Lasers gepulst angeregt (Quantel Brilliant B, Wellenlänge 355nm, Pulsfrequenz 10Hz). Der Strahldurchmesser betrug 7mm und die Laserenergie 60mJ. Senkrecht zur Laserstrahlachse wurde die Fluoreszenz detektiert, welche mit Hilfe eines Spiegels und einer bikonvexen Linse (f= 150mm) auf den Spalt eines Spektrometers (Oriel Multispec, Gitter: 2400 L/mm) fokussiert wird. Das Spektrometer ist mit einer bildverstärkt arbeitenden CCD-Kamera (LaVision GmbH, Flame Star 2) gekoppelt, um das erfasste Spektrum während der Aufheizphase kontinuierlich aufzunehmen. Durch Einsatz eines Streulichtfilters (Schott, GG 375) wurde entstehendes Laserstreulicht ausgeblendet. Mit Hilfe eines Thermoelementes wurde die Temperatur in der Druckkammer simultan zur optischen Messung erfasst. Abbildung 1 zeigt den schematischen experimentellen Aufbau.

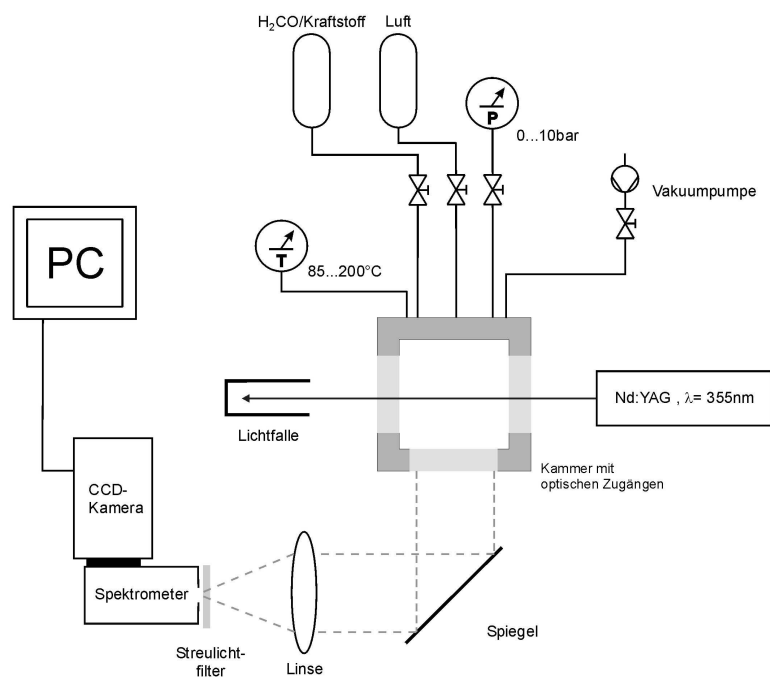


Abb. 1: Experimenteller Aufbau für Temperaturmessungen

Die Untersuchungen fanden an Gemischen Formaldehyd/synthetische Luft bei unterschiedlichen Konzentrationen und Drücken statt. Weiterhin ist ein mit Formaldehyd angereichertes Iso-Oktan/Luft-Gemisch angeregt worden. Bei der Herstellung dieses Gemisches ist Paraformaldehyd bei einer Umgebungstemperatur von 90°C in Ethanol gelöst worden. Die so entstandene Formaldehyd/Ethanol-Lösung kann mit dem Kraftstoff Iso-Oktan problemlos vermischt werden. Zur Generierung eines definierten λ -Wertes in der Druckkammer wurde eine definierte Menge dieses Kraftstoff-Formaldehyd-Gemisches mittels einer Spritze durch ein Septum in die Zelle injiziert.

Ergebnisse

Das hier angewandte Verfahren wurde schon von Burkert et al. 2003 zur Untersuchung von Flammentemperaturfeldern unter Normalbedingungen eingesetzt. Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich insbesondere mit der Erweiterung des Einsatzbereiches auf höhere Drücke und nicht reagierende Mischungen in einem moderaten Temperaturbereich. Ein wesentliches Ziel bestand auch darin, ein Fluoreszenz-Linienpaar zu finden, welches eine Kalibrationskurve liefert, die ausschließlich eine Abhängigkeit von der Temperatur besitzt und nicht von Querempfindlichkeiten hinsichtlich Druck und Gemischzusammensetzung beeinflusst wird. Der erfasste Spektralbereich beinhaltet die Übergänge $2^0_1 4^0_1$ (395nm), $2^0_2 4^1_0$ (404nm) und $2^0_1 4^1_2$ (413nm). Das detektierte Vibrationsspektrum ist in Abbildung 2 zu sehen und ist auf die Wellenlänge 413nm normiert, um die temperaturbedingten Intensitätsfluktuationen zu verdeutlichen.

Die Kalibrationskurven werden gewonnen durch Auftragung der Linienintensitätsverhältnisse gegen die jeweiligen Temperaturen.

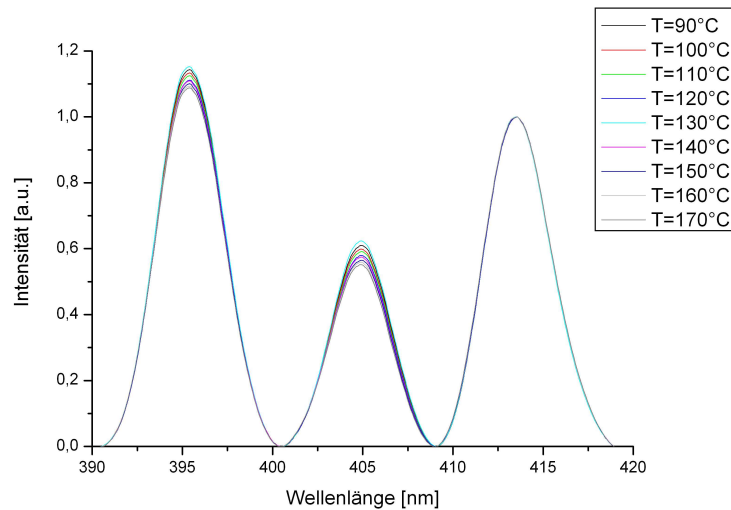


Abb. 2: Fluoreszenzemissionslinien von Formaldehyd

Unter Motor-relevanten Bedingungen findet eine Vermischung des Kraftstoffes mit Luft statt. Daher ist der Einfluss des in der Luft befindlichen Sauerstoffs auf das Fluoreszenzverhalten des Formaldehyds untersucht worden. Dabei wurden jeweils 300mbar Formaldehyd mit synthetischer Luft vermischt. Der Luftanteil der jeweiligen Gemische ist so gewählt, dass die Gesamtdrücke von 1bar bis 10bar erreicht wurden. Es wurden Verhältnisbildungen aller Linienkombinationen auf ihre Verwendbarkeit überprüft. Wie in Abbildung 3 zu erkennen ist, zeigt das Linienpaar 404nm/395nm eine zu starke Streuung der potentiellen Kalibrationskurven. Für einen festen Druck ist zwar eine eindeutige Temperaturabhängigkeit des Fluores-

zenzintensitätsverhältnisses zu erkennen. Eine Druckvariation führt jedoch zu einer zusätzlichen Veränderung der Signalintensitätsverhältnisse.

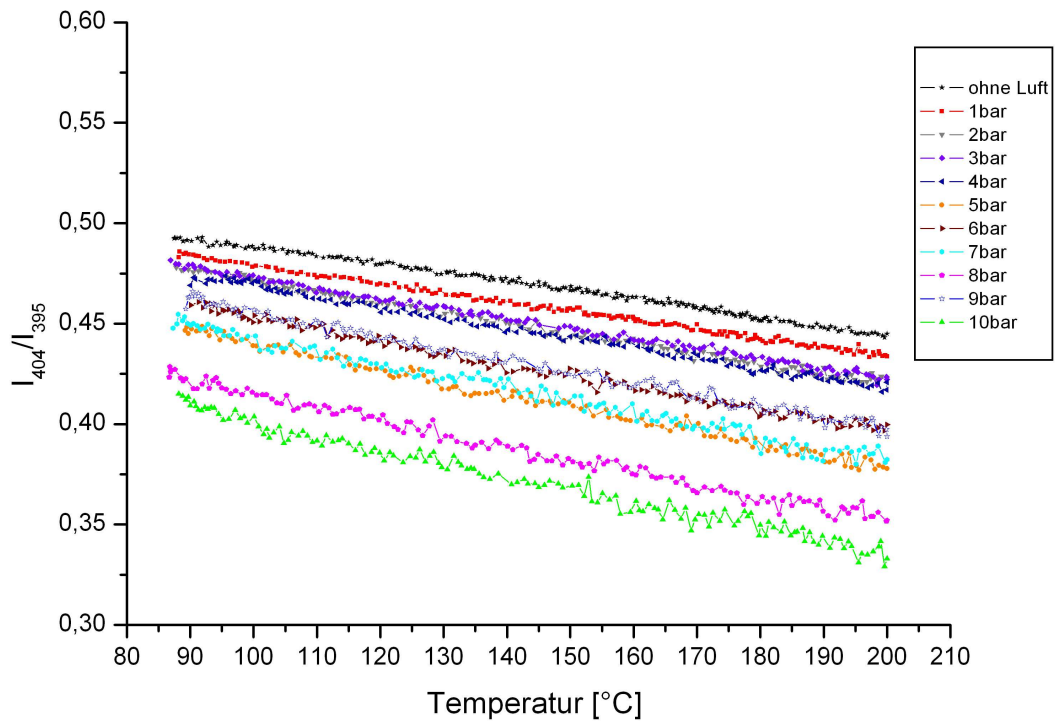


Abb. 3: Temperaturkurven für das Linienintensitätsverhältnis 404nm/395nm

Das Linienpaar 413nm/395nm hat ebenfalls eine zu starke Streuung (siehe Abbildung 4), so dass auch diese Kombination eindeutig nicht für eine Temperaturbestimmung in Motoren geeignet ist.

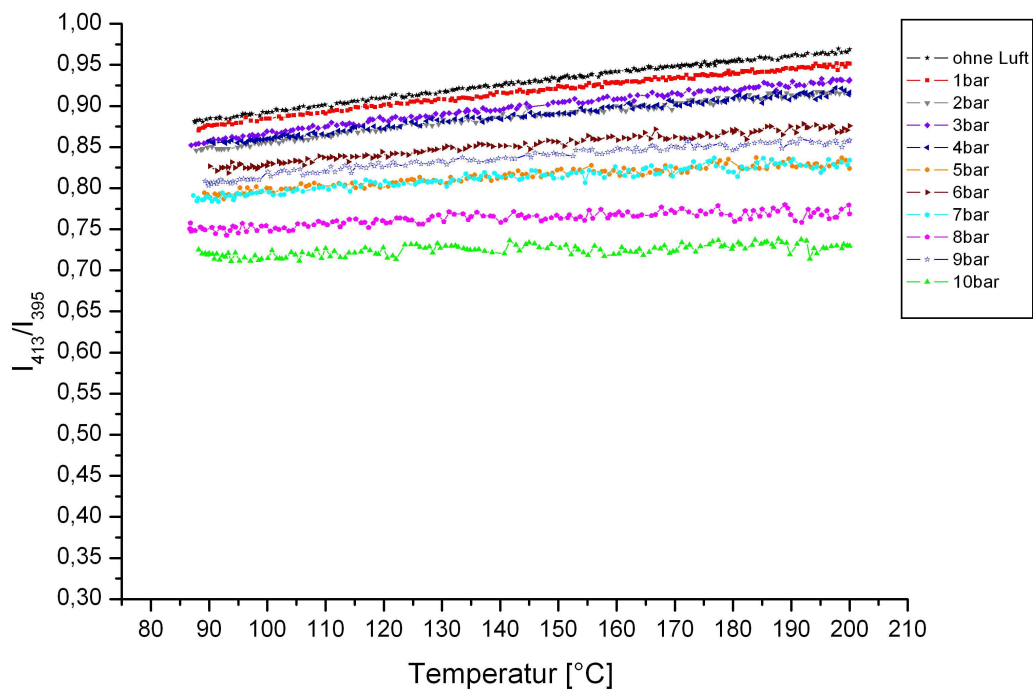


Abb. 4: Temperaturkurven für das Linienintensitätsverhältnis 413nm/395nm

Das Verhältnis 404nm/413nm hingegen zeigt einen nahezu identischen Verlauf aller Kurven, wie in Abbildung 5 zu sehen ist. Die Streuung dieser Kurven ist extrem klein und weist somit eine gute Druckunabhängigkeit auf.

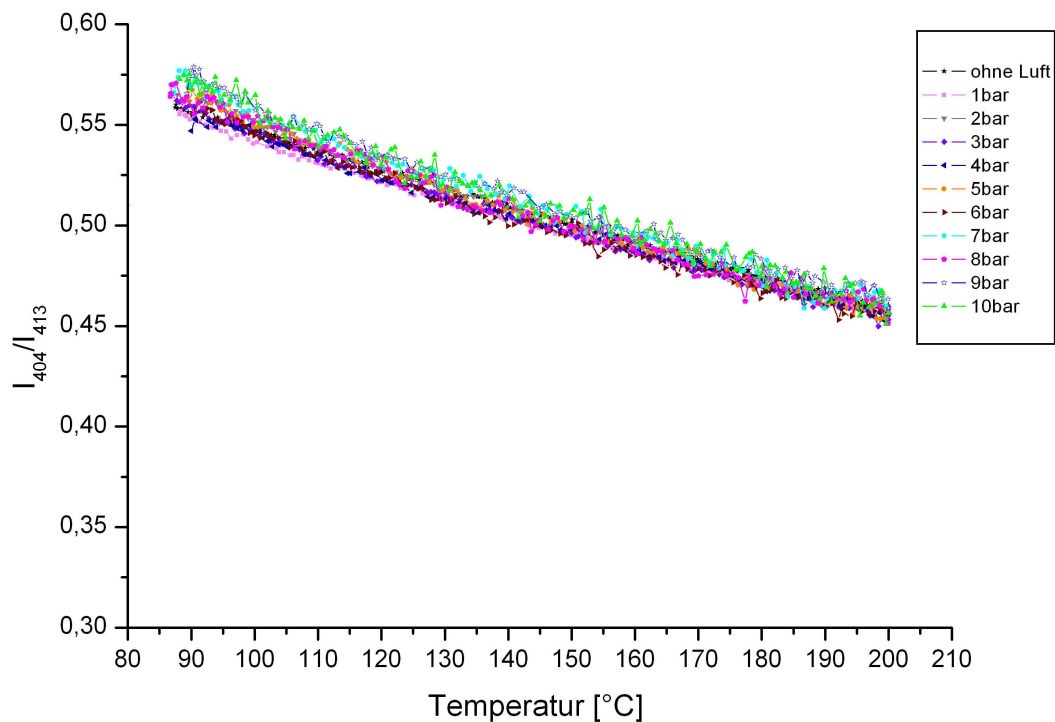


Abb. 5: Temperaturkurven für das Linienverhältnis 404nm/413nm

Desweiteren ist aus den Kurven ersichtlich, dass eine Änderung der Konzentration ebenfalls keinen Einfluss auf das Resultat hat, da zwar bei jeder Messung die Menge an Formaldehyd konstant ist, der Anteil der Luft jedoch proportional mit dem Gesamtdruck ansteigt.

Dieser Trend des Kurvenverlaufs bleibt auch bestehen, wenn ein Kraftstoff/Formaldehyd/Luft-Gemisch statt einem reinen Formaldehyd/Luft-Gemisch verwendet wird.

Das zuvor in Ethanol gelöste Formaldehyd ist dabei mit dem Einkomponentenkraftstoff Iso-Oktan vermischt worden. Mit dieser Lösung wurde dann mit Luft ein Gemisch in der Druckzelle hergestellt. Die Messungen fanden bei λ -Werten statt. Es wurde ein mageres ($\lambda=1,7$), ein fettes ($\lambda=0,6$) und ein nahezu stöchiometrisches Gemisch ($\lambda=1,1$) eingestellt. In allen drei Proben sind identische Kurvenverläufe zu erkennen (Abbildung 6).

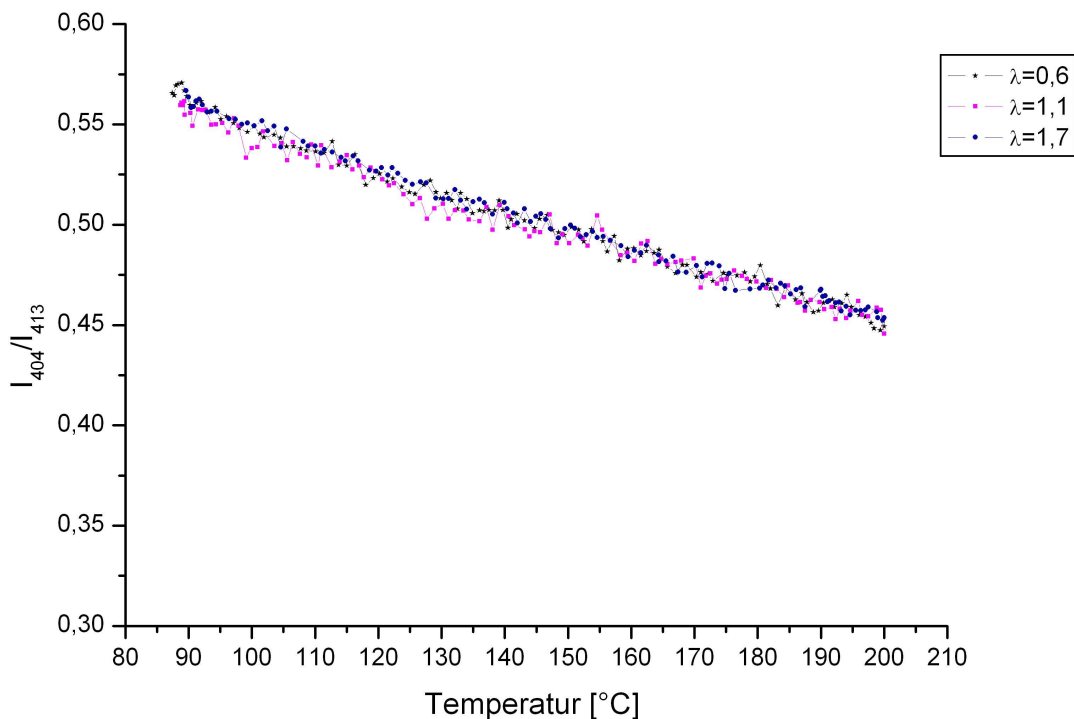


Abb. 6: Linienverhältnis 404nm/413nm, Messung eines Kraftstoff/Luft-Gemisches

Diskussion /Zusammenfassung

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Formaldehyd ein geeigneter Fluoreszenzmarker zur Bestimmung der Ladungstemperatur bei motorischen Verbrennungsprozessen ist. Es konnte gezeigt werden, dass der in der Luft befindliche Sauerstoff, welcher ein starker Fluoreszenzquencher ist, keinen großen Einfluss auf das Intensitätsverhältnis der Linien besitzt. Dies ist auch zu erwarten, da der Vorteil dieser Methode gerade in der Verhältnisbildung der Fluoreszenzsignale liegt und ein Löschungseffekt sich auf beide Linien in identischer Weise auswirkt. Die Fluoreszenzemissionslinien 404nm ($2^0_24^1_0$) und 413nm ($2^0_14^1_2$) zeigen eine erstaunlich geringe Druckabhängigkeit. Auch bei Anwesenheit von Kraftstoff ist eine Änderung der Temperaturkurven nicht zu erkennen. Desweiteren ist eine recht einfache Lösung gefunden, Kraftstoff mit Formaldehyd anzureichern. Diese Sachverhalte lassen den Schluss zu, dass Formaldehyd als Temperaturtracer für die motorische Verbrennung einsetzbar ist.

Ausblick

Es ist geplant, die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse zu einem flächigen Messverfahren auszubauen. Nach erfolgter Weiterentwicklung soll die Einsatzfähigkeit des Verfahrens an einem geeigneten Otto-Transparentmotor nachgewiesen werden.

Literatur

Burkert, A. Triebel, W., 2003: „Temperaturmessung bis 800K in Modellapparaturen und Verbrennungsmotoren basierend auf Laser-induzierter Fluoreszenz von Formaldehyd“, Tagung Motorische Verbrennung 2003, Berichte zur Energie- und Verfahrenstechnik, Heft 3.1, S.263-271

Schulz, C., Sick, V., Wolfrum, J., Drewes, V., Zahn, M., Maly, R. 1996: „Quantitative 2D single-shot imaging of NO concentrations and temperatures in a transparent SI engine“, 26th Symp. (Int.) on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh, S.2597

Palmer, J.L., McMillan, B.K., Hanson, R.K., 1996: „Multi-line fluorescence imaging of the rotational temperature field in a shock-tunnel free jet“, Appl. Phys. 63, S.167

Arnold, A., Lange, B., Bouché, T., Heitzmann, T., Schiff, G., Ketterle, W., Monkhouse, P., Wolfrum, J., 1992: „Absolute temperature fields in flames by 2D-LIF of OH using excimer lasers and CARS spectroscopy“, Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 96, S.1388

Zur Loye, A., Santavicca, D.A., 1983: „Temperature and concentration measurements in an internal combustion engine using laser Raman spectroscopy“, AIAA 18th Thermophysics Conf. Paper AIAA-83-1551

Einecke, S., Schulz, C., Sick, V., 2000: „Measurement of temperature, fuel concentration and equivalence ratio fields using tracer LIF in IC engine combustion“, Appl. Phys. B 71, S. 717-723

Shibuya, K., Lee, E.K.C., 1978: „Vibrational and electronic energy transfers from a single vibronic level of H₂CO, the 41 level“, J. Chem. Phys. 69 (2), S. 758-766