

Visualisierung von Temperaturfluktuationen in einem Ottomotor mit laserinduzierter Fluoreszenz

Dipl.-Ing O. Maiwald, Dr.-Ing R. Schießl, Prof. U. Maas
Institut für Technische Verbrennung (ITV), Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 12, D-70569 Stuttgart

1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur orts aufgelösten Messung von Temperaturfluktuationen im Endgas von Motoren vorgestellt und angewandt. Die Methode benutzt Formaldehyd (H_2CO), das durch stark temperaturabhängige chemische Reaktionen gebildet wird, als hochsensitiven, nativen Marker für lokale Temperaturinhomogenitäten. H_2CO wird mit Hilfe der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) detektiert; aus örtlichen Fluktuationen des LIF-Signals lassen sich mit Hilfe von berechneten Korrelationen zwischen Temperatur und Formaldehydkonzentration im Endgas örtliche Fluktuationen der Temperatur abschätzen.

Wir diskutieren die Grundlagen und die Anwendbarkeit der Technik. Messungen in einem Versuchsmotor demonstrieren, daß eine Visualisierung örtlicher Temperaturschwankungen im Endgas bis unter 10K, vor einem Hintergrund von 800K-1000K möglich ist. Die Applikation der Technik ist vor allem im Bereich der auf Selbstzündung basierenden HCCI-Motoren interessant, da sie recht detaillierte Informationen über lokale Inhomogenitäten des Temperaturfeldes im Zylinder und somit wichtige Hinweise auf das Selbstzündungsverhalten liefert.

2 Einführung

Die Endgastemperatur ist eine wichtige Größe beim Betrieb von Motoren mit äußerer Gemischbildung. Bei zu hohen Werten kommt es zu einer Selbstzündung, die Motorklopfen verursachen kann [1]; in den letzten Jahren ist jedoch das Interesse an einem neuen Motorenkonzept, das auf der Selbstzündung des Endgases basiert, angestiegen. Bei diesen HCCI- (homogeneous charge compression ignition, Kompressionszündung einer homogenen Ladung) Motoren wird das Kraftstoff/Luft-Gemisch durch die kompressionsbedingte Erhitzung im Zylinder gezündet [2]. Diese Selbstzündung erlaubt einen Motorbetrieb auch in stark mageren Bereichen, was eine drosselfreie Leistungsregelung und sehr geringe Stickoxidemissionen verspricht.

Allerdings kann der Beginn der Selbstzündung bei diesem Konzept nicht —wie bei funkengezündeten Motoren durch die Zündkerze oder wie bei Dieselmotoren durch den Beginn der Einspritzung— direkt kontrolliert werden. Der Selbstzündungszeitpunkt, einer der wichtigsten Parameter für einen effizienten und schadstoffarmen Motorbetrieb, hängt vielmehr von der Zündverzugszeit des Endgases ab [3]. Diese wiederum ist extrem stark von der Gastemperatur abhängig. Bereits eine geringe Temperaturerhöhung im Bereich von 10 K kann die Zündverzugszeit wesentlich verkürzen [4,5]. Daher ist es aus mehreren Gesichtspunkten wünschenswert, Information über das Temperaturfeld im Brennraum von Motoren zu erhalten. Insbesondere sind Aussagen über die räumliche Homogenität der Temperaturverteilung wichtig, da es für das Einsetzen der Selbstzündung weniger auf den Mittelwert der

Endgastemperatur ankommt, als vielmehr auf die maximale Temperatur; diese kann stark vom Mittelwert abweichen, wenn das Temperaturfeld örtlich fluktuiert.

3 Prinzip der Messung

Alle Temperaturmessungen beruhen auf der Beobachtung von Größen, die in bekannter Weise von der Temperatur abhängen. Die Messung wird umso empfindlicher, je stärker die beobachtete Größe von der Temperatur abhängt. Im Brennraum von Motoren gehören die Bildungsgeschwindigkeiten gewisser Spezies, die bei chemischen Reaktionen im Endgas während der Kompressionsphase entstehen, zu den am stärksten temperaturabhängigen Größen. Das Prinzip unserer Messmethode ist daher, chemische Spezies nachzuweisen, die an stark temperaturabhängigen Reaktionen des Endgases beteiligt sind.

Der Formaldehyd (H_2CO) eignet sich hierfür sehr gut. Er ist im Kraftstoff/Luft Gemisch nicht enthalten, entsteht jedoch in mehreren Vorreaktionen während der Kompressionsendphase, und ist typischerweise in maximalen Molenbrüchen bis zu 1 % enthalten. Bei Einsetzen einer Zündung verschwindet der Formaldehyd sehr rasch. Kurz vor Einsetzen der Selbstzündung zeigt der Molenbruch von Formaldehyd eine sehr starke Temperaturabhängigkeit. Weiterhin ist bekannt, dass sich das Auftreten des Formaldehyd im Endgas gut mit laseroptischen Techniken visualisieren lässt. All dies spricht für die Nutzung des Formaldehyd zur indirekten Messung von Temperaturfluktuationen im Endgas. Die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) als orts- und zeitauflösende, berührungslose diagnostische Technik ist bereits als gut geeignet für die Detektion von Formaldehyd im Endgas von Motoren ausgewiesen worden [6, 7, 8].

Die Bestimmung von Gastemperaturen in instationären und räumlich inhomogenen Strömungen ist problematisch; mit den bekannten Methoden lassen sich selbst unter optimalen Messbedingungen kaum Genauigkeiten besser als etwa 30K darstellen. Im Endgas von Motoren ist die erreichbare Genauigkeit einer absoluten Temperaturmessung wesentlich schlechter. Unsere Methode misst nicht absolute Temperaturen, sondern örtliche Temperaturschwankungen über eine Bestimmung von Schwankungen der LIF-Intensität von Formaldehyd [9]. Schwankungen der LIF-Intensität ΔI lassen sich in Temperaturschwankungen ΔT umsetzen, wenn der Zusammenhang zwischen ΔI und Schwankung der Formaldehydkonzentration, $\Delta[\text{H}_2\text{CO}]$ sowie die Relation zwischen $\Delta[\text{H}_2\text{CO}]$ und ΔT bekannt sind.

3.1 Ermittlung der Korrelationen

Die Korrelation zwischen $[\text{H}_2\text{CO}]$ und T wurde für die in unserem Motor herrschenden Bedingungen durch eine numerische Simulation mit dem Programmpaket HOMREA ermittelt [10]. Dabei wurde das Endgas als lokal homogener Reaktor modelliert, dem der im Motor gemessene zeitliche Zylinderdruckverlauf $p(t)$ als Randbedingung aufgeprägt wurde. Zur Modellierung der chemischen Reaktionen im Endgas wurde ein detaillierter iso-Oktan/n-Heptan Tieftemperatur-Mechanismus [6] benutzt. Die Rechnung beginnt am unteren Totpunkt ($t = 0$), wo die Bedingungen bezüglich Druck und chemischer Zusammensetzung des Endgases genau bekannt sind; als Anfangstemperatur wurde $T = 320\text{K}$ gesetzt. Die Rechnung liefert die zeitliche Entwicklung aller Spezieskonzentrationen sowie der Temperatur im Endgas. In Abbildung 1 ist das Resultat für verschiedene gemessene Druckkurven gezeigt.

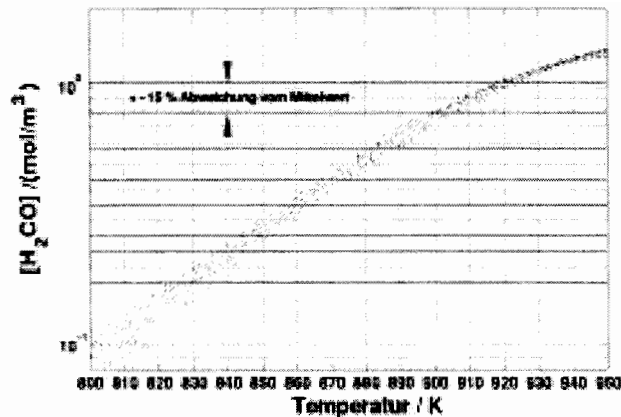


Abbildung 1 Berechnete Korrelation zwischen der Temperatur und der Formaldehydkonzentration $[H_2CO]$ im Endgas. Die Punkte stammen von 50 Rechnungen mit verschiedenen Zylinderdruckkurven; die y-Achse ist logarithmisch aufgetragen.

In dieser halblogarithmischen Darstellung erscheint die Korrelation in weiten Temperaturbereichen näherungsweise als Gerade, sodass

$$[H_2CO] = A \exp BT,$$

oder in logarithmischer Form

$$\log [H_2CO] = \log A + BT$$

mit temperaturunabhängigen Größen A und B , die sich aus der Korrelation leicht ermitteln lassen, gelten muss.

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, hängt diese Korrelation nicht davon ab, welche der experimentell bestimmten Zylinderdruckkurven als zeitliche Randbedingung für die Berechnung gewählt wird; die Korrelation ist ausserdem von der Temperatur des Gases am unteren Totpunkt unabhängig.

Für örtliche Fluktuationen $\Delta \log [H_2CO] = \log [H_2CO]_1 - \log [H_2CO]_2$ und $\Delta T = T_1 - T_2$ zwischen zwei Punkten 1 und 2 gilt also (der Term $\log A$ fällt bei der Differenzbildung heraus):

$$\frac{\Delta \log [H_2CO]}{\Delta T} = B$$

Somit lässt sich die Abweichung ΔT der Temperatur vom örtlichen Mittelwert abschätzen, wenn die Abweichung $\Delta \log [H_2CO]$ bekannt ist:

$$\Delta T = \frac{\Delta \log [H_2CO]}{B}$$

3.2 Auswertung der Messsignale

Das gemessene Fluoreszenzsignal I hängt bei gegebenen Werten der Formaldehydkonzentration, Laser-Anregungsenergie und Detektionseffizienz noch von äusseren Bedingungen (Temperatur, Druck, Gemischzusammensetzung) ab. Da die Gemischzusammensetzung in unserem Motor sehr homogen ist, trifft das Formaldehyd überall im wesentlichen die gleichen Stosspartner an, so dass die örtliche Änderung der

Fluoreszenzausbeute aufgrund von Variationen in der chemischen Zusammensetzung vernachlässigbar ist. Der Druck ist im Brennraum örtlich konstant, so dass es keine räumliche Variation der Fluoreszenzausbeute aufgrund von Druckunterschieden geben kann. Es bleibt die Temperatur als wesentliche Einflussgröße zu betrachten. Die thermische Population der laserangeregten Grundzustände wurde unter Benutzung der Vibrationsfrequenzen des H_2CO -Moleküls aus [12] und mit dem Programm WANG [11] berechnet. Sie ändert sich im hier zu betrachtenden Bereich zwischen 700K und 1000K etwa sechsmal weniger stark mit der Temperatur als die Konzentration von Formaldehyd. Unter Annahme eines $T^{1/2}$ -Ansatzes für die Stosslöschung der Fluoreszenz (Quenching) ergibt sich im Bereich [700K;1000K] eine temperaturbedingte Änderung der Fluoreszenzintensität, die um fast 2 Größenordnungen geringer ist als die Änderung durch Variation der Formaldehydkonzentration.

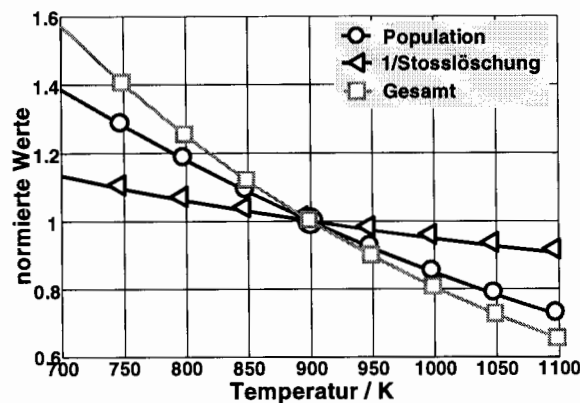


Abbildung 2 Berechnete Änderung der thermischen Population des Grundzustands bei Anregung von Formaldehyd nahe 339.3 nm und Änderung der Fluoreszenzausbeute unter Einfluss von Stosslöschung ($1/T^{1/2}$ -Gesetz), sowie das Produkt dieser Größen. Alle Größen sind auf Wert 1 bei 900K normiert.

Der Gesamteffekt dieser Änderung der Fluoreszenzintensität bei gegebener Anzahldichte und Anregungsenergie (vgl. Abbildung 2) aufgrund von lokalen Temperaturänderungen kann im betrachteten Temperaturbereich sehr gut durch eine Exponentialfunktion der Form $D \exp(ET)$ angenähert werden, mit temperaturunabhängigen Größen D und E .

Die Abhängigkeit des gemessenen Fluoreszenzsignals von der Temperatur kann somit in unserem Fall ausgedrückt werden als Produkt aus der Formaldehydkonzentration $A \exp(BT)$, der Fluoreszenzeffizienz $D \exp(ET)$ und einer Konstante K , die die Beeinflussung des Signals durch instrumentelle Größen wie Abbildung, Gesamttransmission des optischen Systems und Effizienz der Detektoren beschreibt:

$$I = A \exp(BT) D \exp(ET) K$$

Nach Bildung des Logarithmus

$$\log I = \log A + BT + \log D + ET + \log K$$

A , B , D , E , und K hängen nicht von der Endgastemperatur ab. Demnach gilt für die Differenz $\Delta \log I$ der logarithmischen Signalintensität zwischen 2 Ortspunkten 1 und 2:

$$\Delta \log I = \log I_2 - \log I_1 = B(T_2 - T_1) + E(T_2 - T_1) = B \Delta T + E \Delta T$$

da $\log A$, $\log D$ und $\log K$ bei Differenzbildung herausfallen. Damit ist

$$\Delta T = \frac{\Delta \log I}{B + E}. \quad (3.1)$$

Mit dieser Gleichung kann die örtliche Temperaturfluktuation direkt aus der Variation des Logarithmus der gemessenen Fluoreszenzintensität I bestimmt werden; es sind nur noch die Größen B und E erforderlich, die sich durch kinetische bzw. spektroskopische Modellierung abschätzen lassen.

Die Genauigkeit der Methode wird zum einen durch die Genauigkeit in der Bestimmung der Größen B und E bestimmt. Da B und E durch Rechnungen ermittelt werden, hängt ihre Genauigkeit wiederum von der Qualität der verfügbaren chemischen bzw. spektroskopischen Informationen ab. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass Fluktuationen $\Delta \log I$ auch von Signalrauschen herrühren können. Wenn diese Fluktuationen in Gl. 3.1 mit eingesetzt werden, resultieren zu hohe Werte für ΔT . Dieser Einfluss des Signalrauschens kann einfach durch LIF-Messung einer räumlich homogenen Formaldehydverteilung (z.B. in einer Messzelle) bei gleicher Signalstärke wie in den Motormessungen ermittelt und eliminiert werden.

4 Experimentelles

4.1 Motor

In Abbildung 3 ist eine Skizze des Motors mit optisch zugänglichen Brennraum gezeigt. Es handelt sich um einen Zweitakt-Motor (ILO L 372), dessen Zylinderkopf durch eine Anordnung aus einem Quarzglasring, Quarzglasblock und einem Spanning ersetzt wurde. Diese Konstruktion erlaubt die Einstrahlung von Laserlicht in den Brennraum von der Seite sowie die vollständige und verzerrungsfreie Beobachtung des gesamten Brennraums von oben. Der Motor arbeitet mit äußerer Gemischbildung, und wird mit Mischungen aus iso-Oktan und n-Heptan als Kraftstoff betrieben. Er ist mit einem Kurbelwinkelgeber ausgestattet, der bei jeder Umdrehung Spannungspulse liefert, die zur Synchronisation des Motorzyklus mit dem restlichen Experiment benutzt werden können. Es wird nur jeder fünfte Zyklus gefeuert, die restlichen Zyklen werden zur Auspülung von Abgas aus dem Zylinder benutzt.

4.2 Experimenteller Aufbau

Die Detektion von Formaldehyd mit laserinduzierter Fluoreszenz wurde mit dem in Abbildung 4 gezeigten Aufbau durchgeführt. Ein von einem XeCl-Excimer Laser (Lambda Physik LPX 200) gepumpter, abstimmbarer Farbstofflaser (Lambda Physik FL 3002) lieferte 20 Nanosekunden lange Pulse mit einer Wellenlänge von 339,3 nm. Diese Laserpulse wurden über eine Anordnung von Linsen und Blenden durch den Quarzglasring in den Brennraum des gefeuerten Motors gelenkt. Im Endgas des Motors ergab sich bei dieser Wellenlänge ein starkes Fluoreszenzsignal. Durch eine Analyse des Fluoreszenz-Emissionssignals wurde Formaldehyd als einziger Emittent identifiziert.

Formaldehyd zeigt im nahen Ultraviolett eine sehr ausgeprägte Absorptionsstruktur. Diese kommt durch kombinierte elektronische und ro-vibronische Übergänge des Formaldehydmoleküls zustande; diese Übergänge sind von anderen Autoren untersucht worden [12]. Wir benutzten zur Anregung der Formaldehydfluoreszenz eine Wellenlänge von 339,3 nm. Mit dieser Wellenlänge wird das $2_0^1 4_0^1$ -Schwingungsband im elektronischen $A^1 A_2 - X^1 A_1$ Übergang angeregt.

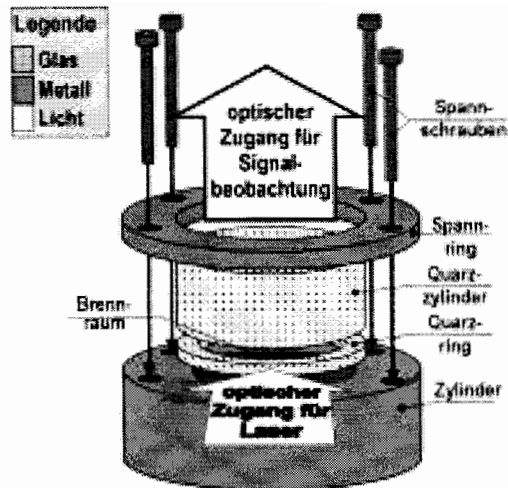


Abbildung 3 Skizze des für die Untersuchungen verwendeten optisch zugänglichen Motors mit optische zugänglichem Brennraum.

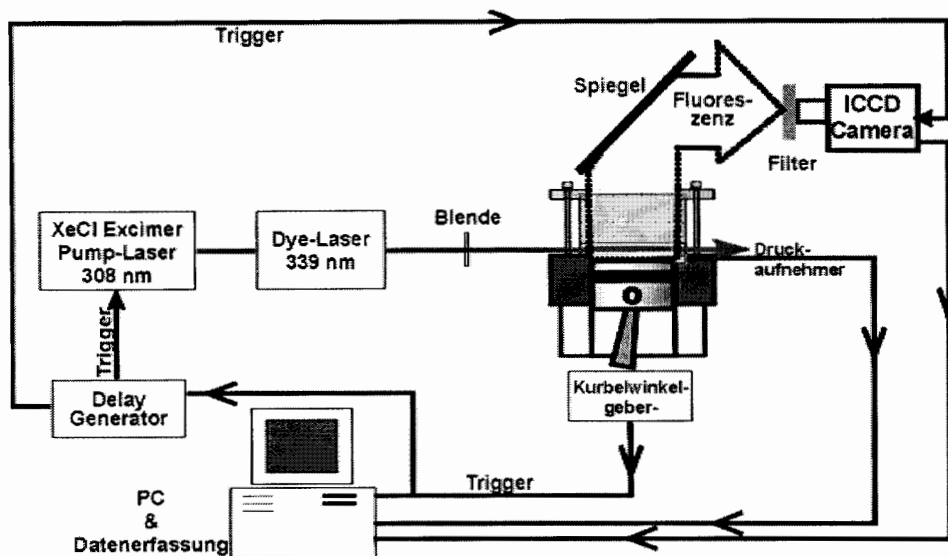


Abbildung 4 Schema des experimentellen Aufbaus zur Detektion der Formaldehyd-Fluoreszenz im Endgas.

5 Resultate

5.1 Fluktuationen der LIF-Intensität

In Abbildung 5 ist oben ein H_2CO -LIF-Bild aus dem Endgas des gefeuerten Motors gezeigt. Es wurde am oberen Totpunkt bei Motorbetrieb mit 95%iso-Oktan und 5%n-Heptan bei 1000 U/min aufgenommen und zeigt einen 3,5 cm langen Bereich in der Mitte des Brennraums, also weit von den Zylinderwänden entfernt. Unten ist das durch Summation der Grauwerte aus gleichen Bildspalten erhaltene Intensitätsprofil $I(x)$ gezeigt. Das Intensitätsprofil wurde durch Subtraktion des örtlichen Mittelwertes und Teilung durch diesen Mittelwert normiert. Wie zu sehen ist, zeigen die LIF-Profile durchwegs ausgeprägte örtliche Intensitätsfluktuationen. Diese sind in ähnlichen

Experimenten an Formaldehyd auch von anderen Gruppen beobachtet worden [8] und lassen sich ebenso bei anderen intermediären Spezies im Endgas finden [9].

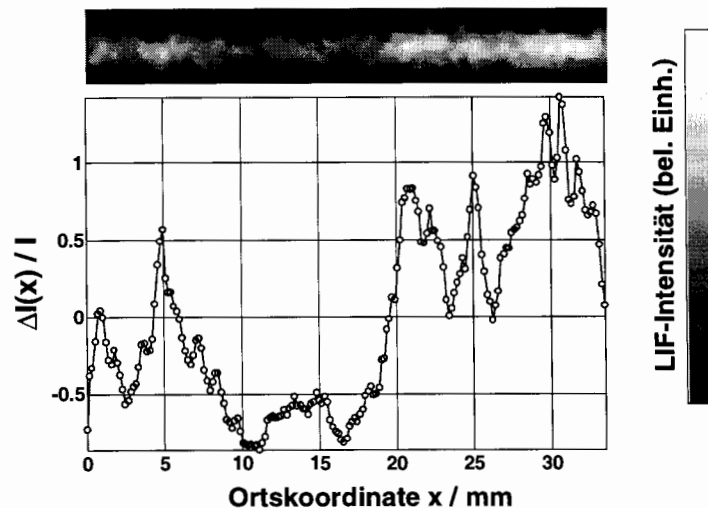


Abbildung 5 LIF-Intensitätsprofil von Formaldehyd im Endgas des Motors, RON 95, aufgenommen bei OT. Oben ist ein typisches LIF-Bild gezeigt, unten das entsprechende, durch Summation der Grauwerte über Zeilen enthaltene, normierte Intensitätsprofil $\Delta I(x) / I$, wobei I den Mittelwert des Profils bezeichnet.

Sie können nicht auf Inhomogenitäten des Kraftstoff/Luft-Gemisches zurückgeführt werden, da dieses –wie in vorherigen Untersuchungen bestätigt- keine wesentlichen Schwankungen aufweist. Die Fluktuationen müssen hauptsächlich von unterschiedlichen Bildungsgeschwindigkeiten des H_2CO unter dem Einfluss lokal leicht verschiedener Endgastemperaturen stammen.

5.2 Abschätzung von Temperaturfluktuationen

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3.1 und 3.2 kann in unserem Fall die Temperaturfluktuation aus dem gemessenen Fluoreszenzsignal durch Gl. 3.1 abgeschätzt werden. In Abbildung 6 ist beispielhaft ein LIF-Bild sowie das hieraus ermittelte Profil der Temperaturfluktuation gezeigt. Das Bild wurde am oberen Totpunkt (OT) aufgenommen und vor der Auswertung zur Rauschminderung mit einem Medianfilter prozessiert. Durch Aufsummieren der Bildgrauwerte aus gleichen Spalten (Binning) wurde aus dem Bild ein eindimensionales LIF-Intensitätsprofil erhalten, aus dem sich das gezeigte Profil der Temperaturschwankung berechnen lässt. Aus dem Profil ist evident, dass merkliche Temperaturfluktuationen vorhanden sind; die Amplitude der Schwankungen ergibt sich mit den Werten für B und E zu etwa $\pm 10K$; die Fluktuationen haben eine örtliche Ausdehnung im Bereich zwischen etwa 1mm und 1cm. Aus der Auswertung von 32 solchen Bildern wurde die in Abbildung 7 gezeigte Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (engl.: probability density function, pdf) der Abweichung von Endgastemperaturen vom örtlichen Mittelwert erhalten. Dabei wurden in der Auswertung nur Regionen aus dem mittleren Bereich des Brennraumes betrachtet (mindestens 20mm von der Zylinderwand entfernt). Das Signalrauschen bewirkte in unserem Fall eine unwesentliche Erhöhung der Temperaturfluktuations-Messwerte um etwa 5%. Aus dem guten Fit mit einer Gauss-Kurve kann auf eine Normalverteilung geschlossen werden.

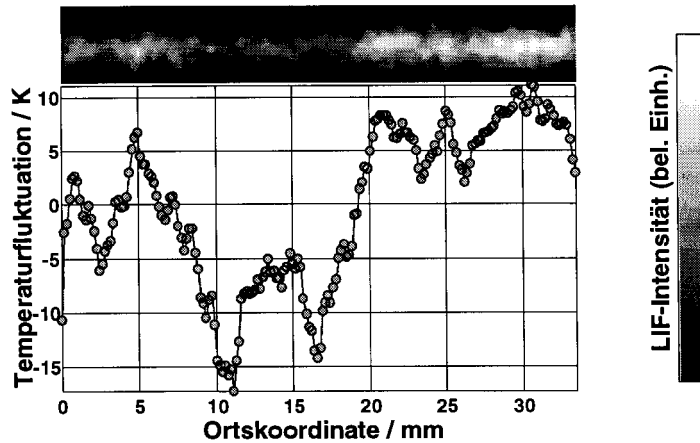


Abbildung 6 Oben: LIF-Bild von Formaldehyd im Endgas, aufgenommen bei OT, RON 95. Unten: Das hieraus ermittelte Profil der örtlichen Temperaturfluktuation um den Mittelwert.

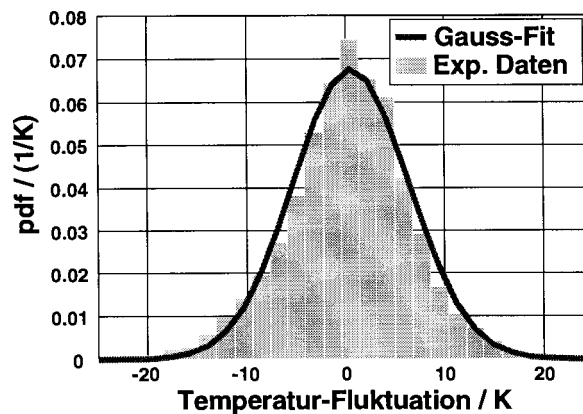


Abbildung 7 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (pdf) örtlicher Temperaturfluktuationen im Endgas, ermittelt am oberen Totpunkt, RON=95.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es wurde ein Verfahren zur orts aufgelösten Messung kleiner räumlicher Temperaturfluktuationen im Endgas von Motoren entwickelt. Die Methode beruht auf der Visualisierung von Formaldehyd, das im Endgas während der Kompressionsphase gebildet wird, mit laserinduzierter Fluoreszenz (LIF). Aus den örtlichen Fluktuationen des LIF-Signals ließen sich unter Bedingungen, die in dieser Arbeit diskutiert werden, relative örtliche Fluktuationen der Formaldehyd-Konzentration ermitteln. Diese wurden in Verbindung mit Korrelationen zwischen Endgastemperatur und Formaldehydkonzentration, die unter Nutzung detaillierter chemischer Modelle berechnet wurden, zu einer Abschätzung räumlicher Temperaturfluktuationen im Endgas herangezogen.

Anwendung der Technik auf einen Versuchsmotor zeigte, dass in nominell homogenen Endgas eines Versuchsmotors beträchtliche Temperaturfluktuationen vorhanden sind. Es konnte abgeschätzt werden, dass diese Fluktuationen typischerweise im Bereich von $\pm 10\text{K}$ liegen. Die Längenskalen reichen von 1mm bis über 1cm.

Die Methode ist von besonderem Interesse für Untersuchungen des Motorklopfens und für Entwicklung und Modellierung von HCCI-Motoren, da das Einsetzen der Selbstzündung nicht vom örtlichen Temperaturmittelwert, sondern von der höchsten im Endgas vorhandenen Temperatur, und damit von der Fluktuationsamplitude bestimmt wird.

- [6] K. Schiedl, F. Fixl, A. Diezler, and U. Maas. *Formaldehyde formation in the endgas of Otto engines: Numerical simulations and quantitative concentration measurements*. Combustion Science and Technology, 149, 1999, 339-360
- [7] B. Bäuerle, J. Warnatz, and F. Behrendt. *Time resolved investigation of hot spots in the end gas of an S.I. engine by means of 2-D double pulse LIF of formaldehyde*. 26th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1996, 2619-2626
- [8] N. Graf, J. Gronki, Ch. Schulz, T. Baritaud, J. Chereh, P. Duret, J. Lavy: *In-Cylinder Combustion Visualisation in an Auto-Igniting Gasoline Engine using Fuel-Tracer- and Formaldehyde-LIF imaging*, SAE Technical Paper Series No. 2001-01-1924, 2001.
- [9] R. Schießl and U. Maas: *Analysis of endgas temperature fluctuations in an SI engine by laser-induced fluorescence*, Combustion and Flame (2003), im Druck
- [10] U. Maas et al, *Ignition Processes in Hydrogen/Oxygen Mixtures*, Comb. and Flame 74, 1988, 53 ff.
- [11] D. Luckhaus and M. Quack. Mol. Phys., 68(3), 1989, 745-758
- [12] J. Clouthier D. and A. Ramsay: *The spectroscopy of Formaldehyde and Thioformaldehyde*. Ann. Rev. Phys. Chem., 34, 1983, 31-58