

FZKA-BWPLUS

**Untersuchungen zur Realisierung einer rußarmen Verbrennung bei
Benzin-Direkteinspritzung**

von

H. Kubach, K. Mayer, U. Spicher
Institut für Kolbenmaschinen
Universität Karlsruhe

Förderkennzeichen: PEF 398004

Die Arbeiten des Projektes Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur
Luftreinhaltung wurden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Februar 2001

Untersuchungen zur Realisierung einer rußarmen Verbrennung bei Benzin-Direkteinspritzung

H. Kubach, K. Mayer, U. Spicher
Institut für Kolbenmaschinen
Universität Karlsruhe

Zusammenfassung

Direkteinspritzende Ottomotoren bieten ein enormes Potential hinsichtlich Kraftstoffeinsparung und Schadstoffreduzierung. Trotzdem konnte sich bisher kein Konzept auf dem Markt durchsetzen, da es trotz intensiver Forschungsaktivitäten nach wie vor schwierig ist, eine Abstimmung von Gemischbildung und Verbrennung über alle Lastbereiche zu realisieren, die dieses Potential ausnutzt. Ein weiteres und derzeit heftig diskutiertes Problem ist die Rußemission, zu der es im geschichteten Motorbetrieb kommt und die eine Belastung für Umwelt und Gesundheit darstellt.

Bisherige in diesem Forschungsvorhaben erlangte Untersuchungsergebnisse an einem direkteinspritzenden Ottomotor zeigen die Problematik der Rußentstehung in unterschiedlichen Betriebszuständen auf und stellen Lösungsansätze zur Vermeidung der Rußbildung dar. In weiteren Untersuchungen sollen ausgeprägtere Informationen über die Problematik erarbeitet werden und eine verbesserte ganzheitliche Abstimmung des Brennverfahrens realisiert werden.

Investigations for the realisation of combustion with low soot emissions in gasoline direct injection engines

H. Kubach, K. Mayer, U. Spicher

Summary

GDI engines provide an enormous potential on both reduced fuel consumption and exhaust gas. Nevertheless none of the concepts could win recognition on the market because it is still very difficult to develop a tuning of mixture formation and combustion over all loads to make use of this potential. Another vehemently discussed problem is the soot emission which denotes an impact on health and environment.

Results of this research project on a GDI engine show the soot formation problem for different loads and offer solutions to avoid soot formation. Further investigations shall provide more detailed information about these processes and improved concepts for mixture formation and combustion.

1. Einleitung

Erst in neuester Zeit werden Fahrzeuge mit direkteinspritzenden Ottomotoren serienmäßig zum Verkauf angeboten, obwohl den Motoren mit Benzindirekteinspritzung schon seit Jahren ein großes Potential hinsichtlich Verbrauchseinsparung und Schadstoffreduzierung zugesprochen wird. Besonders die Abstimmung der direkteinspritzenden Brennverfahren über die nötigen großen Betriebsbereiche hat sich als besonders schwierig herausgestellt. Neben den Vorteilen zeigt sich vor allem jedoch die in letzter Zeit heftig diskutierte Rußemission als Problem dieser neuen Motorengeneration.

Die Rußemission ist nicht nur bedenklich hinsichtlich der Umweltbelastung, vielmehr haben Untersuchungen der letzten Jahre mehrfach eine Gefährdung der Gesundheit in Abhängigkeit von der Rußbeschaffenheit festgestellt. Da vor allem für den Pkw-Sektor keine geeigneten Abgasnachbehandlungsmethoden vorhanden sind, ist auch die Einhaltung zukünftiger Abgasgrenzwerte in Frage gestellt.

Um geeignete Maßnahmen bei der Gemischbildung und dem Verbrennungsprozess zur Reduzierung der Rußemission einleiten zu können, ist einerseits die Wissensbasis diesbezüglich erheblich auszubauen, andererseits ist zu überprüfen, ob Maßnahmen von anderen Motorkonzepten übertragen werden können und inwieweit diese mit der Betriebsstrategie in Einklang gebracht werden können. Potentialabschätzungen der Vorteile des direkteinspritzenden Ottomotors machen klar, dass dieser Aufwand durchaus gerechtfertigt ist, um dieses Motorenkonzept als umweltverträglicheres Antriebssystem zu forcieren.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden daher Untersuchungen an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung durchgeführt, der sowohl im Schicht- als auch im Homogenbetrieb gefahren werden kann, mit dem Ziel, detaillierte Kenntnisse über die Rußbildungsproblematik des DE-Ottomotors und Lösungsansätze für eine rußarme Verbrennung zu erarbeiten.

Mit Hilfe moderner optischer Messverfahren wird die Flammenausbreitung im geschichteten Betrieb visualisiert und sowohl Temperatur als auch Rußverlauf über dem Kurbelwinkel berechnet. Als Einflussparameter werden Raildruck, Drallintensität und die geometrische Lage der Zündkerze variiert.

2. Grundlagen

2.1. Gemischbildung und Verbrennung

Die Gemischbildung bei der Benzin-Direkteinspritzung lässt sich bezüglich des Einspritzdrucks und der Methode, mit der die Ladungsschichtung erzeugt wird, untergliedern. So gibt es Verfahren mit Hochdruckeinspritzung, bei denen der Kraftstoff mit einem Einspritzdruck zwischen 50 und 120 bar in den Brennraum eingespritzt wird und Verfahren mit luftunterstützter Niederdruckeinspritzung. Das erste Verfahren eignet sich besonders für eine extreme Schichtung mit spätem Einspritzbeginn. Aufgrund der dabei zur Verfügung stehenden kurzen Zeit für die Gemischbildung kann es hierbei jedoch zu hohen HC- und Rußemissionen kommen. Das zweite Verfahren mit luftunterstützter Niederdruckeinspritzung fördert zwar die Verdampfung des Kraftstoffes, wird aber hinsichtlich der Ladungsschichtung nicht als ideal angesehen. Dieses Verfahren könnte jedoch Potential bieten für den Betrieb mit höheren AGR-Raten, da sich aufgrund der kombinierten Einspritzung von Luft und Kraftstoff trotz hoher Abgasanteile ein größerer Frischluftanteil in Kraftstoffnähe befindet.

Die Untergliederung nach der Methode zur Ladungsschichtung erfolgt heute in die drei Gruppen strahlgeführte, wandgeführte und luftgeführte Verfahren. Strahlgeführte Verfahren weisen eine enge räumliche Lage von Einspritzventil und Zündkerze auf, mit dem Ziel, zum Zündzeitpunkt eine kompakte zündfähige Gemischwolke an der Zündkerze zu platzieren. Dieses Verfahren kann sehr mager mit Luft-Kraftstoff-Verhältnissen λ bis zu 10 im Leerlauf betrieben werden und wird wegen der Ladungsschichtung im Zentrum des Brennraums thermodynamisch als sehr vorteilhaft bewertet, da die Wandwärmeverluste erheblich reduziert werden. Bei der Einspritzung während des Saughubs kann mit dieser Methode eine gute Homogenisierung erreicht werden. Da die Einspritzstrahlcharakteristik, die durch den Brennraumdruck erheblich beeinflusst wird, bei dieser Methode eine große Rolle spielt, ist die Abstimmung dieses Verfahrens enorm schwierig und erfordert erheblichen Forschungsaufwand. Mit Common-Rail-Einspritzsystemen (CR) kann die Einspritzung aufgrund der drehzahlunabhängigen Druckregelung verbessert und optimal angepasst werden. Von diesem strahlgeführten Verfahren in Kombination mit Common-Rail-Einspritztechnik wird das höchste Kraftstoff-Einsparpotential erwartet.

Jedoch liegen bei diesem Verfahren auch die größten Schwierigkeiten hinsichtlich der stabilen Laufeigenschaften. Um alle relevanten Parameter in allen Betriebspunkten optimal abzustimmen, ist eine Wissensbasis notwendig, die die komplexen Interaktionen der veränderbaren Parameter beschreibt. Dazu sollen die Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens beitragen.

2.2. Rußbildung

Die Partikelemission war bisher überwiegend eine Problematik der dieselmotorischen Verbrennung, da Brennverfahren mit äußerer Gemischbildung nicht die für die Rußbildung förderlichen Bedingungen im Brennraum aufweisen. Da die ausgestoßenen Partikel überwiegend aus Ruß bestehen, an die Kohlenwasserstoffe, Kraftstoff- und Schmierölaerosole sowie Sulfate angelagert sind, wird häufig nur von Rußemission gesprochen.

Die Grenzwerte für die Partikelemission von Dieselmotoren sind nicht zuletzt wegen Untersuchungen, die karzinogene und mutagene Auswirkungen von Rußpartikeln festgestellt haben, in den letzten Jahren vom Gesetzgeber deutlich gesenkt worden. Die gesundheitsgefährdenden Auswirkungen der Rußpartikel gehen dabei überwiegend von den oben genannten Anlagerungen aus. Ein großes Problem bei der Entwicklung von Dieselmotoren ist daher unumstritten die Rußemission. Es bedarf meist aufwendiger experimenteller Abstimmungen, um die Rußemission soweit zu reduzieren, damit diese Grenzwerte eingehalten werden können. Seit der Einführung der Benzin-Direkteinspritzung wurde die Problematik der Rußbildung auch auf den Sektor der Ottomotoren übertragen. Da der DE-Ottomotor aber nach wie vor fremdgezündet ist, hängt es stark vom gewählten Brennverfahren und der Betriebsstrategie ab, ob es zu einer Rußentstehung kommt, die abgasseitig berücksichtigt werden muss. Mit der zunehmenden Tendenz hin zur Benzin-Direkteinspritzung ist jedoch verstärkt auf das Anstreben einer rußarmen Verbrennung zu achten, um dem Ziel der Entwicklung umweltfreundlicherer Motoren gerecht zu werden, ohne erst gesetzliche Limitierungen abzuwarten. Die zwei Hauptursachen für die Rußbildung in Verbrennungsmotoren sind eine stark unterschiedliche Gemischzusammensetzung mit deutlich unterstöchiometrischen Gebieten des Luft-Kraftstoff-Gemisches und die Anwesenheit unverdampften Kraftstoffes, der mit der Flamme wechselwirken kann. Die Bildung der 0.01 - 0.5 μm großen Rußteilchen ist ein sehr komplexer kinetischer Vorgang, der bis heute noch nicht vollständig geklärt ist, obwohl sich zahlreiche Untersuchungen an Brennerflammen, Stoßwellenrohren und teilweise auch an Verbrennungsmotoren mit den Randbedingungen und der Ergiebigkeit der Rußbildung auseinandergesetzt haben. Ergebnisse dieser Untersuchungen waren Rußbildungsgrenzen als Funktion der Gastemperatur und des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses, die einen Bereich festlegen, in dem mit Rußbildung zu rechnen ist, wenn die Verbrennung Zustände in diesem Bereich annimmt. Obwohl aus thermodynamischer Sicht Rußbildung bei Luft-Kraftstoff-Verhältnissen $\lambda > 0.34$ nicht mehr auftreten dürfte, wurde in zahlreichen Experimenten immer wieder bewiesen, dass die Rußbildung bereits bei einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis von $\lambda = 0.6 - 0.7$ einsetzt. Die untere Temperaturgrenze wurde bei etwa 1500 K ermittelt. Bei der Temperaturabhängigkeit hat sich gezeigt, dass bei Temperaturen zwischen 1600 und 1700 K ein Maximum der Rußbildung erreicht wird und sich die Rußbildungsgrenze bei höheren Temperaturen zu niedrigeren Luft-Kraftstoff-Verhältnissen verschiebt. Unterschiedliche Rußexperimente, die jedoch nicht im Brennraum von Motoren durchgeführt wurden, ergaben die in Abb. 1 skizzierten Rußbildungsgrenzen in Abhängigkeit vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis und der Temperatur.

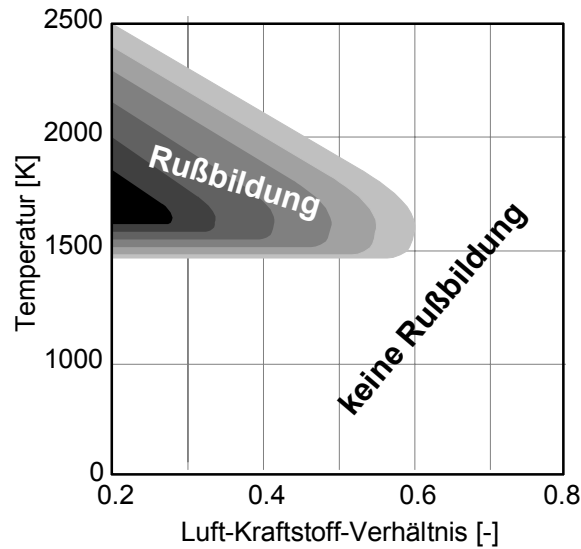


Abb. 1: Rußbildungsbereich

Bei abnehmendem Luft-Kraftstoff-Verhältnis λ ist also mit einer Zunahme der Rußbildung zu rechnen. Für eine Verbrennung mit wenig Stickoxiden und Ruß müsste daher ein Luft-Kraftstoff-Verhältnis von $0.6 < \lambda < 0.9$ eingehalten werden. Im Brennraum geschichtet betriebener Verbrennungsmotoren gibt es jedoch Bereiche mit sowohl sehr unter- als auch sehr überstöchiometrischem Gemisch. Bei Untersuchungen mit der Ramanspektroskopie wurden Luftverhältnisse im Kern eines Einspritzstrahls eines Dieselmotors von $0.5 < \lambda < 0.8$ sowie die Entflammung in Bereichen mit Luftverhältnissen von $\lambda = 0.7$ ermittelt. Bei Untersuchungen mit einem getakteten Gasentnahmeventil an einem DE-Ottomotor ermittelte den in Abb. 2 dargestellten Verlauf des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses in der Nähe der Zündkerze für unterschiedliche Zeiten des Einspritzbeginns. Der Verlauf des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses zeigt stark unterstöchiometrische Bereiche nahe der Zündkerze, die sogar unterhalb der Zündgrenze liegen.

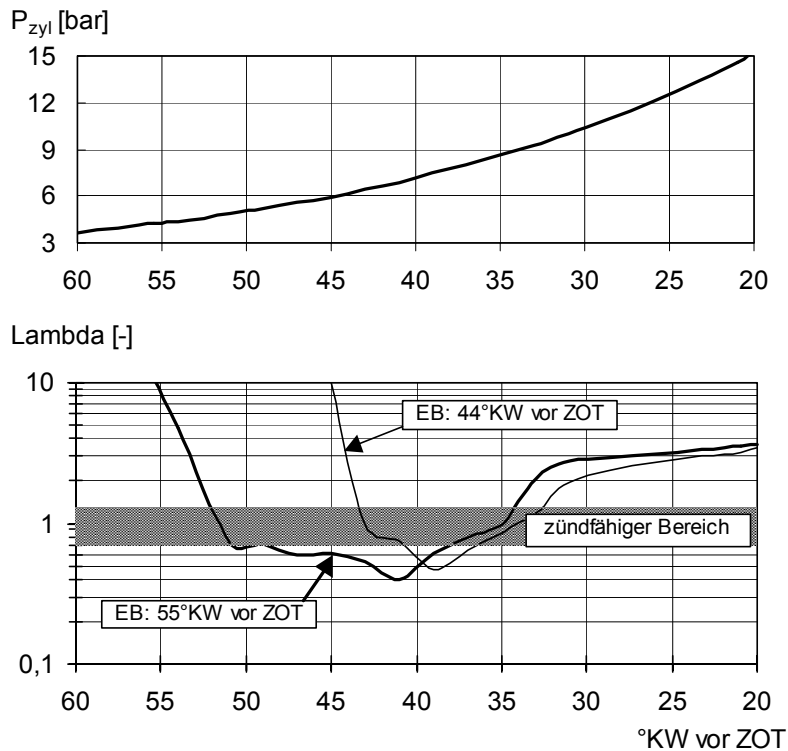


Abb. 2: Luft-Kraftstoffverhältnis nahe der Zündkerze, KÖLMEL (2000)

Durch das Verdampfen der Kraftstofftröpfchen bei einsetzender Verbrennung sinkt das Luftverhältnis in diesem Bereich weiter ab. Bei Luft-Kraftstoff-Verhältnissen von bis zu $\lambda = 0.5$ und in der Nähe der Brennraumwand durch starke Abkühlung bei Luft-Kraftstoff-Verhältnissen von $\lambda = 0.6$ kann Ruß gebildet werden.

Für die Entwicklung von rußarmen Verbrennungsmotoren und somit der Realisierung niedriger Rußbildungsraten ist es aber nicht nur wichtig, die Rußbildungsgrenzen zu kennen, sondern auch die Einflussparameter auf die Rußbildung. In Untersuchungen an Diffusionsflammen und Verbrennungsmotoren wurde neben der Gastemperatur und dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis als Haupteinflussgrößen auch der Zylinderdruck und die Kraftstoffzusammensetzung als Einflussgrößen ermittelt, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird. Weitere motorische Einflussparameter, wie z.B. Einspritzparameter und Brennraumform, beeinflussen das Luft-Kraftstoff-Verhältnis und die Gastemperatur, sie sind daher ebenfalls zu berücksichtigen. Eine Studie zeigte, dass unter den hohen Drücken und Temperaturen, wie sie in Motoren vorliegen, mehr Ruß produziert wird als in atmosphärischen Brennerflammen. Die kürzeren Verweilzeiten setzen schnellere Keimbildung und Oberflächenwachstumsraten voraus. Die größere Rußmenge spiegelt sich durch eine höhere Partikelanzahl, aber nicht in größeren Partikeln wieder. Obwohl die Partikelanzahl zunimmt, spielt aufgrund der kürzeren Verweilzeiten die Koagulation eine kleinere Rolle als in Brennerflammen.

Zahlreichen Untersuchungen an Ethylen-Luft-Flammen ermittelten eine starke Druckabhängigkeit sowohl bei der Bildung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) als auch beim Rußvolumenbruch. So konnte bis zu einem Druck von

10 bar eine quadratische Abhängigkeit und für Drücke über 10 bar bis zu 100 bar eine lineare Abhängigkeit vom Druck festgestellt werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich die zwei bei niedrigen Drücken ablaufenden PAK-Bildungsphasen in der Oxidationszone und im Postflame-Bereich bei höheren Drücken zu einem räumlich nicht mehr trennbaren Prozeß überlagern. Es wird vermutet, dass der zweite Bildungsprozeß im Postflame-Bereich deutlich überwiegt.

Hinsichtlich der Kraftstoffzusammensetzung gibt es Unterschiede bei der Rußbildung nicht nur zwischen Diesel- und Ottokraftstoff, sondern auch zwischen unterschiedlichen Zusammensetzungen der Kraftstoffe. So neigt bleifreies Superbenzin eher dazu, kleine runde Partikel und nur wenig vereinzelte, aber sehr große Agglomerate zu bilden. Die mittleren Durchmesser der gebildeten Rußpartikel sind ebenso vom gewählten Kraftstoff abhängig.

Untersuchungen mit aromatischen Kohlenwasserstoffen an Diffusionsflammen und unterschiedlichen Kraftstoffmischungen an Dieselmotoren zeigten eine deutliche Abhängigkeit der Rußbildung von der Cetan-Zahl und dem Anteil aromatischer Komponenten im Dieselmotorkraftstoff. Mit zunehmender Cetan-Zahl wurde eine verstärkte Rußbildung festgestellt, während der Einfluß der aromatischen Komponenten mit zunehmender Cetan Zahl geringer wird.

Die Rußbildung lässt sich während des motorischen Verbrennungsprozesses in vier zeitliche Abschnitte unterteilen:

- Rußbildung in stark unterstöchiometrischen Gemischbereichen. In der ersten Verbrennungsphase ist nur wenig Gemisch im Luft-Kraftstoff-Verhältnisbereich $0.6 < \lambda < 0.9$ mit einem möglichst kurzen Zündverzug zu verbrennen, wenn eine schadstoffarme und geräuschgünstige Verbrennung erreicht werden soll.
- Rußbildung durch Kraftstoffeinspritzung in die Flamme. Wird Kraftstoff direkt in die Flamme eingespritzt, so steigt die Rußbildung an, deren Ursache in der Bildung von Radikalen zu suchen ist.
- Rußbildung durch Kraftstoffeinspritzung in verbranntes Gas. Vermischt sich Kraftstoff bei fortgesetzter Verbrennung mit Verbrennungsgasen bei einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis $\lambda < 4$, so führt dies ebenfalls zur Rußbildung. Die Vermischung von Kraftstoff mit sauerstoffarmem Gemisch ist somit durch Hochdruckeinspritzung und ausreichende Luftzufuhr zu vermeiden.
- Nachoxidation der Rußteilchen durch weitere Abmagerung nach Einspritzende. Für die Rußoxidation günstige Bereiche decken sich jedoch oberhalb des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses von $\lambda = 1$ mit dem intensiven NO_x -Bildungsbereich. Die Rußoxidation soll bei Anwesenheit von OH-Radikalen auch bei Luft-Kraftstoff-Verhältnissen von $\lambda < 1$ möglich sein.

Wie Abbildung Abb. 3 zeigt, kann die Bildung der Rußpartikel durch mehrere Phasen beschrieben werden, die im Brennraum eines Verbrennungsmotors sowohl örtlich als auch

zeitlich parallel zueinander oder nur teilweise überlagert ablaufen. Dies kann zum Beispiel bedeuten, dass in Gebieten mit Sauerstoffüberschuss bereits Rußpartikel oxidiert werden, während in unterstöchiometrischen Bereichen noch neue Partikel gebildet werden. Als die vier wichtigsten Bildungsphasen werden häufig die Teilchenbildung, das Oberflächenwachstum, die Koagulation und die Rußoxidation angeführt (MAYER (2000)).

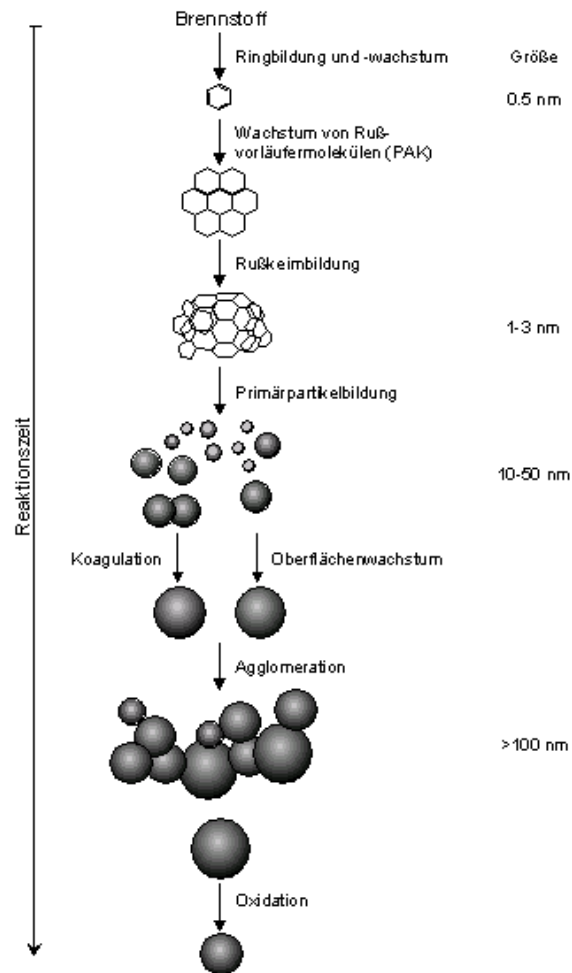


Abb. 3: Rußbildungsphasen nach BOCKHORN (1994)

3. Versuchsaufbau und Messtechnik

3.1. Versuchsträger

Als Versuchsträger wird ein Einzylinder-Viertaktmotor mit Common-Rail-Direkteinspritzung und strahlgeführtem Brennverfahren eingesetzt. Über eine Ventilabschaltung kann eine Einlassdrallströmung erzeugt werden. Der optische Zugang zum Brennraum wurde über 2 Bohrungen realisiert, die entweder mit einem Druckquarz oder mit einer optischen Sonde bestückt werden können. Die Abgaskomponenten CO, CO₂, NO_x, HC und O₂ können integral über mehrere Arbeitsspiele gemessen werden. In Tab. 1 sind weitere Motordaten dargestellt.

Bohrung	89,6	mm
Hub	86,6	mm
Hubvolumen	546	cm ³
Verdichtungsverhältnis	10	-
Einlaßventil	2	-
Auslaßventil	1	-
Brennraumform	Dachbrennraum	

Tab. 1: Motordaten

Weiterhin verfügt der Prüfstand über Öl- und Wasserkonditionierung, um die Warmlaufphase zu verkürzen, die Verschmutzung der optischen Sonden zu minimieren und um die Randbedingungen während der Untersuchungen konstant zu halten.

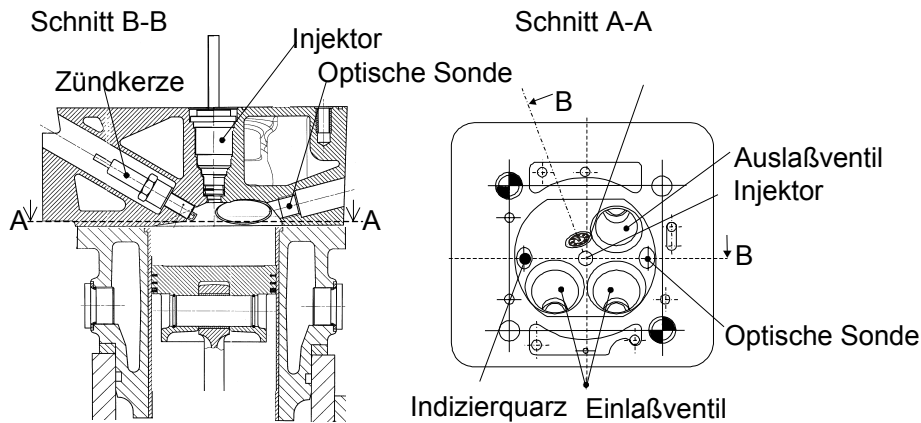


Abb. 4: Versuchsträger mit Adaption der Messtechnik

Für die Hochdruckindizierungen wurde ein wassergekühlter Druckquarz des Typs Kistler 7061 B verwendet. Die zweite Indizierbohrung wurde für Adaption der optischen Sonden verwendet (s. a. in den Kapiteln der einzelnen Messtechniken).

3.2. Visualisierung der Flammenausbreitung

Die Visualisierung der Flammenausbreitung erfolgte mit einem neuartigen endoskopischen System, das über 1920 Einzel-Lichtleiter verfügt und Aufnahmen mit einer zeitlichen Auflösung von 200 kHz erlaubt. Jeder der 1920 Einzelfasern erfasst einen kegelförmigen Bereich des Beobachtungsvolumens, das Gesamtbild stellt ein reales Abbild der Flammenfront dar. In Abb. 5 ist der Aufbau für diese Messtechnik dargestellt.

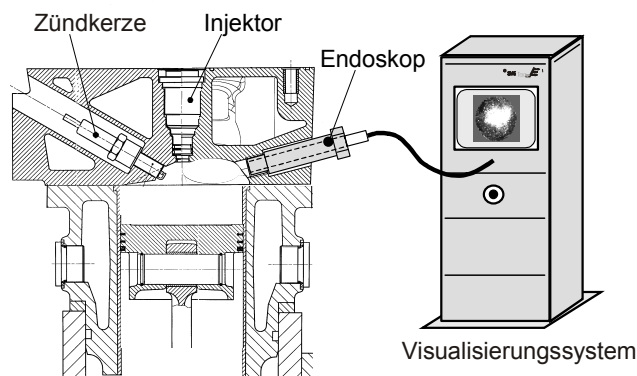


Abb. 5: Messaufbau zur Visualisierung der Flammenausbreitung

Über einen Speziellen Adapter wird das Endoskop zur Aufnahme der Verbrennungsstrahlung in die zweite Indizierbohrung eingebracht. Um das Endoskop vor dem Brennraumdruck und den hohen Temperaturen zu schützen, ist dieser Adapter mit einem Quarzglas gegen den Brennraum abgedichtet und mit einer Luftkühlung versehen.

3.3. Erweiterte Zwei-Farben-Methode

3.3.1. Grundlagen

Die Zwei-Farben-Methode ist eine pyrometrische Meßmethode, bei der die von den Rußteilchen emittierte Strahlung einer leuchtenden Flamme bei zwei verschiedenen Wellenlängen gemessen und zur Berechnung der Flammentemperatur und Rußkonzentration in der Flamme herangezogen wird. Als leuchtende Flamme werden Flammen bezeichnet, die ein gelbes, von Rußteilchen hervorgerufenenes Leuchten zeigen, welches typisch ist für Diffusionsflammen.

Der Dieselmotor weist einen hohen Anteil an diffusionskontrollierter Verbrennung auf, was ein charakteristisches gelbliches Rußleuchten hervorruft. Analog hierzu erfolgt beim direkteinspritzenden Ottomotor im geschichteten Betrieb ein Teil der Verbrennung diffusionskontrolliert, so dass es auch hier zur erhöhten Rußbildung und dem dazugehörigen Rußleuchten kommt.

Bei der Verbrennung in Motoren tritt sowohl Kontinuumsstrahlung durch Partikel als auch Chemielumineszenz durch Atome und Moleküle auf. Obwohl die Rußstrahlung sehr intensiv ist, soll die Wahl der untersuchten Wellenlängen nicht auf Bereiche fallen, in denen intensive Bandenstrahlung zu erwarten ist, da die sich addierenden Strahlungsintensitäten die Berechnung der Temperatur und Rußkonzentration verfälschen würden. Sehr intensive Bandenstrahlung ist vor allem im UV-Bereich zu finden. Oberhalb von 1000 nm sind dagegen sehr intensive und breite Banden von H₂O und CO₂ zu finden, so dass dieser Bereich für die Messung der Rußstrahlung überwiegend ungeeignet ist. Abbildung

Abb. 6 zeigt zur Verdeutlichung die Bandenköpfe der Strahlungsbanden einer Kohlenwasserstoff-Flamme mit mittlerer bis höherer Intensität.

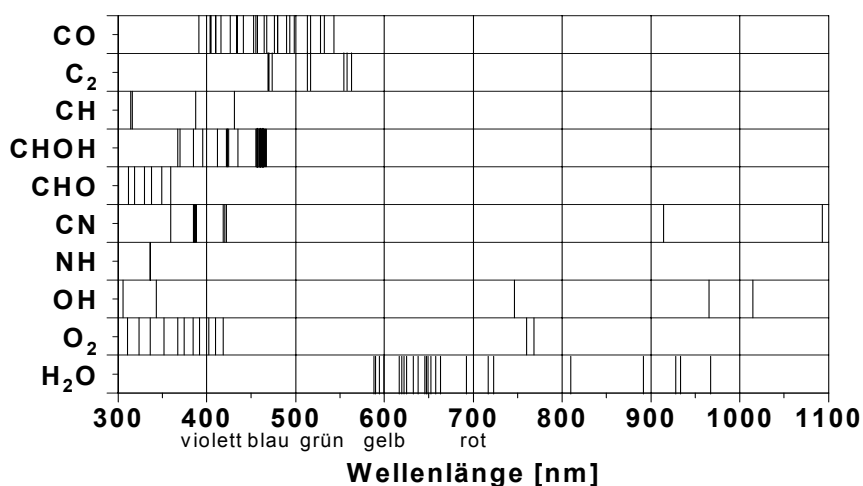


Abb. 6: Strahlungsbanden einer Kohlenwasserstoffflamme

Bei den meisten Untersuchungen mit der Zwei-Farben-Methode findet man daher Wellenlängen aus dem sichtbaren oder untersten infraroten Spektrum. Für diese Arbeit stand ein Photodiodenmodul mit Bandpassfiltern bei den sichtbaren Wellenlängen 600 nm und 750 nm, sowie der Wellenlänge 900 nm im unteren Infrarotbereich zur Verfügung. Ein Maximum der Strahlungsintensität in der Nähe von 900 nm zu erwarten, so dass diese Wellenlänge die besten Signale liefert. Die Zwei-Farben-Methode bedarf eigentlich nur der Analyse der Rußstrahlung bei zwei Wellenlängen. Da sich jedoch die Annahmen, die für die Rußbeschaffenheit zu treffen sind und Fehlereinflüsse aus Messung und Kalibrierung auf die ermittelten Verläufe auswirken, wurde in dieser Arbeit eine erweiterte Zwei-Farben-Methode verwendet. Die Erweiterung liegt in der Untersuchung von drei diskreten Wellenlängen. Hierdurch kann die Berechnung für jeweils drei Wellenlängenpaare durchgeführt werden, wodurch drei Temperatur- und Rußkonzentrationsverläufe ermittelt werden, die im Idealfall gleich sein müssten. Diese Vorgehensweise dient lediglich der Kontrolle, da bei der Verwendung von nur zwei Wellenlängen keinerlei Informationen über die Güte von Messung und Berechnung für den Rußkonzentrations- bzw. Temperaturverlauf erhalten werden.

Die im Brennraum entstehende Rußstrahlung kann über optische Sonden und Lichtleiter Photodioden mit vorgeschalteten Interferenzfiltern zugeführt werden. Mit einer Photodiode und einer anschließenden elektronischen Signalverarbeitung wird die Strahlung aus dem Beobachtungsvolumen jeder optischen Sonde spektral gefiltert und in ein proportionales Spannungssignal gewandelt. Die in dieser Arbeit eingesetzten dreiarmligen Lichtleiter übernehmen zusätzlich die Funktion der Strahlungsteilung. Die Einzelfasern sind hierzu stochastisch auf drei Arme verteilt. Der während dieser Arbeit verwendete prinzipielle Aufbau der Zwei-Farben-Methode ist in Abb. 7 dargestellt. Der Einsatz dreiarmliger Lichtleiter bietet zudem die Möglichkeit, über einen Arm die Strahlung im UV-Bereich mit einem Photomultiplier aufzunehmen und gleichzeitig über die verbleibenden zwei Arme die Zwei-Farben-Methode einsetzen zu können.

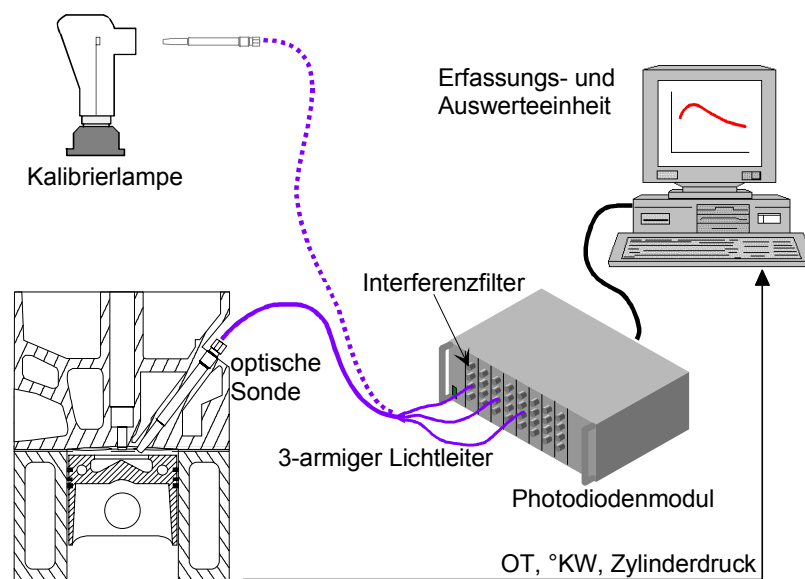


Abb. 7: Aufbau der Zwei-Farben-Methode

Die Ausgangsspannung U der einzelnen Kanäle des Photodiodenmoduls hängt von folgenden Größen ab, wobei vor allem der spektrale Transmissionsgrad des optischen Messweges nicht bekannt ist.

$$U = e(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot L_e(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Omega_K \cdot A_{LL} \quad [\text{V}]$$

mit:	$e(\lambda)$ = Proportionalitätsfaktor des Messkanals	[V/W]
	$\tau(\lambda)$ = spektraler Transmissionsgrad des optischen Messweges	[-]
	$L_e(\lambda)$ = Spektrale Strahldichte	[W sr ⁻¹ m ⁻³]
	$\Delta\lambda$ = Halbwertsbreite der Interferenzfilter	[nm]
	Ω_K = Raumwinkel der auftreffenden Strahlung	[sr]
	A_{LL} = bestrahlte Lichtleiterfläche	[m ²]

Um der Ausgangsspannung des Photodiodenmoduls eine Strahlungsleistung zuordnen zu können, über die die Temperatur der Rußteilchen berechnet werden kann, muss die optische Messkette mit einem Strahlungsnormal kalibriert werden. Als Strahlungsnormal wird häufig eine kalibrierte Wolframbandlampe eingesetzt, für die die Schwarzkörpertemperatur bei einer bestimmten Wellenlänge ermittelt wurde. Idealerweise steht weiterhin die Strahldichteverteilung der Lampe über dem betrachteten Wellenlängenbereich zur Verfügung, damit diese nicht rechnerisch über die wahre Wolframbandtemperatur ermittelt werden muss. Andere Lampentypen, wie etwa wesentlich billigere Quecksilber- oder Halogenlampen können ebenfalls eingesetzt werden, insofern die Strahldichten bei den untersuchten Wellenlängen bekannt sind oder rechnerisch ermittelt werden können. Genaugenommen wird bei der Temperaturberechnung aus den aufgezeichneten Spannungsverläufen nicht die Flammentemperatur, sondern die Temperatur der Rußteilchen berechnet. Da die Rußpartikel über ihre Strahlung jedoch Energie abgeben, wird erwartet, dass ihre Temperatur geringer ist als die des sie umgebenden Gases. Trotz einiger Untersuchungen, in denen ein geringer Temperaturunterschied zwischen Rußpartikeln und dem sie umgebenden Gas ermittelt wurden, ist man sich einig, dass bei einer deutlich leuchtenden Flamme von einem Temperaturgleichgewicht ausgegangen werden kann. Untersuchungen hierzu zeigten, dass sich ein thermisches Gleichgewicht in weniger als 10⁻⁹ Sekunden einstellt und die Temperaturdifferenz weniger als 1 K beträgt. Die Berechnung der Temperaturverläufe basiert auf Planck'schen Strahlungsgesetz, das die spektrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Temperatur beschreibt.

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad [\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-3}]$$

mit	C_1 = 1. Planck'sche Strahlungskonstante (1,191*10 ⁻¹⁶)	[W m ²]
	C_2 = 2. Planck'sche Strahlungskonstante (1,4388*10 ⁻²)	[m K]
	λ = Wellenlänge	[nm]

T = Temperatur [K]
 Ω_0 = Raumwinkeleinheit [sr]

Zur Vereinfachung der Berechnung wird häufig Wien'sche Näherung verwendet. Die Berechnung des Temperaturverlaufs kann nach der vereinfachten, aber schneller auswertbaren Relativmethode erfolgen.

Genauer ist jedoch die Absolutmethode, die nach den folgenden Gleichungen sowohl eine Berechnung der Temperatur als auch der Rußkonzentration zulässt.

$$T = \left\{ \frac{1}{T_{s1}} + \frac{\lambda_1}{C_2} \cdot \ln \left[1 - \left(1 - e^{-\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{s2}} \right)} \right)^{A_{a1}/A_{a2}} \right] \right\}^{-1} \quad [\text{K}]$$

mit $T_{s1,2}$ = Schwarzkörpertemperatur $\lambda_{1,2}$ [K]
 $A_{a1,2}$ = Absorptionsquerschnitte der Rußteilchen bei $\lambda_{1,2}$ [m² g⁻¹]

$$c = -\frac{1}{s \cdot A_a} \cdot \ln \left[1 - e^{-\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right)} \right] \quad [\text{mg m}^{-3}]$$

3.3.2. Adaption

Der optische Zugang wurde für die Zwei-Farben-Methode so ausgelegt, dass nur eine minimale Änderung der Brennraumgeometrie und des Wärmeübergangs vorliegt. Der Betriebsbereich des Motors wurde durch die optische Sonde in keiner Weise eingeschränkt.

Der optische Zugang wurde mit einer optischen Sonde in Form eines Druckquarzadapters realisiert, der über die vorhandenen Indizierbohrungen eingesetzt werden kann. Die Sonde besteht aus einem eingeklebten Spectrosil-Quarzglasstab mit einem Anschlussgewinde für die speziellen dreiarmigen Lichtleiter.

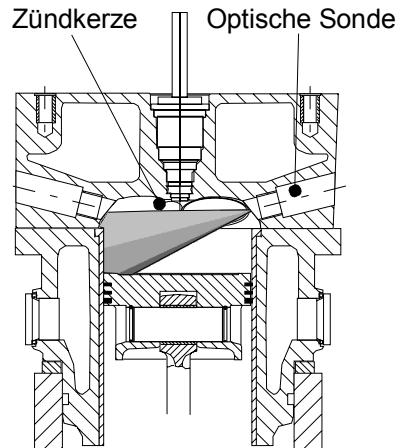


Abb. 8: Beobachtungsvolumen der optischen Sonde

Die optische Sonde hat einen Öffnungswinkel von 27° und ist wie in Abb. 8 gezeigt leicht geneigt, so dass das Beobachtungsvolumen in OT-nahen Kolbenstellungen durch den Kolben begrenzt wird. Diese Änderung des Beobachtungsvolumens muss bei der Berechnung mit der Zwei-Farben-Methode berücksichtigt werden. Hierzu wird bei der Berechnung die mittlere Höhe des aufgespannten kegelförmigen Beobachtungsvolumens in Abhängigkeit von der Kolbenstellung als Schichtdicke für die untersuchte Gasschicht verwendet.

Der in Abb. 9 dargestellte Verlauf des prozentualen Anteils des Beobachtungsvolumens am gesamten Zylindervolumen in Abhängigkeit von der Kolbenstellung schwankt zwischen etwa im 6 % im UT und etwa 18 % bei 20° KW v. OT. Durch die Begrenzung des Beobachtungsvolumens im OT durch den Kolben wird der maximale Anteil nicht im OT, sondern erst etwa 40° KW n. OT erreicht.

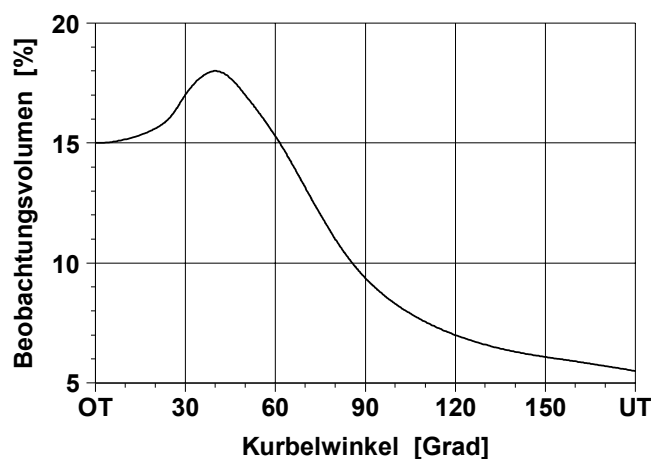


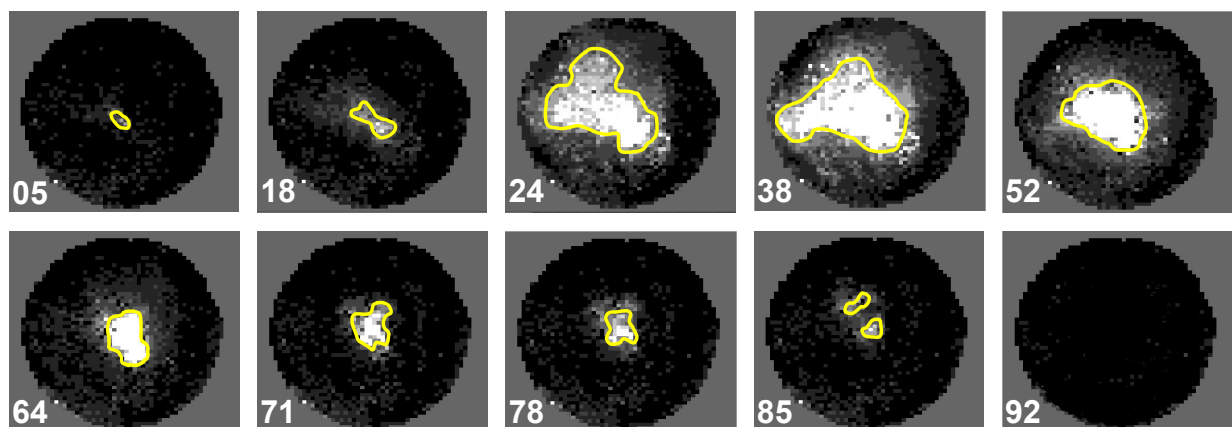
Abb. 9: Beobachtungsvolumen der optischen Sonde in Prozent

4. Ergebnisse

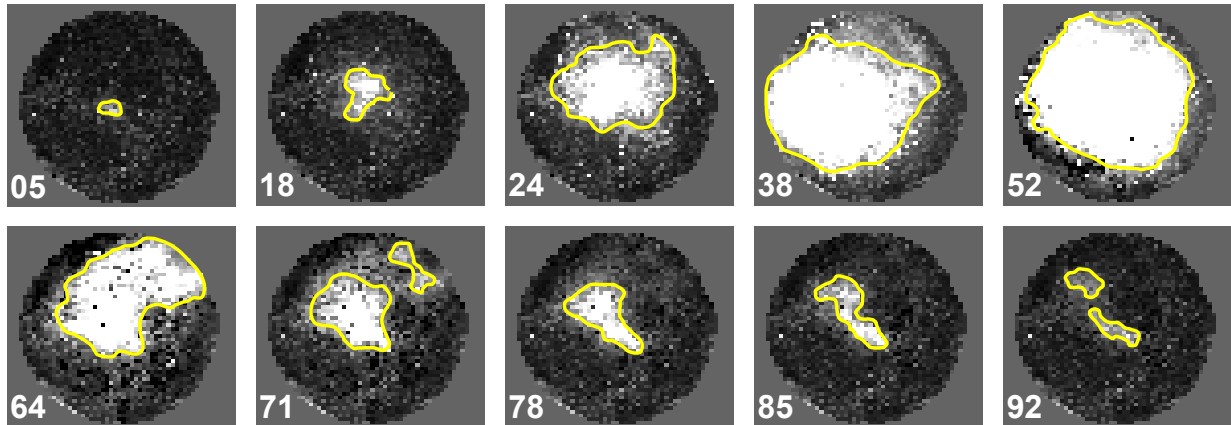
Im Folgenden werden Ergebnisse aus verschiedenen Untersuchungen, die bisher am Versuchsträger durchgeführt worden sind, vorgestellt. Diese umfassen im einzelnen Untersuchungen der Flammenausbreitung mit einem endoskopischen System, Lastvariationen zur Klärung der Rußbildung in Abhängigkeit von Betriebszuständen und Einspritzdruckvariationen, die den Einfluss von Gemischbildungsparametern verdeutlichen sollen. Um den Einfluss der Einlasströmung aufzuzeigen, wurde dieser durch die Abschaltung eines der beiden Ansaugkanäle ein Drall aufgeprägt. Die geometrische Position der Zündkerze wurde ebenfalls in 4 Schritten verändert.

4.1. Flammenausbreitung

In Untersuchungen mit einem zeitlich hochauflösenden Visualisierungssystem wurde die Flammenausbreitung im geschichteten Betrieb aufgenommen. Es konnte gezeigt werden, dass die Flammenkontur gegenüber dem homogenen Betrieb stark zerklüftet ist und der vollständige Ausbrand deutlich langsamer abläuft. Die Rußbildung erfolgt hierdurch über einen längeren Zeitraum hinweg, so dass weniger Zeit zur Nachoxidation zur Verfügung steht und eine höhere Rußkonzentration im Abgastrakt zu erwarten ist. Weiterhin verdeutlichen diese Aufnahmen das Vorhandensein sehr fetter Gebiete, in denen es verstärkt zur Rußbildung kommt. Abb. 10 zeigt den zeitlichen Verlauf der Verbrennung im Beobachtungsvolumen bei 1500 U/min und 2 bar p_{mi} für 2 verschiedene Zyklen im geschichteten Betrieb. Der Zündzeitpunkt (ZZP) lag jeweils bei 44 °KW vor OT. Die Zahlen in den Einzelbildern zeigen den Aufnahmezeitpunkt in °KW nach ZZP. Die Linien in den Bildern stellen die Flammenfronten dar.



Zyklus 1



Zyklus 2

Abb. 10: Aufnahme der Verbrennungsstrahlung von 2 Zyklen bei geschichtetem Betrieb,
 $n = 1500 \text{ U/min}$, $p_{mi} = 2 \text{ bar}$

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass beim Einsatz der Zweifarben-Methode damit zu rechnen ist, dass nicht über den ganzen Zeitraum der Verbrennung das gesamte Beobachtungsvolumen von der Flamme erfasst wird.

Der Einfluss von zyklischen Schwankungen auf die Ladungsschichtung und den damit verbundenen Verbrennungsablauf ist deutlich zu erkennen. Bei Zyklus 1 behält die Flamme ihre räumliche Position weitgehend über die gesamte Brenndauer bei. Im 2. Zyklus wandert die Flamme durch den Brennraum und teilt sich in der zweiten Hälfte in mehrere Bereiche auf. Eine stabile, gleichmäßige Schichtung der Zylinderladung wie im ersten Zyklus ist für eine schnelle und emissionsarme Verbrennung wünschenswert. Eine gleichmäßige Zündungseinleitung als maßgebliche Voraussetzung für gute Gleichlaufeigenschaften der Motors wird dadurch wesentlich erleichtert. Es ist deshalb unbedingt notwendig die Parameter Einspritzstrahlcharakteristik und Luftbewegung über alle Betriebspunkte gezielt beeinflussen und abstimmen zu können beziehungsweise die Streuung derselben über die gesamte Lebensdauer des Motors so gering wie möglich zu halten.

In SPICHER ET AL. (2000) sind weitere Ergebnisse sowie ein Vergleich zum homogenen Betrieb angeführt.

4.2. Lastvariation

Variationen der Last zeigten, dass bei zunehmender Last auf eine gute Zerstäubung des Kraftstoffes Wert gelegt werden muss (REISSING ET AL. (1999)). Eine gute Zerstäubung stellt sicher, dass keine Kraftstofftropfen in die Flamme eingebracht werden und die Zündkerze nicht mit flüssigem Kraftstoff in Kontakt kommt. Das Auftreffen von flüssigem Kraftstoff auf die Zündkerze belastet diese durch Thermoschock und senkt die Lebensdauer. Das Verbrennen von unverdampften Kraftstofftröpfchen führt zu einem starken Anstieg der Rußbildung. Abb. 11

zeigt die zunehmende Rußbildung bei höherer Last infolge unverdampften Kraftstoffes, der mit der Flamme in Kontakt kommt und verdeutlicht, dass mit zunehmender Kraftstoffmenge die Rußrate erhöht wird, wenn nicht ausreichend Zeit zur vollständigen Verdampfung zur Verfügung steht.

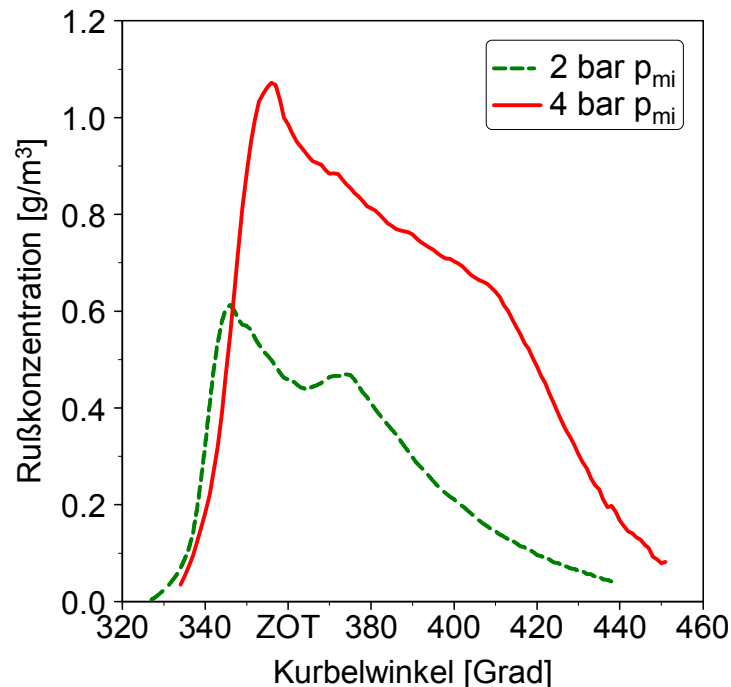


Abb. 11: Lasteinfluss auf die Rußbildung, Drehzahl 1000 U/min

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen vermuten, dass durch eine Variation des Einspritzdrucks die Rußbildung nachhaltig beeinflusst werden kann. Weitergehende Informationen hierzu, können in REISSING (1999) nachgelesen werden.

4.3. Einspritzdruckvariation

Der Einfluss des Einspritzdrucks auf die Rußbildung im Brennraum des Motors wurde mit der Zweifarbenmethode untersucht. Die Temperaturstrahlung der bei der Verbrennung gebildeten Rußpartikel wurde hierzu mit einer Auflösung von 0,2 Grad Kurbelwinkel über 140 Arbeitsspiele erfasst. Die Berechnung der Temperatur- und Rußkonzentrationsverläufe erfolgte für das gemittelte Arbeitsspiel.

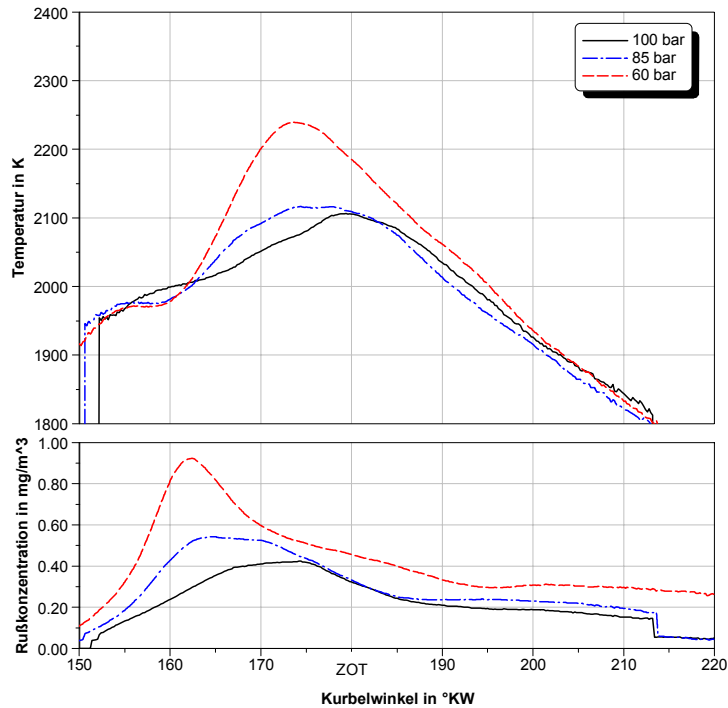


Abb. 12: Raildruckvariation bei $n = 1000 \text{ min}^{-1}$, $p_{mi} = 2 \text{ bar}$

Wie in Abb. 12 zu sehen ist, nimmt die Rußbildung analog zum Dieselmotor mit zunehmendem Einspritzdruck ab. Dies ist auf eine verbesserte Gemischbildung zurückzuführen, da der Tropfendurchmesser bei der Einspritzung abnimmt und durch die verkürzte Einspritzdauer mehr Zeit zur Verdampfung des Kraftstoffs zur Verfügung steht.

4.4. Einlassdrall und weitere Einspritzdruckerhöhung

Der Motor verfügt über zwei parallel geführte Einlasskanäle. Wird einer der beiden Kanäle durch eine Klappe verschlossen, bildet sich ein Drallströmung im Zylinder durch die asymmetrische Einströmung aus. Dadurch könnte die Gemischbildung durch ein besseres Vermischen von Luft und Kraftstoff nochmals unterstützt werden. Außerdem soll eine nochmalige Erhöhung der Einspritzdruckes zu noch kleineren Kraftstofftropfen führen und eine schnellere Verdampfung ermöglichen. Die Auswirkungen sind in der nächsten Abbildung dargestellt.

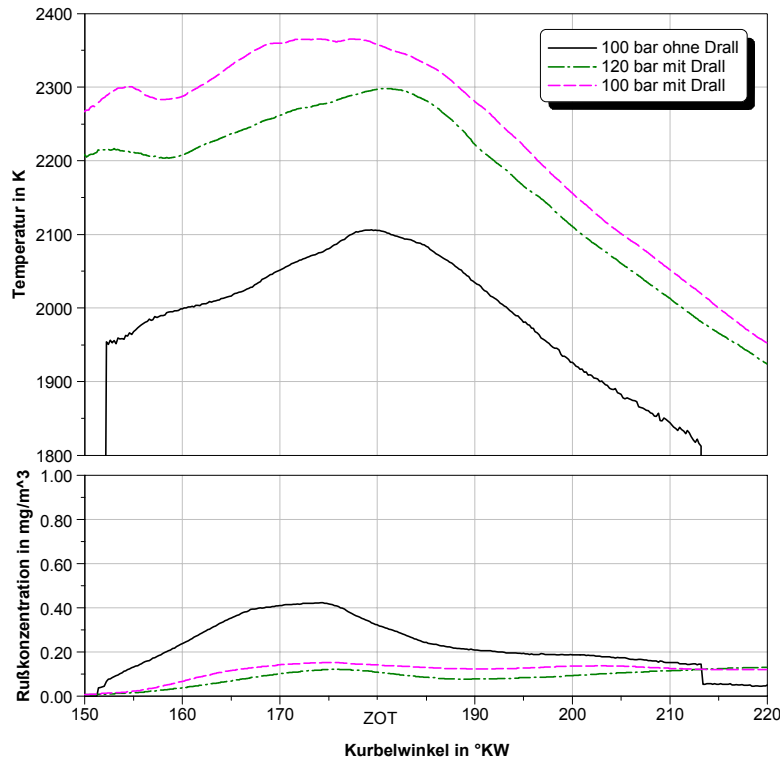


Abb. 13: Weitere Raildruckerhöhung und Einlassdrall bei $n = 1000 \text{ min}^{-1}$, $p_{mi} = 2 \text{ bar}$

Die Überhöhung der Rußbildung, wie sie ohne Einlassdrall zu sehen ist, kommt nicht mehr vor. Durch die verbesserte Gemischbildung wird ein intensiver Kontakt von flüssigem Kraftstoff mit der Zündkerze vermieden. Dies führt zu einer größeren Standzeit der Zündkerze durch geringere Thermoschockgefahr. Außerdem verrußt die Kerze nicht so schnell und kann über längere Zeit eine sichere Zündung einleiten. Allerdings ist die Nachoxidation des Rußes nicht so stark ausgeprägt wie ohne die Drallströmung. Die tatsächlichen Rußemissionen werden sich deshalb nicht stark unterscheiden, was auch die im Abgas gemessenen Schwärzungszahlen belegen, die für alle drei Fälle bei ca. 0,6 liegen.

Bei der Dralleinlassströmung ist gegenüber der Einlassströmung ohne Drall jedoch ein signifikanter Unterschied in der Temperatur zu erkennen. Der Temperaturanstieg von 200 bzw. 250 K ist so zu erklären, dass durch die Abschaltung eines Einlassventils und den damit verbundenen größeren Strömungswiderstand der Einlassströmung die Füllung des Zylinders mit Frischluft verkleinert wird. Durch die kleinere Gemischmasse, wird diese bei gleicher Energiefreisetzung (gleiche Kraftstoffmasse) auf eine höhere Temperatur erhitzt. Außerdem entstehen durch die verbesserte Gemischbildung mehr Zonen mit einem lokalen, stöchiometrischen Luftverhältnis, die bei höheren Temperaturen verbrennen als lokal fettere Zonen bei schlechterer Gemischbildung. Die Verhältnisse sind in Abb. 14 dargestellt.

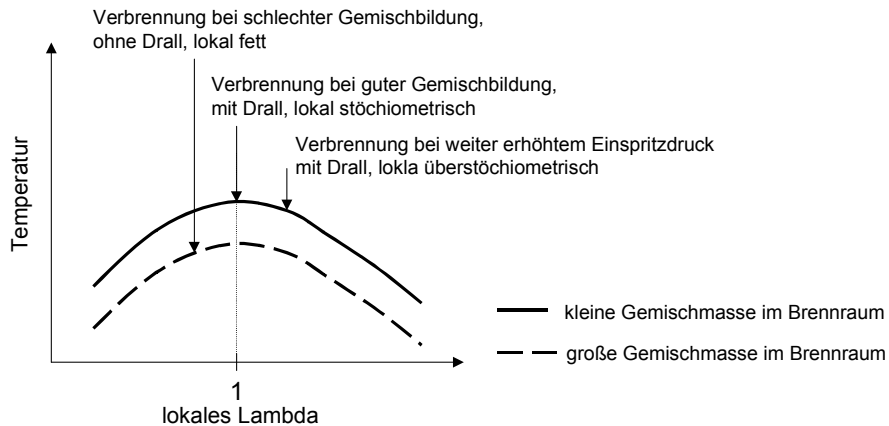


Abb. 14: Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des lokalen Lambdawertes (schematisch)

4.5. Lagevariation der Zündkerze

Ausgehend von der normalen Zündkerzenlage, wurde diese durch unterlegen von Kupferscheibe an der Dichtfläche in 3 Schritten Richtung Brennraumwand, d.h. Richtung Strahlmantel verschoben. Die Dicke der Unterlegscheiben entsprach gerade der Steigung des Kerzengewindes, so dass die Masselektrode immer in die gleiche Richtung zeigte.

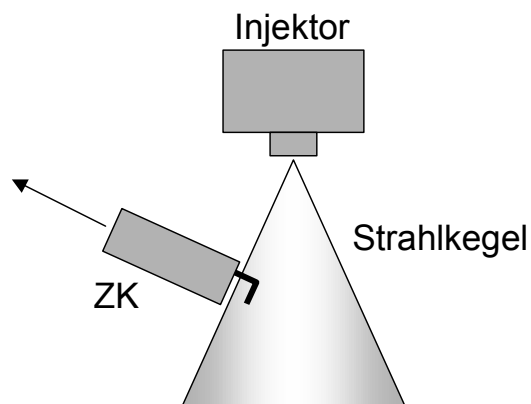


Abb. 15: Schematische Darstellung der Zündkerzenlagevariation

Wie in der oberen Abbildung schematisch dargestellt, wurde die Zündkerze in 3 Schritte um je 1,25 mm in Pfeilrichtung verschoben. Die Ausgangslage wird mit 0 bezeichnet, die Lage am weitesten in Pfeilrichtung verschoben mit 3.

Über 140 Zyklen wurde der indizierte Mitteldruck gemessen und dessen Standardabweichung berechnet. Dabei wurden alle Verbrennungsparameter wie Einspritzzeitpunkt, Zündzeitpunkt und Einspritzdauer konstant gehalten.

Zündkerzenlage	0	1	2	3
p_{mi} in bar	4,0	4,1	3,7	2,6
Standardabweichung	0,222	0,186	0,601	1,886

Tab. 2: Mitteldruck und Standardabweichung bei der Zündkerzenlagevariation

Wie Tab. 2 zu entnehmen ist, sind die Positionen 1 und 2 gut geeignet, die Positionen 2 und 3, bei denen die Kerze weiter am Strahlmantel sitzt, zeigen sehr große Standardabweichungen und inakzeptable Laufunruhen. Bei Position 3 traten ca. 20 % Aussetzer auf. Die Einlassströmung sowie das Strahlbild des Injektors unterliegen statistischen Schwankungen. Nur wenn zum Zündzeitpunkt ein zündfähiges Gemisch an der Kerze vorliegt, findet eine gute Verbrennung statt. Dies ist in einzelnen Zyklen bei allen Positionen der Fall. Durch die Schwankungen bekommt aber die Zündkerze die im äußersten Strahlbereich liegt (3) am häufigsten ein nicht zündfähiges Gemisch ab. Die Kerze, die am weitesten im Strahlinneren liegt verschmutzt zwar schneller und stärker (s. Abb. 16), kann aber auch bei zyklischen Schwankungen des Strahlbildes und der Einlassströmung sicher zünden.

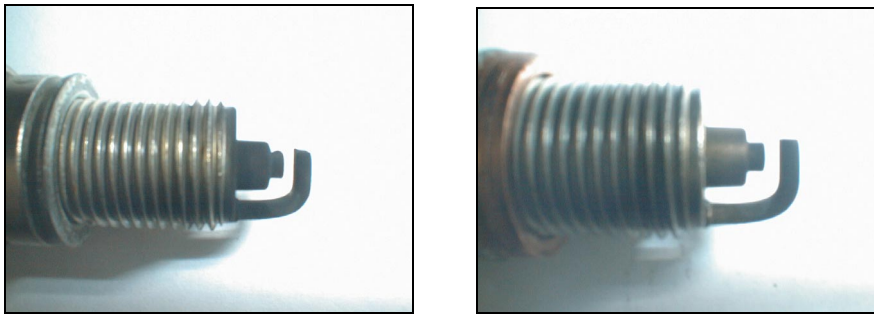


Abb. 16: Rußbelegung der Zündkerze nach ca. 1 Minute Laufzeit. Position 0 (links) und Position 3 (rechts)

Bei „guten Zyklen“, d.h. wenn ein optimales Gemisch an der Kerze vorliegt (alle Zyklen haben $p_{mi} = 4$ bar), ist auch in allen 3 Fällen kaum ein Unterschied in der Rußkonzentration festzustellen.

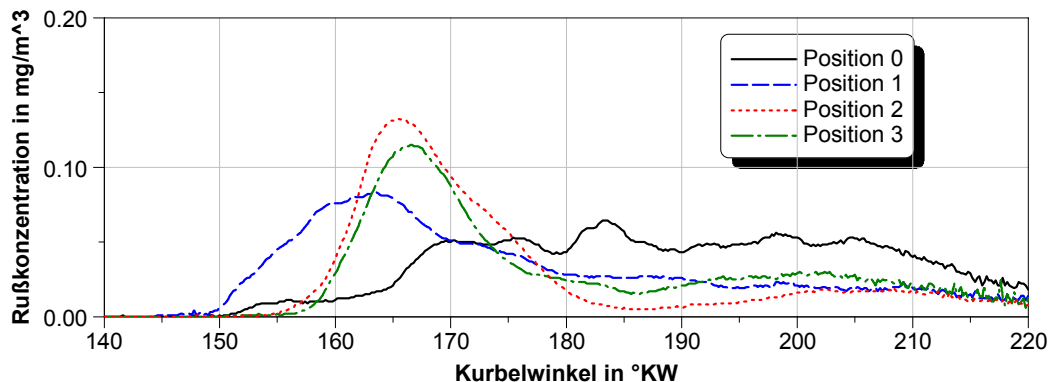


Abb. 17: Rußkonzentrationen bei Einzelzyklen mit jeweils $p_{mi} = 4$ bar

5. Zusammenfassung

Mit Hilfe eines neuartigen Photomultipliersystems konnte der Ablauf der Verbrennung im geschichteten Betrieb eines direkteinspritzenden Ottomotors sichtbar gemacht werden. Mit der erweiterten Zwei-Farben-Methode wurde die Verbrennungstemperatur und die Rußkonzentration kurbelwinkelaufgelöst gemessen.

Eine Erhöhung des Einspritzdruckes führte zu einer deutlichen Reduzierung der Rußbildung während der Verbrennung. Eine weitere Verbesserung brachte die Generierung einer drallbehafteten Einlassströmung in Verbindung mit einer nochmaligen Steigerung des Einspritzdruckes um 20 bar.

Das Verfahren reagiert sehr empfindlich auf zyklische Schwankungen bezüglich Einlassströmung und Einspritzstrahlbild. Eine sehr genaue und über alle Betriebspunkte zuverlässige Abstimmung des gesamten Parameterfeldes ist schwierig und eine der Hauptaufgaben für zukünftige Weiterentwicklungen des strahlgeführten Verfahrens.

Aus den Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass über die richtige Wahl der Einspritzparameter, insbesondere des Einspritzdruckes, eine schadstoffarme Verbrennung bei Benzin-Direkteinspritzung möglich ist. Weitere wichtige Parameter wie z. B. Zylinderinnenströmung, Positionierung von Zündkerze und Injektor, erlauben zusätzliche Verbesserungen.

Zusammengefasst zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass es prinzipiell möglich ist, den Ottomotor mit Direkteinspritzung schadstoffarm zu betreiben, so dass mit einer zusätzlichen, geeigneten Abgasnachbehandlung für Stickoxide zukünftige Abgasgrenzwerte unterschritten werden können bei gleichzeitig erheblich verbessertem Verbrauchsverhalten gegenüber heutigen Ottomotoren. Jedoch ist es noch erforderlich, die entsprechende Einspritztechnik für höhere Einspritzdrücke als heute möglich zu entwickeln, sowie das Brennverfahren hinsichtlich zukünftiger Serienentwicklung weiter zu erforschen und zu entwickeln.

6. Literatur

BOCKHORN H: (1994): Sootformation in Combustion: Mechanics and Models, Springer Series in Chemical Physics, Springerverlag Heidelberg, 1. Auflage

KÖLMEL A. (2000): Analysemethoden zur Charakterisierung der ottomotorischen Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffemissionen, Dissertation, Universität Karlsruhe

MAYER K. (2000): Pyrometrische Untersuchung der Verbrennung in Motoren mit Common-Rail-Direkteinspritzung mittels einer erweiterten Zwei-Farben-Methode

REISSING, J., KECH, J. M., MAYER, K., GINDELE, J., KUBACH, H., SPICHER, U. (1999): „Optical Investigations of a Gasoline Direct Injection Engine“, SAE Technical Paper 1999-01-3688, SAE Fall Meeting 1999, Toronto

REISSING, J. (1999): „Spektroskopische Untersuchungen an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung“, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)

SPICHER, U., KÖLMEL, A., KUBACH, H., TÖPFER, G. (2000): „Combustion in Spark Ignition Engines with Direct Injection“, SAE Technical Paper 2000-01-0649, SAE 2000 World Congress, Detroit