

Dissertation ETH Nr. 14939

**EXPERIMENTELLER BEITRAG ZUR  
CHARAKTERISIERUNG  
DER GEMISCHBILDUNG UND VERBRENNUNG  
IN EINEM  
DIREKTEINGESPRITZTEN, STRAHLGEFÜHRTEN  
OTTOMOTOR**

ABHANDLUNG

Zur Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

KATHARINA SCHÄNZLIN

Dipl. Phys. TU Darmstadt  
geboren am 01.12.1971  
deutsche Staatsangehörige

angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. K. Boulouchos, Referent  
Prof. Dr. M.K. Eberle, Korreferent  
Prof. Dr. M. Bargende, Korreferent

2002

## Kurzzusammenfassung

Diese Dissertation behandelt die gemischbildungs- und verbrennungsrelevanten chemisch-physikalischen Phänomene in einem direkteingespritzten, strahlgeführten Ottomotor. Ziel dieser Arbeit war somit die Beschreibung und Darstellung der Gemischbildung und Verbrennung sowie der währenddessen ablaufenden Prozesse.

Um diese Charakterisierung durchführen zu können, wurden weitreichende experimentelle Untersuchungen am Einzylinderprüfstand wie auch in einer Hochdruck-Hochtemperatur-Zelle durchgeführt. Darunter fallen die Untersuchung der Hydrodynamik des Kraftstoffstrahles in der Hochdruck-Hochtemperatur-Zelle mit Hilfe der Mie-Streuung und der Gegenlichtaufnahme unter variierten Zellenbedingungen bis zu Drücken und Temperaturen, die denen im realen Motor gleich kommen. Diese Untersuchungen dienten auch der Validierung von dreidimensionalen Berechnungen anhand eines KIVA-Modells, welches in einer parallel entstandenen Dissertation [1] durchgeführt wurde.

Auch im Motor wurde die flüssige Phase der Kraftstoffstrahlausbreitung mit Hilfe der Endoskopie untersucht. Diese Messmethode wurde im Rahmen der Arbeit entwickelt; das Besondere ist, dass nur ein optischer Zugang für Beleuchtung und Beobachtung benötigt wird, was die konstruktiven Eingriffe für diese Messtechnik reduziert und gleichzeitig eine mögliche thermodynamische Störung der Verbrennungsvorgänge durch evtl. veränderte Wandwärmeverluste minimiert.

Zur routinemässigen Verbrennungsuntersuchung wurde eine Druckindizierung verwendet. Die Auswertung der Druckverläufe erfolgte anhand des hausinternen Wärmeentwicklungsprogrammes WEG.

Zusätzlich wurde die Verbrennung innermotorisch mit Hilfe von optischen Methoden untersucht. Hierunter fallen die Endoskopie, die Spektrographie, die Lichtwellenleiterzündkerze sowie die Zweifarbenmethode. Ausserdem wurde als elektrochemische Methode die Ionenstromsondentechnik angewendet, welche im Rahmen der Arbeit entwickelt wurde. Es resultiert sowohl aus den Ionenstromsondenuntersuchungen wie auch aus der Endoskopie ein visueller Eindruck der Flammausbreitung im Brennraum. Mit Hilfe der Zweifarbenmethode war es möglich, die Temperatur der russhaltigen Reaktionszonen zu bestimmen und gleichzeitig eine Abschätzung über die Russbildung zu erhalten. In Kombination mit einem Zwei-Zonen-Modell konnte mit dieser Methode auch das Luft-Kraftstoff-Verhältnis in der russbehafteten Reaktionszone abgeschätzt werden.

Aussermotorisch wurden diese Untersuchungen durch Partikelmessungen im Abgasstrang ergänzt. Angewendete Methoden waren Coulometrie, Gravimetrie,

Photoelektrischer Aerosolsensor (PAS), Diffusion Charger (DC) und Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). Ausserdem erfolgte die Aufnahme der herkömmlich gemessenen Emissionen HC, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>.

Begleitet wurden diese Experimente durch dreidimensionale Berechnungen mit KIVA wie auch phänomenologischen Vorausberechnungen im Rahmen einer parallel durchgeführten Dissertation [1].

Durch synergetische Anwendung dieses umfassenden Messtechnikinstrumentariums in einem weiten Kennfeldbereich des Motors konnten die dominierenden motorischen Parameter im Schichtungsbetrieb identifiziert werden. Ein sehr gutes Verständnis über die ablaufenden chemisch-physikalischen Prozesse wurde erreicht und es gelang mit dieser Analyse, die Gemischbildung, Verbrennung und Russbildung umfassend zu charakterisieren.

Allgemein konnten die massgebenden Phänomene des Schichtungsbetriebes gegenüber denen des Homogenbetriebes abgegrenzt werden und die wesentlichen Merkmale der geschichteten Verbrennung herausgearbeitet werden.

Im Schichtungsbetrieb bestimmt aufgrund von Gemischaufbereitungsphänomenen vor allem der Zündzeitpunkt im Verhältnis zum Einspritzbeginn die Verbrennung und Russbildung. Dies vor allem dadurch, dass durch die Wahl des Zündzeitpunktes auch die verfügbare Zeit zur Gemischhomogenisierung determiniert wird. Deshalb zeigen Betriebspunkte mit zu früher Zündeinleitung einen höheren Kraftstoffverbrauch inklusive höherer zyklischer Schwankungen und langsamer Flammausbreitung wie auch zeitlich späterer Energieumsetzung. Denn in diesem Fall ist nicht genügend Zeit zur Gemischhomogenisierung vorhanden und die Zündung wird bei relativ fettem Luft-Kraftstoff-Verhältnis im Bereich der Zündkerze initiiert, wie aus den numerischen Untersuchungen einerseits und der Kombination aus Zweifarbenmethode und Mehrzonenmodell bzw. den erhöhten Russemissionen andererseits bestätigt wird. Bei zu später Zündeinleitung dagegen ist die Gemischaufbereitung so weit vorangeschritten, dass zwar im Bereich der Zündkerze optimale Bedingungen für die Entflammung gegeben sind (hier beginnt die Verbrennung recht schnell, das Luft-Kraftstoff-Verhältnis im Bereich der Zündkerze ist näher dem Stöchiometrischen), gleichzeitig wird aber durch die lange Aufbereitungszeit die Zone mit brennfähigem Gemisch in Brennraumbereiche weit ab der Zündkerze ausgeweht und die Schichtung ist somit weniger konzentriert. Hier ergibt sich demnach auch wiederum ein hoher Kraftstoffverbrauch und hohe zyklische Schwankungen. Im optimalen Schichtungsbetrieb hat sich gezeigt, dass der Zielkonflikt zwischen genügender Gemischaufbereitung und gleichzeitiger

Begrenzung des örtlichen Bereiches, in welches das Gemisch gelangen kann, bestmöglichst gelöst ist.

Neben dem Zündzeitpunkt ist der Drall ein weiterer wichtiger Einflussparameter, denn die Interaktion zwischen Einspritzung und Strömung im Brennraum beeinflusst die Verdampfung des Kraftstoffes, die räumliche Eingrenzung des Brennstoffstrahles und die anschliessende Energieumsetzung.

Im Rahmen der Arbeit wurden weitere typische motorische Betriebsparameter untersucht, so neben Zündzeitpunkt und Drall z.B. Last, Drehzahl, Einspritzbeginn, Einspritzdruck, Abgasrezirkulationsrate. Der Einfluss dieser Parameter auf die Gemischbildung und Verbrennung im direkteingespritzten, strahlgeführten Ottomotor konnte weitreichend geklärt werden.

Die Novität dieser Arbeit besteht in der konsequenten, wenn möglich gleichzeitigen, Anwendung aussagekräftiger Messtechniken zur Charakterisierung von Gemischbildung und Verbrennung. Die Auswahl der Methoden erfolgte derart, dass jede einzelne Methode alleine schon aussagekräftige Resultate über spezielle chemisch-physikalische Prozesse liefert und die Kombination mit anderen Techniken zum einen das Gefundene – soweit möglich – bestätigt, zum anderen aber gerade durch die Überschneidung des Anwendungsbereiches der einzelnen Methoden eine komplementäre Sicht der ablaufenden Vorgänge und Prozesse erhalten werden kann. Dadurch konnten direkt die Einflüsse der Kraftstoffstrahleinbringung und Zündungseinleitung auf die anschliessende Verbrennung und Russbildung dargestellt werden. Gleichzeitig flossen diese Erkenntnisse in ein parallel entwickeltes phänomenologisches Modell ein [1].

## **Abstract**

This study deals with the thermochemical and fluiddynamic phenomena of mixture formation and combustion in a jet-guided direct injection spark ignition gasoline engine. The goal of this thesis was to describe and illustrate the mixture formation and combustion processes.

To achieve this, comprehensive experimental investigations of the processes concerning mixture formation and combustion have been performed. In detail, the hydrodynamics of the fuel jet has been investigated in the high-temperature-high-pressure-cell by means of shadowgraphy and Mie-scattering. Here, the conditions in the cell concerning pressure and temperature have been varied up to conditions which are similar to that in the engine. These investigations have been also necessary to validate a KIVA-model for three-dimensional calculations, which have been performed in another thesis [1].

In the engine, the liquid phase of the fuel propagation has been investigated by using Mie-scattering through an endoscope. This measurement technique has been developed during this work and a special feature of this technique is, that only one bore is used for optical access to the engine for both illumination as well as observation. This is a clear advantage regarding accessibility to the combustion chamber and in this way, it is also possible to minimize thermodynamical disturbances.

Pressure indication has been used to investigate combustion in the usual way. The analysis of the pressure curves have been made by the heat release analysis programm WEG, which was developed at the lab.

Additionally to heat release investigations, optical and electro-chemical methods have been used to illuminate the combustion processes. Regarding the optical methods endoscopy, spectrography, two-color-pyrometry and a light fiber equipped spark plug have been used. As an electro-chemical method, ion current probes have been applied.

A "visual" impression of the flame behavior inside the combustion chamber can be realised by using the methods endoscopy and ion current probes. With the two-color-method, it has been possible to determine the temperature in the sooty reaction zone of the combustion and to estimate the soot concentration and the associated radiation temperature. In combination with a two-zone-model, it has also been possible to compute the air-fuel-ratio in this zone.

In addition, measurements related to soot emissions in the exhaust pipe of the engine have been performed. These have been coulometry, gravimetry, photo-

electrical aerosol sensor (PAS), diffusion charger (DC) and scanning mobility particle sizer (SMPS). Furthermore, the emissions of UHC, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> have been surveilled.

These experimental investigations have been accompanied by numerical, three-dimensional calculations and phenomenological calculations in the context of another thesis [1].

By using these comprehensive measurement techniques in a broad region of the performance map, it has been possible to identify the parameters during stratification which have the most important influence on the performance of the engine. New information has been thereby obtained with regard to the extensive characterization of mixture formation, combustion and soot formation and oxidation.

Generally, distinctive features between stratified combustion and homogeneous charge have been worked out and it has been possible to demonstrate the main characteristics of and relevant parameters for stratification.

One important finding is that mainly the spark timing in relation to the injection timing determinates combustion and soot emissions. The main reason for this is that the spark timing directly determines the time which is available for mixture homogenization. In practice, a too early spark timing is associated with higher specific fuel consumption and with higher cycle-to-cycle-variations as well as with a slower flame propagation and a later energy conversion. In this case, there is not enough time for homogenization available und ignition is taking place during relatively rich conditions in the vicinity of the spark plug, as can be seen from the numerical investigations and the combination between two-color-method and two-zone-model as well as from the higher soot emissions in the exhaust. If ignition is chosen to be too late, good conditions for flame propagation are reached in the near region of the spark plug (which is confirmed by the fast heat release at the beginning of combustion and an air-fuel ratio which is nearer to the stoichiometry), but due to the long duration of the mixture preparation process, some part of the fuel vapor has been carried out into regions of the combustion chamber which are far away from the spark plug and this results in a poor quality of stratification. Also in this case, a relatively high specific fuel consumption with high cycle-to-cycle-variations is obtained. It has been shown, that optimal stratification is only achievable when the conflict between sufficient mixture preparation and confinement of the local region in the combustion chamber, to which the fuel can penetrate, is traded appropriately.

In addition to the spark timing, swirl is an other important influence parameter. Due to the interaction between injection of the fuel and flow conditions in the combustion

chamber, evaporation, spray penetration and fuel confinement as well as heat release are influenced.

During this study, other typical running conditions have been investigated as there are load, speed, start of injection, rail pressure, exhaust gas recirculation rate. The influence of these parameters on mixture preparation and combustion in the direct injection spark ignition jet-guided gasoline engine has been quantified, but this is generally of lesser importance than the influence of swirl and spark vs. injection timing.

The innovation of this study lies in the consistent application of several types of significant measurement techniques, whenever possible even at the same time, in order to characterize the mixture formation and combustion processes. The measurement techniques have been chosen in that way, that each method alone can give a reliable information about a certain process. The combination with other techniques allows to verify the result and, on the other side to get complementary information related to the overall mixture formation and combustion process. In that way, it has been possible to identify the relevant parameters which dominate the system behaviour in spray-guided direct injection gasoline engines.

The new insights from this study here have been a basis for a phenomenological simulation model, which has been developed in parallel [1].