

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

**Untersuchungen zur Entwicklung einer rußfreien
Verbrennung bei Dieselmotoren mit Direkteinspritzung**

U. Wagner, S. Merkel, U. Spicher
Institut für Kolbenmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)

Förderkennzeichen: BWI 23001

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung
werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Juli 2006

Untersuchungen zur Entwicklung einer rußfreien Verbrennung bei Dieselmotoren mit Direkteinspritzung

U. Wagner, S. Merkel, U. Spicher
Institut für Kolbenmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)

Zusammenfassung

Dieselmotoren stellen heute die Antriebsquelle für Kraftfahrzeuge aller Art mit dem höchsten Wirkungsgrad dar. Nur durch ihren Einsatz lassen sich die gesteckten Ziele zur Reduzierung des Kohlendioxidausstoßes im Hinblick auf den Treibhauseffekt erreichen. Ein großes Problem stellt jedoch die Rußemission dieser Motoren dar, die mit heutigen Brennverfahren innermotorisch nicht in dem gewünschten Maß reduziert werden kann. Dies erfordert den Einsatz komplexer und teurer Abgasnachbehandlungssysteme, deren Funktionstüchtigkeit jedoch bei weitem noch nicht zufriedenstellend ist.

Die Hauptquelle für die Rußemission eines Dieselmotors stellt das Zusammentreffen von noch flüssigem Kraftstoff mit der Flamme dar. Dies ist insbesondere bei Motoren mit Direkteinspritzung der Fall, bei denen die Einspritzung aus Geräuschgründen in eine Vor- und eine Haupteinspritzung unterteilt ist. Nach der Zündung des voreingespritzten Kraftstoffes erfolgt die Haupteinspritzung direkt in die Flamme, was eine erhöhte Rußbildung zur Folge hat.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll ein Brennverfahren entwickelt und untersucht werden, welches eine räumliche Trennung der Einspritzungen vornimmt und damit die Rußbildung weitestgehend vermeidet. Im Einzelnen wird dazu ein Einspritzsystemaufbau entwickelt und an einem Versuchsmotor appliziert, der eine ausreichende Flexibilität zur Umsetzung der Einspritzstrategie und des Brennverfahrens besitzt. Die Effekte des modifizierten Einspritzverfahrens auf den Verbrennungsablauf wird sowohl mittels konventioneller Zylinderdruckindizierung und Abgasanalyse als auch mittels hoch komplexer optischer Messtechnik untersucht.

Investigations for the realisation of a soot-free combustion in direct injection Diesel engines

Summary

Up to now Diesel engines with direct fuel injection are the propulsion systems with the highest efficiency for mobile applications. Future targets in reducing CO₂-emissions with regard to global warming effects can only be met using these engines. A major disadvantage of Diesel engines are the high soot emissions which cannot be reduced completely with only engine internal measures today. Therefore highly complex and expensive exhaust gas after-treatment systems are required to meet future emissions regulations. However, all these systems are

expensive and have not yet reached a satisfactory state in regard to a safe and reliable functionality.

The main source for soot formation during the combustion is the interaction of liquid fuel with the flame. This effect appears especially in modern direct injection engines where the injection is often split in a pre- and a main injection due to noise reasons. After the ignition of the pre-injected fuel a part of the main injection can interact with the flame still in liquid phase as the fuel is injected straight towards the already burning cylinder areas. This leads to high amounts of soot.

The proposed injection strategy for this experimental study should overcome this problem by separating the injections spatially and therefore suppress the soot formation. In particular an injection configuration will be developed which gives the degree of freedom to modify the injection in the described manner. The effects of the new injection strategy on the combustion process will be investigated using cylinder pressure indication and exhaust gas analysis as well as sophisticated optical measurement techniques for observing the ignition and combustion directly.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	4
2. GRUNDLAGEN	5
2.1. GEMISCHBILDUNG UND ZÜNDUNG.....	5
2.2. RUßBILDUNG.....	7
3. STAND DER FORSCHUNG	11
4. RÄUMLICHE TRENNUNG DER VOR- UND HAUPT-EINSPRITZUNG	13
4.1. GRUNDLAGEN.....	13
4.2. IDEE UND PRAKTISCHE UMSETZUNG.....	15
5. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK.....	16
5.1. VERSUCHSTRÄGER	16
5.2. ZYLINDERKOPFAUFBAU UND AUFGETRETENE PROBLEME.....	17
5.3. MESSTECHNIK	19
6. ERGEBNISSE.....	20
6.1. UMSETZUNG DER ZYLINDERKOPFKONSTRUKTION	20
6.2. EINSPRITZSTRAHLVISUALISIERUNG	20
6.3. MOTORISCHE UNTERSUCHUNGEN	22
7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	30
8. LITERATUR.....	31

1. Einleitung

Die weltweit immer strenger werdende Abgasgesetzgebung (EU 4, EU 5, SULEV) stellt eine große Herausforderung dar, diese besonders mit verbrauchsarmen Motorkonzepten umzusetzen. Mit heutigen Brennverfahren können diese Grenzwerte allein durch innermotorische Maßnahmen nicht eingehalten werden. Dies macht den Einsatz aufwändiger Abgasnachbehandlungssysteme speziell zur Minderung der Partikelemissionen notwendig. Jedoch sind diese Systeme sehr komplex und stellen bis heute keine Lösung dar, die unter allen Betriebsbedingungen eine zufriedenstellende Funktionstüchtigkeit gewährleistet. Außerdem geht mit diesen Systemen immer ein nicht unerheblicher Kraftstoffmehrverbrauch einher, der gerade im Hinblick auf die angestrebte Minderung des CO₂-Ausstoßes kontraproduktiv ist. Gerade Dieselmotoren mit Direkteinspritzung weisen heute die höchsten Wirkungsgrade als Antriebsquelle für Pkw und Nfz auf, weshalb ihr Einsatz auch weiterhin unumgänglich sein wird, um die angestrebte CO₂-Reduzierung zu erreichen.

In diesen Motoren weichen die Verbrennungsbedingungen oft von einem stöchiometrischen Luftverhältnis ab, so dass neben Kohlendioxid und Wasser auch andere Produkte einer unvollständigen Verbrennung entstehen. Hierbei wird besonders in kraftstoffreichen Brennraumzonen Ruß produziert, der im weiteren Verlauf der Verbrennung nicht vollständig oxidiert wird. Die so verbliebene Rußmenge wird vom Motor emittiert.

Bei heutigen Motoren ist die direkte Kraftstoffeinspritzung meist in eine Vor- und eine Haupteinspritzung unterteilt, um sowohl das Geräusch- als auch das Schadstoffverhalten zu verbessern. Hierbei wird zuerst eine kleine Menge Kraftstoff in den Brennraum eingespritzt, die sich mit der Luft vermischt und entzündet. Im Anschluss daran findet die Einspritzung der Hauptmenge statt. Dabei wird ein großer Teil des Kraftstoffes aufgrund der Düsengeometrie noch flüssig direkt in die Flamme eingespritzt. Durch diese lokal sehr fetten Verbrennungsbereiche werden große Mengen an Ruß produziert, die durch eine nachfolgende Oxidation nicht mehr vollständig abgebaut werden können.

2. Grundlagen

2.1. Gemischbildung und Zündung

Der Prozess des Dieselmotors ist durch Luftansaugung und -verdichtung, Kraftstoffeinspritzung in den Zylinder, Gemischbildung und Selbstzündung gekennzeichnet. Es ist dadurch eine wesentlich höhere Verdichtung als beim klopfempfindlichen Ottomotor mit homogenem Kraftstoff-Luftgemisch realisierbar. Der Dieselmotor ist die Kraftmaschine mit dem höchsten Wirkungsgrad (bei größeren langsamlaufenden Aggregaten bis zu 50 % oder sogar höher). Dieselmotoren können sowohl nach dem 2-Takt- als auch nach dem 4-Takt-Verfahren arbeiten. Im Kraftfahrzeug (Pkw und Lkw) kommen fast ausschließlich 4-Takt-Motoren zum Einsatz (schnelllaufende Dieselmotoren). Für die Einspritzung des Kraftstoffes in den Zylinder, die Gemischbildung, Zündung und Verbrennung steht lediglich eine kurze Zeitspanne von wenigen Millisekunden zur Verfügung.

Der Kraftstoff wird beim Dieselmotor gegen Ende der Verdichtung durch eine Einspritzdüse mit hohem Druck direkt in den Brennraum eingespritzt, d.h. es erfolgt eine innere Gemischbildung. Mit der eingespritzten Kraftstoffmenge wird die Last des Motors geregelt (Qualitätsregelung). Die Einspritzung des Kraftstoffes direkt in den Brennraum und die Selbstzündung haben zur Folge, dass sich der Kraftstoff nur teilweise mit der Luft im Brennraum vermischen kann, bevor die Verbrennung einsetzt. Man spricht in diesem Fall von einer heterogenen Verbrennung.

Wegen des hohen Druckes vor der Düse tritt der Kraftstoff mit hoher Geschwindigkeit und entsprechend hoher Turbulenz aus der Düse aus. Im Strahl zerfällt der Strahlrand wegen der hohen Relativgeschwindigkeit zur hochverdichteten Luft und der Turbulenz sofort in kleine Tropfen. Durch die hohe Verdichtungstemperatur im Brennraum verdampfen die kleinen Tropfen des Strahlmantels sehr rasch. Dadurch ergibt sich ein stark inhomogenes Gemisch, welches im äußersten Strahlmantel mager und im Strahlkern sehr fett und mit Tropfen durchsetzt ist. Es liegt eine Gemischschichtung vor. Im Strahlmantel existiert wegen dieser Schichtung immer eine Zone mit einem optimalen Mischungsverhältnis für die Entzündung.

Bei modernen Dieselmotoren wird die direkte Kraftstoffeinspritzung in den Brennraum meist in mehrere Teileinspritzungen wie eine Voreinspritzung, eine Haupteinspritzung und unter Umständen eine Nacheinspritzung unterteilt. Die einzelnen Teileinspritzungen erfolgen in der Regel mit den selben Einspritzsystemkomponenten und daher in identische Bereiche des Brennraums. Durch eine kleine, der eigentlichen Haupteinspritzung vorgelagerte Voreinspritzmenge werden Vorteile bei den Geräusch- und Stickoxidemissionen im Vergleich zu einer Verbrennung ohne Voreinspritzung erzielt. Der voreingespritzte Kraftstoff verbrennt vor der Verbrennung der Haupteinspritzung und erhöht die Temperatur im Brennraum. Der Zündverzug für den Kraftstoff der Haupteinspritzung verkürzt sich und der Anteil an vorgemischter Verbrennung wird im Verhältnis zur diffusionskontrollierten Verbrennung kleiner. Dies reduziert den maximalen Druckanstieg

(„Dieselschlag“) und die Spitztemperatur während der Verbrennung. Dadurch wird sowohl das Geräuschniveau des Motors gesenkt als auch die Bildung von Stickoxiden während der Verbrennung vermindert.

Die Erhöhung des Anteils diffusionskontrollierter Verbrennung wirkt sich jedoch negativ auf die Rußbildung und damit die Rußemission aus. Dies zeigt sich besonders bei einer auch nur minimal über dem Idealwert liegenden Voreinspritzmenge, bei der die Rußemissionen überproportional ansteigen. Die höhere Rußemission liegt nicht nur an dem größeren Anteil diffusionskontrollierter Verbrennung, sondern auch an weiteren Einflussfaktoren. Einerseits ist das lokale Luftverhältnis für die Haupteinspritzung durch den dort schon umgesetzten Kraftstoff der Voreinspritzung reduziert, was sowohl die Rußbildung erhöht als auch die Rußoxidation während der Verbrennung vermindert. Andererseits kann es zu einem direkten Kontakt von noch flüssigem Kraftstoff der Haupteinspritzung mit dem unter Umständen noch brennenden Kraftstoff der Voreinspritzung kommen.

Bei modernen Dieselmotoren mit Common-Rail-Einspritzung wird oft auch eine Nacheinspritzstrategie sowohl zur Verbesserung der Abgasemissionen als auch zur Einleitung einer Partikelfilterregeneration angewendet. Gerade bei einer späten Nacheinspritzung, wie sie zur Abgastemperaturerhöhung bei einer Partikelfilterregeneration notwendig ist, dringen die Einspritzstrahlen aufgrund des schon deutlich abgesunkenen Zylinderdruckes weit in den Brennraum und sogar bis an die Zylinderwand vor. Dies führt zu einer Wandbenetzung und einem Eintrag von Kraftstoff in das Schmieröl des Motors, wodurch sich die Schmiereigenschaften des Öls verschlechtern und der Motorverschleiß erhöht. Die zylinderachsennahe Nacheinspritzung in zentrale Brennraumbereiche vermeidet diese Wandbenetzung und damit eine mögliche Schmierölverdünnung.

In Abb. 1 ist der Druckverlauf einmal für den Fall mit Voreinspritzung und einmal für den Fall ohne Voreinspritzung dargestellt. Eine Voreinspritzung bietet den Vorteil, dass der Druckgradient verringert wird, was sich positiv auf den Geräuschkomfort auswirkt. Daneben führt eine Verkürzung des Zündverzuges durch Voreinspritzung zur Abnahme der NO_x -Emissionen. Diese Verkürzung des Zündverzuges wirkt sich aber gleichzeitig negativ auf die Rußemissionen aus. Dadurch entsteht ein Trade-Off von Ruß zu NO_x . Ohne Voreinspritzung steigt der Druckgradient steil an, was sich in einem sehr lauten Verbrennungsgeräusch bemerkbar macht. Da keine Voreinspritzung stattfindet, muss die gesamte Kraftstoffmenge umgesetzt werden, was zu einem verlängerten Zündverzug führt, der sich positiv auf die Ruß- und negativ auf die NO_x -Emissionen auswirkt.

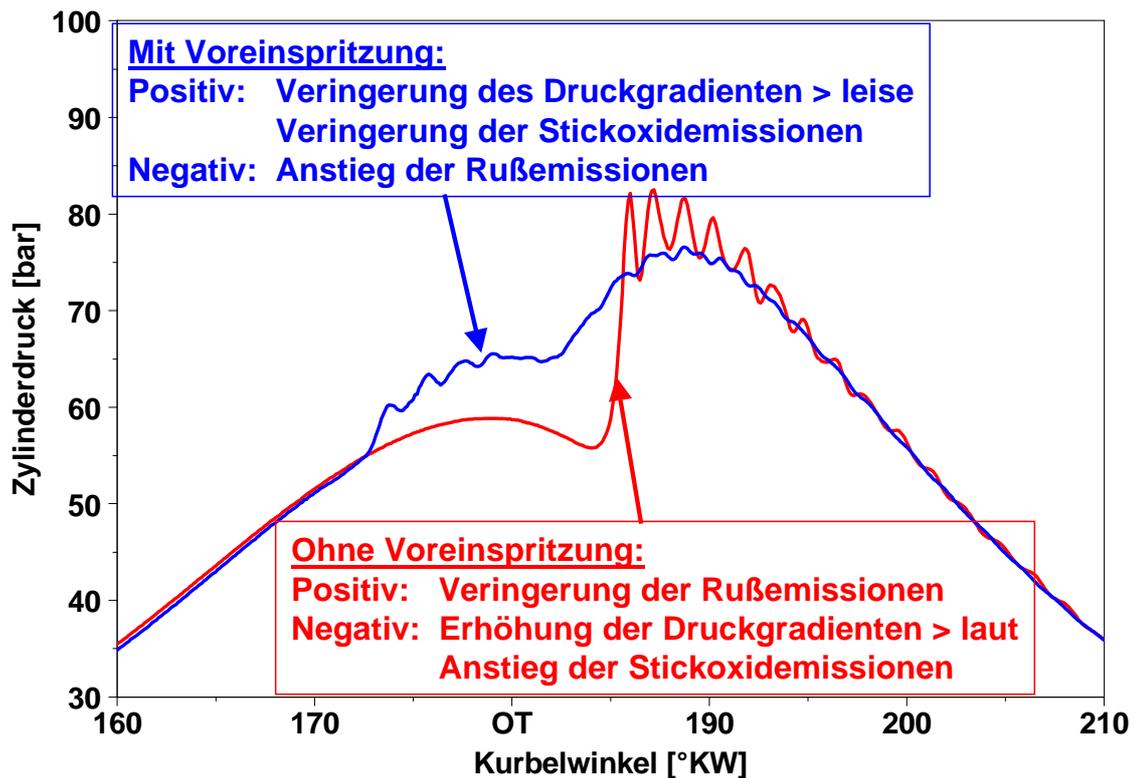


Abb. 1: Druckverlauf mit und ohne Voreinspritzung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll deshalb ein Brennverfahren entwickelt und untersucht werden, welches eine räumliche Trennung der beiden Einspritzvorgänge vornimmt und somit innermotorisch die Bildung großer Rußmengen verhindert. Die räumliche Trennung der beiden Einspritzungen wird erreicht, indem zuerst die Voreinspritzmenge mittels z.B. einer Einspritzdüse mit wenigen Spritzlöchern zentral in den Brennraum eingebracht wird, und anschließend mit einer Mehrlochdüse die Haupteinspritzung in konventioneller Art erfolgt. Nach der Zündung der Voreinspritzmenge findet die Verbrennung vom zentralen Brennraumbereich in Richtung der Haupteinspritzung statt.

2.2. Rußbildung

Die Partikelemissionen sind 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. Ein großes Problem bei der Entwicklung von Dieselmotoren ist daher unumstritten die Rußemission. 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 auseinander gesetzt 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, die allerdings nicht im Brennraum von Motoren durchgeführt wurden, nachgewiesen, dass die Rußbildung auch bei Luft-Kraftstoff-Verhältnissen von $\lambda = 0,6 - 0,7$ einsetzt [2]. 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. In Abb. 2 sind die Entstehungszonen von Ruß und NO_x im Motor dargestellt. Es wird deutlich, dass die Bereiche der Rußentstehung aus den Experimenten, die nicht an Motoren durchgeführt wurden, durchaus auf den motorischen Betrieb übertragbar sind. Des Weiteren zeigt sich die Problematik des Trade-Off von Ruß zu NO_x , da sich die Entstehungszone von NO_x genau in dem Bereich befindet, in denen kein Ruß entsteht. In der Praxis ist es daher nahezu unmöglich, die innermotorischen Randbedingungen durch operative Parameter, wie z.B. AGR, so zu gestalten, dass im gesamten Motorkennfeld der Motor in einem Bereich betrieben wird, in dem wenig Ruß und gleichzeitig wenig NO_x gebildet wird.

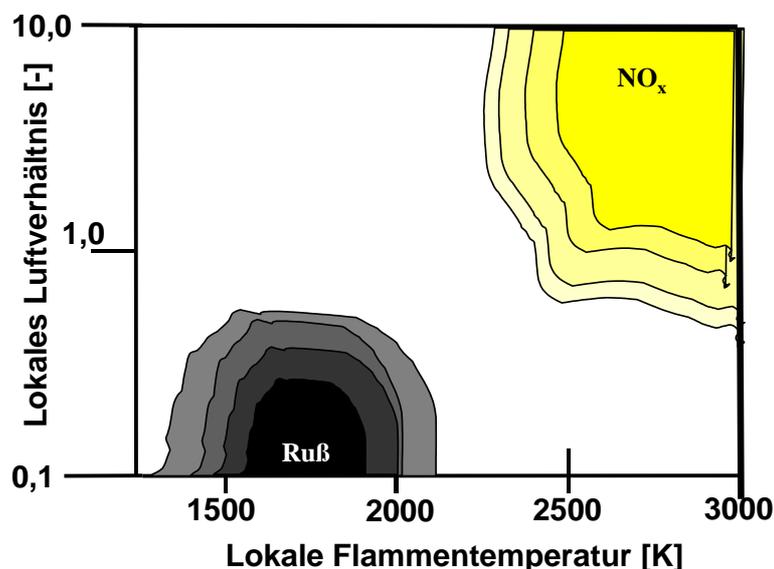


Abb. 2: Rußbildungsbereich

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 [4], [5] und Verbrennungsmotoren [6], [7] 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 von TREE et al. [8] 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.

In zahlreichen Untersuchungen an Ethylen-Luft-Flammen [9], [10] konnte eine starke Druckabhängigkeit sowohl bei der Bildung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) als auch beim Rußvolumenbruch nachgewiesen werden. 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 [6].

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 abnimmt [11].

Nach PISCHINGER et al. [12], [13] lässt sich die Rußbildung während des motorischen Verbrennungsprozesses in vier zeitliche Abschnitte unterteilen:

- ***Rußbildung in stark unterstöchiometrischen Gemischbereichen***

In der ersten Verbrennungsphase sollte deshalb nur wenig Gemisch im unterstöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Verhältnisbereich $0.6 < \lambda < 0.9$ mit einem möglichst kurzen Zündverzug verbrennen, um eine schadstoffarme und geräuschgünstige Verbrennung zu gewährleisten.

- ***Rußbildung durch Kraftstoffeinspritzung in die Flamme***

Das Zusammentreffen von noch flüssigem Kraftstoff der Haupteinspritzung und der durch die Voreinspritzung bereits entzündete Flamme sollte durch eine geeignete Einspritzstrategie weitestgehend vermieden werden, um die Produktion größerer Rußmengen zu verhindern.

▪ **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 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 [15].

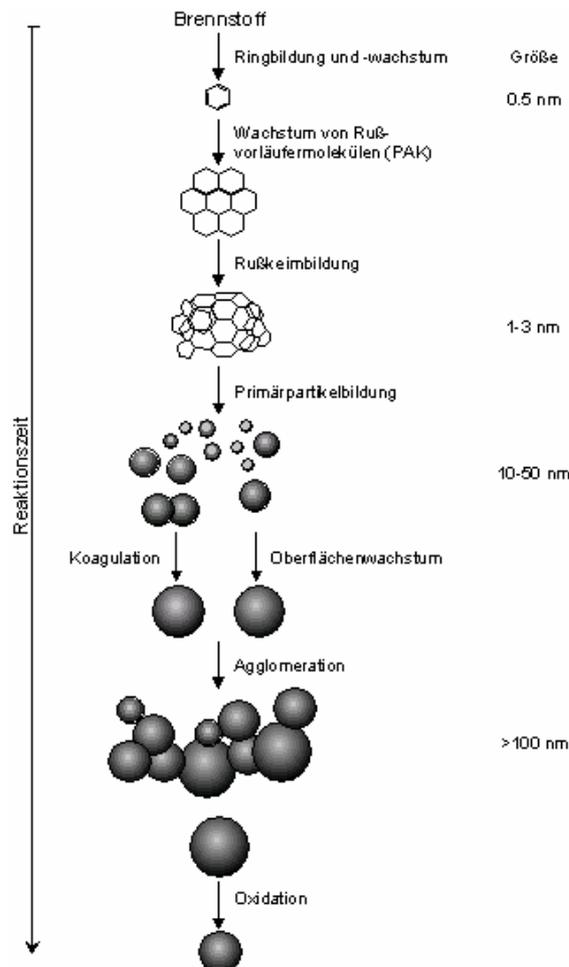


Abb. 3: Rußbildungsphasen nach BOCKHORN (1994) [16]

3. Stand der Forschung

Wie schon erwähnt, ist die Einspritzung bei modernen Common-Rail-Dieselmotoren in eine Vor- und eine Haupteinspritzung unterteilt, um den Verbrennungsablauf hauptsächlich hinsichtlich Geräuschkomfort und Stickoxidemissionen zu optimieren [19]-[30]. Zentrales Problem bei unterteilter Einspritzung ist, dass bei Einbringen der Hauptmenge in den Brennraum der Kraftstoff aufgrund der Düsengeometrie noch flüssig in die durch die Voreinspritzung bereits entzündete Flamme eingespritzt wird. Dadurch entstehen lokal sehr fette Verbrennungsbereiche, was zu einer Produktion von großen Mengen an Ruß führt, die durch eine nachfolgende Oxidation nicht mehr vollständig abgebaut werden können. Die Stickoxide werden bei heutigen Dieselmotoren mit Direkteinspritzung durch Abgasrückführung reduziert. Dies ist allerdings kontraproduktiv zur Rußreduzierung, woraus sich ein Trade-Off von Ruß zu NO_x ergibt. Deshalb ist heute zur Erfüllung weltweiter Abgasnormen ein komplexes und teures Abgasnachbehandlungssystem mit Partikelfilter erforderlich, um die Abgasgrenzwerte einhalten zu können [30]-[33].

DOHLE ET AL.[19] beschreiben die erheblichen Fortschritte bezüglich der Reduzierung der Abgasemissionen und der Erhöhung der spezifischen Leistung und des Komforts, die bei Dieselmotoren in den letzten Jahren gemacht worden sind. Vor allem gelang die „akustische „Zähmung“ des Dieselmotors durch die Beherrschung kleinster Voreinspritzmengen verbunden mit einer großen Flexibilität in der Wahl des Einspritztimings“. In ihrer Arbeit stellen DOHLE ET AL. den deutlichen positiven Einfluss der Piloteinspritzmenge auf den Geräuschkomfort dar. Allerdings nehmen die Stickoxid/Partikel-Emissionen mit steigender Voreinspritzmenge zu. Mit einem hydraulisch verstärkten Injektor (HADI), der den Raildruck im Sackloch der Düse verdoppelt und einer verbesserten Hochdruckpumpe, gelingt es, das Emissionspotenzial um ca. 50% zu verbessern, ohne dass sich der Geräuschkomfort nennenswert verschlechtert.

PISCHINGER ET AL.[22], [23] untersuchen an einem Transparentdieselmotor die Ruß- und die CO-Bildung. Dabei wird die örtliche O_2 -Konzentration und die Temperatur im Zylinder mittels Ramanstreuung analysiert, da diese die entscheidenden Parameter sind, die zur unvollständigen Oxidation von Ruß und CO im Brennraum führen. Zur Charakterisierung von Rußbildung und Rußoxidation wird die Laser-induzierte Inkandescenz (LII) und die simultane Detektion des Rußeigenleuchtens angewendet. Die Messungen in der späten Verbrennungsphase zeigen eine Inhomogenität der Rußverteilung im Brennraum, wobei die höheren Rußkonzentrationen zum Auslass hin verschoben sind. Bei niedrigerem Raildruck nehmen die Rußwolken mehr Fläche ein, so dass die integrale Rußkonzentration höher ausfällt. Dies ist auf eine späte Rußbildung aufgrund des verzögerten Kraftstoffumsatzes zurückzuführen. Obwohl während der Verbrennung in fetten Bereichen im Brennraum eine hohe CO-Konzentration vorzufinden ist, ermöglichen die hohen Temperaturen die vollständige Oxidation von CO durch die kontinuierliche Entrainment-Strömung der Luft in die fette Flammenzone. Ruß wird in fetten Verbrennungsbereichen und dabei vor allem im Strahlkern gebildet. Die CO-Konzentration ist während der Voreinspritzung am höchsten, da hier die schnelle Entrainment-Strömung der Luft eine magere und rußfreie Verbrennung mit niedrigeren Temperaturen, die keine Oxidation von CO erlauben, ermöglicht. Dies führt zu einem Trade-Off von Ruß und CO.

HENEIN ET AL. [27] untersuchen an einem Dieselmotor mit Direkteinspritzung ($p_{me} = 3$ bar bei 1500 min^{-1}) die Einflüsse von verschiedenen Abgasrückführaten (AGR), unterschiedlichen Drallzahlen und unterschiedlichen Einspritzdrücken auf die konventionelle Dieselerbrennung und auf die Niedertemperaturverbrennung (LTC). Die konventionelle Dieselerbrennung ist hierbei gegeben mit AGR-Raten bis 60%, wobei mit steigenden AGR-Raten die NO_x -Emissionen absinken, während die Ruß- und CO-Emissionen ansteigen. Der Trade-Off von Ruß und NO_x entsteht bei Abgasrückführung durch Sauerstoffmangel, der sich nachteilig auf die Rußoxidation und positiv auf die NO_x -Emissionen auswirkt. Die Niedertemperaturverbrennung findet bei AGR-Raten zwischen 60% und 64% statt, was sich positiv auf die Rußemissionen und die NO_x -Emissionen auswirkt, während die CO-Emissionen ansteigen. Erklärt wird dieser positive Effekt bezüglich dem Trade-Off von Ruß und NO_x durch die verbesserte Gemischbildung aufgrund des längeren Zündverzuges bei hohen AGR-Raten und des durch Abgasrückführung gesenkten Temperaturniveaus. AGR-Raten über 64% führen zu instabilen Verbrennungsbedingungen aufgrund starker zyklischer Schwankungen und zu gelegentlichen Verbrennungsaussetzern. Höhere Einspritzdrücke haben aufgrund einer besseren Gemischbildung einen größeren vorgemischten Anteil und wirken sich somit positiv auf die Ruß- und negativ auf die NO_x -Emissionen aus. Bei sehr hohen AGR-Raten und hohen Einspritzdrücken hat die Verbrennung einen größeren Zündverzug und somit einen größeren vorgemischten Anteil, was sich negativ auf die NO_x -Emissionen auswirkt. Höhere Drallzahlen haben grundsätzlich eine verbesserte Gemischbildung zur Folge, die sich positiv auf die Rußemissionen auswirkt. Bei sehr hohen Drallzahlen sinkt allerdings die Gastemperatur ab und wirkt sich somit negativ auf die Rußemissionen aus.

ALRIKSSON ET AL. [25] bewerten in ihrer Arbeit ebenfalls die simultane Reduzierung von Ruß und NO_x durch eine Niedertemperaturverbrennung mit hohen AGR-Raten an einem Einzylinder-Nutzfahrzeug-Dieselmotor. Die Tendenz der Ergebnisse entspricht denen, wie sie von HENEIN ET AL. auch dargestellt wird. Bei sehr hohen AGR-Raten ist der längere Zündverzug aufgrund niedrigerer Temperatur und die damit verbundene längere Gemischbildungsdauer der entscheidende Parameter, um die Ruß-Emissionen abzusenken. Der Mangel an Sauerstoff bei hohen AGR-Raten wirkt sich positiv auf die NO_x -Emission aus, so dass eine gleichzeitige Reduzierung von Ruß und NO_x möglich ist. Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass ein längerer Zündverzug bei hohen Lasten, die ohnehin eine längere Einspritzdauer erfordern, nicht erreichbar ist, da die Temperatur des zurückgeführten Abgases zunimmt.

SEEBODE ET AL. [29] zeigen durch ihre Untersuchungen an einem Einzylinder-Nutzfahrzeug-Dieselmotor ein deutliches Potenzial bezüglich simultaner Reduktion von Ruß und NO_x durch Einspritzratenformung auf. Dabei gelingt es, durch ein flexibles Einspritzsystem die Einspritzratenform anzupassen und zusätzlich über eine Druckmodulation den Leitungsdruck im Rail zu variieren. Dadurch ist es möglich, die Einspritzung während der Düsenöffnung so zu steuern, dass sich für die Schadstoffbildung möglichst ungünstige Bedingungen ergeben. Die besten motorischen Ergebnisse mit klarem Trend zur simultanen Reduzierung von Ruß und NO_x wurden hierbei durch eine druckmodulierte schnelle Rampenform erreicht.

MUELLER [30] beschreibt die Entwicklungs- und Auswahlstrategie von Konzepten zur Erfüllung zukünftiger Abgasnormen für Nutzfahrzeuge von DaimlerChrysler. Bei ähnlicher Anforderung zur

Erlangung eines Abgasemissionszertifikates unterscheiden sich die Prüfzyklen der stationären und instationären Testverfahren in Europa, Japan und USA deutlich, was eine besondere Herausforderung für den Hersteller, der allen Anforderungen gerecht werden muss, darstellt. Bislang konnten Nutzfahrzeug-Motorenentwickler auf den Einsatz aufwändiger Abgasnachbehandlungssysteme durch die ständige Reduktion der Motorrohmissionen verzichten. Zur Erfüllung von Euro5, EPA'07 und Jap'05 werden die Grenzwerte allerdings nicht mehr allein durch innermotorische Maßnahmen erreicht, so dass Abgasnachbehandlungssysteme eingesetzt werden müssen. Hierbei spielen bei der Auswahl vor allem wirtschaftliche Aspekte eine entscheidende Rolle. Die Problematik, wie sie sich z.B. bei Einsatz eines Partikelfilters ergibt, ist der Kraftstoffmehrverbrauch bei Filterregeneration und die Notwendigkeit zusätzlicher Betriebsmittel, wie z.B. Harnstoff bei Einsatz eines SCR-Katalysators zur NO_x-Reduktion.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Erfüllung der zukünftigen Abgasemissionsvorschriften ohne entsprechende Nachbehandlungssysteme noch nicht möglich ist, da alle vorgestellten Konzepte zur Emissionsreduzierung noch nicht ausgereift sind bzw. nur in Teilen des gesamten Motorkennfeldes entsprechendes Potenzial bieten.

4. Räumliche Trennung der Vor- und Haupteinspritzung

4.1. Grundlagen

Um ein Konzept zu entwickeln, welches es ermöglicht, die Bildung großer Rußmengen innermotorisch zu verhindern, bedarf es des genauen Verständnisses des innermotorischen Rußbildungsprozesses. In Abb. 4 ist der prinzipielle Verlauf der Rußkonzentration im Zylinder während der Verbrennung dargestellt [18]. Der gesamte Prozess ist unterteilt in eine erste Rußbildungsphase, in der die Rußkonzentration ansteigt und den darauffolgenden beiden Rußoxidationsphasen, in denen die Rußkonzentration wieder absinkt. Die Einflussgrößen OH, T, O₂ sind in Abb. 4 den jeweiligen Phasen zugeordnet. Es wird deutlich, dass sowohl für die Rußentstehung als auch für die Rußoxidation die Sauerstoffkonzentration eine der Größen ist, welche die vom Motor emittierte Rußmenge entscheidend beeinflusst. An den Aufnahmen des Rußeigenleuchtens in Abb. 4 [17] lassen sich ebenfalls die jeweiligen Phasen des Rußbildungsprozesses erkennen. Dabei ist das gelbe Flammenleuchten ein Zeichen hoher Rußkonzentration und die schwarzen Bereiche ein Hinweis auf Sauerstoff. Es wird deutlich, dass nach der Rußbildungsphase die Rußkonzentration am höchsten ist, während bei Verbrennungsende nach erfolgter Rußoxidation vergleichsweise wenig Ruß vorhanden ist. Außerdem ist zu erkennen, dass sich im Brennraumzentrum ein Sauerstoffüberschuss befindet, der für die Rußoxidation in den Randbereichen nicht mehr nutzbar ist.

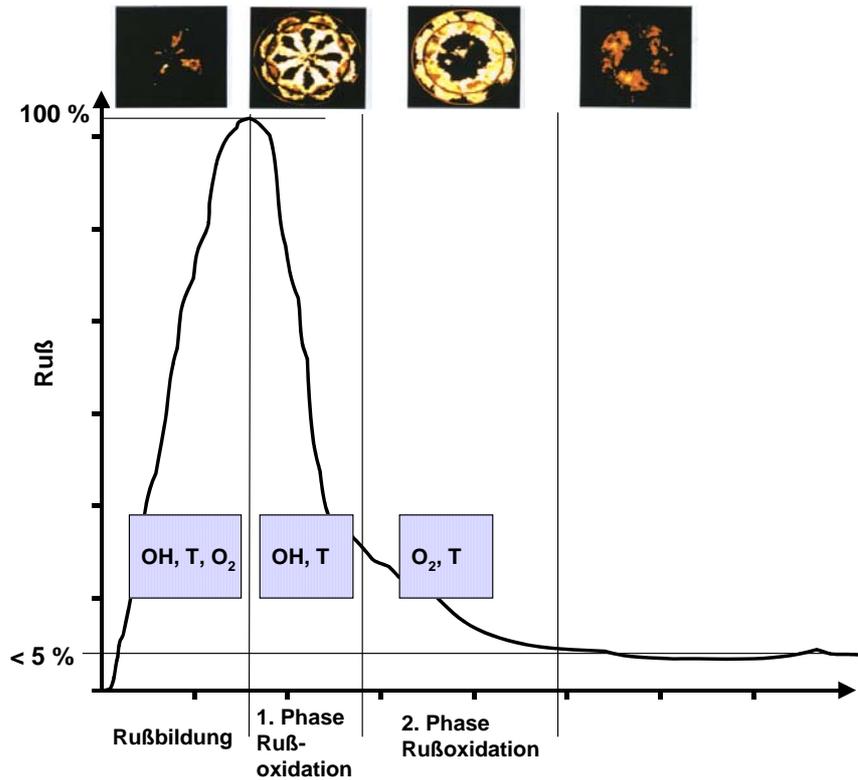


Abb. 4: Prozess der Rußbildung und der Rußoxidation nach VELJI [18]

Um den Einfluss des lokalen Luft-Kraftstoff-Verhältnisses und der Temperatur auf die Rußbildung zu verdeutlichen, ist in Abb. 5 das Diagramm von MUELLER et al. [14] dargestellt.

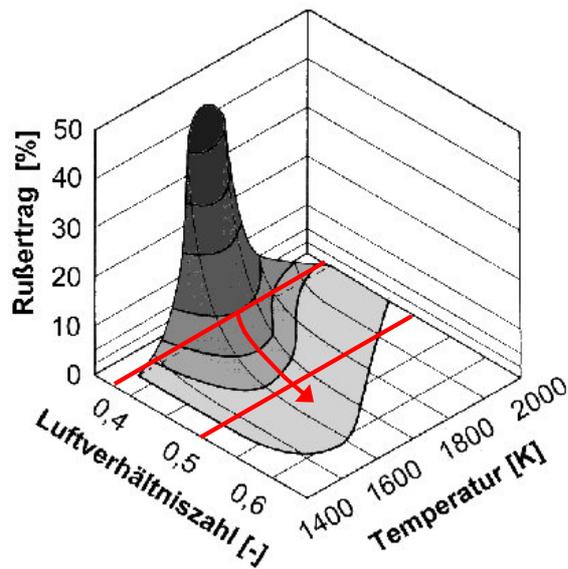


Abb. 5: Einfluss der Temperatur und des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses auf die Rußbildung [14]

Es ist offensichtlich, dass bereits durch eine minimale Anhebung des lokalen Luft-Kraftstoff-Verhältnisses der Rußertrag sehr stark absinkt. Deshalb ist es naheliegend, bei einem neuen Konzept zur innermotorischen Rußreduzierung das lokale Luft-Kraftstoff-Verhältnis zu erhöhen, um die Rußbildung zu reduzieren und die Rußoxidation zu verbessern. Neben der Verbesserung des O₂-Angebots im Brennraum sollte auch durch geeignete Strahlführung das direkte Zusammentreffen von noch flüssigem Kraftstoff und der Flamme vermieden werden, um die Rußbildung weiter einzuschränken. Außerdem sollte das Überangebot an Sauerstoff im Brennraumzentrum besser ausgenutzt werden.

4.2. Idee und praktische Umsetzung

Die Idee, die sich nach der Studie des Rußbildungsprozesses ergibt, ist, den Kraftstoff der Voreinspritzung in einen anderen Bereich des Brennraumes einzubringen als den der Haupteinspritzung. Dadurch wird zum Einen ein direktes Zusammentreffen des während der Haupteinspritzung eingespritzten Kraftstoffes mit den Bereichen, in denen der voreingespritzte Kraftstoff umgesetzt wird, vermieden und zum Anderen das lokale Luft-Kraftstoff-Verhältnis für die Haupteinspritzung erhöht. Außerdem wird die Voreinspritzmenge zentral in den Brennraum eingebracht, um den dort vorhandenen Sauerstoffüberschuss auszunutzen. Die Folge ist eine reduzierte Rußbildung und eine erhöhte Rußoxidation. Um dies zu realisieren, müsste eine Einspritzdüse zur Verfügung stehen, die z.B. die Voreinspritzmenge durch 2 Düsenlöcher zentral in den Brennraum einspritzt und die Hauptmenge konventionell durch z.B. 7 Löcher mit einem großen Spraywinkel um den voreingespritzten Kraftstoff herumlegen kann (Abb. 6). Diese erfordert eine getrennte Ansteuerbarkeit der unterschiedlichen Düsenlochanordnungen.

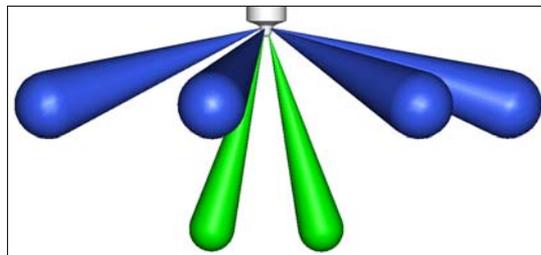


Abb. 6: Konzept der räumlich getrennten Vor- und Haupteinspritzung

Momentan gibt es leider keinen Injektor auf dem Markt, der es ermöglicht, beide Lochanordnungen getrennt anzusteuern. Deshalb wird das Konzept so abgeändert, dass die Vor- und Haupteinspritzung durch verschiedene Injektoren erfolgen kann. Dabei wird zusätzlich zur konventionellen Düse ein zweiter Injektor für die Voreinspritzung in den Zylinderkopf integriert, dessen Düsen Spitze möglichst nah zu der Hauptdüse angeordnet ist und dessen Einspritzstrahlen nicht die der Haupteinspritzung schneiden (Abb. 7).

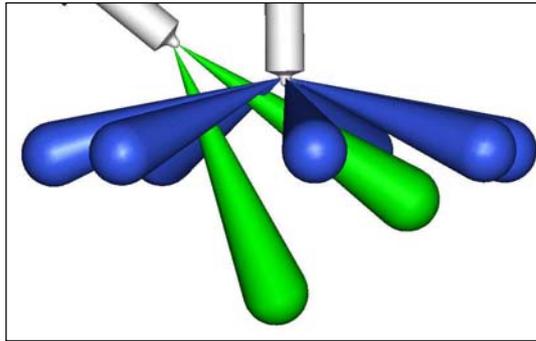


Abb. 7: Umsetzung der räumlich getrennten Vor- und Haupteinspritzung

5. Versuchsaufbau und Messtechnik

5.1. Versuchsträger

Als Versuchsträger kommt ein moderner Einzylinder-Nutzfahrzeug-Dieselmotor von DaimlerChrysler (DC) mit Direkteinspritzung zum Einsatz, der für die durchzuführenden Untersuchungen modifiziert wird. In Tabelle 1 sind die Basiskenngrößen des Motors zusammengefasst.

Hubvolumen	1827 cm ³
Hub	142 mm
Bohrung	128 mm
Verdichtungsverhältnis	17,7:1
Aufladung (fremd)	bis 2,8 bar absolut
Abgasrückführung	extern

Tabelle 1: Motorkenngrößen OM 450 von DaimlerChrysler

Dieser Motor stellt mit seinem Vierventil-Zylinderkopf den Stand der heutigen Technik moderner Dieselmotoren dar, erlaubt gleichzeitig aber auch durch ausreichende Platzverhältnisse eine gute Zugänglichkeit zur Adaptierung zusätzlicher Einspritz- und Messtechnik ohne Beeinflussung der Abläufe im Zylinder.

Der Prüfstand ist sowohl mit einer Wirbelstrombremse als auch einem Elektromotor ausgestattet. Die Aufladung erfolgt über einen Schraubenlader, der von einem Elektromotor angetrieben wird. Dies erlaubt eine vom Verbrennungsmotorbetrieb unabhängige Anpassung des Ladedruckes. Der maximal mögliche Ladedruck beträgt 2,8 bar absolut.

Die Einspritzung wird von einem Pumpe-Leitung-Düse-System (PLD-System) auf ein modernes Common-Rail-System umgebaut, welches die Anpassung der für die Einspritzung relevanten Parameter unabhängig von der Kurbelstellung des Motors erlaubt. Ein solches System stellt die Voraussetzung zur Umsetzung fortschrittlicher Brennverfahren dar. Zur Umsetzung der räumlichen Trennung von Vor- und Haupteinspritzung werden zwei Injektoren verwendet, die unabhängig voneinander angesteuert werden können.

Weiterhin ist der Prüfstand mit einer Öl- und Wasserkonditionierung ausgestattet, um die Warmlaufphase zu verkürzen und die damit verbundene Verschmutzung der optischen Zugänge zu minimieren. Außerdem können durch eine vollständige Konditionierung die motorischen Randbedingungen während der Untersuchungen konstant gehalten werden.

5.2. Zylinderkopfaufbau und aufgetretene Probleme

Bei dem Zylinderkopf des Versuchsmotors handelt es sich um einen konventionellen Zylinderkopf mit einer zentral zwischen den vier Gaswechselventilen platzierten Einspritzdüse. Diese Injektorposition sollte für die Haupteinspritzung beibehalten werden, jedoch wird der Serieninjektor durch einen Nutzfahrzeug-Common-Rail-Injektor ersetzt. Für die Voreinspritzung kommt ein zweiter Injektor zum Einsatz. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen Common-Rail-Injektor, wie er serienmäßig in Pkw verbaut wird. Aufgrund der geringen Voreinspritzmenge im Vergleich zur Haupteinspritzmenge ist ein Pkw-Injektor in diesem Fall ausreichend.

Zusätzlich zu den Modifikationen am Zylinderkopf, die zur Aufnahme des zweiten Injektors notwendig sind, wurden noch zwei weitere Zugänge integriert, die den Einsatz verschiedener optischer Messtechniken ermöglichen, ohne die Vorgänge im Zylinder zu beeinflussen. Mit Hilfe dieser optischen Zugänge kann sowohl ein Laserlichtschnitt in den Brennraum eingekoppelt und mit einer CCD-Kamera beobachtet als auch die bei der Verbrennung entstehende Strahlung erfasst werden. Die Lage der Injektoren und der optischen Zugänge im Zylinderkopf sind in Bild Abb. 8 dargestellt.

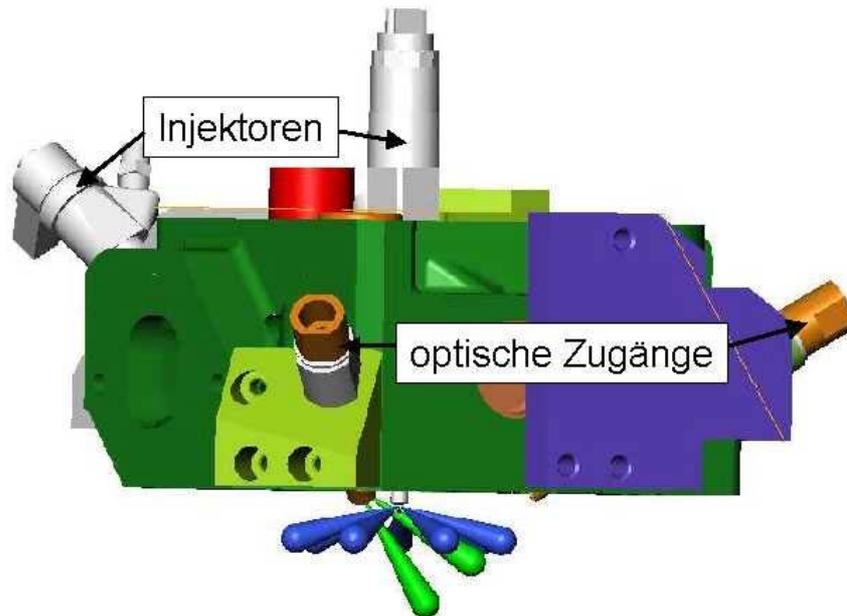


Abb. 8: Zylinderkopfaufbau

Die Lage der Einspritzstrahlen von Vor- und Haupteinspritzung ist schematisch sowohl in Abb. 8 als auch senkrecht dazu in Abb. 9 dargestellt. Im realen Betrieb erfolgt die Voreinspritzung selbstverständlich vor der Haupteinspritzung und ist abgeschlossen, sobald die Ansteuerung des Injektors für die Haupteinspritzung erfolgt. Die Voreinspritzung erfolgt zentral in den Brennraum mit einer Zweilochdüse, um einen möglichst großen räumlichen Abstand zu den Einspritzstrahlen der Haupteinspritzung zu gewährleisten. Die Haupteinspritzung erfolgt mit einer konventionellen Siebenlochdüse, wie sie serienmäßig in schweren Nutzfahrzeugen zum Einsatz kommt.

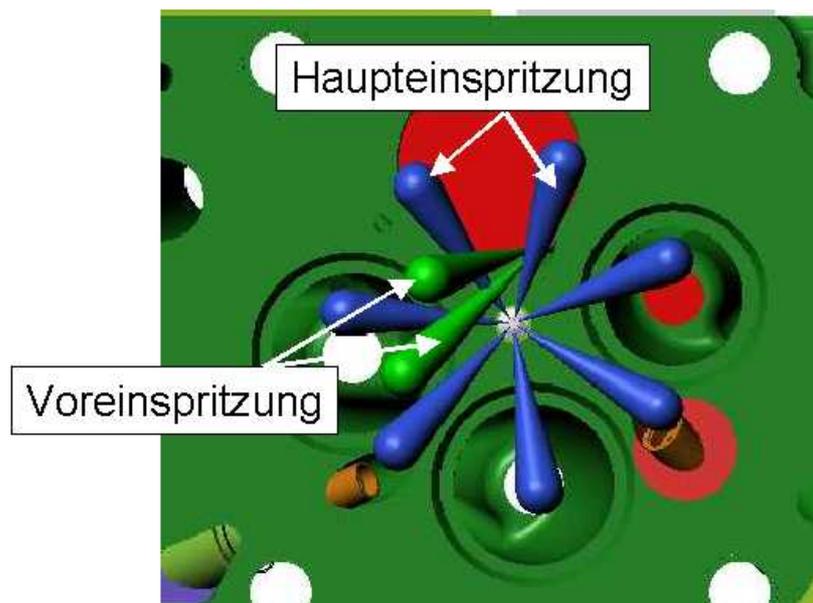


Abb. 9: Lage der Einspritzstrahlen

Im Ganzen erwies sich die Einbringung der zusätzlich notwendigen Bohrungen in den Zylinderkopf als sehr kompliziert und erforderte umfangreiche Konstruktionsstudien und Iterationsschritte. Da es sich bei dem verwendeten Zylinderkopf um ein Serienbauteil handelt, ist dieses natürlich für den konkreten Serieneinsatzzweck und nicht für den Einbau weiterer Messtechnik optimiert. Dies erschwert die notwendigen Modifikationen, z.B. aufgrund mangelhafter Platzverhältnisse oder Wandstärken.

Zum Einen ist es aufgrund der Lage der Zylinderkopfschrauben zu den Gaswechselventilen schwierig, zusätzliche Bohrungen zylinderradial zwischen den Ventilen zu plazieren. Zum Anderen muss bei diesen zusätzlichen Bohrungen auch die Abdichtung zwischen Wassermantel und Brennraum bzw. Wassermantel und Abgastrakt / Zylinderaußenseite berücksichtigt werden. Speziell zur Integration des zweiten Injektors für die Voreinspritzung musste der Auslasskanal angeschnitten sowie ein Auslassventil deaktiviert und verschlossen werden, was zu erheblichen Komplikationen führte.

5.3. Messtechnik

Strahlvisualisierung

Zur Analyse der Strahlausbreitung an einer Einspritzkammer wird eine CCD-Kamera in Verbindung mit einem Stroboskop als Beleuchtungsquelle eingesetzt. Bei der Kamera handelt es sich um eine CCD-Kamera der Fa. LaVision, deren Chip eine Auflösung von 1392 x 1024 Pixel besitzt.

Zur Aufnahme schneller Bewegungen mit kurzer Belichtungszeit sind energiereiche Lichtimpulse notwendig, um eine ausreichende Helligkeit zur Verfügung zu stellen. Hierfür wird ein Bildverarbeitungsstroboskop Typ BVS-020 der Fa. Polytec verwendet, welches mit einer Xenonblitzlampe die Objektausleuchtung übernimmt.

Abgasmesstechnik

Für die Messung der Komponenten NO_x , O_2 , HC, CO, CO_2 im Abgas steht eine Standardabgasmessanlage der Firma Peus-Systems GmbH zur Verfügung, die den ECE- bzw. den EWG-Richtlinien entspricht.

Zur Bestimmung des Rußgehaltes im Abgas wird das AVL 415S Smoke Meter eingesetzt. Es besteht aus Abgassonde und Entnahmeggerät mit Pneumatik, photoelektrischem Messkopf, Schaltwerk, Filterpapiermanagement und Reduzierventil. Die Messanlage entnimmt dem Abgas mittels einer Sonde, die an den Abgastrakt angeschlossen wird, ein Probevolumen (1 Liter). Dieses Volumen ist bei allen Messungen gleich. Es wird durch weißes Filterpapier gesaugt. Die zurückbleibende, durch die Rußpartikel im Abgas verursachte, Schwärzung des Filterstreifens wird mittels einer Photozelle erfasst. Der Schwärzungsgrad wird als Filter Smoke Number (FSN) ausgegeben. Die Skala reicht von 0-10. Über eine empirisch ermittelte Formel wird dann die Rußmasse errechnet und auf die Leistung bezogen, um die spezifische Rußemission angeben zu können.

6. Ergebnisse

6.1. Umsetzung der Zylinderkopfkonstruktion

Die notwendigen Modifikationen am Zylinderkopf zur Einbringung des zweiten Injektors sowie der optischen Zugänge zur Visualisierung der Prozesse im Zylinder wurden nach der Ausarbeitung am 3D-CAD-Modell am realen Zylinderkopf umgesetzt. Abb. 10 zeigt den bearbeiteten Zylinderkopf mit den zusätzlichen Bohrungen und optischen Zugängen.



Abb. 10: Bearbeiteter Zylinderkopf

6.2. Einspritzstrahlvisualisierung

Die Visualisierung der Einspritzung zur Beurteilung der Lage der Einspritzstrahlen sowie einer möglichen gegenseitigen Beeinflussung der Teileinspritzungen erfolgte vorab an einer atmosphärischen Druckkammer. Hierbei werden die flüssigen Kraftstoffstrahlen mit einer Blitzlampe global beleuchtet und senkrecht zur Beleuchtungsrichtung mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Abb. 11 und Abb. 12 zeigen den Aufbau der Messanordnung schematisch und in Realität.

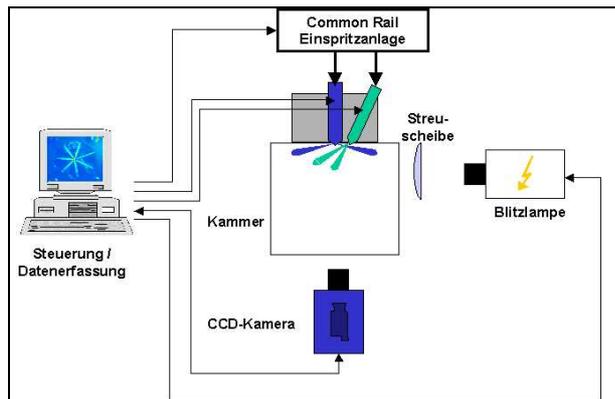


Abb. 11: Schema Druckkammeraufbau

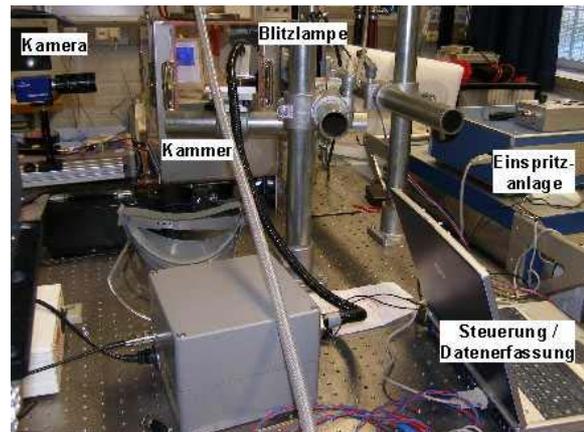


Abb. 12: Messaufbau real

Bei den Untersuchungen zur Einspritzstrahlausbreitung wurden die Injektoransteuerzeiten und -dauern variiert, um den Einfluss einer möglichen Interaktion der Einspritzstrahlen auf deren Lage zu ermitteln. Abb. 13 zeigt beispielhaft eine Aufnahme der Einspritzung bei gleichzeitiger Ansteuerung beider Injektoren, d.h. der kritischste Fall für eine gegenseitige Beeinflussung. Es ist eine leichte Interaktion von zwei Strahlen von Vor- und Hauptinjektor zu erkennen. Im Realbetrieb des Motors tritt dies in dieser Form aufgrund des zeitlichen Versatzes der Einspritzungen nicht auf. Somit ist im Motorbetrieb eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen, wie es in Abb. 14 dargestellt ist.

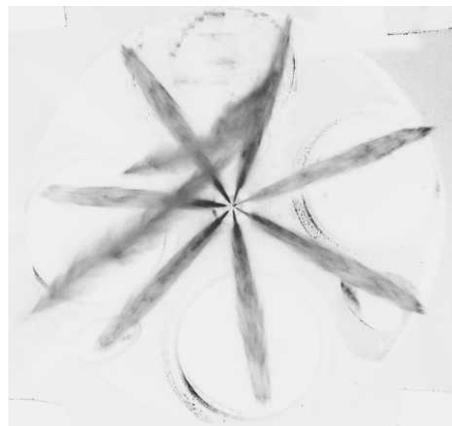


Abb. 13: Einspritzstrahlausbreitung bei gleichzeitiger Ansteuerung

Abb. 14 zeigt den zeitlichen Ablauf eines gesamten Einspritzvorganges bestehend aus einer Vor- und einer Haupteinspritzung bei einem Einspritzdruck von 400 bar. Bis zu einem Zeitpunkt von 1465 μs nach Injektoransteuerbeginn (n. ASB) sind nur die beiden Strahlen der Voreinspritzung zu erkennen. Ab 1665 μs n. ASB sind die Strahlen der Haupteinspritzung zu sehen, während der Flüssiganteil der Voreinspritzung immer weiter abnimmt und daher die Abbildung dieser Einspritzstrahlen schwächer wird.

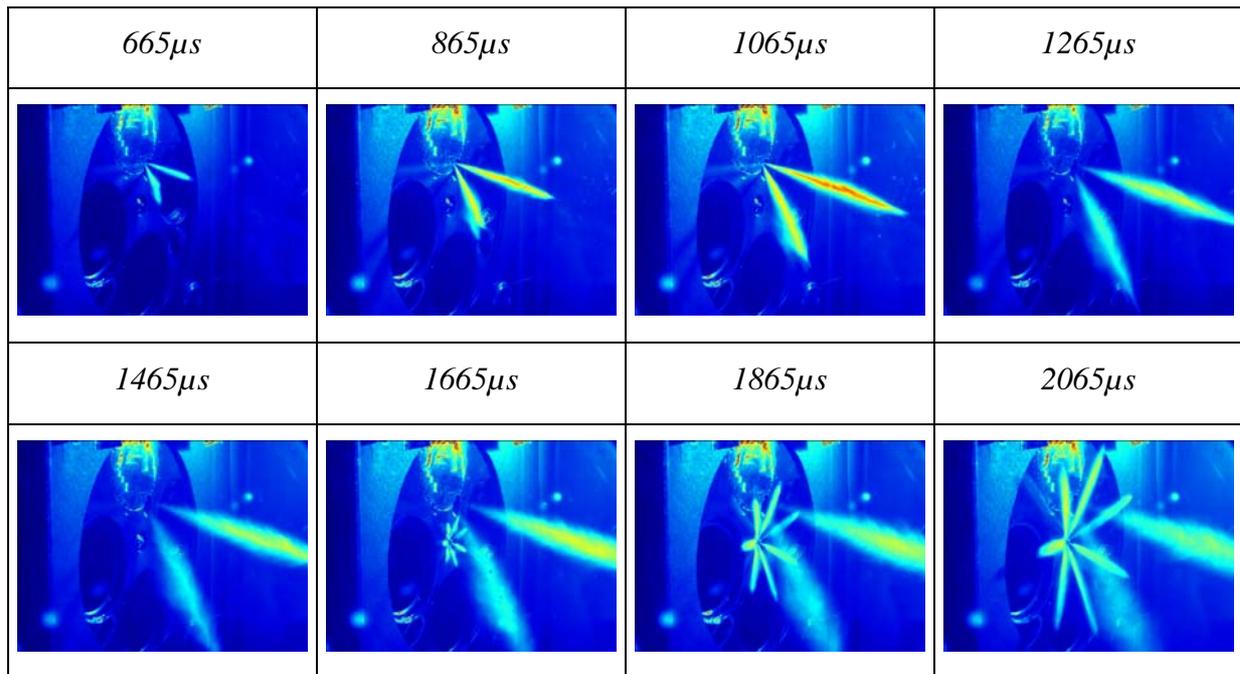


Abb. 14: Ablauf eines Einspritzvorganges (ESD 400 bar)

Aus der Zeitserie der Einspritzung wird deutlich, dass sich die Strahlen der Vor- und Haupteinspritzung nicht treffen. Im Betrieb bedeutet dies, dass flüssiger Kraftstoff der Haupteinspritzung und die bereits entzündeten Strahlen der Voreinspritzung nicht zusammentreffen. Durch die Voreinspritzung in das Brennraumzentrum kann außerdem das dort vorhandene Überangebot des Sauerstoffs (vgl. Abb. 14) ausgenutzt werden.

6.3. Motorische Untersuchungen

Um das Potenzial der räumlich getrennten Vor- und Haupteinspritzung aufzuzeigen, wurden als Vergleichsbasis zunächst Referenzmessungen mit konventioneller Voreinspritzstrategie durchgeführt, d.h. sowohl Vor- als auch Haupteinspritzung erfolgt mit dem zentralen Injektor. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird das Luftverhältnis, der indizierte Mitteldruck und die Einspritzmenge bei beiden Einspritzstrategien jeweils konstant gehalten und eine Variation des Einspritzzeitpunktes, der Einspritzmenge und der Abgasrückführrate (AGR-Rate) durchgeführt. Sie ist definiert als die Masse des rückgeführten Abgases (m_{AGR}) bezogen auf die gesamte Masse ($m_{AGR} + m_{Luft}$). In Tabelle 2 sind die Variationsparameter und die Betriebsbedingungen dargestellt. Der Motor wird mit 0% und 35% AGR betreiben. Der Einspritzzeitpunkt der Haupteinspritzung wird zwischen 13° KW v. OT bis 5° KW n. OT in 2° KW-Schritten variiert. In allen Fällen beträgt der Abstand zwischen dem Ansteuerbeginn (ASB) der Voreinspritzung zu dem der Haupteinspritzung 10° KW. Bei Variation der Voreinspritzmenge wird die gesamte Kraftstoffmenge konstant gehalten, indem die Hauptmenge in dem Maße reduziert wird, wie die Voreinspritzmenge angehoben wird. Die voreingespritzte Menge wurde dabei über das Luft-

Kraftstoff-Verhältnis bei ausgeschalteter Haupteinspritzung berechnet. Alle Messungen wurden bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} und einem Einspritzdruck von 1400 bar durchgeführt.

Parameter	Werte		
AGR-Rate [%]	0	35	
ASB Haupteinspritzung [°KW]	13° v. OT bis 1° v. OT		
ASB Voreinspritzung	10° KW vor ASB Haupteinspritzung		
Voreinspritzmenge [mg]	4	6	11

Tabelle 2: Variationsparameter und Betriebsbedingungen

Rußemission

Abb. 15 und Abb. 16 zeigen die spezifische Rußemission bei Variation des Einspritzzeitpunktes für 0% AGR und 35% AGR. In beiden Fällen steigen erwartungsgemäß die Rußemissionen bei konventioneller Einspritzstrategie mit Spätverstellung des Einspritzzeitpunktes. Der Grund hierfür ist ein verkürzter Zündverzug bei späterem Einspritzzeitpunkt, so dass weniger Zeit für die Gemischbildung bleibt, was sich negativ auf die Rußemissionen auswirkt. Bei räumlich getrennter Vor- und Haupteinspritzung fällt die Rußemission bei 0% AGR und Spätverstellung des Einspritzzeitpunktes leicht ab, was so nicht erwartet wurde. Zurückzuführen ist dieser Effekt eventuell auf schlechte Einspritzbedingungen der Voreinspritzung bei frühen Einspritzzeitpunkten, so dass z.B. die Kolbenstellung derart ungünstig ist, dass gerade die Kolbenmuldenkante angespritzt wird. Bei 35% AGR bleibt die Rußemission auf einem nahezu konstant niedrigen Niveau. Der Grund hierfür liegt in der mit der längeren Zündverzugszeit verbundenen besseren Gemischbildung aufgrund der AGR auch bei späteren Einspritzzeitpunkten. Die räumliche Trennung von Vor- und Haupteinspritzung sorgt dafür, dass noch flüssiger Kraftstoff aus der Haupteinspritzung und die durch die Voreinspritzung bereits entzündete Flamme nicht zusammentreffen. Dies vermeidet die Produktion großer Mengen an Ruß. Die geringe Änderung des lokalen Luftverhältnisses führt zu einer starken Reduzierung der Rußemission, wie es von HANSEN et al. [2] und MUELLER et al. [14] auch in der Theorie beschrieben wird. Dazu begünstigt eine lokale Abmagerung im Brennraum durch die räumliche Trennung der Einspritzung die Rußoxidation.

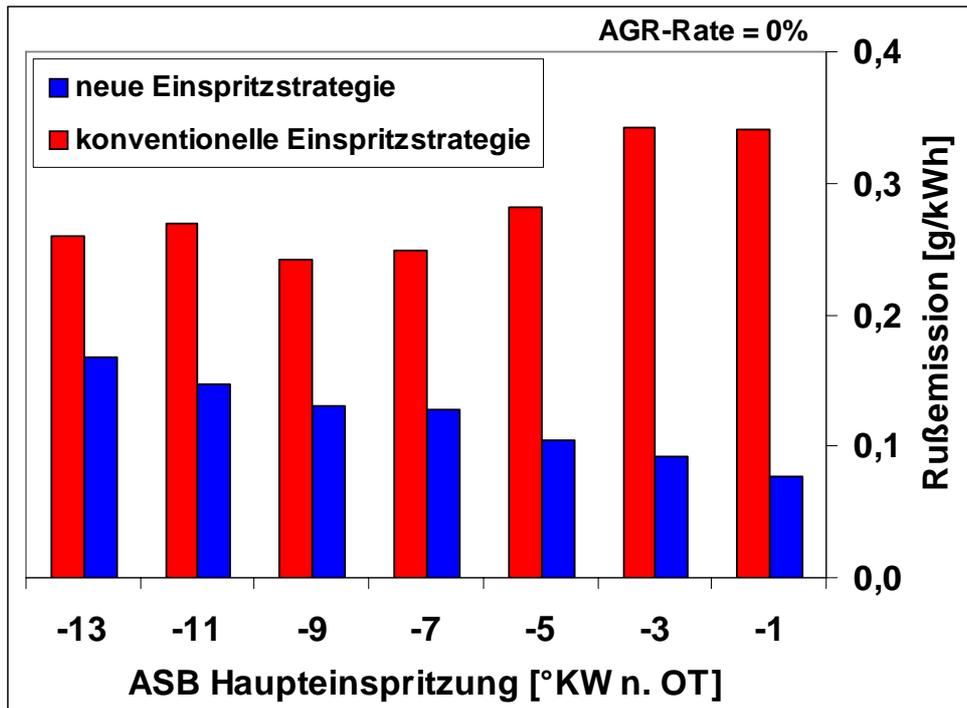


Abb. 15: Rußemission bei Einspritzzeitpunktvariation mit 0% AGR

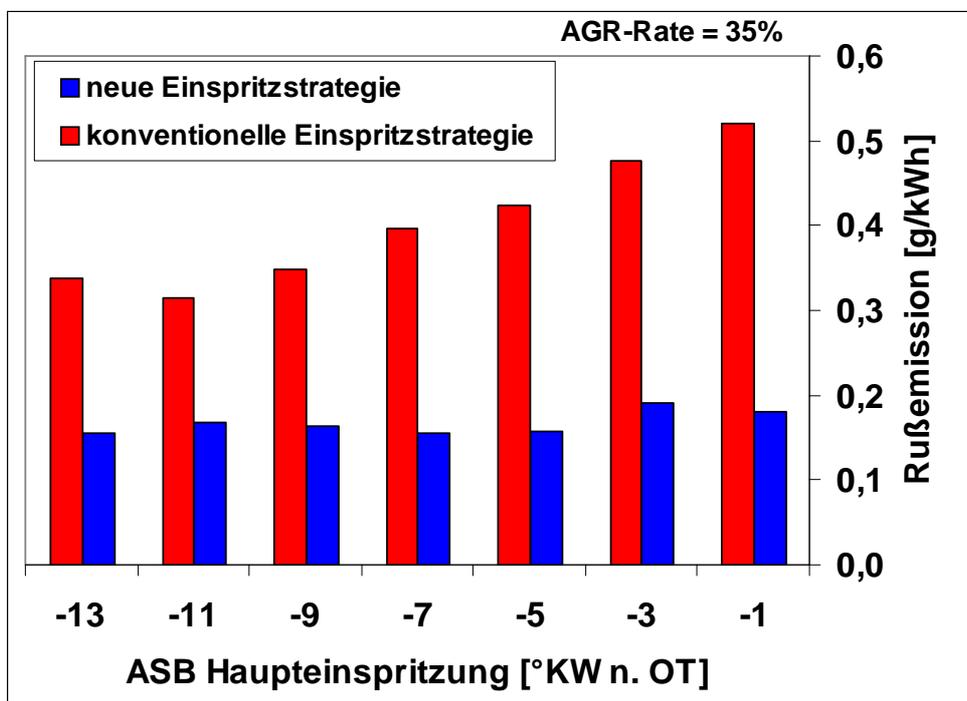


Abb. 16: Rußemission bei Einspritzzeitpunktvariation mit 35% AGR

NO_x-Emissionen

In Abb. 17 und Abb. 18 sind die NO_x-Emissionen analog zu den Rußemissionen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei einer AGR-Rate von 35% die NO_x-Emissionen für beide Einspritzstrategien deutlich niedriger sind als bei 0% AGR. Zurückzuführen ist dies auf einen Mangel an Sauerstoff aufgrund AGR. Der für ein heterogenes Dieselmotorenverfahren bekannte Trend, dass die NO_x-Emissionen mit Spätverstellung des Einspritzzeitpunktes abnehmen, ist ebenfalls zu erkennen. Der Grund hierfür liegt an der verkürzten Zündverzugszeit. Bei verkürztem Zündverzug ist der vorgemischte Luft-Kraftstoff-Anteil geringer, was zu weniger vorgemischter Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemisches und einem damit verbundenen niedrigeren Temperaturniveau führt. Bei Vergleich beider Einspritzstrategien wird deutlich, dass die NO_x-Emissionen für die räumliche Trennung der Vor- und Haupteinspritzung etwas höher sind als bei konventioneller Einspritzstrategie. Dies ist ein Resultat des lokal magereren Gemisches bei räumlicher Trennung der Vor- und Haupteinspritzung, was sich positiv auf die Rußemissionen und negativ auf die NO_x-Emissionen auswirkt.

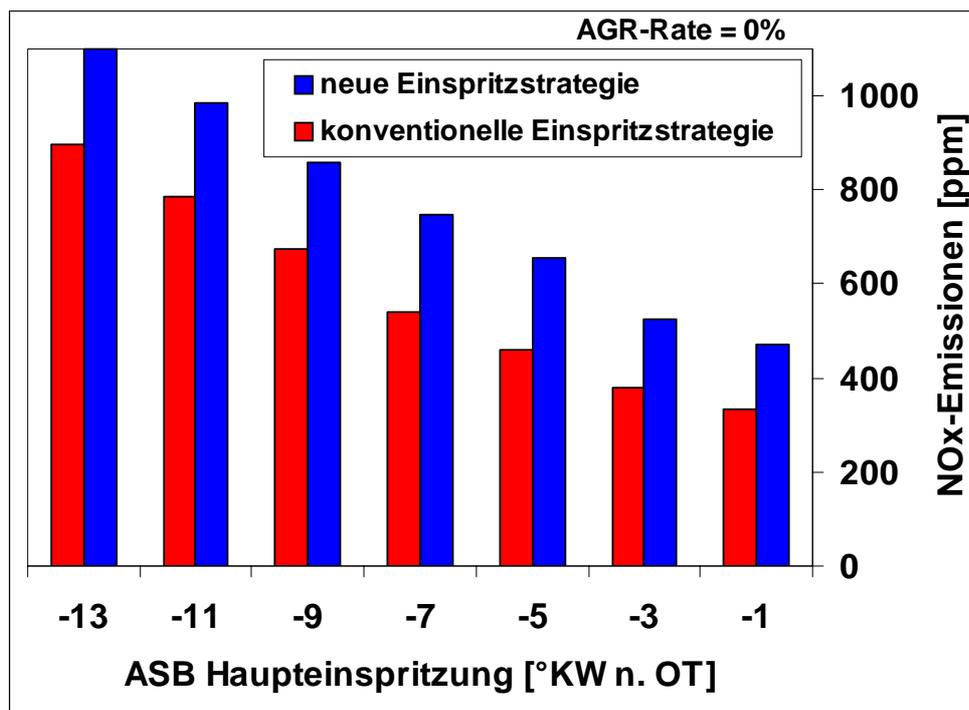


Abb. 17: NO_x-Emission bei Einspritzzeitpunktvariation mit 0% AGR

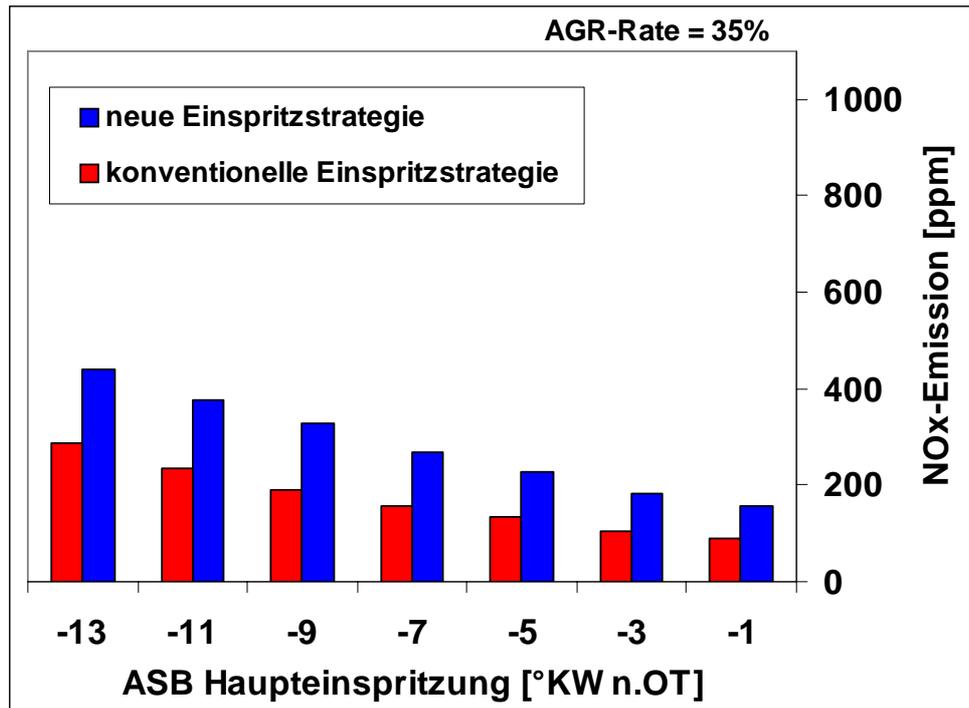


Abb. 18: NO_x-Emission bei Einspritzzeitpunktvariation mit 35% AGR

Potenzial bezüglich gleichzeitiger Reduzierung der Ruß- und NO_x-Emissionen

Um das gesamte Potenzial des Verbrennungsprozesses mit räumlich getrennter Vor- und Haupteinspritzung bezüglich Schadstoffreduzierung abschätzen zu können, müssen sowohl die Ruß- als auch die NO_x-Emissionen gleichzeitig betrachtet und mit denen der konventionellen Einspritzstrategie verglichen werden. In Abb. 19 ist das Potenzial bezüglich simultaner Reduzierung von Ruß und NO_x für den Einspritzzeitpunkt der Haupteinspritzung mit ASB 1° KW v. OT dargestellt. Bei Wahl dieses Einspritzzeitpunktes ist ein motorischer Betrieb mit hoher thermischer Effizienz möglich. Ausgangspunkt für den Vergleich der Ruß- und NO_x-Emissionen und damit als 100% definiert sind die Emissionen bei Verbrennung mit konventioneller Einspritzstrategie und 0% AGR. Bei einer AGR-Rate von 35% wird für die konventionelle Einspritzstrategie der Ruß-NO_x-Trade-Off deutlich, indem die Rußemissionen auf 160% ansteigen und die NO_x-Emissionen auf 30% absinken (Abb. 19 links). Bei Vergleich des selben Ausgangspunktes mit der neuen Einspritzstrategie bei 35% AGR ist das Absinken der Rußemissionen auf 53% und der NO_x-Emissionen auf 47% zu erkennen (Abb. 19 rechts). Somit ist durch die räumliche Trennung eine simultane Reduzierung der Ruß- und NO_x-Emissionen möglich. Der Grund hierfür liegt in dem hohen Potenzial der neuen Einspritzstrategie bezüglich Rußreduzierung. Vergleicht man die konventionelle Einspritzung und 35% AGR mit der neuen Einspritzstrategie und 35% AGR, beträgt die Rußreduzierung über 75%. Damit lassen sich durch Betrieb mit hohen AGR-Raten auch die NO_x-Emissionen reduzieren, ohne das Potenzial bezüglich Rußreduzierung stark zu beeinflussen. Im Übrigen ist bei Anwendung der neuen Einspritzstrategie eine weitere Reduzierung der Rußemissionen möglich, wenn die AGR-Rate niedriger gewählt wird.

So ist bei räumlicher Trennung der Vor- und Haupteinspritzung ohne AGR im Vergleich zur konventionellen Einspritzstrategie eine Rußreduzierung von bis zu 80% möglich (vgl. Abb. 15). In diesem Falle muss allerdings eine Erhöhung der NO_x-Emissionen um 20 - 40% in Kauf genommen werden (vgl. Abb. 17).

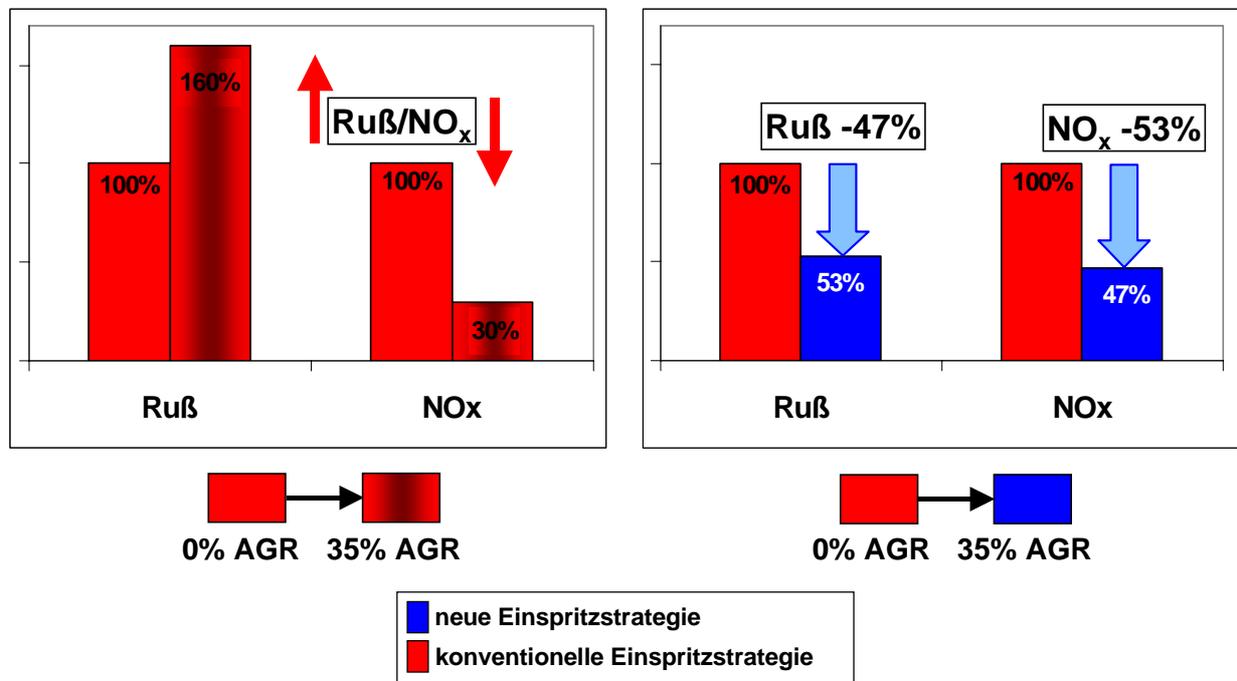


Abb. 19: Potenzial bezüglich gleichzeitiger Reduzierung der Ruß- und NO_x-Emissionen

Abb. 20 zeigt den Trade-Off von Ruß zu NO_x für konventionelle und neue Einspritzstrategie bei Einspritzzeitpunktvariation, wie in Abb. 15 und Abb. 17 dargestellt. Es zeigt sich, dass mit der neuen Einspritzstrategie dieser Trade-Off nicht besteht.

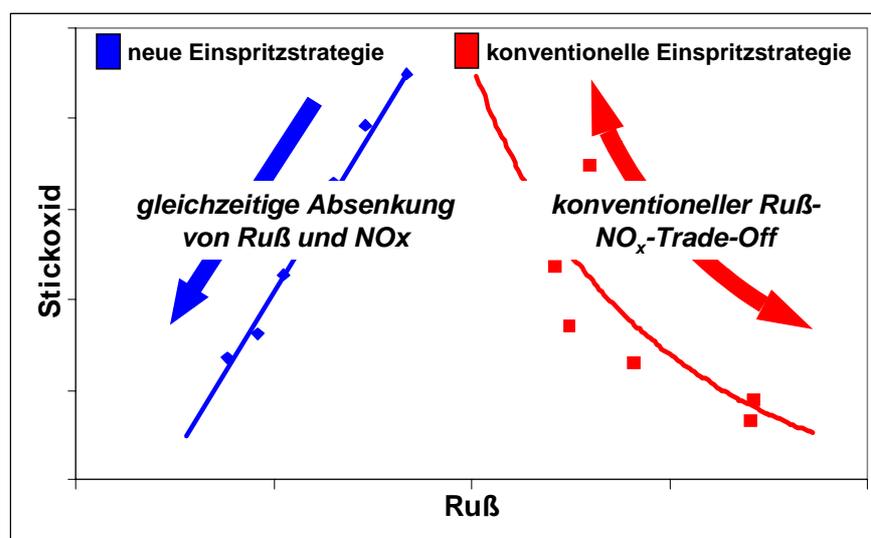


Abb. 20: Absenkung von Ruß- und NO_x-Emissionen

Einfluss der Voreinspritzmenge auf die Rußemissionen

Die Rußemissionen von Dieselmotoren mit Direkteinspritzung reagieren sehr empfindlich auf die effektiv eingespritzte Voreinspritzmenge. Wenn die Voreinspritzmenge nur minimal über einem Optimalwert liegt, steigen die Rußemission stark an. Im Gegensatz dazu verliert die Voreinspritzung ihren Effekt bezüglich Reduzierung des vorgemischten Anteils der Verbrennung verbunden mit höherem Geräuschkomfort und verminderten NO_x -Emissionen, wenn die Voreinspritzmenge zu gering ist. Um immer die richtige Voreinspritzmenge in den Brennraum einzubringen, muss der Einfluss der Voreinspritzung auf die Verbrennung genauer untersucht werden. Um den Effekt der Voreinspritzmenge auf die Rußemissionen zu analysieren, wurden deshalb Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Voreinspritzmenge variiert, die gesamte Kraftstoffmenge allerdings konstant gehalten wird. In Abb. 21 ist die Rußemission in Abhängigkeit der Voreinspritzmenge dargestellt. Mit der konventionellen Einspritzstrategie steigen die Rußemissionen mit steigender Voreinspritzmenge an, während bei räumlich getrennter Vor- und Haupteinspritzung die Rußemissionen auf einem konstant niedrigen Niveau bleiben. Zum besseren Verständnis des Einflusses der Voreinspritzmenge auf die Rußbildung muss deshalb zusätzlich der Verbrennungsprozess näher betrachtet werden.

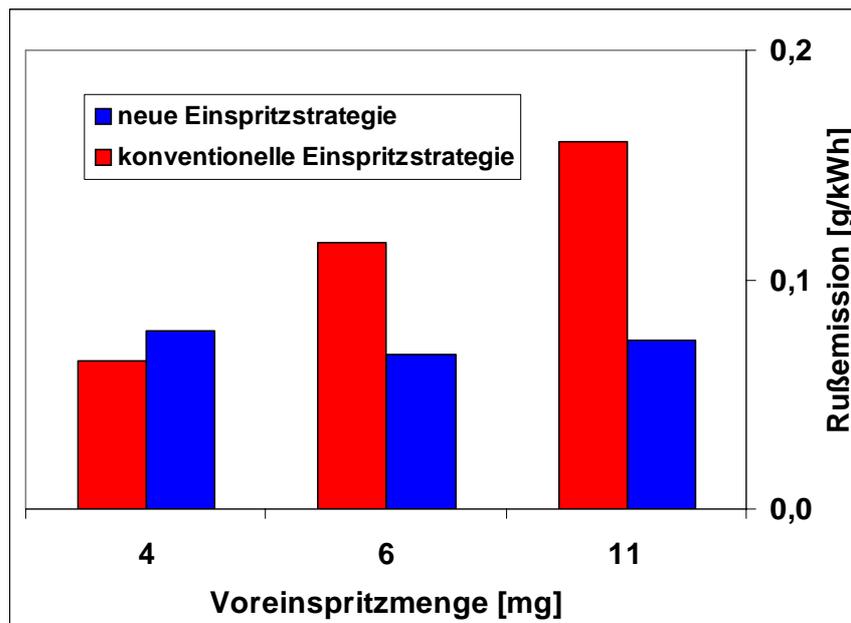


Abb. 21: Rußemission bei Variation der Voreinspritzmenge, 0% AGR-Rate

In Abb. 22 sind die Druckverläufe für die konventionelle und die räumlich getrennte Vor- und Haupteinspritzung bei verschiedenen Voreinspritzmengen dargestellt.

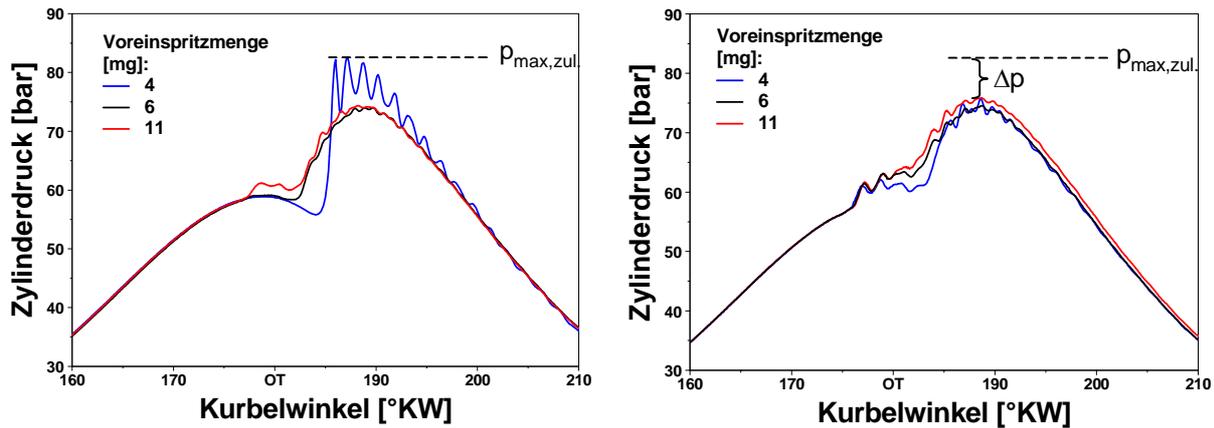


Abb. 22: Gegenüberstellung der Druckverläufe für konventionelle (links) und räumlich getrennte Voreinspritzstrategie (rechts) bei Voreinspritzmengenvariation

Für die konventionelle Einspritzung wird ein signifikanter Unterschied zur räumlich getrennten Vor- und Haupteinspritzung deutlich. Bei kleinster Voreinspritzmenge von 4 mg hat die Voreinspritzung offenbar keinen Einfluss auf die Verbrennung, denn der Druckverlauf ist ähnlich einem solchen ohne Voreinspritzung mit einem großen Anteil an vorgemischter Verbrennung. Für eine Voreinspritzmenge von 6 mg ist nur ein geringer Einfluss der Vorverbrennung auf den Druckverlauf zu erkennen, aber dies ist ausreichend, um den Zündverzug zu verkürzen und so den vorgemischten Anteil der Verbrennung zu reduzieren. Für eine Voreinspritzmenge von 11 mg ist keine Vergrößerung des Einflusses auf die Hauptverbrennung zu erkennen, allerdings wird ein weiter gestiegener Anteil der Verbrennung des voreingespritzten Kraftstoffes deutlich. Der verkürzte Zündverzug der Hauptverbrennung aufgrund einer größeren Voreinspritzmenge verkleinert das Verhältnis von vorgemischter zu diffusionskontrollierter Verbrennung und führt durch den zusätzlichen Einfluss auf das Luftverhältnis zu einem Anstieg der Rußemissionen.

Bei Anwendung der neuen Einspritzstrategie wirken sich schon kleinste Mengen der Voreinspritzung auf die Verbrennung aus. Bei einer Voreinspritzmenge von 4 mg ist bereits eine Vorverbrennung und deren Einfluss auf die Hauptverbrennung durch Absenkung des maximalen Druckgradienten erkennbar. Eine Erhöhung der Voreinspritzmenge bewirkt keine Verlagerung des Verbrennungszeitpunktes, nur der Einfluss der Verbrennung des voreingespritzten Kraftstoffes auf den Druckverlauf ist zu erkennen. Aufgrund des selben Verbrennungszeitpunktes und des unveränderten Zündverzugs bleibt das Verhältnis von vorgemischter zu diffusionskontrollierter Verbrennung gleich, so dass sich die Rußemissionen ebenfalls auf einem konstant niedrigen Niveau bewegen.

Daneben hat die räumliche Trennung der Vor- und Haupteinspritzung noch weitere Vorteile. Erstens führt die Erhöhung der Voreinspritzmenge nicht zur Absenkung des lokalen Luft-Kraftstoff-Verhältnisses. So ist es möglich, durch Erhöhung der Voreinspritzmenge die Haupteinspritzmenge zu reduzieren, um den Sauerstoffgehalt für die Hauptmenge zu erhöhen und somit die Verbrennungsbedingungen zu verbessern.

Zweitens ist eine Abstimmung der Düse speziell für die kleinen Kraftstoffmengen der Voreinspritzung möglich, da der Kraftstoff der Voreinspritzung nicht durch den selben Injektor in

den Brennraum eingebracht wird wie die Hauptmenge. So wird z.B. der Kraftstoff der Voreinspritzung nur durch 2 Düsenlöcher in den Brennraum eingespritzt anstatt durch die 7 Löcher des Hauptinjektors, was sich positiv auf die Gemischbildung im Falle der räumlich getrennten Vor- und Haupteinspritzung auswirkt.

Drittens ist durch den Einsatz der neuen Einspritzstrategie eine bessere Ausnutzung des maximal zulässigen Spitzendruckes $p_{\max, \text{zul}}$ möglich, da bereits kleinste Voreinspritzmengen einen moderaten Druckverlauf zur Folge haben (vgl. Abb. 22). Durch Erhöhung des Ladedruckes oder des Verdichtungsverhältnisses wäre es z.B. möglich, die Druckdifferenz Δp auszunutzen und somit den thermischen Wirkungsgrad zu erhöhen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Dieselmotoren stellen heute die Antriebsquelle für Kraftfahrzeuge aller Art mit dem höchsten Wirkungsgrad dar. Nur durch ihren Einsatz lassen sich die gesteckten Ziele zur Reduzierung des Kohlendioxidausstoßes im Hinblick auf den Treibhauseffekt erreichen. Ein großes Problem stellt jedoch die Rußemission dieser Motoren dar, die mit heutigen Brennverfahren innermotorisch nicht in dem gewünschten Maß reduziert werden kann. Dies erfordert den Einsatz komplexer und teurer Abgasnachbehandlungssysteme, deren Funktionstüchtigkeit jedoch bei weitem noch nicht zufriedenstellend ist.

Die Hauptquelle für die Rußemission eines Dieselmotors stellt das Zusammentreffen von noch flüssigem Kraftstoff mit der Flamme dar. Dies ist insbesondere bei Motoren mit Direkteinspritzung der Fall, bei denen die Einspritzung aus Geräuschgründen in eine Vor- und eine Haupteinspritzung unterteilt ist. Nach der Zündung des voreingespritzten Kraftstoffes erfolgt die Haupteinspritzung direkt in die Flamme, was eine erhöhte Rußbildung zur Folge hat.

Daher ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Brennverfahren entwickelt und untersucht worden, welches eine räumliche Trennung der Einspritzungen vornimmt und damit die Rußbildung stark reduziert.

Als Basisaggregat zur Umsetzung und Untersuchung des Brennverfahrens dient ein Einzylinder-Nutzfahrzeugmotor. Um das Brennverfahren zu realisieren, wurden umfangreiche Modifikationen am Zylinderkopf vorgenommen wie die Integration eines zweiten Injektors für die Voreinspritzung sowie optischer Zugänge zum Brennraum.

Vorab durchgeführte Untersuchungen an einer Druckkammer zeigen die Möglichkeit zur Visualisierung von Deseleinspritzstrahlen mittels optischer Messtechnik. Die räumliche Trennung der Teileinspritzungen ohne gegenseitige Beeinflussung ist möglich und wurden durch Untersuchungen an einer atmosphärischen Druckkammer nachgewiesen.

Zur Abschätzung des Potenzials der räumlich getrennten Vor- und Haupteinspritzung wurden an dem Einzylinder-Nutzfahrzeugmotor sowohl für die neue als auch für die konventionelle Einspritzstrategie Untersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse gegenübergestellt. So zeigt sich, dass die räumliche Trennung der Vor- und Haupteinspritzung ein hohes Potenzial vor allem

bezüglich der Reduzierung der Rußemissionen besitzt. Zu erklären ist die Produktion von deutlich weniger Ruß dadurch, dass die Hauptmenge des Kraftstoffes in einen anderen Brennraumbereich eingespritzt wird als die Voreinspritzmenge und so ein direktes Zusammentreffen von noch flüssigem Kraftstoff und der bereits vorhandenen Flamme vermieden wird. Außerdem ist bei räumlicher Trennung ein lokal magereres Gemisch vorhanden, was sich positiv auf die Rußoxidation auswirkt. Durch zusätzlichen Einsatz von Abgasrückführung ist es möglich, die Rußemissionen und die NO_x-Emissionen gleichzeitig zu senken und somit den Ruß-NO_x-Trade-Off zu überwinden. Untersuchungen bei Variation der Voreinspritzmenge zeigen, dass durch den Einsatz der neuen Einspritzstrategie bereits kleinste Voreinspritzmengen den Verbrennungsprozess positiv beeinflussen und die Rußemissionen auf einem konstant niedrigen Niveau halten.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen soll das neue Brennverfahren weiter optimiert werden. Zur idealen Anpassung des Einspritzsystems an den Brennraum soll eine breite Datenbasis bei Variation der Parameter wie Einspritzdruck, Injektorposition, Abgasrückführrate usw. ermittelt werden. Die innermotorische Rußbildung sowie die Einspritzstrahllausbreitung im Brennraum und die anschließende Verbrennung sollen mittels optischer Messtechniken detailliert analysiert und optimiert werden. Des Weiteren soll das Forschungsaggregat um ein zweites Common-Rail-System erweitert werden, so dass es möglich ist, unterschiedliche Einspritzdrücke für Vor- und Haupteinspritzung einzustellen. Da dadurch die Voreinspritzung vollkommen unabhängig von der Haupteinspritzung ist, kann die jeweilige Teileinspritzung optimal abgestimmt werden. Daraus entsteht ein weiteres Potenzial bezüglich Reduzierung der Ruß- und NO_x-Emissionen. Die experimentellen Untersuchungen sollen dabei ständig durch numerische 3D-CFD-Simulation der Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffbildung mit dem Programm KIVA3V begleitet werden, um im Voraus gewisse Einflussparameter auf das Brennverfahren abschätzen und die am Prüfstand gewonnen Ergebnisse besser interpretieren zu können.

8. Literatur

- [1] BADAMI M. et al (2002): Influence of Multiple Injection Strategies on Emissions, Combustion Noise and BSFC of a DI Common Rail Diesel Engine, SAE Paper 2002-01-0503
- [2] HANSEN J.: Untersuchung der Verbrennung und Rußbildung in einem Wirbelkammer-Dieselmotor mit Hilfe eines schnellen Gasentnahmeventils, Dissertation, RWTH Aachen, 1989
- [3] Kölmel A. (2000): Analysemethoden zur Charakterisierung der ottomotorischen Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffemissionen, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2000
- [4] GLASSMAN L.: Soot Formation in Combustion Processes, 22nd Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1988

- [5] FLOWER W.L. et al.: Measurements of the Structure of Sooting Laminar Diffusion Flames at Elevated Pressures, 20th Symposium on Combustion, Seiten 1035-1044, The Combustion Institute, ISSN 0082-0784, 1984
- [6] FRANKE H.U. et al.: Influence of Fuels on Soot-Particle Geometry in Fuels 1999, 2nd International Colloquium, herausgegeben von W.J. Bartz, Seiten 517-525, Technische Akademie Esslingen, 1999
- [7] MAYER A: Einfluss des Treibstoffes auf die Größenverteilung ultrafeiner Partikel bei Dieselmotoren, Fuels 1999, 2nd International Colloquium, herausgegeben von W.J. Bartz, Seiten 509-516, Technische Akademie Esslingen, 1999
- [8] TREE D.R. et al.: Optical Soot Particle Size and Number Density Measurements in a Direct Injection Diesel Engine, Combust. And Techn., Band 95, Seiten 313-331, 1994
- [9] BÖHM H. et al.: Pressure Dependence of Formation of Soot and PAH in premixed Flames, Soot Formation and Combustion: Mechanism and Models, herausgegeben von H. Bockhorn, Springer Series in Chemical Physics, Seiten 145-164, Springer Verlag, Heidelberg, 1994
- [10] BÖHM H. et al. The Influence of ,Pressure and Temperature on Soot Formation in Premixed Flames, 22nd Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1988
- [11] LADOMMATOS et al. (1997): The Effect of Aromatic Hydrocarbons on Soot Formation in Laminar Diffusion Flames and in a Diesel Engine, Journal of the Institute of Energy, Band 70, 1997
- [12] PISCHINGER F: et al.: Soot Formation and Oxidation in Diesel Engines, Soot Formation and Combustion: Mechanisms and Models, herausgegeben von H. Bockhorn, Springer Series in Chemical Physics, Seiten 382-393, Springer Verlag, Heidelberg, 1994
- [13] PISCHINGER F: et al.: Grundlagen und Entwicklungslinien der dieselmotorischen Brennverfahren, VDI Berichte 714, VDI, 1988
- [14] MÜLLER et al. (2001): Homogene Dieselerbrennung – Die Lösung des NO_x – Partikel – Problems?, 4. Dresdner Motorenkolloquium, Dresden 2001
- [15] MAYER K. (2000): Pyrometrische Untersuchung der Verbrennung in Motoren mit Common-Rail-Direkteinspritzung mittels einer erweiterten Zwei-Farben-Methode, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2000
- [16] BOCKHORN H: (1994): Sootformation in Combustion: Mechanics and Models, Springer Series in Chemical Physics, Springerverlag Heidelberg, 1. Auflage

- [17] BERTSCH: PhD-Thesis, Dissertation, University of Karlsruhe (TH), 1999
- [18] VELJI A.: Stand der Technik: Rußbildung und –oxidation, FVV Workshop Ruß- und Schadstoffentstehung sowie Abgaskatalyse in modernen Verbrennungsmotoren, Frankfurt, Juli 2005
- [19] DOHLE U. et al.: Die 4. Generation Common Rail Dieseleinspritzung – Neue Ansätze zur Erfüllung höchster Kundenerwartung und gesetzlicher Anforderungen, Diesel- und Benzindirekteinspritzung, Haus der Technik, Berlin 2004
- [20] KAMPMANN S. et al.: Weiterentwicklung von Common Rail Einspritzsystemen zur Erreichung künftiger Emissionsgrenzen, 7. Tagung Motorische Verbrennung, Haus der Technik, München 2005
- [21] SCHMÜCKER J. et al.: Möglichkeiten zur Einspritzverlaufsformung bei NFZ-Motoren, 7. Tagung Motorische Verbrennung, Haus der Technik, München 2005
- [22] PISCHINGER S.: Reduktionspotential für Ruß und Kohlenmonoxid zur Vermeidung des CO Emissionsanstiegs bei modernen PKW DI-Dieselmotoren mit flexibler Hochdruckeinspritzung, 7. Tagung Motorische Verbrennung, Haus der Technik, München 2005
- [23] PISCHINGER S. et al.: Potential Soot and CO Reduction for HSDI Diesel Combustion Systems, SAE PAPER 2006- 01- 1417, SAE 2006 World Congress
- [24] MITO Y. et al.: The effect of intake, injection parameters and fuel properties on diesel combustion and emissions, SAE PAPER 2003-01-1793, JSAE/SAE International Spring Fuels and Lubricants Meeting
- [25] ALRIKSSON M. et al.: Low Soot, Low NOx in a Heavy-Duty Diesel Engine Using High Levels of EGR, SAE PAPER 2005-01-3836, Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA
- [26] HARDY W. L. et al.: A Study of the Effects of High EGR, High Equivalence Ratio, and Mixing Time on Emissions Levels in a Heavy-Duty Diesel Engine for PCCI Combustion, SAE PAPER 2006-01-0026, SAE 2006 World Congress
- [27] HENEIN N. A. et al.: Effect of Injection Pressure and Swirl Motion on Diesel Engine-Out Emissions in Conventional and Advanced Combustion Regimes, SAE PAPER 2006- 01- 0076, SAE 2006 World Congress
- [28] FENG T. et al.: Soot Structure in a Conventional Non-Premixed Diesel Flame, SAE PAPER 2006- 01-0196, SAE 2006 World Congress

- [29] SEEBODE J. et al.: Potentialabschätzung einer freien Einspritzratenformung zur innermotorischen Emissionsreduktion an einem DI-Dieselmotor, 10. Tagung "DER ARBEITSPROZESS DES VERBRENNUNGSMOTORS", Technische Universität Graz 2005
- [30] MUELLER B., Strategien für Nutzfahrzeugdieselmotoren zur Erfüllung der weltweiten Abgasgesetze, 4. Internationales Forum Abgas- und Partikelemissionen, AVL, Ludwigsburg 2006
- [31] FUHE M. et al.: Performance Validation of an Advanced Diesel Particulate Filter With High Catalyst Loading Capacity, SAE PAPER 2005-01-3696, Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA
- [32] McGEEHAN J. et al.: On The Road to 2010 Emissions: Field Test Results and Analysis With DPF-SCR System and Ultra-Low-Sulfur Diesel Fuel, SAE PAPER 2005-01-3716, Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA
- [33] TERRES F. et al.: Partikelfilter für Diesel-PKW – Beladungs und Regenartionsverhalten, MTZ 08/2002