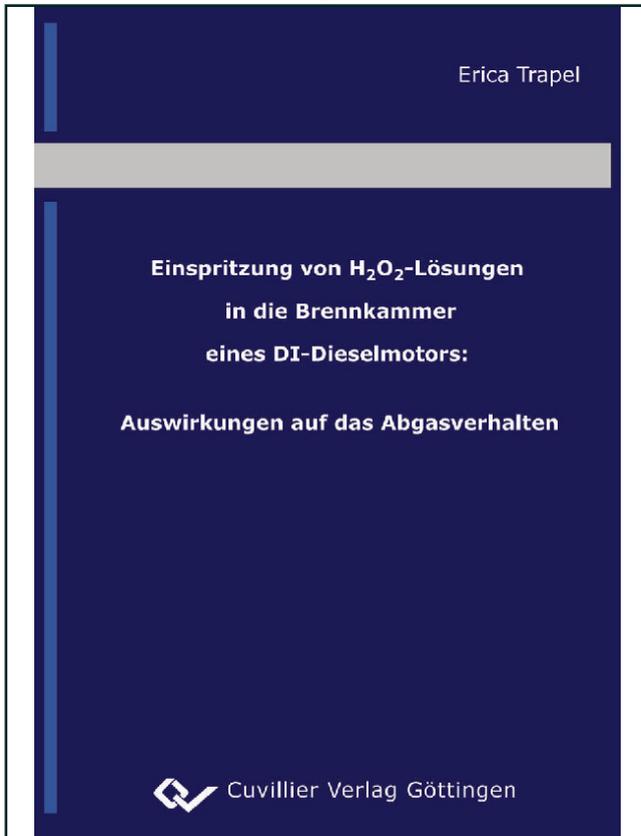




Erica Trapel (Autor)

# **Einspritzung von H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Lösungen in die Brennkammer eines DI-Dieselmotors: Auswirkungen auf das Abgasverhalten**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2101>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung und Motivation

Dieselmotoren mit Direkteinspritzung haben in den letzten Jahren eine enorme technische Weiterentwicklung erfahren, die zu einer deutlichen Verminderung der Abgasemissionen und des Brennstoffverbrauchs geführt hat. Im Bereich der Verbrennungsmotoren gelten DI-Dieselmotoren in Kombination mit inner- und nachmotorischen Maßnahmen als ein erfolgversprechendes Konzept, um zukünftige Abgasvorschriften zu erfüllen. Zu diesen Maßnahmen zählen die neuen Common-Rail-Einspritztechnologien, die Abgasturboaufladung, die Abgasrückführung, der Partikelfilter und die modernen DeNO<sub>x</sub>-Systeme. Dabei sind diese Konzepte mit höheren Kosten und unterschiedlichen Nachteilen verbunden. Aus diesen Gründen werden zurzeit immer stärker alternative Brennstoffe und neuartige Brennverfahren weiterentwickelt und optimiert, die zur Verbesserung der Abgasqualität führen können. Bei der Beurteilung eines neuen Verfahrens sind neben der technischen Durchführbarkeit auch die Wirksamkeit und die entscheidenden Einflussgrenzen von Interesse.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, anhand experimenteller Untersuchungen an einem Einzylinder DI-Dieselmotor, der mit unterschiedlichen Kombinationen aus Diesel, Wasser, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Wasser-Lösung und Fettsäure-Methylester FAME (engl. Fatty Acid Methyl Ester) betrieben wird, neue Erkenntnisse über die Entwicklung moderner Brenn- und Einspritzverfahren zu gewinnen. Die Experimente sollen für den Einsatz der Zusatzfluide insbesondere folgende Einflussmöglichkeiten auf den dieselmotorischen Prozess klären:

- Variation der Einspritzmenge
- Variation des Einspritzdruckes
- Variation des Einspritzbeginns
- Art der Einbringung in den Brennraum (gemischt oder getrennt).

Ein besonderer Schwerpunkt wurde hier auf die Untersuchung des Einflusses von wässrigen  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Lösungen auf die gas- und partikelförmigen Emissionen gelegt. Für diese Versuche waren Voruntersuchungen mit reinem Wasser erforderlich, um den Einfluss des Wasserstoffperoxides getrennt von dem von Wasser beurteilen zu können. Aus früheren Arbeiten ist bekannt, dass  $\text{H}_2\text{O}_2$  bei höheren Temperaturen OH-Radikale bildet, deren Reaktionswahrscheinlichkeit für die Oxidation von Dieselruß wesentlich höher ist als diejenige von molekularem Sauerstoff [47]. Im Rahmen dieser Versuchsreihen werden zwei Methoden zur Einbringung der Zusatzstoffe in den Brennraum eines Dieselmotors vorgestellt: die Einspritzung einer Emulsion von Kraftstoff und  $\text{H}_2\text{O}_2$ /Wasser durch das vorhandene Kraftstoffsystem und die getrennte Einspritzung von  $\text{H}_2\text{O}_2$ /Wasser-Lösungen durch ein zweites Düsensystem. Die  $\text{H}_2\text{O}_2$ /Wasser-Einspritzung sowohl in den Brennraum [13] als auch in das Abgasrohr eines Dieselmotors [41] hat sich als eine effektive Maßnahme zur Verminderung der Schadstoffemissionen erwiesen.

Eine weitere Untersuchung, die in dieser Arbeit präsentiert wird, ist die Einspritzung des sauerstoffhaltigen Biokraftstoffs Fettsäure-Methylester FAME, entweder in reiner Form oder vermischt mit normalem Dieseldieselkraftstoff. Wegen seiner höheren Cetanzahl und seinem hohen Sauerstoffanteil (bis zu 11 %) trägt FAME beachtlich zur Reduzierung der Abgasemissionen bei. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Verbrennung von FAME - im Gegensatz zur Dieselverbrennung - wesentlich umweltfreundlicher möglich ist [37, 98, 139].

Im Anschluss an diese Einleitung werden zunächst die wesentlichen Grundlagen zur Bildung und Oxidation der gas- und partikelförmigen Abgaskomponenten erläutert. Neben einer kurzen Darstellung der auftretenden Gasemissionen, werden die Grundlagen der Rußbildung und Rußoxidation behandelt. Anschließend wird auf Faktoren eingegangen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Entstehung und Reduktion der Partikel haben. Gegenstand des letzten Teils dieses Kapitels ist die morphologische Analyse der Abgaspartikel, deren Form wesentlich von sphärischen Partikeln abweicht.

Im dritten Kapitel werden die benutzten experimentellen Methoden erläutert. Zunächst wird die Versuchsanordnung schematisch dargestellt und die einzelnen Komponenten zur Realisierung des Messaufbaus beschrieben. Im Anschluss daran wird die in dieser Arbeit eingesetzten Kraftstoffkombinationen vorgestellt.

In den nächsten Kapiteln werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Zuerst wird die Charakterisierung des Einspritzsprays präsentiert, gefolgt von der Darstellung der kurbelwinkelaufgelöst gemessenen Größen: indizierter Zylinderdruck und OH-Emission. Weiterhin werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Analyse des Abgasverhaltens hinsichtlich Gas- und Partikelkomponente vorgestellt. Den letzten Teil der Ergebnisse bildet die morphologische Charakterisierung der Rußagglomerate.

Das letzte Kapitel fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen, stellt die Vorteile und Nachteile der präsentierten Untersuchungen dar und macht Vorschläge für weitere, auf dieser Arbeit aufbauende Experimente im Hinblick auf eine optimale, zukunftsorientierte dieselmotorische Verbrennung.



## 2 Bildung und Oxidation von Abgasemissionen

### 2.1 Gasförmige Abgasemissionen

Bei der dieselmotorischen Verbrennung treten neben den Produkten der vollständiger Verbrennung Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O), auch Stoffe wie Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) sowie Ruß auf. Daneben enthält das Abgas Stickoxide (NO<sub>x</sub>) als Oxidationsprodukte des Stickstoffs und in sehr geringerer Menge Schwefeloxide. Das Verbrennungsprodukt CO<sub>2</sub> wird im Allgemeinen nicht als Schadstoff angesehen, es trägt aber zur Erwärmung der Erdatmosphäre über den Treibhauseffekt bei. Eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission ist bei fossilen Kraftstoffen ausschließlich über eine Absenkung des Kraftstoffverbrauches und damit eine Steigerung des Wirkungsgrades zu erzielen. H<sub>2</sub> wird aufgrund seiner Ungiftigkeit allgemein nicht als Schadstoff bezeichnet. Bei der dieselmotorischen Verbrennung sind NO<sub>x</sub>, Ruß, CO und unverbrannte HC als wichtigste Schadstoffkomponenten des Abgases anzusehen, wobei für den Dieselmotor die beiden erstgenannten Komponenten besonders kritisch sind. Die Bildung von HC, CO und NO<sub>x</sub> ist stark vom Luftverhältnis  $\lambda$  und der damit in Zusammenhang stehenden Verbrennungstemperatur abhängig. HC und CO sind Produkte der unvollständigen Verbrennung bei fettem Gemisch ( $\lambda < 1$ ), während die NO<sub>x</sub>-Bildung durch höhere Temperaturen bei magerem Gemisch ( $\lambda > 1$ ) begünstigt wird.

#### **Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid (CO) ist ein farb- und geruchloser Schadstoff, der bei Konzentrationen über 0,1% beim Menschen zu akuten Vergiftungserscheinungen und zu innerer Erstickung führt. Bei der dieselmotorischen Verbrennung tritt CO im

Abgas nur in geringen Konzentrationen auf, die im Vollastbetrieb stärker ansteigen. Die Oxidation von CO ist vom Luftverhältnis  $\lambda$  und von der Temperatur abhängig und kann wegen der inhomogenen Gemischbildung örtlich sehr unterschiedlich sein. Der Hauptreaktionspartner bei der Oxidation von CO ist das OH-Radikal [93]:



Im unterstöchiometrischen Bereich ( $\lambda < 1$ ) läuft die CO-Oxidation (1) wegen des Sauerstoffmangels in Konkurrenz zur H<sub>2</sub>-Oxidation (2):



und die CO-Konzentration nimmt nur geringfügig ab.

Im überstöchiometrischen Bereich ( $\lambda > 1$ ) läuft die CO-Oxidation (1) parallel zur O<sub>2</sub>-Reaktion (3) ab:



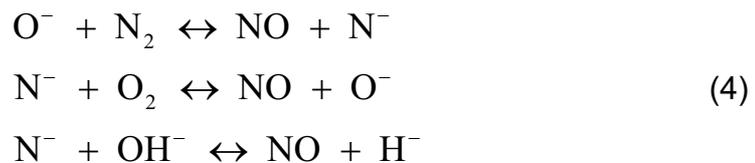
In diesem Bereich läuft die Reaktion (1) jedoch verzögert ab, weil mehr H<sup>-</sup> als OH<sup>-</sup> vorhanden ist.

Im extrem mageren Gemisch ( $\lambda > 1,4$ ) entsteht vermehrt CO wegen der niedrigen Temperaturen und der unvollständigen Verbrennung im wandnahen Bereich des Brennraums.

### Stickoxide

Unter dem Obergriff „Stickoxide“ (NO<sub>x</sub>) werden im Allgemeinen die gebildeten Oxidationsprodukte des Stickstoffs NO und NO<sub>2</sub> zusammengefasst. Beide Schadstoffe wirken im Wesentlichen auf die Lungenfunktion, NO<sub>2</sub> kann darüber hinaus u.a. auch zu Herzmuskelschädigungen führen. NO<sub>x</sub> begünstigen in der Troposphäre die Bildung von bodennahem Ozon und photochemischem Smog. In der Verbrennungszone entsteht hauptsächlich NO, das jedoch unter atmo-

sphärischen Bedingungen fast vollständig zu  $\text{NO}_2$  umgewandelt wird. Bei der Stickoxidbildung in den Verbrennungsprozessen wird zwischen „thermischer“ und „prompter“ NO-Bildung unterschieden. Die thermische NO-Bildung läuft hinter der Flammenfront im heißen Gas ab und wurde erstmals von Zeldovich [152] beschrieben. Der von ihm vorgeschlagene Reaktionsmechanismus wurde später von Baulch [6] erweitert:



Die experimentell ermittelten Reaktionskoeffizienten zeigten, dass die erste Reaktion die langsamste mit einer hohen Aktivierungsenergie ist [93]. Deshalb wird über diesen Mechanismus erst bei hohen Temperaturen  $\text{NO}_x$  gebildet.

Darüber hinaus können Stickoxide aus dem Stickstoff der Verbrennungsluft auch über einen weiteren Mechanismus gebildet werden, der zuerst von Fenimore [38] beschrieben wurde und als „Prompt“-NO-Bildung bezeichnet wird. Sie findet in der Flammenfront statt und ist wesentlich komplizierter als die thermische NO-Bildung. Die dort vorhandenen Radikale wie CH,  $\text{C}_2$  und andere sind in der Lage, die starke  $\text{N}_2$ -Bindung aufzubrechen und Zwischenprodukte wie HCN zu bilden, die dann weiter zu NO reagieren.

Der Bildung von Stickoxiden aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff kommt in kleinen und mittleren Dieselmotoren bei Verwendung eines handelsüblichen Kraftstoffes mit einem Stickstoffmassenanteil von unter 0,01% selbst bei angenommener vollständiger Umsetzung zu Stickstoffmonoxid nur eine sehr geringe Bedeutung zu. Prinzipiell findet die Bildung von Stickoxiden aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff über die Bildung von Blausäure (HCN) in der Verbrennungszone statt, wobei der Reaktionsmechanismus nur schwach temperaturabhängig und stark vom Verbrennungsluftverhältnis abhängig ist.

## Unverbrannte Kohlenwasserstoffe

Die unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) stammen aus Zonen, die nicht oder nicht vollständig von der Verbrennung erfasst werden. Sie setzen sich aus einer Vielzahl verschiedener Komponenten zusammen, die entweder vollständig unverbrannt oder aber schon teiloxidiert sein können. Im Dieselmotor ist die HC-Bildung sehr komplex und kann von folgenden Parametern beeinflusst werden [93]:

- die magere Gemischzusammensetzung des äußeren Sprayrandes, die außerhalb der Zündgrenzen liegt,
- die fette Gemischzusammensetzung des inneren Sprayrandes, die zur Bildung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen führen,
- die kalten Brennraumwände, die zu einer unvollständigen Verbrennung der hier angelagerten Tropfen führen,
- die schnellen Druck- und Temperaturverminderungen, die zur Löschung der Diffusionsflamme führen,
- die kleineren Tropfen, die schneller verdampfen und verbrennen,
- die unverbrannten Brennstoffreste aus dem Sacklochvolumen der Einspritzdüse, die gegen Ende der Verbrennung ausdampfen und mit dem Abgas unverbrannt den Brennraum verlassen.

## 2.2 Partikelförmige Emissionen

Untersuchungen zur Bildung und Oxidation von Rußpartikeln wurden größtenteils an vorgemischten Flammen oder Diffusionsflammen durchgeführt. Bei der Diffusionsflamme spielen hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs relativ langsame Mischungsvorgänge die entscheidende Rolle für den Reaktionsablauf, dagegen sind in vorgemischten Flammen reaktionskinetische Vorgänge bestimmend. Bei diesen Flammenexperimenten handelt es sich meistens um atmosphärische Brennerflammen, bei denen verschiedene Charakteristika einfacher als bei der dieselmotorischen Verbrennung zu beobachten sind, wo zusätzlich Einflüsse des turbulenten Strömungsfeldes oder der Sprayverbrennung auftreten. Ge-

genüber Flammen ist die Partikelbildung bei der dieselmotorischen Verbrennung ein deutlich komplexerer Vorgang. In Hinblick auf die Rußbildung und Rußoxidation sind folgende Prozesse von Bedeutung:

- die Einspritzung des Kraftstoffes in heiße komprimierte Luft und in Verbranntes,
- die Kraftstoffverdampfung,
- die Mischungsvorgänge durch Luftbewegung,
- die Änderung von Druck und Temperatur durch Kolbenbewegung und Verbrennung während der Reaktionsabläufe [11, 144].

Die Teilvorgänge und Einflussgrößen, die bei der Rußbildung und Rußoxidation im Dieselmotor beitragen, sind deutlich komplexer als bei der Diffusions- oder Vormischflammen. Zahlreiche Untersuchungen verwenden optische Messtechniken, um die Rußkonzentration in Druckkammern oder in Transparent-Dieselmotoren zu messen. Weiterhin werden - zeitlich und örtlich aufgelöst - Proben aus dem Brennraum mit Hilfe der Gasentnahmetechnik entnommen und die Konzentrationen der gasförmigen Komponenten sowie des Rußes ermittelt [33].

### **2.2.1 Rußbildung**

Die Rußbildung hängt leicht vom Druck und sehr stark von der örtlichen Flammentemperatur und dem Luftverhältnis ab. Als Resultat der Zerstäubung des Einspritzstrahls und der Verdampfung des Kraftstoffs entstehen Bereiche unterschiedlicher Gemischaufbereitung. Eine wichtige Rolle bei der Gemischbildung spielen ebenfalls die chemischen Reaktionen, die lokalen Temperaturen, die lokalen Stoffkonzentrationen und die Brennraumgeometrie.

#### **Schematischer Ablauf**

Die Rußbildung im Dieselmotor wird unter anderen mit folgendem Schema beschrieben [93]: