

## **Räumliche Temperaturfluktuationen im Endgas von HCCI-Motoren: Nachweis und Einfluss auf Charakteristika der Verbrennung**

### **Spatial temperature fluctuations in the endgas of HCCI-Engines: Detection and Influence on Combustion Characteristics**

**O. Maiwald, R. Schießl und U. Maas**, Institut für Technische Verbrennung, Universität Stuttgart

#### **1. Einleitung**

In Verbrennungsmotoren ist die Temperatur des Kraftstoff-Luft-Gemisches von entscheidendem Einfluss auf wichtige Charakteristika der Verbrennung, wie zum Beispiel auf das Selbstzündungsverhalten. Vor allem vor dem Hintergrund der Entwicklung von Motoren, die auf der Selbstzündung vorgemischter Ladungen basieren, häufig als HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) oder CAI (Controlled Auto Ignition) bezeichnet [1], gewinnt die Analyse von Temperaturfeldern immer mehr an Bedeutung.

In diesem Beitrag werden räumliche Temperaturfluktuationen im Endgas von Motoren untersucht. Die laserinduzierte Fluoreszenz von Bestandteilen des Endgases wird benutzt, um Konzentrationsfluktuationen von Formaldehyd ( $\text{H}_2\text{CO}$ ) zu ermitteln. Diese Messung, kombiniert mit berechneten Korrelationen zwischen Endgastemperatur und Konzentration intermediärer Spezies, liefert orts aufgelöste Profile der Temperaturfluktuation im Endgas und ergibt so Informationen über die statistische Verteilung der Fluktuationsamplituden und Fluktuationswellenlängen.

Die Wichtigkeit dieser Information wird an der Berechnung des Selbstzündverlaufs in einem HCCI-Motor durch ein statistisches Ensemble homogener Reaktoren gezeigt. Dieses Reaktorensemble kann die gemessene Zylinderdruckkurve recht gut abbilden, wenn ihm eine anfängliche Temperaturverteilung entsprechend der gemessenen Fluktuationen aufgeprägt wird. Die Zylinderdruckkurve eines mager betriebenen HCCI-Motors kann demnach also gut mit einer sequentiellen, örtlich verteilten Selbstzündung des Endgases entsprechend der temperaturabhängigen lokalen Zündverzugszeit modelliert werden, bei der die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Ortsbereichen durch Transportprozesse oder gasdynamische Effekte in erster Näherung vernachlässigbar ist.

## 2. Versuchsbeschreibung

Bei dem Versuchsträger handelt es sich um einen für HCCI-Untersuchungen modifizierten Einzylinder 2-Takt Motor (ILO L 372) mit elektrischer Ansaugluftvorwärmung äußerer Gemischbildung mittels elektromagnetischem Einspritzventil sowie einem Scheibenbrennraum. In Tabelle 1 sind einige Motordaten aufgeführt.

Typ	ILO 372, optischer 2-Takt-HCCI-Motor
Bohrung	80 mm
Hub	74 mm
Hubraum	368,4 cm <sup>3</sup>
Drehzahl	1000 min <sup>-1</sup>
geometrische Verdichtung	20,7
Effektive Verdichtung	9,0
Luft-Kraftstoff-Verhältnis	> 1,8
Kraftstoff	Iso-Oktan/Aceton 90:10
Gemischaufbereitung	Bosch Otto-DE-Injektor

**Tabelle 1:** Daten des optischen HCCI-Motors

Der Brennraum des Motors verfügt über einen optischen Zugang. Über einen Quarzglasring am oberen Ende des Zylinders kann ein Laserstrahl eingekoppelt werden. Optische Verbrennungsaufnahmen sind von oben über eine Quarzglasscheibe möglich, die zugleich auch den Zylinderkopf darstellt. Dadurch ist eine vollständige und verzerrungsfreie Beobachtung des gesamten Brennraums gewährleistet.

Für vergleichbare thermische Randbedingungen wird der Motor im „Skip-Fire“-Modus, d.h. alternierend mit und ohne Kraftstoffeinspritzung bzw. Verbrennung, betrieben.

Für die Fluoreszenzanregung von Aceton kommt ein gepulster XeCl-Excimerlaser (308 nm) zum Einsatz. Die Anregung des  $2_0^1 4_0^1$  Schwingungsbandes im elektronischen  $A^1A_2 - X^1A_1$ -System von H<sub>2</sub>CO erfolgt durch einen XeCl-Excimerlaser gepumpten, gepulsten Farbstofflaser, der bei 339,3 nm emittiert. Für die Detektion der laserinduzierten Fluoreszenz werden zwei ICCD-Kameras verwendet. Ein Schema des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 1 dargestellt.

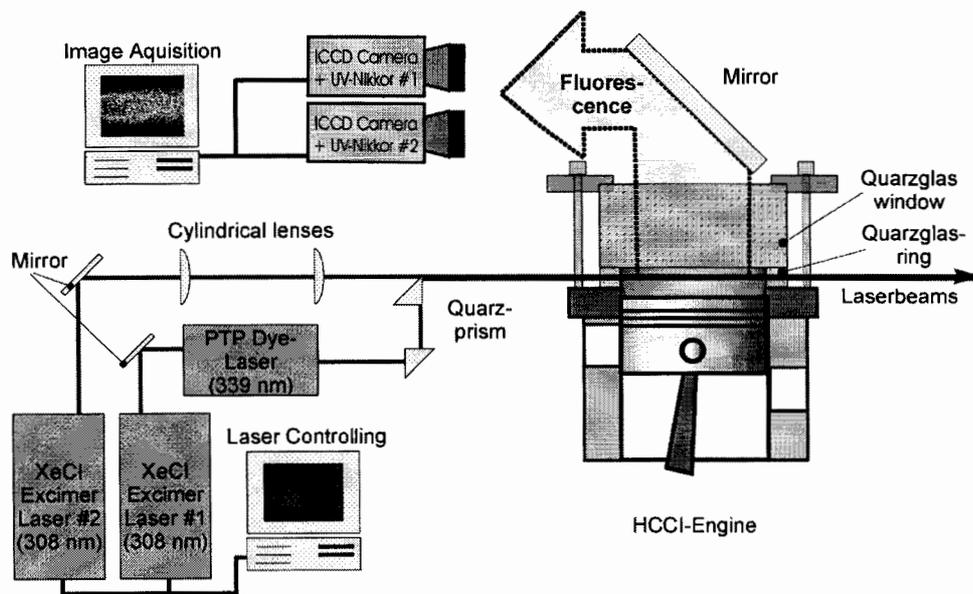


Abbildung 1: Schema des experimentellen Aufbaus

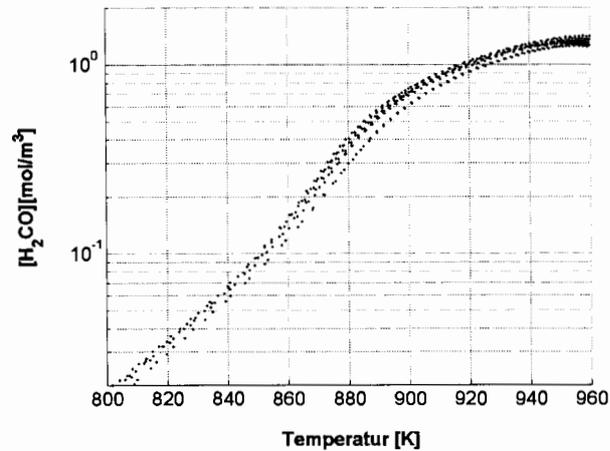
### 3. Prinzip des Messverfahrens

Die Bestimmung von Temperaturfluktuationen im Motor beruht auf der Visualisierung von Konzentrationsverteilungen im Endgas mit laserinduzierter Fluoreszenz und mit detaillierter Kinetik berechneten Korrelationen zwischen der Temperatur und der Formaldehydkonzentration [2, 3].

Berechnungen ergeben, dass für die Bedingungen des komprimierten Endgases viele der thermochemischen Größen wie Druck, Temperatur und Spezieskonzentrationen korreliert sind; in vielen Fällen ist diese Korrelation zudem insensitiv gegen Änderungen der Anfangsbedingungen ( $p_0, T_0, c_0$ ) und dem zeitlichen Verlauf des Zylinderdrucks  $p(t)$ . Ein Beispiel bildet die Beziehung zwischen Gastemperatur  $T(t)$  und Formaldehydkonzentration  $[H_2CO](t)$ ; deren Korrelationskurven für verschiedene Druckverläufe  $p(t)$  und Anfangstemperaturen  $T(0)$  sind in Abbildung 2 gezeigt.

In log- Darstellung aufgetragen, ergibt sich in typischen Endgastemperaturbereichen ein linearer Zusammenhang  $\log([H_2CO]) = A + BT$  mit konstanten  $A$  und  $B$ , die sich aus der Simulation bestimmen lassen. Mit spektroskopischen Berechnungen lässt sich ermitteln, dass für das Endgas im Motor in dem fraglichen Temperatur- und Druckbereich das Fluoreszenz-Signal  $I$  innerhalb einer Einzelschuss-Messung in sehr guter Näherung proportional zur Formaldehyd-Anzahldichte ist [2,3]. Für die Temperaturfluktuation  $\Delta T$  lässt sich dann schreiben

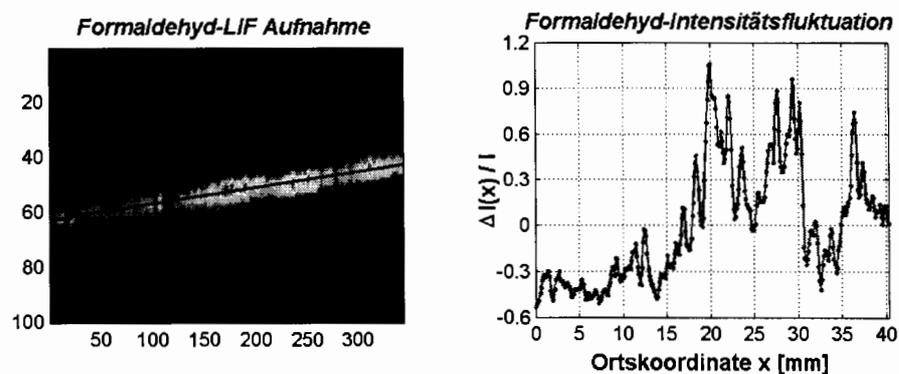
$$\Delta T = \frac{\Delta \log I}{B + E}$$



**Abbildung 2:** Korrelation zwischen  $[H_2CO]$  und  $T$ , ermittelt für einen Motor mit 1000 U/min; für die Berechnung wurden experimentell ermittelte Zylinderdruckkurven als zeitliche Zwangsbedingung dem System aufgeprägt.

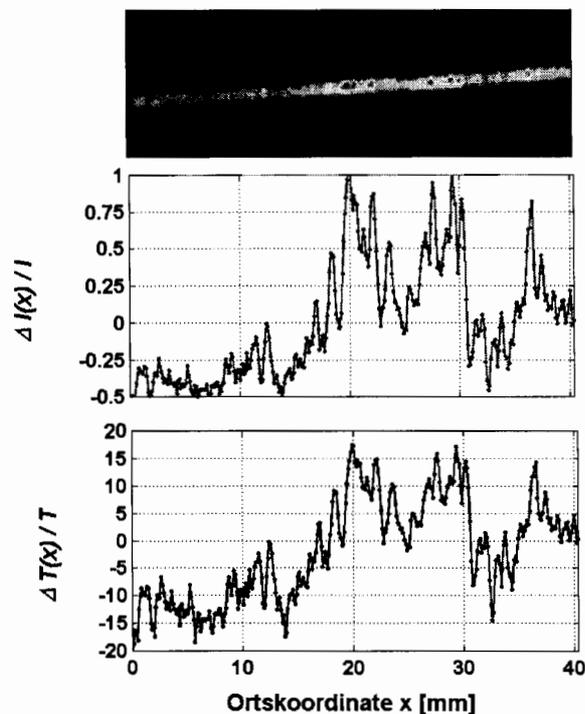
Die Konstante  $B$  lässt sich einfach aus der Korrelationskurve zwischen  $\log [H_2CO]$  und  $T$  ermitteln, während sich die Konstante  $E$  aus spektroskopischen Berechnungen bestimmen lässt [3]. Aus dieser Beziehung können für die Bedingungen des Endgases in unserem Motor Temperaturfluktuationen direkt aus dem Logarithmus der LIF-Signalfuktuationen  $\Delta \log I$  abgeschätzt werden.

#### 4. Resultate



**Abbildung 3:** Eindimensionaler Intensitätsverlauf des  $H_2CO$ -LIF Signals. Das Signal wurde bei 8°KW vor OT aufgenommen.

Abbildung 3 zeigt eine typische LIF-Aufnahme von Formaldehyd aus dem Motor (8°KW v.ZOT); es zeigen sich deutliche örtliche Inhomogenitäten. Simultan erhaltene Fluoreszenzbilder von Aceton, das dem Kraftstoff als Tracersubstanz zugemischt (10 Vol-%) wurde, zeigen dagegen keine wesentlichen Inhomogenitäten, was auf eine nahezu vollständige Durchmischung von Kraftstoff und Luft schliessen lässt. Fluktuationen des H<sub>2</sub>CO-LIF Signals sind auch von anderen Gruppen in ähnlichen Experimenten beobachtet worden [4], und lassen sich auch bei anderen intermediären Spezies nachweisen [2]. Aus spektroskopischen Abschätzungen [3] folgt, dass die Signalfluktuationen fast ausschließlich von Konzentrationsänderungen der Spezies als Folge der stark temperaturabhängigen chemischen Bildungsgeschwindigkeiten im Temperaturbereich von etwa 700 K bis 1000 K stammen müssen.



**Abbildung 4:** H<sub>2</sub>CO LIF Bild, unten entsprechendes  $\Delta H_2CO$  und daraus ermitteltes  $\Delta T$ -Profil

Unter Nutzung der für Motorbedingungen berechneten Korrelation zwischen H<sub>2</sub>CO und Endgastemperatur  $T$  können relative Signalfluktuationen in absolute Temperaturfluktuationen umgerechnet werden [2,3]. Abbildung 4 zeigt als typisches Resultat ein H<sub>2</sub>CO LIF Bild, sowie die relative Signalfluktuations und die hieraus ermittelte Temperaturfluktuation.

## 5. Numerische Untersuchung des Selbstzündungsprozesses bei HCCI

Für das Studium des Selbstzündungsprozesses wurden Berechnungen mit dem Programm INSFLA angestellt [5]. Dieses Programm erlaubt die eindimensionale Berechnung der Zeitentwicklung instationärer chemischer Reaktionssysteme mit detaillierter Chemie und molekularen Transportprozessen.

Die Simulationen beginnt bei einem Gas mit der chemischen Zusammensetzung und mittleren Temperatur des Endgases, dem anfängliche, örtlich leicht fluktuierende Temperaturverteilungen, entsprechend den experimentell bestimmten Fluktuationsamplituden und -wellenlängen aufgeprägt werden.

Für die Bedingungen des Endgases gegen Kompressionsende zeigen eindimensionale, numerische Simulationen mit chemischer Kinetik und detailliertem Transport, dass von den in den Erhaltungsgleichungen für Speziesmassen und Energie auftretenden Termen die chemischen Quellterme bei weitem die vorherrschenden Größen sind, und Transportprozesse (Diffusion, Wärmeleitung) demgegenüber praktisch vernachlässigbar sind.

Dabei zeigt sich, dass die simulierten Reaktionsfortschrittsgeschwindigkeiten recht gut mit experimentellen Daten aus optischen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen übereinstimmen.

## 6. Synthese experimenteller und numerischer Daten - Folgerungen

Aus den experimentellen und numerischen Befunden lässt sich folgendes Bild des Selbstzündungsprozesses in dem oben beschriebenen HCCI-Motor ableiten:

Im Endgas existieren, trotz eines *nominell* homogenen Gemisches, räumliche Temperaturfluktuationen, deren Amplitude gering (wenige 10 K), für den Verlauf der Selbstzündung aber dennoch von entscheidender Bedeutung ist. Die räumliche Ausdehnung dieser Inhomogenitäten liegt typischerweise im Bereich mehrerer Millimeter. Dies folgt aus der Analyse der mit Formaldehyd-LIF erhaltenen experimentellen Befunde.

Die lokal verschiedenen Temperaturen führen in der Kompressionsphase (Bereich der Niedertemperaturchemie) zu merklich verschiedenen chemischen Produktionstermen für Speziesmassen und Wärmefreisetzung. Die so entstehenden zunehmenden Konzentrations- und Temperaturgradienten können durch Transportprozesse (Diffusion, Wärmeleitung) bei niedriger Turbulenz nicht abgebaut werden, da die hierdurch lokal abgeführten Wärme- und Stoffmengen für typische Endgasbedingungen um mehr als 3 Größenordnungen geringer sind als die durch chemische Produktion neu entstehenden. Es resultiert schließlich ein Selbstzündungsprozess, beginnend an den Stellen mit der geringsten Zündverzugszeit. Bei hinreichend mageren Gemischen ( $\lambda > 1,8$ ), wie sie typischerweise bei HCCI-Motoren zum

Einsatz kommen, ist nach den bisherigen Erkenntnissen die Wärmefreisetzung nicht schnell genug, um merkliche örtliche Druckstörungen zu generieren [5,6]; insbesondere kann sich keine druckinduzierte Zündung aufgrund der lokalen Erwärmung durch Stosswellen ausbilden, wie sie für das Motorklopfen typisch ist.

Die Selbstzündung unter den beschriebenen Bedingungen ist also eine sequentielle Selbstzündung verschiedener Endgasbereiche entsprechend der lokalen Zündverzugszeit, die hauptsächlich von der Temperatur bestimmt wird. Die verschiedenen Brennbereichbereiche verhalten sich dabei weitgehend unabhängig voneinander, es gibt bei geringer Turbulenz keine wesentliche Interaktion durch Wärmeleitung und Diffusion (wie es bei einer flammenartigen Verbrennung der Fall ist) oder durch Stosswellen (wie es bei druckinduzierten Zündungen oder Detonationen der Fall ist).

Eine Folge ist, dass der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzung, ebenso wie die chemische Kinetik im Endgas, in erster Näherung durch ein Ensemble homogener, voneinander unabhängiger chemischer Reaktoren modelliert werden kann. Die experimentell ermittelte statistische Verteilung der Endgastemperatur wird als Anfangsbedingung einem statistischen Ensemble homogener Reaktoren eingesetzt. Dieses Reaktorenensemble liefert ein Ensemble von Zylinderdruckkurven, das die sequentielle Selbstzündung widerspiegelt. Die Ensemble-gemittelte Druckkurve kann direkt mit gemessenen Druckkurven verglichen werden (siehe Abbildung 5).

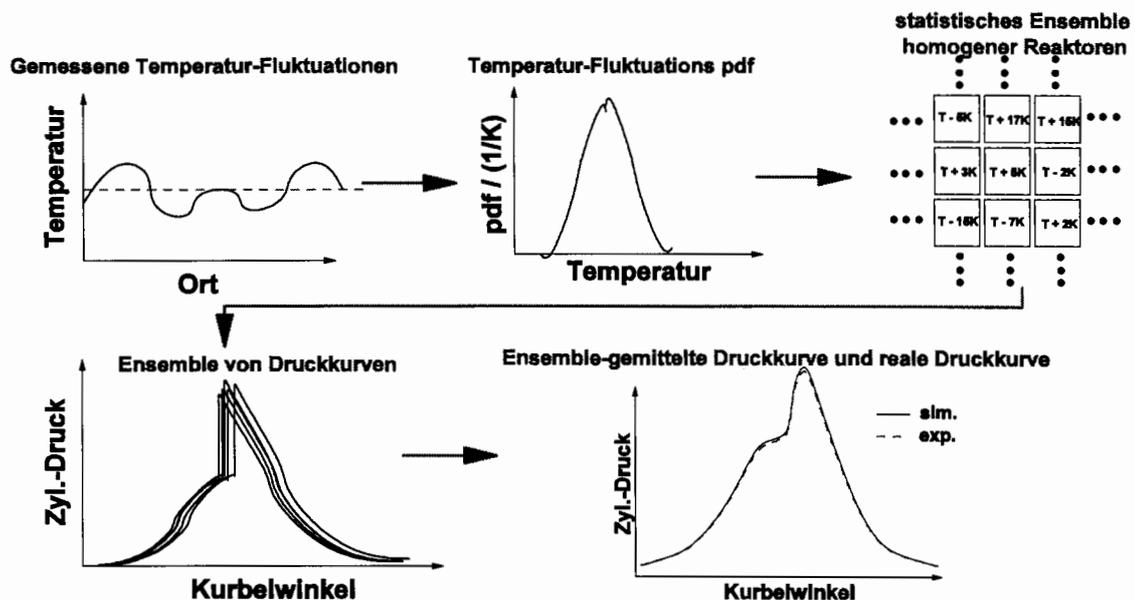
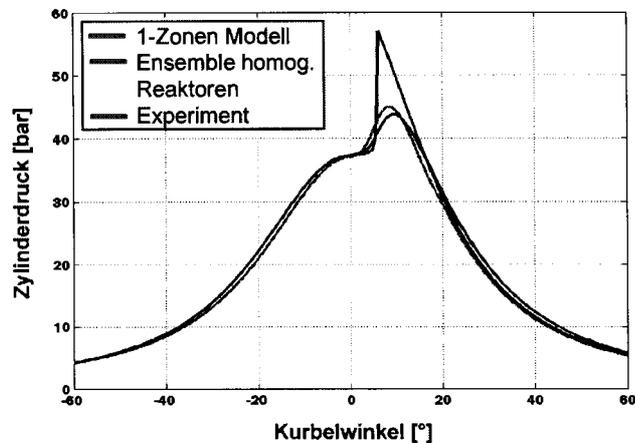


Abbildung 5: Schematische Darstellung zur Berechnung ensemblegemittelter Zylinderdruckkurven.

In der Tat ergeben entsprechende Rechnungen eine sehr gute Vorhersage für den real gemessenen Zylinderdruckverlauf bei der Selbstzündung, wenn die mit LIF gemessenen Temperaturfluktuationen als Anfangsbedingungen für das statistische Ensemble eingesetzt werden (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Berechnete Zylinderdruckkurve eines motorischen HCCI-Verbrennungsprozesses unter Verwendung eines 1-Zonen-Modells sowie einem Ensemble homogener Reaktoren. Zum Vergleich ist außerdem eine experimentell ermittelte Druckkurve dargestellt.

## 7. Literatur

- 
- [1] R. H. Thing, Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engines, SAE Paper No. 830264, 1983
  - [2] R. Schiessl, U. Maas: *Analysis of endgas temperature fluctuations in an SI engine by laser-induced fluorescence*, Combustion and Flame 133:19-27 (2003)
  - [3] O. Maiwald, R. Schießl, U. Maas: *Visualisierung von Temperaturfluktuationen in einem Ottomotor mit laserinduzierter Fluoreszenz*, Beitrag in Berichte zur Energie- und Verfahrenstechnik: Motorische Verbrennung, VI. Tagung, 209-217 (2003)
  - [4] N. Graf, J. Gronki, Ch. Schulz: *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)
  - [5] U. Maas, J. Warnatz: *Detailed Numerical Modeling of H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Ignition by Hot Spots*, Progress in Astronautics and Aeronautics Volume 131, 526 (1989)
  - [6] O. Maiwald, R. Schießl, U. Maas: *Laser-Diagnostic Measurements and Modeling of Combustion in HCCI Engines*, Combustion and Atmospheric Pollution, 123-126 (2003)