

**Aus dem Institut für Technologie und Biosystemtechnik**

**Emine Capan  
Hendrik Stein**

**Olaf Schröder  
Jürgen Krahl**

**Projektleitung: Axel Munack**

**Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben  
"Untersuchung von Biodiesel und seinen Gemischen  
mit fossilem Dieselkraftstoff auf limitierte Emissionen"**

Manuskript, zu finden in [www.fal.de](http://www.fal.de)

**Braunschweig  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)  
2004**

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

## **Untersuchung von Biodiesel und seinen Gemischen mit fossilem Dieselkraftstoff auf limitierte Emissionen**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Axel Munack

Beteiligte Mitarbeiter:  
Dipl.-Chem. Emine Capan  
Dipl.-Chem. Olaf Schröder  
Dipl.-Chem. Hendrik Stein

sowie

Prof. Dr. Jürgen Krahl,  
Steinbeis-Transferzentrum Biokraftstoffe und Umweltmesstechnik, Coburg

Projektlaufzeit: 01.04.2003 – 30.10.2003

Gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V.  
Braunschweig und Coburg im Dezember 2003



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
1 Aufgabenstellung.....	3
2 Umweltrelevanz von Dieselmotoremissionen .....	4
3 Material und Methoden .....	9
3.1 Motor und Motortestbedingungen .....	9
3.2 Analysenmethoden und Kraftstoffeigenschaften.....	10
3.2.1 Gesetzlich limitierte Abgasparameter .....	10
3.2.2 Kraftstoffeigenschaften .....	12
4 Ergebnisse.....	13
4.1 Kohlenmonoxidemissionen .....	14
4.2 Kohlenwasserstoffemissionen .....	15
4.3 Stickoxidemissionen.....	17
4.4 Partikelmasseemissionen.....	18
5 Zusammenfassung .....	20
6 Literaturverzeichnis .....	21
7 Anhang .....	24
7.1 Kraftstoffanalysen .....	24
7.2 Einzeldarstellung der Emissionswerte.....	26
7.2.1 Kohlenwasserstoffe (HC) .....	26
7.2.2 Kohlenstoffmonoxid (CO).....	28
7.2.3 Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) .....	30
7.3 Exemplarische Verläufe weiterer Parameter .....	32



# 1 Aufgabenstellung

Der Verbrauch von Biodiesel (RME, Rapsölmethylester) nahm in der Bundesrepublik Deutschland in den letzten Jahren deutlich zu. 2002 lag er bei 550.000 t und wird im Jahr 2003 voraussichtlich ca. 650.000 t erreichen (UFOP, 2003). Das sind ca. 2 % des deutschen Dieselkraftstoffverbrauchs.

In der Praxis werden Biodiesel und fossiler Dieselkraftstoff (DK) sowohl in reiner Form als auch im Mischbetrieb eingesetzt. Es erhebt sich die Frage, inwieweit Mischungen beider Kraftstoffe eine nichtlineare Änderung der Emission über dem Mischungsverhältnis zur Folge haben.

Wenn sich die Emissionen von Mischungen aus Biodiesel und DK nicht proportional zum Mischungsverhältnis ändern, steht bei erhöhten Emissionen das Zulassungsverfahren für Motoren bei Mischkraftstoffbetrieb in Frage; bei günstigeren Emissionen wäre die Entwicklung eines umweltfreundlicheren Kraftstoffs möglich.

Frühere Untersuchungen an der FAL haben am Beispiel eines im 5-Punkte-Test betriebenen Einzylinder-Versuchsmotors gezeigt, dass sich die Emissionen im Wesentlichen proportional zum Mischungsverhältnis ändern (Schröder et al., 1998). Testreihen mit einem Fendt-Schlepper in zwei Punkten des 13- bzw. 8-Stufen Tests ergaben hingegen bei  $\text{NO}_x$ , CO, HC und der organisch unlöslichen Partikelmasse deutliche Abweichungen von einer linearen Veränderung über dem Mischungsverhältnis (Krahl et al., 2000). Die Tests lassen jedoch keine generelle Aussage zu, da sich moderne Motoren deutlich von den Testmotoren unterscheiden und zudem nur wenige Lastpunkte betrachtet wurden.

Ziel des Vorhabens ist es, am Beispiel eines modernen Nutzfahrzeugmotors verschiedene Mischungen aus RME und DK mit Blick auf die limitierten Emissionen zu untersuchen.

## 2 Umweltrelevanz von Dieselmotoremissionen

Seit dem 2. Weltkrieg werden Dieselmotoren in vielen Industriezweigen sowie im Bereich Transport und Verkehr eingesetzt. Neben ihrer guten energetischen Effizienz wurde zunächst auch auf die besondere Umweltverträglichkeit der Emissionen verwiesen, die bei CO und HC vergleichsweise niedrig sind. Mitte der 80er Jahre wurden mit Dieselmotoren betriebene Pkw daher steuerlich begünstigt.

In den letzten Jahren gelangte der Dieselmotor jedoch wegen seiner Emissionen in das Kreuzfeuer der Kritik. Dabei stehen insbesondere die NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen im Vordergrund. Während den gasförmigen Stickoxiden eindeutige Gesundheits- und Umweltwirkungen zugeschrieben werden können, gestaltet sich eine Beurteilung der Rußemissionen weit vielschichtiger.

Neben diesen Komponenten sind noch eine Vielzahl weiterer Substanzen im Abgas vorhanden, die für die Schädlichkeit von Dieselmotorabgasen verantwortlich sind. In diesem Projekt wird aufgrund der Aufgabenstellung jedoch nur auf die gesetzlich limitierten Abgasbestandteile eingegangen.

### Kohlenwasserstoffe (HC)

Die Verbrennung von organischem Material verläuft idealerweise unter Bildung von Kohlendioxid und Wasser gemäß der Bruttoreaktionsgleichung



Bei der Verbrennung im Motor wird diese ideale Umsetzung des Kraftstoffs zu Wasser und Kohlendioxid nicht erreicht. Je nach Motor und Betriebsbedingungen (Lastpunkt, Motortemperatur etc.) können teiloxidierte Verbindungen entstehen oder unverbrannter Kraftstoff emittiert werden. Alle diese Komponenten werden als Summenparameter erfasst.

Kohlenwasserstoffemissionen können toxikologisch wenig relevant sein (z. B. Alkane oder Alkene) oder aber kanzerogen wirken wie z. B. Benzol. Darüber hinaus sind sie in der atmosphärischen Chemie (Sommersmogbildung) von Bedeutung. Eine Korrelation zwischen einem HC-Gesamtemissionswert und den daraus resultierenden Gesundheits- und Umweltschäden kann aufgrund der komplexen Zusammensetzung dieser Stoffgruppe nicht vorgenommen werden.

### Kohlenmonoxid (CO)

Wie bei den Kohlenwasserstoffen entsteht CO durch eine unvollständige Verbrennung des Kraftstoffs. Neben motorischen Prozessen sind weitere Hauptemissionsquellen Verbrennungsprozesse in Haushalt und Industrie. Ein etwa ebenso großer Anteil wie aus Verbrennungsprozessen stammt aus der Oxidation von Methan in der Troposphäre. Außerdem wird es beim Abbau von Chlorophyll freigesetzt. In der Atmosphäre wird CO ständig über die Oxidation mit Hydroxylradikalen zu CO<sub>2</sub> umgesetzt oder aus der Atmosphäre durch Bodenbakterien eliminiert. Die mittlere Verweildauer in der Troposphäre ist kürzer als ein halbes Jahr. Durch den hohen Umsatz von CO in der Atmosphäre liegt die Hauptgefahr weniger im globalen als im lokalen Bereich und besonders in geschlossenen Räumen. Kohlenmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas. Es bindet sich um den Faktor 250 stärker an das Hämoglobin als Sauerstoff. Deshalb besteht bei einer erhöhten CO-Konzentration in

der Atemluft die Gefahr des Erstickens. Akute Vergiftungen treten ab 2000 ppm, subakute schon ab 500 ppm CO auf. Der MAK-Wert beträgt 33 mg/m<sup>3</sup> (Marquardt und Schäfer, 1992; MAK-Liste, 1997).

Die durch die motorische Verbrennung entstehenden Kohlenmonoxidemissionen sind mit Blick auf die sonstigen durch den Kraftfahrzeugverkehr hervorgerufenen Umweltbelastungen ohne Bedeutung (Henschler, 1994).

### Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Die Stickstoffoxide NO und NO<sub>2</sub> sind Nebenprodukte der vollständigen Verbrennung. So entsteht Stickstoffmonoxid, das einen Anteil von über 90 % an der Gesamtstickoxidemission im Rohabgas hat, als sogenanntes "thermisches NO" in sauerstoffreichen Gebieten der Flamme bzw. in der Nachreaktionszone (Baumbach, 1993) gemäß



Die Reaktion setzt bei ca. 1300 °C in Folge der beginnenden Sauerstoffdissoziation ein. Im motorischen Bereich wird eine nennenswerte NO<sub>x</sub>-Bildung jedoch erst ab ca. 1900 °C festgestellt (Mattes et al., 1999).

Zum anderen entsteht das als "promptes NO" bezeichnete Stickstoffoxid, welches aus der Reaktion von CH-Radikalen mit Luftstickstoff und intermediär gebildeter Blausäure entsteht (Warnatz et al., 2001). Letzteres spielt quantitativ jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

Eine inhomogene Gemischaufbereitung von Kraftstoff und Luft im Brennraum führt bei Dieselmotoren zwangsläufig zur Partikelbildung. Diese sind demnach als Produkte der unvollständigen Verbrennung zu betrachten, die durch hohe Temperaturen – allerdings zu Lasten einer erhöhten NO<sub>x</sub>-Emission – vermindert sind. Diese unausweichliche Gegenläufigkeit gilt derzeit als eines der größten Probleme direkt einspritzender Dieselmotoren und wird als sogenanntes "Diesel-Dilemma" bezeichnet. Es deutet sich jedoch erwartungsgemäß auch an, dass moderne direkt einspritzende Ottomotoren ein tendenziell analoges Verhalten zeigen (Lake et al., 1999). Zur Lösung dieses Problems werden simultan drei voneinander unterschiedliche Wege beschritten: die Feinabstimmung von Motor und Einspritzsystem, die Abgasnachbehandlung und die Optimierung von Kraftstoffen. Dabei sind die drei genannten jeweils aneinander anzupassen, um die Partikel- und Stickoxidemissionen gleichzeitig zu vermindern.

Charakteristisch für NO ist sein großes Bestreben, mit Sauerstoff – und besonders schnell mit Ozon – zu NO<sub>2</sub> zu reagieren. Dadurch wirkt NO "ozonzehrend". Reines NO besitzt keine Lungenreizwirkung, bildet aber, sofern keine Umwandlung zu NO<sub>2</sub> stattfindet, nach Resorption über den Atemtrakt Methämoglobin. NO ist ein endogener Modulator des Blutgefäßtonus und deshalb physiologisch-metabolisch eine gut untersuchte Substanz (Lenz et al., 1993).

Stickstoffdioxid ist ein Gas mit stechendem Geruch und rot-brauner Farbe. Es wirkt bereits bei geringen Konzentrationen als Lungenreizgas und ist schleimhautreizend. Als freies Radikal ist NO<sub>2</sub> grundsätzlich in der Lage, Wasserstoffatome von Fettsäuren zu abstrahieren und so die Lipidperoxidation einzuleiten. Diese Peroxidationen führen letztlich zum Funktionsverlust von biologischen Membranen. Die Membranzerstörung gilt als übergeordnetes Toxizitätsprinzip, wobei die Lipidperoxidation eine Initialreaktion darstellt. Diesem Prozess arbeiten in der lebenden Zelle jedoch Schutz- und Reparaturmechanismen entgegen,

so dass er erst bei extrem hohen, in der freien Atmosphäre kaum erreichbaren Konzentrationen von  $\text{NO}_2$  eintritt.  $\text{NO}_2$  disproportioniert in Gegenwart von Wasser zu salpetriger Säure und Salpetersäure. Die salpetrige Säure ( $\text{HNO}_2$ ) oder ihre Salze können mit sekundären Aminen zu mutagenen Nitrosaminen reagieren. Nitrit in der Blutbahn kann das Hämoglobin zu Methämoglobin oxidieren, wobei dann Kapazitäten für den Sauerstofftransport verloren gehen. Ebenso wirkt  $\text{NO}_2$  wahrscheinlich durch die entstehende Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) als Zellgift im Respirationstrakt. Eine Exposition gegenüber  $9 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_2$  (MAK-Wert) bewirkt eine verminderte Fluidität von Plasmamembranen. Veränderungen der Membranfluidität betreffen eine Reihe fundamentaler zellulärer Funktionen wie den transmembranen Transport, bestimmte Enzymaktivitäten und Rezeptor-Ligand-Interaktionen. Eine Aktivierung antioxidativer Enzyme und Lipidperoxidation werden nach Exposition gegenüber ca.  $0,7 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_2$  festgestellt (Marquart und Schäfer, 1994). Von Bedeutung ist darüber hinaus die Eigenschaft von  $\text{NO}_2$ , als Vorläufersubstanz für die Fotooxidantienbildung, insbesondere für Ozon, zu dienen. Der Austrag der Stickoxide aus der Atmosphäre erfolgt über gebildete salpetrige Säure oder Salpetersäure und deren anschließende nasse Deposition als sogenannter saurer Regen.

## Partikel

Eine allgemeine Definition für Dieselpartikel existiert nicht. Entsprechend der Definition der Bundesumweltbehörde der USA (EPA) sollen im Folgenden unter Partikeln alle Stoffe verstanden werden, die bei Temperaturen unter  $51,7 \text{ °C}$  (entsprechend  $125 \text{ °F}$ ) im verdünnten Abgas in fester oder flüssiger Form vorhanden sind und auf einem Filter abgeschieden werden können (Code of Federal Regulations). Durch die Begrenzung der Abgasprobentemperatur soll sichergestellt werden, dass alle höhersiedenden, eventuell gesundheitlich bedenklichen organischen Verbindungen an die Rußpartikel adsorbiert sind und bei der Analyse erfasst werden. Die Temperaturabsenkung der Abgasprobe soll dabei durch Vermischung mit Luft in einem Abgasverdünnungssystem erreicht werden. Auf diese Weise wird der Austritt der Abgase in die Umgebung simuliert.

Die emittierte Partikelmasse besteht aus einer Vielzahl von organischen und anorganischen Substanzen. Die Hauptbestandteile der organischen Substanzen sind Ruß (Kohlenstoff), unverbrannter oder nur unvollständig verbrannter Kraftstoff und Schmieröl. Zu den anorganischen Substanzen zählen Sulfate, Wasser und Metallverbindungen. Bei den Metallverbindungen handelt es sich sowohl um Späne und Rostpartikeln, die direkt aus dem Motor bzw. der Abgasleitung stammen, als auch um Überreste von Kraftstoff- und Schmierölderivaten. Der prozentuale Anteil dieser Stoffe an der gesamten Partikelmasse ist von vielen Parametern abhängig. Neben konstruktiven Parametern wie Brennraumform und Ausführung der Einspritzanlage gehören hierzu der Betriebspunkt (Last und Drehzahl), die Kraftstoff- und Schmierölqualität sowie der Verschleißzustand des Motors (Wachter und Cartellieri, 1987).

Die Partikelbildung wird durch die Rußbildung im Brennraum eingeleitet. Ruß entsteht, wenn Kraftstoff in eine Umgebung hoher Temperatur bei geringem Sauerstoffangebot gelangt. Die Reaktionen, die zur Ruß- bzw. Partikelbildung führen, sind quantitativ nur unvollständig geklärt. Als wahrscheinlichste Hypothese gilt die Acetylen-Theorie (Klingenberg et al., 1992). Hiernach stehen am Anfang der Rußbildung Crack- und Dehydrierungsreaktionen, die zur Zersetzung der langkettigen Kraftstoffmoleküle in kurzkettige, ungesättigte Kohlenwasserstoffe wie das Acetylen führen. Durch Anlagerungsprozesse entstehen aus dem Acetylen unter weiterer Wasserstoffabspaltung zyklische und polyzyklische Kohlenwasserstoffe. Weitere Additions- und Dehydrierungsreaktionen führen zu einem Anwachsen des Kohlen-



stoffanteils in den Molekülen, bis schließlich erste Teilchen mit Durchmessern größer 0,001 µm entstanden sind, aus denen durch Koagulation die sogenannten Primärpartikel mit Durchmessern von 0,01 bis 0,08 µm gebildet werden. Die Gestalt, in der die Partikel den Brennraum verlassen, ist sehr vielfältig. Sowohl kleine Primärpartikeln als auch größere, aus Primärpartikeln zusammengesetzte Agglomerate in Form von teilweise räumlich sehr verzweigten Ketten und sphärischen Zusammenballungen wurden beobachtet (Lipkea und Johnson, 1978; Amann und Siegl, 1982; Jing et al., 1996).

Bei der Betrachtung der Partikelbildung wird grundsätzlich zwischen den Vorgängen im Brennraum, denen im Abgasstrang sowie denen bei der Vermischung von Abgas mit der Umgebungsluft beim Austritt ins Freie unterschieden.

Bei der Partikelbildung im Brennraum ist die praktisch gleichzeitig mit der Rußbildung einsetzende Rußoxidation von großer Bedeutung. Die Geschwindigkeiten der die Rußbildung einleitenden Crackreaktionen sowie der Oxidationsreaktionen sind stark von Druck, Temperatur und vom Luftverhältnis abhängig. Bei hohen Temperaturen und geringem Sauerstoffangebot (kleine Luftverhältnisse) ist die Geschwindigkeit der Crackreaktionen größer als die der Oxidationsreaktionen; somit wird mehr Ruß gebildet als oxidiert. Bei hohen Temperaturen und großen Luftverhältnissen ist hingegen die Oxidationsgeschwindigkeit größer, so dass eine nachträgliche Rußverbrennung möglich ist (Meurer, 1966; Hühn, 1970; Houben und Lepperhoff, 1990).

Als Dieselmotoremission (DME) gilt gemäß den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) nur der nach einem speziellen Analyseverfahren filtrierbare elementare Kohlenstoff des Partikelanteils (Bundesarbeitsblatt, 1996). Bei der coulometrischen Analyse kann dann zwischen dem elementaren Kohlenstoff und den organisch löslichen Kohlenstoffverbindungen unterschieden werden (Mayer et al., 1998). Die Verwendung des Begriffs Dieselmotoremissionen ist jedoch häufig weiter gefasst, weil er im Allgemeinen die Gesamtheit der aus Gas- und Partikelphase bestehenden Emissionen bezeichnet. Der TRK-Wert (Technische Richtkonzentration) für DME liegt derzeit bei 0,1 mg/m<sup>3</sup>.

Die erbgutverändernden Eigenschaften (Mutagenität und Kanzerogenität) von DME sind seit geraumer Zeit bekannt. Obwohl ein sicherer Nachweis der krebsauslösenden Wirkung beim Menschen noch nicht geführt war, wurden 1987 in Deutschland DME aufgrund eindeutiger Untersuchungen *in vitro* und an Tieren (Heinrich et al., 1986; Ishinishi et al., 1986; Mauderly et al., 1987) als krebserregender Arbeitsstoff in die Gruppe III A2 der MAK-Liste eingestuft. Die International Agency for Research on Cancer (IARC, 1989), die Weltgesundheitsorganisation WHO (1996) und ebenso US-amerikanische Behörden stufte DME nach zusätzlichen Auswertungen epidemiologischer Studien als wahrscheinlich für den Menschen krebserregend ein (NIOSH, 1988; EPA 1998). Die kanzerogene Wirkung geht dabei von der Partikelphase mit den daran anhaftenden mutagenen Substanzen aus. Dabei sind vor allem polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe von Bedeutung (Scheepers und Bos, 1992; Health Effects Institute, 1995). Aber auch andere Gesundheitsgefahren, die vor allem den Atemtrakt und das Herz-Kreislaufsystem betreffen, wurden beobachtet (Health Effects Institute, 1995).

In Umweltstudien wurde beobachtet, dass kurzzeitige Anstiege der Partikelkonzentrationen in der Luft zum Anstieg von Krankenhauseinweisungen und Todesfällen bei Patienten mit Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen führten (Dockery and Pope, 1994; Samet et al., 1995; Katsouyanni et al., 1997). Langzeitstudien zeigten, dass in Ballungsgebieten mit hoher Partikelbelastung der Luft mehr chronische Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen auftraten als in ländlichen Regionen (Dockery et al., 1993; Pope et al., 1995). Eine 1999 publizierte Untersuchung ergab Assoziationen eines Lungenkrebsrisikos mit Partikeln, aber auch mit Ozon und Schwefeldioxid (Abbey et al., 1999). Insgesamt ergibt sich aus den vor-

liegenden Daten, dass Partikelemissionen mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit vor allem von empfindlichen Personen (Kindern, alten und kranken Menschen) verbunden sein können. Eine Abschätzung des globalen Gesundheitsrisikos bei gleichbleibend steigender partikulärer Luftverschmutzung ergab für die Jahre 2000 bis 2020 weltweit 8.000.000 zusätzliche Todesfälle (Working Group on Public Health and Fossil-Fuel Combustion, 1997). In neuen Studien wird auch zunehmend die Partikelgrößenverteilung der Emissionen berücksichtigt, da es Hinweise gibt, dass feine ( $< 2,5\mu\text{m}$ ) und ultrafeine ( $< 0,1\ \mu\text{m}$ ) Partikel stärker mit Gesundheitsrisiken verbunden sein könnten, als die bisher meistens herangezogenen Partikelgrößen ( $< 10\ \mu\text{m}$ ) (Seaton et al., 1995; Peters et al., 1997).

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Motor und Motortestbedingungen

Die Untersuchungen erfolgten am Emissionsprüfstand des Institutes für Technologie und Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig. Dort steht ein moderner Mercedes Benz Motor OM 904 LA (125 kW) mit Turbolader und Ladeluftkühlung zur Verfügung (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Technische Daten des Mercedes Benz OM 904 LA

Zylinderhub	130 mm
Zylinderbohrung	102 mm
Anzahl Zylinder	4
Hubvolumen	4250 cm <sup>3</sup>
Nenndrehzahl	2300 min <sup>-1</sup>
Nennleistung	125 kW
Maximales Drehmoment	635 Nm bei 1380 min <sup>-1</sup>
Verdichtung	17,4

Der Vierzylindermotor arbeitet mit einem Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem. In der am Emissionsprüfstand montierten Ausführung entspricht der Motor den nach EURO II geltenden Emissionsgrenzwerten. DaimlerChrysler verbaut das Aggregat überwiegend in der ATEGO-Lkw-Serie. Gekoppelt an eine Wirbelstrombremse können gemäß ECE-R 49 die geforderten Lastpunkte hintereinander automatisch angefahren werden (Abb. 3-1). Ein Verlauf des 13-Stufen-Tests ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

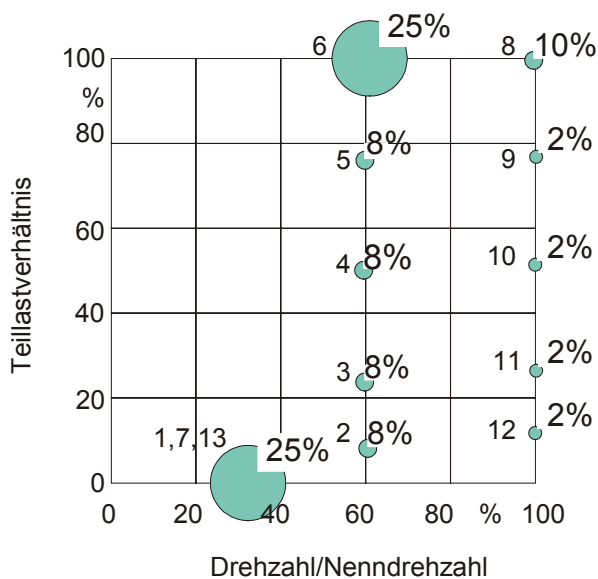


Abbildung 3-1: Motorbetriebspunkte des 13-Stufen-Tests nach ECE-R 49

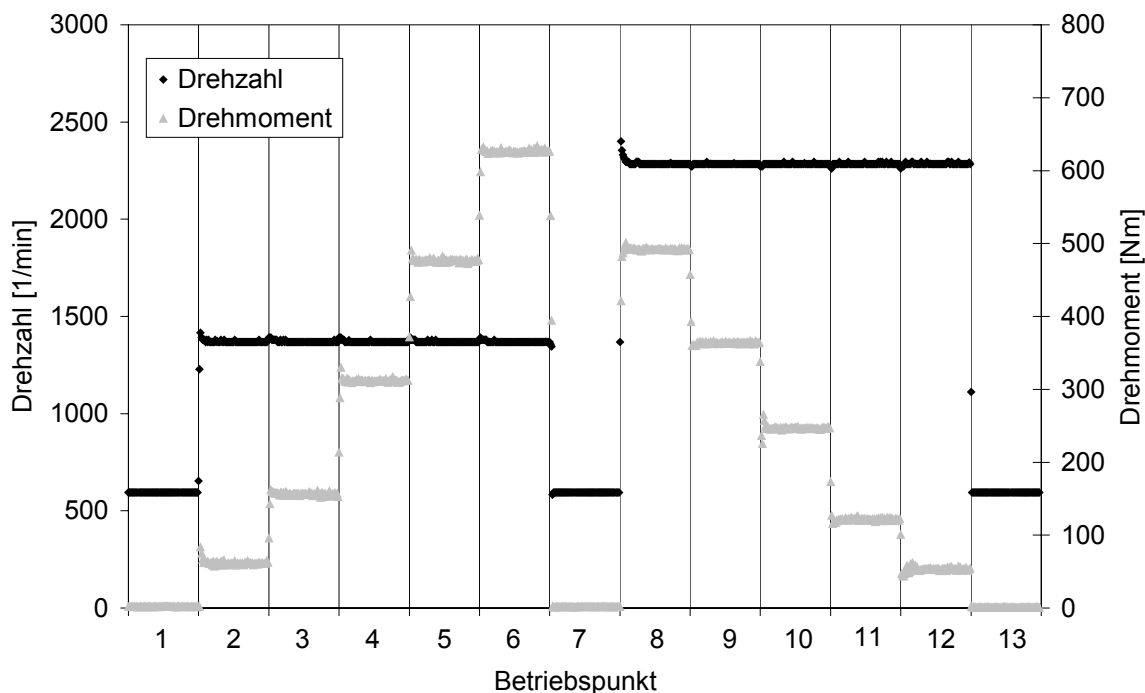


Abbildung 3-2: Drehzahl und Drehmoment im Verlauf des 13-Stufen-Tests nach ECE-R 49

## 3.2 Analysenmethoden und Kraftstoffeigenschaften

### 3.2.1 Gesetzlich limitierte Abgasparameter

Die gesetzlich limitierten Abgasbestandteile Kohlenmonoxid (CO), Gesamtkohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) werden durch herkömmliche Gasanalysatoren bestimmt und ihre Werte alle fünf Sekunden aufgezeichnet. Aus den in der letzten Minute eines Betriebspunktes aufgezeichneten Werten wird ein Mittelwert gebildet.

Das Messgerät für CO arbeitet mit nicht dispersem Infrarotlicht (NDIR-Verfahren). Es handelt sich dabei um einen Gasanalysator Multor 710 (Fa. Maihak). Der gefilterte und unter seine Taupunkttemperatur abgekühlte Probegasstrom wird in zwei gleiche, jeweils durch eine Küvette fließende Teilströme geteilt. Eine dieser Küvetten wird mit infrarotem Licht bestrahlt, dessen Wellenlänge auf charakteristische Absorptionen des Kohlenmonoxids abgestimmt ist. Dadurch erwärmt sich dieser Teilstrom, und es kommt in einem Verbindungskanal der beiden Küvetten zu einer Ausgleichsströmung, die durch einen Mikroströmungsfühler gemessen wird und ein kalibrierfähiges Maß für den Gehalt der Messkomponente CO ist. Kalibriert wird der Analysator mittels Prüfgas von 0,198 % CO in Stickstoff.

Zur Bestimmung der Kohlenwasserstoffe wird als Messgerät der Gasanalysator RS 55-T der Firma Ratfisch eingesetzt. Er arbeitet mit einem Flammenionisations-Detektor (FID), wobei das Probegas in einer Helium-Wasserstoff-Flamme ionisiert wird, die in einem elektrischen Feld brennt. Durch Messung der Feldänderung wird der Kohlenwasserstoffgehalt ermittelt. Die Kalibrierung erfolgte mit Propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 276 ppm) als Einpunktkalibrierung. Dabei führt eine mittels eines Thermostaten konstant auf 190°C beheizte Leitung das heiße und zuvor gefilterte Abgas dem HC-Analysator zu. Mit der Beheizung des Gasweges soll eine vorzeitige Kondensation höhersiedender Kohlenwasserstoffe vermieden werden.

Die Stickoxide werden mit einem Chemilumineszenzdetektor (CLD) der Firma EcoPhysics (CLD 700 EL ht) analysiert. Grundlage des CLD ist die Tatsache, dass bei der Oxidation von NO zu NO<sub>2</sub> etwa 10 % der NO<sub>2</sub>-Moleküle in einen elektronisch angeregten Zustand gelangen, aus dem sie sofort in den nicht angeregten Zustand zurückkehren, wobei Photonen ausgesendet werden (Lumineszenz). Diese werden bestimmt und sind ein Maß für den NO-Gehalt. Zur Bestimmung des Gesamtgehaltes an NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub> = NO<sub>x</sub>) wird die heiße und gefilterte Probe zunächst durch einen Konverter geleitet, in dem NO<sub>2</sub> zu NO reduziert wird. NO<sub>2</sub> wird als Differenz aus der Messung von NO<sub>x</sub> und NO errechnet. Der CLD erzeugt mittels eines im Gerät enthaltenen Ozongenerators Ozon (O<sub>3</sub>) für die Oxidation von NO zu NO<sub>2</sub>. Die Kalibrierung erfolgt mit Prüfgasen von 838 ppm NO in Stickstoff.

Die Probenahme zur Partikelmassebestimmung erfolgt an einem Abgasteilstromverdünnungstunnel (Abb. 3-3), der das Abgas verdünnt und somit auf unter 51,7°C abkühlt. Die Partikel werden auf einem zweistufigen Filter gesammelt, indem ein Teilstrom aus dem verdünnten Abgas entnommen wird. Dieser Teilstrom wird nach den Filtern durch einen Massendurchflussregler geführt und hat daher einen konstanten Volumenstrom. Das Gesamtvolumen V<sub>SAM</sub>, das durch den Filter gesogen wird, ergibt sich aus der Vorgabe, dass bei jedem Betriebspunkt mindestens 30 Sekunden und höchstens 300 Sekunden der Filter belegt werden darf. Dazu wird für jeden Betriebspunkt die Verdünnung während des Testverlaufs errechnet und der Filter dann solange belegt, dass der geforderte Anteil des Betriebspunktes WF<sub>i</sub> am gesamten 13-Stufen-Test (Abb. 3.1) mit +/- 7 % eingehalten wird.

$$\frac{V_{SAM,i} \cdot \sum_i (V''_{EDF,i} \cdot WF_i)}{V_{SAM} \cdot q_i \cdot V''_{EDF,i}} = WF_i$$

mit

V<sub>SAM</sub>: Gesamtprobevolumen

V<sub>SAM,i</sub>: Probevolumen im Betriebspunkt i

V''<sub>EDF,i</sub>: Abgasvolumenstrom im Betriebspunkt i

WF<sub>i</sub>: Wichtungsfaktor des Betriebspunktes i

q<sub>i</sub>: Abgasverdünnungsverhältnis im Betriebspunkt i

Bei den Filtern handelt es sich um PTFE-beschichtete Glasfaserfilter (T60A20, Pallflex Products Corp.), deren gravimetrische Analyse per Mikrogrammwaage erfolgt (Sartorius M5P, ± 5µg Genauigkeit).

Die Partikelemission berechnet sich dann nach

$$PT = \frac{M_{PF} \cdot \sum_i (V''_{EDF,i} \cdot WF_i)}{V_{SAM} \cdot \sum_i (P_i \cdot WF_i)}$$

mit

PT: spezifische Partikelemission

M<sub>PF</sub>: Gesamtmasse auf den Partikelfiltern

V<sub>SAM</sub>: Gesamtprobevolumen

V''<sub>EDF,i</sub>: Abgasvolumenstrom im Betriebspunkt i

WF<sub>i</sub>: Wichtungsfaktor des Betriebspunktes i

P<sub>i</sub>: Leistung im Betriebspunkt i

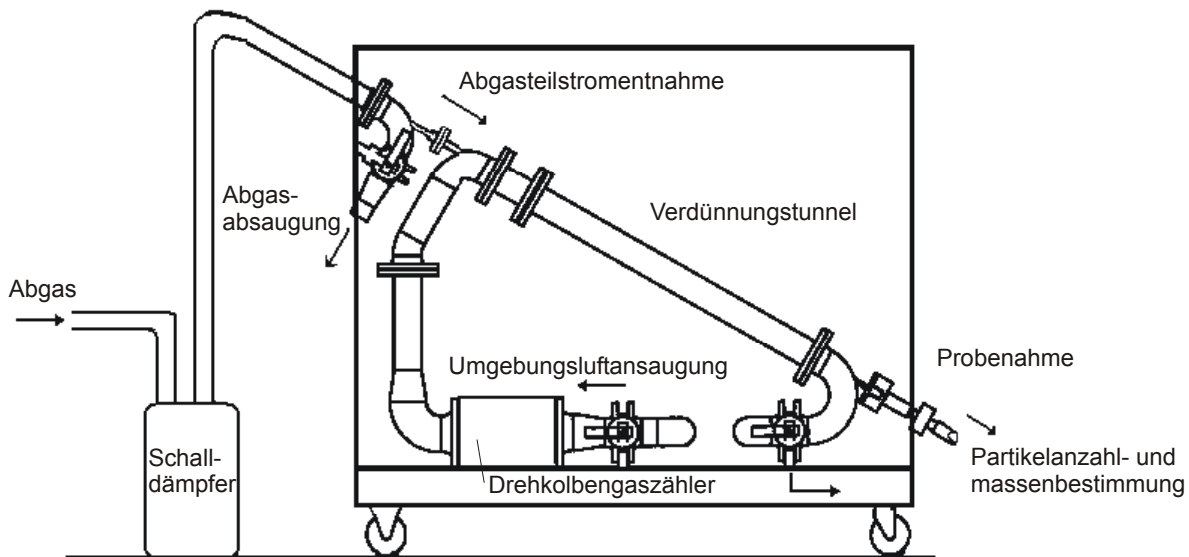


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des Abgasverdünnungstunnels

### 3.2.2 Kraftstoffeigenschaften

Die gemäß den vorliegenden Analysen vergleichbaren Kraftstoffeigenschaften werden in Tabelle 3-2 wiedergegeben. Alle darüber hinaus zur Verfügung stehenden Parameter finden sich im Anhang.

Mineralischer Dieselmotorkraftstoff gemäß DIN EN 590 (DK) wurde von der Carl Büttner Mineralöl GmbH, Leer bezogen. Rapsölmethylester gemäß E DIN 51 606 (RME) wurde von der Oelmühle Leer Connemann GmbH & Co zur Verfügung gestellt.

Tabelle 3-2: Eigenschaften der verwendeten Kraftstoffe

	Grenzwert nach DIN EN 14214	RME	Grenzwert nach DIN EN 590	DK
Dichte (15°C) [kg/m <sup>3</sup> ]	860-900	883	820-845	827,1
kin. Viskosität (40°C) [mm <sup>2</sup> /s]	3,5-5,0	4,55	2-4,5	2,434
Flammpunkt [°C]	min. 120	>170	> 55	69,0
C.F.P.P. [°C]	max. -20	-10	max. -20	-15
Schwefel [mg/kg]	max. 10,0	<10	max. 50	8
Koksrückstand [Gew.-%]	max. 0,30	<0,05	max. 0,30	<0,05
Cetanzahl [-]	min. 51	>55	min. 51	54,4
Wassergehalt [mg/kg]	max. 500	267	max. 200	20
Gesamtverschmutzung [mg/kg]	max. 24	2	max. 24	<10
Kupfer Korrosion [-]	max. 1	1	max. 1	1
Neutralisationszahl [mg KOH/g]	max. 0,5	0,173	max. 0,5	<0,05

## 4 Ergebnisse

Im Verlauf der Versuchsreihe wurden über 50 13-Stufen-Tests gefahren. Von diesen konnten jedoch nicht alle zur Auswertung herangezogen werden. Am Ende einer Serie trat ein Riss in der Kühlung der Ladeluft auf und verursachte einen starken Leistungsabfall des Motors. Da nicht genau bestimmt werden konnte, ab wann dieser Riss vorlag, wurden alle Versuche wiederholt. Am Ende dieser Wiederholung zeigte sich ein Fehler bei der Messung des Verdünnungsluftverhältnisses, das zur Partikelemissionsbestimmung notwendig ist. Somit wurden weitere Wiederholungsmessungen notwendig. Zudem war aufgrund von leicht schwankenden Verdünnungsverhältnissen zwischen verschiedenen Tests die Bestimmung der Partikelemissionen schwierig, so dass auch hier einzelne Tests wiederholt werden mussten. Aus der Vielzahl der Wiederholungen resultiert eine große, gut gesicherte Datengrundlage für die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen. Für die Bestimmung der Partikelemissionen stehen pro Gemisch die im Projektantrag geforderten zwei Testläufe zur Auswertung zur Verfügung. Jedoch wurden über die Anforderungen des Projektantrags hinaus auch die Partikelemissionen der Gemische mit 25 % und 75 % RME-Anteil bestimmt.

Der Versuchsmotor lief in den Versuchen weitgehend reproduzierbar und zuverlässig. Nur im Betriebspunkt 12 ist die Einstellung des geforderten Drehmoments schwer möglich, so dass hier oft größere Schwankungen auftreten (Abbildung 4-1). Da dieser Punkt jedoch nur mit 2 % zum Gesamtergebnis beiträgt, machen sich diese Schwankungen nicht bemerkbar. Mit zunehmendem RME-Anteil ist eine Abnahme der Leistung in den Betriebspunkten 6 und 8 feststellbar. Das maximale Drehmoment verringert sich bei RME gegenüber DK um ca. 2-3 %, die maximale Leistung um ca. 1 %. Um jedoch einen vergleichbaren Testverlauf zu erzielen, werden alle anderen Punkte bei identischen Einstellungen gefahren und nicht auf das jeweils geringere Drehmoment von RME oder RME-Mischungen heruntergerechnet.

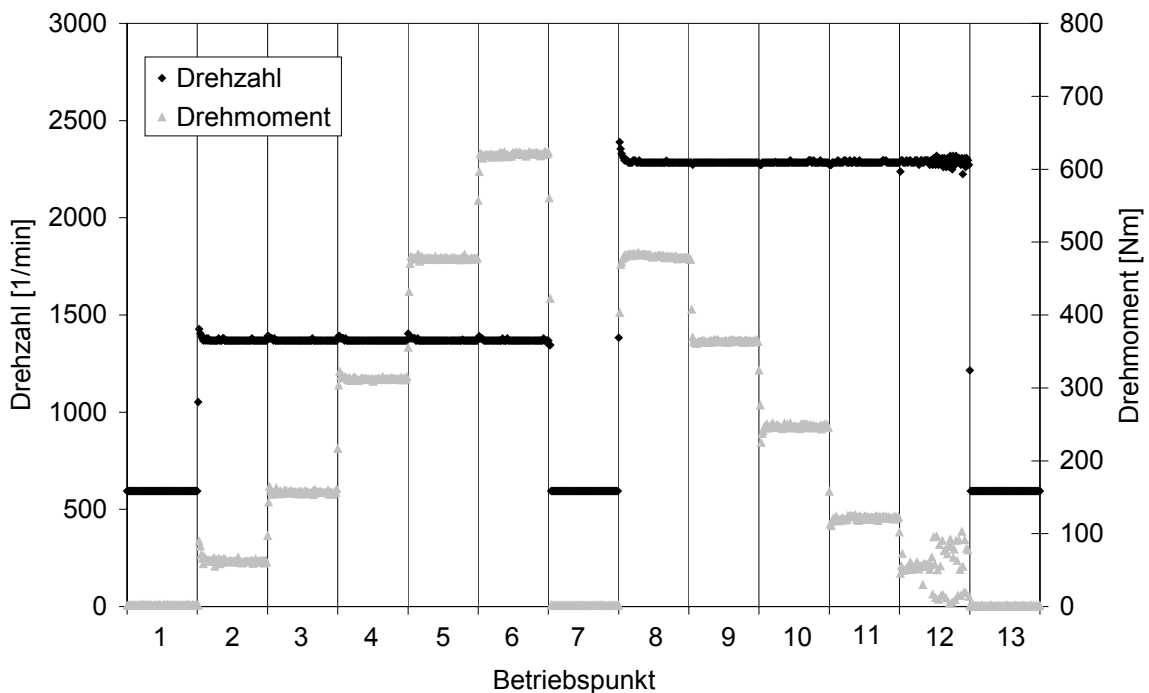


Abbildung 4-1: Drehzahl und Drehmoment im Verlauf des 13-Stufen-Test mit extremen Schwankungen des Motors im Betriebspunkt 12

Während der 13-Stufen-Tests wurden noch zahlreiche weitere Motorparameter (z.B. Öldruck, Ansaugvolumenstrom, Abgastemperatur), Abgasbestandteile (z.B. Sauerstoffgehalt, Kohlendioxidgehalt) und Umgebungsparameter (z.B. Temperatur und relative Feuchte der Ansaugluft) aufgezeichnet. Für die Parameter, die sich während des 13-Stufen-Tests verändern, ist ein exemplarischer Verlauf im Anhang abgebildet.

#### 4.1 Kohlenmonoxidemissionen

Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft die Kohlenmonoxidemissionen im Verlauf des 13-Stufen-Tests. Insbesondere die Betriebspunkte 1, 6 und 12 weisen hohe Konzentrationen im Abgas auf. Die geringsten Konzentrationen sind in den Betriebspunkten 9, 10 und 11 zu erkennen.

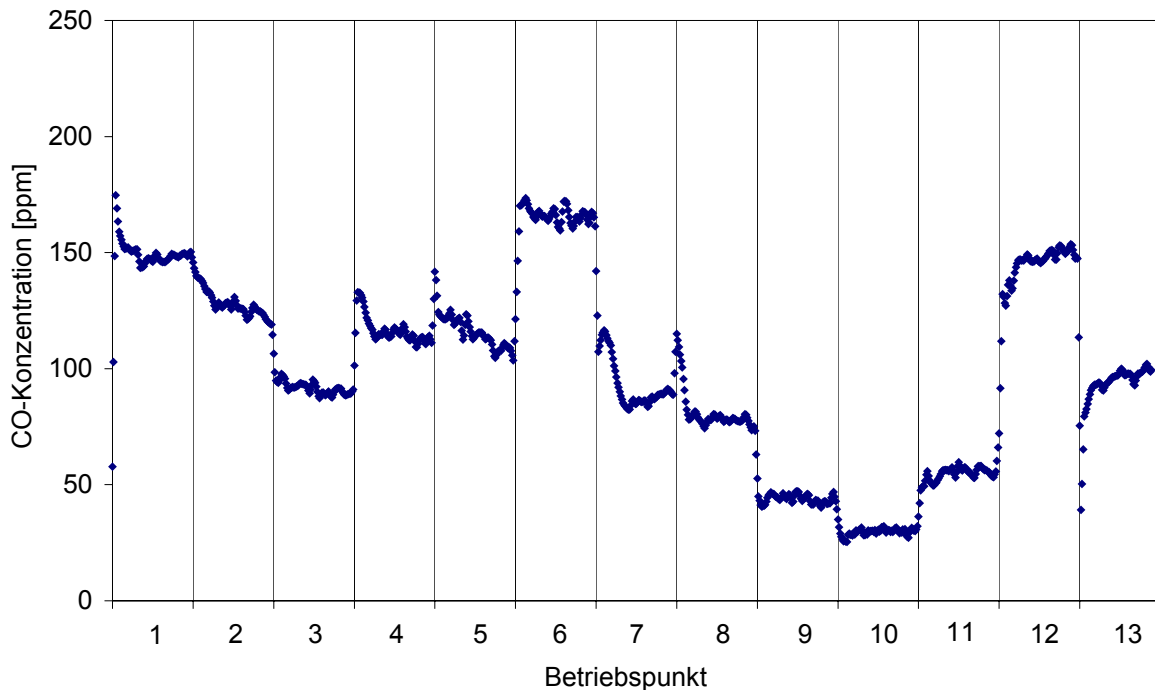


Abbildung 4-2: Exemplarischer Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas im Verlauf des 13-Stufen-Tests



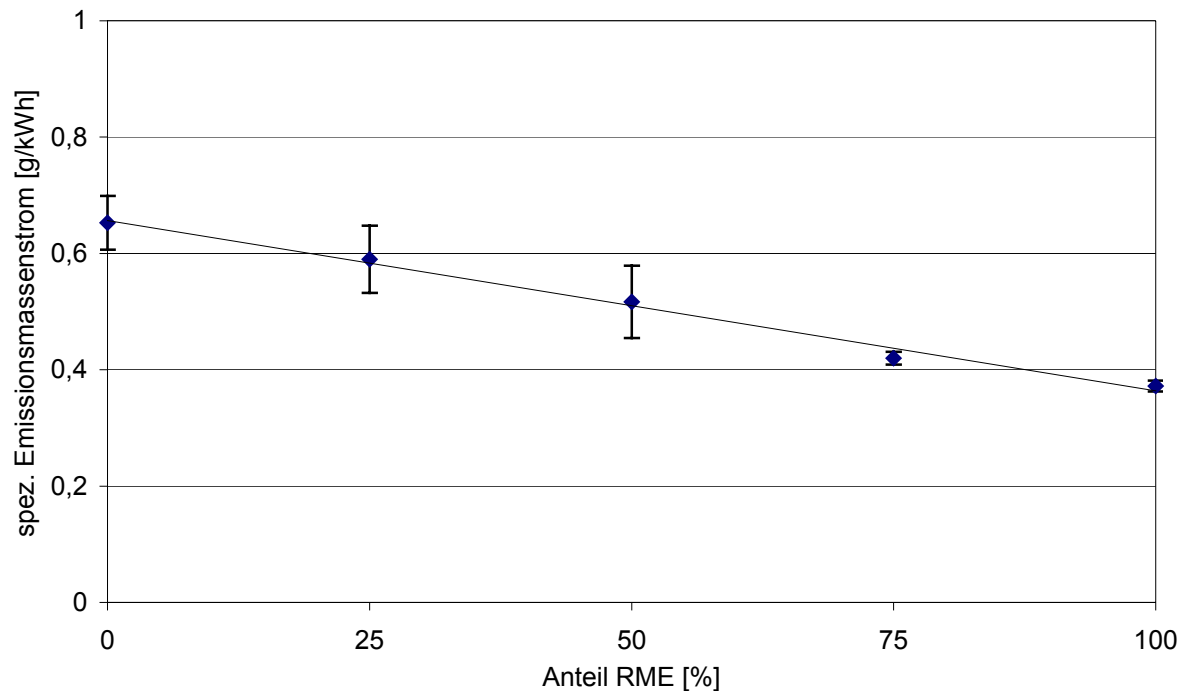


Abbildung 4-3: Spezifische CO-Emissionsmassenströme von verschiedenen RME/DK-Mischungen im 13-Stufen-Test

Sowohl DK als auch RME liegen deutlich unter dem Emissionsgrenzwert von 4,0 g/kWh (Abbildung 4-3). Mit zunehmendem RME-Anteil nimmt die Emission um ca. 40 % linear ab. Die relative Standardabweichung zwischen den einzelnen Ergebnissen des 13-Stufen-Tests beträgt etwa 10 %. Die je 6 ausgewerteten 13-Stufen-Tests bei 75 % bzw. 100 % zeigen im Ergebnis eine deutlich geringere Standardabweichung. Berechnet man die Standardabweichung aus den Standardabweichungen der Einzelpunkte mittels Fehlerfortpflanzung, ergibt sich auch bei den Mischungen von 75 % und 100 % eine mit den anderen Mischungen vergleichbare Standardabweichung von ca. 10 %. Die Ergebnisse der einzelnen 13-Stufen-Tests sind aufgeschlüsselt nach Betriebspunkten im Anhang 7.2.1 dargestellt.

Beim CO handelt es sich um ein Produkt unvollständiger Verbrennung und seine Entstehung ist im Wesentlichen auf Sauerstoffmangel zurück zu führen. Der durch die Esterbindungen im RME enthaltene Sauerstoff und die lineare Molekülgeometrie werden zum Teil für den beobachteten Minderungseffekt mit verantwortlich gemacht.

## 4.2 Kohlenwasserstoffemissionen

Ebenso wie für CO wird auch bei den HC-Emissionen die Anforderung der EURO II-Grenzwerte (1,1 g/kWh) für alle Reinkraftstoffe und Kraftstoffgemische erfüllt. Eine vergleichsweise hohe Emission ist im Leerlauf und den Schwachlastpunkten zu verzeichnen (Abbildung 4-4).

Die Emissionen nehmen über dem Mischungsverhältnis mit zunehmendem RME-Anteil um knapp 50 % ab. Diese Abnahme ist weitgehend linear (Abbildung 4-5).

Die Ergebnisse der einzelnen 13-Stufen-Tests sind aufgeschlüsselt nach Betriebspunkten im Anhang 7.2.2 dargestellt.

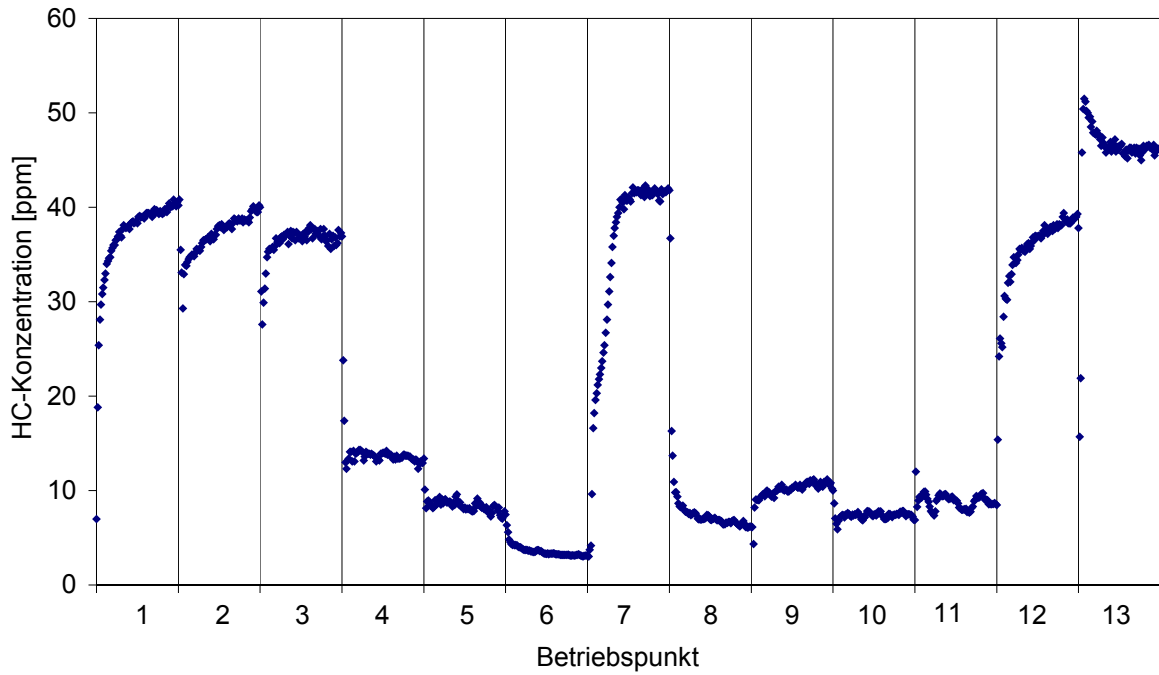


Abbildung 4-4: Exemplarischer Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentration im Abgas im Verlauf des 13-Stufen-Tests

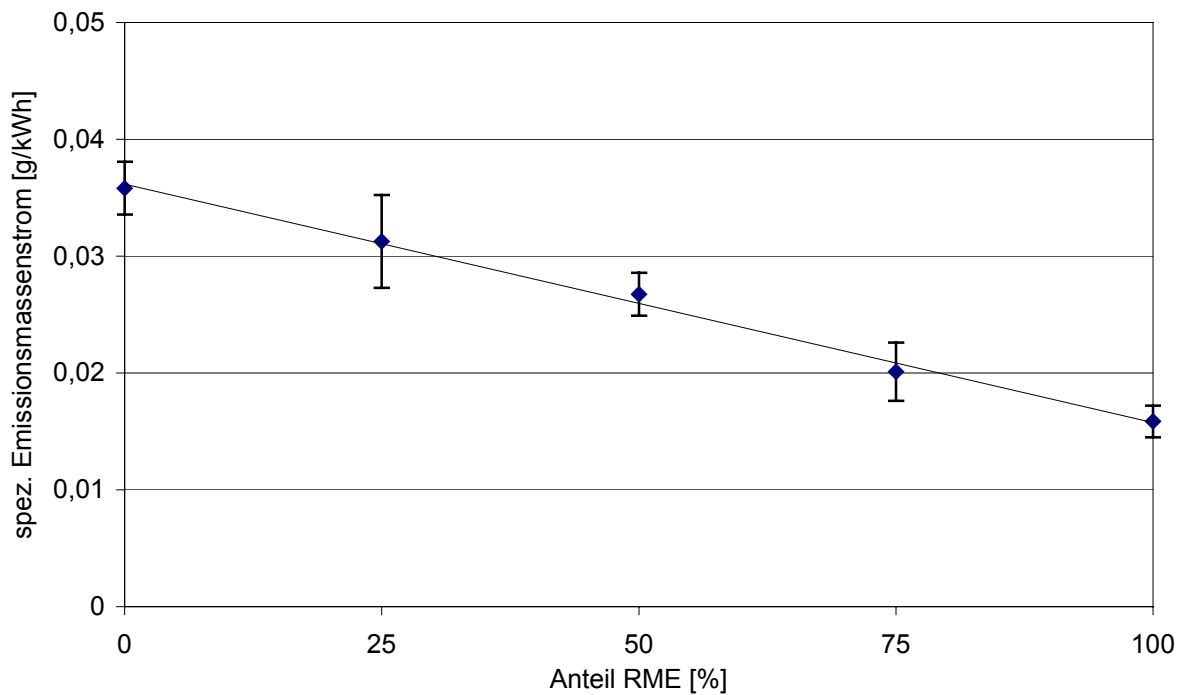


Abbildung 4-5: Spezifische HC-Emissionsmassenströme im 13-Stufen-Test

### 4.3 Stickoxidemissionen

Bei den Stickoxidemissionen unterschreiten die ermittelten Emissionsmassenströme nur knapp den vorgeschriebenen Grenzwert von 7,0 g/kWh. Dieses Ergebnis unterstreicht im Zusammenhang mit den weiter unten dargestellten Ergebnissen für die emittierte Partikelmasse, dass gerade diese beiden Schadstoffgruppen für den Dieselmotor ein Problem darstellen.

Mit steigendem RME-Anteil nehmen die Stickoxidemissionen linear zu. So zeigt RME gegenüber DK eine um ca. 10 % höhere Emission (Abbildung 4-7).

Abbildung 4-6 zeigt, dass nur im Leerlauf geringe  $\text{NO}_x$ -Emissionen entstehen, da hier die notwendig hohe Verbrennungstemperatur für die Entstehung von thermischen  $\text{NO}_x$  nicht erreicht wird. Zudem ist erkennbar, dass die Stickoxide zu über 90 % als  $\text{NO}$  emittiert werden;  $\text{NO}_2$  nimmt nur einen geringen Anteil an den Emissionen ein.

Die Ergebnisse der einzelnen 13-Stufen-Tests sind aufgeschlüsselt nach Betriebspunkten im Anhang 7.2.3 dargestellt.

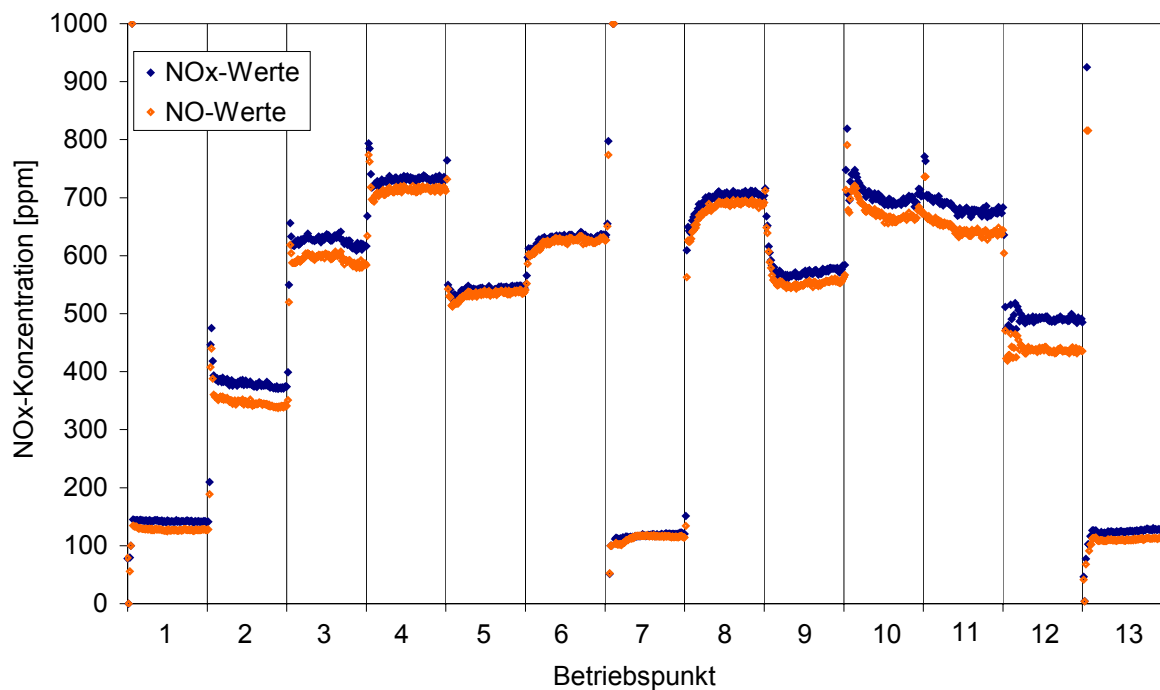


Abbildung 4-6: Exemplarischer Verlauf der Stickoxidkonzentration im Abgas im Verlauf des 13-Stufen-Tests

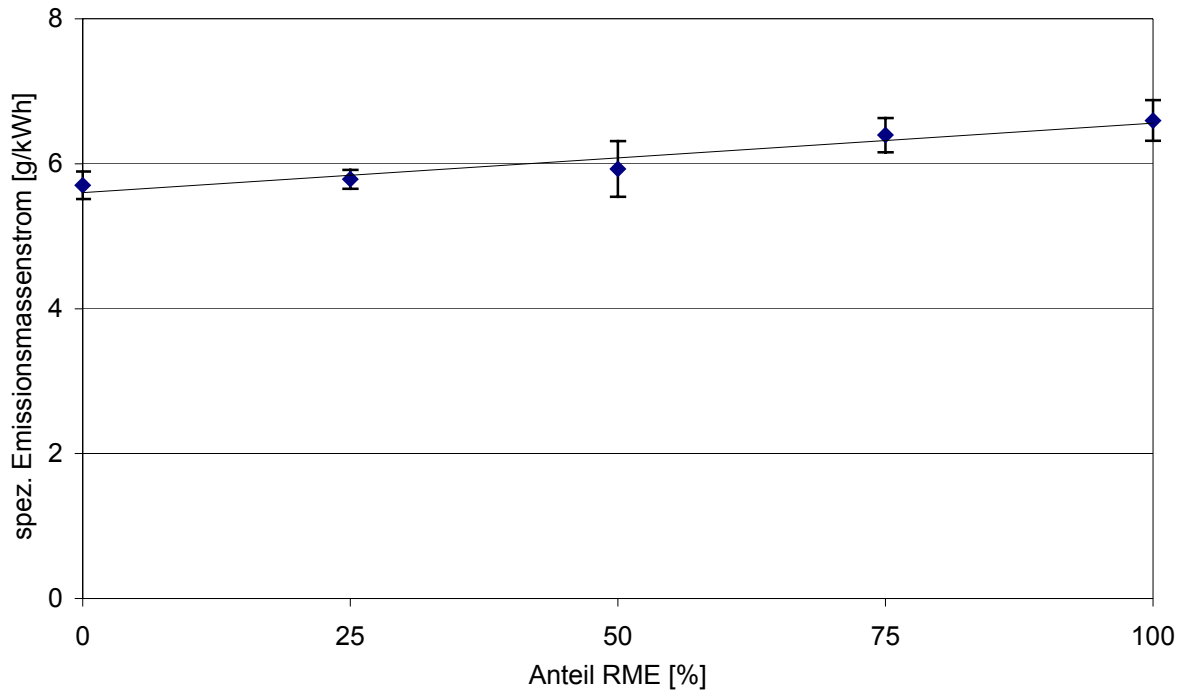


Abbildung 4-7: Spezifische Stickoxidmassenströme im 13-Stufen-Test

#### 4.4 Partikelmasseemissionen

Die Partikel werden im Verlauf des 13-Stufen-Tests auf einem Filter gesammelt. Daher kann keine Differenzierung nach einzelnen Betriebspunkten erfolgen. Für die Bestimmung der Emissionen der einzelnen Gemische konnten jeweils nur zwei Versuche ausgewertet werden. Daher ist hier die Datengrundlage deutlich kleiner als bei den anderen limitierten Abgas-komponenten. Dies macht sich in einer höheren Standardabweichung und einer schlechteren linearen Regression bemerkbar.

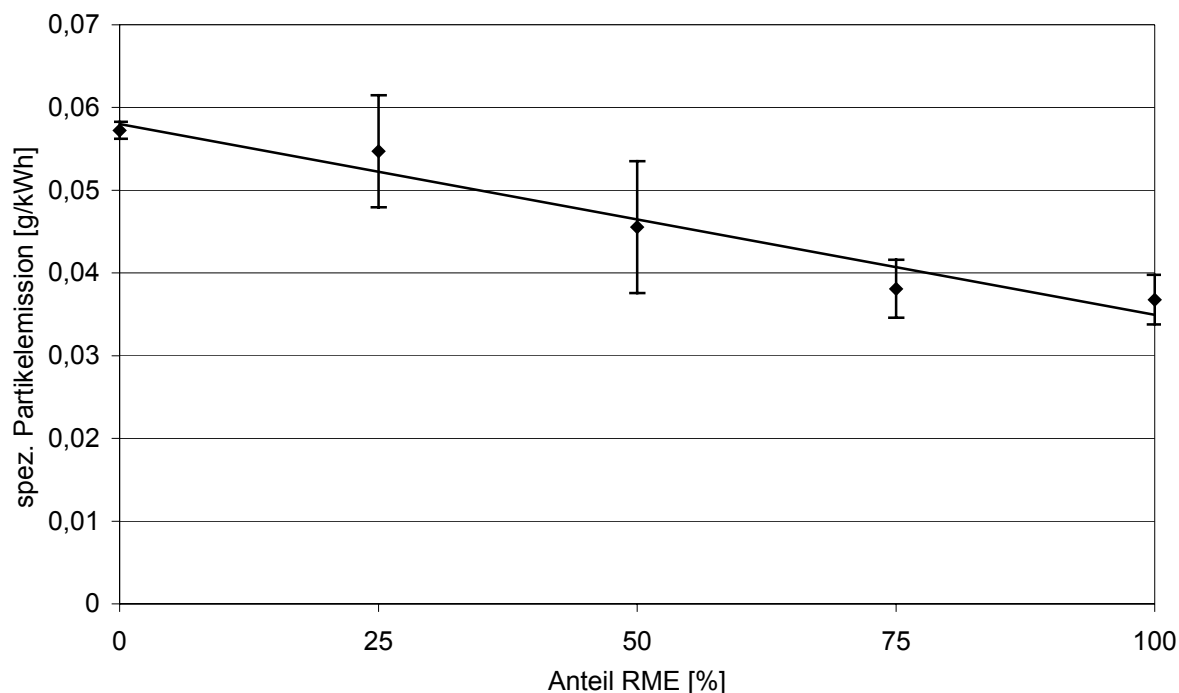


Abbildung 4-8: Spezifische PM-Emissionsmassenströme im 13-Stufen-Test

Die Verwendung von RME bewirkt eine Reduktion von ca. 40 % gegenüber DK. Die Gemische liegen zwischen den Werten von RME und DK. Eine lineare Regression ist hier aber nicht so deutlich ausgeprägt wie bei den anderen Schadstoffen. Der Emissionsgrenzwert von maximal 0,15 g/kWh wird in jedem Fall eingehalten (Abbildung 4-8).

Die wesentlichen Voraussetzungen zur Bildung von PM-Emissionen sind Sauerstoffmangel und niedrige Verbrennungstemperaturen. Damit ist auch schon das Dilemma des Dieselmotors umschrieben. Denn diese beiden Parameter stehen im Gegensatz zu den Bedingungen, die für die NO<sub>x</sub>-Bildung verantwortlich sind. Im vorliegenden Fall wurden herstellerseitig offensichtlich die Partikelmassen weitestgehend abgesenkt, und im Gegenzug konnten die Stickoxide nur knapp unterhalb des zulässigen Grenzwertes gehalten werden. Allerdings führt ein hoher Emissionswert für NO<sub>x</sub> typischerweise zu einem niedrigen spezifischen Kraftstoffverbrauch und hat dadurch auch einen positiven Effekt aus der Sicht des Motorenherstellers und des Fahrzeughalters.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes wurden die limitierten Emissionen von Dieselkraftstoff, RME sowie deren Mischungen in dieselmotorischer Verbrennung untersucht.

Die Versuche wurden mit einem modernen direkteinspritzenden Motor des Typs Mercedes Benz (OM 904 LA) durchgeführt, der im 13-Stufen-Test (ECE-R 49) betrieben wurde.

Ziel der Untersuchungen war es, Aussagen zum Emissionsverhalten verschiedener Mischungen von RME und DK zu gewinnen. Dazu wurden die Reinkraftstoffe und Mischungen von Dieselkraftstoff mit 25 %, 50 %, und 75 % RME untersucht.

Zur Bestimmung von Kohlenmonoxid- (CO), Gesamtkohlenwasserstoff- (HC) und Stickoxid- (NO<sub>x</sub>) Emissionen wurden je Kraftstoffmischung zwischen vier und acht 13-Stufen-Tests gefahren. Dagegen wurden für die Partikelmassemissionen nur je zwei 13-Stufen-Tests durchgeführt. Jedoch wurden auch die Partikelemissionen der Gemische mit 25 % und 75 % RME-Anteil, die nicht im Projektantrag gefordert wurden, bestimmt.

Die Emissionen lagen bei allen Versuchen unter den gesetzlich festgelegten Grenzwerten von EURO II. Die Stickoxidemissionen haben diesen Grenzwert nur knapp unterschritten. Für die Partikelemissionen und insbesondere für Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen lagen die ermittelten Werte weit unterhalb der Grenzwerte.

RME weist dabei gegenüber DK bei NO<sub>x</sub> eine um ca. 10 % höhere Emission auf. Eine Reduktion ist dagegen bei HC (50 %), CO (40 %) und der PM-Emission (40 %) zu verzeichnen.

Die Emissionen der Mischungen ändern sich weitgehend linear mit dem Anteil von RME im DK. Nur bei der Partikelmasse ist dieser Trend – wohl aufgrund der geringeren Versuchszahl – nicht so deutlich ausgeprägt.

## 6 Literaturverzeichnis

- Abbey D E, Nishino N, McDonnell W F, Burchette R J, Knutsen S F, Beeson L W, Yang J X (1999) Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in nonsmokers. *American Journal of Respiratory Diseases and Critical Care Medicine* 159, 373 – 382
- Amann C, Siegl D (1982) Diesel particulates – what they are and why. *Journal of Aerosol Science and Technology* 1, 73 – 101
- Bundesarbeitsblatt (BArbBl.) (1996) Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 554): Dieselmotoremissionen (DME), Nr. 3, 69 – 77; geändert durch BArbBl. (1997) Nr. 4, 44 – 45 und BArbBl. (1998) Nr. 5, 58 – 63
- Dockery D W, Pope C A III, Xu X, Spengler J D, Ware J H, Fay M E, Ferris B G, Speizer F E (1993) An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England Journal of Medicine* 329 (24), 1753 – 1759
- Dockery D W, Pope C A III (1994) Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Review of Public Health* 15, 107 – 132
- EPA (1998) Health assessment document for diesel emissions: SAB Review draft. EPA/8-90/057C. Office of Research and Development, Washington, DC, USA
- Health Effects Institute (1999) Diesel emissions and lung cancer: Epidemiology and quantitative risk assessment. Health Effects Institute, Cambridge, MA, USA
- Heinrich U, Muhle H, Takenaka S, Ernst H, Fuhst R, Mohr U, Pott F, Stöber W (1986) Chronic effects on the respiratory tract of hamsters, mice and rats after long-term inhalation of high concentrations of filtered and unfiltered diesel engine emissions. *Journal of Applied Toxicology* 6, 383 – 395
- Henschler D (1994) Persönliche Mitteilung. Universität Würzburg
- Houben L, Lepperhoff G (1990) Untersuchungen zur Rußbildung während der dieselmotorischen Verbrennung. *Supplement Motortechn. Zeitschrift* 51, Anhang im Jahresband S. XI – XVI
- Hühn W (1970) Rußbildung bei der dieselmotorischen Verbrennung und Möglichkeiten ihrer Verminderung. *Motortechn. Zeitschrift* 31(3), 109
- IARC (1989) Evaluation of carcinogenic risks to humans: Diesel and gasoline exhausts and some nitroarenes. *IARC Monographs*, Vol. 46
- Ishinishi N, Kuwahara N, Nagase S, Suzuki T, Ishiwata S, Kohno T (1986) Longterm inhalation studies on effect of exhaust from heavy and light duty diesel engines on F344 rats. In: Ishinishi N, Koizumi A, McClellan R O, Stöber W (eds.): *Carcinogenic and mutagenic effects of diesel engine exhaust. Developments in toxicology and environmental science*, Vol. 13, Elsevier, Amsterdam, 329 – 348
- Jing C, Forss A M, Bach C, Graf R, Eggenberger U (1996) Umfassende, wirkungsorientierte Charakterisierung von Partikeln aus Dieselabgasen. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 56, 139 – 145
- Katsouyanni K, Touloumi G, Spix C, Schwartz J, Balducci F, Medina S, Rossi G, Wojtyniak, Sunyer, J, Bacharova L, Schouten J P, Ponka A, Anderson H R (1997) Short-term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. *Air pollution and health: a European approach. British Medical Journal* 314 (7095), 1658 – 1663

- Klingenberg H, Lies K-H, Winneke H (1992) Dieselabgas – Entstehung, Messung und Gesundheitsgefahren. VDI-Fortschrittberichte Reihe 12, Nr. 172, 1 – 21
- Krahl J, Baum K, Hackbarth U, Jeberien H E, Schütt C, Schröder O, Walter N (2000) Systematische Untersuchungen zur Bestimmung von Ozonvorläufersubstanzen im Abgas von Dieselkraftstoff und Rapsölmethylester. Abschlussbericht; Institut für Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Braunschweig, 117 Seiten
- Lake T, Bending R G, Williams G P, Beanmont A J, Waburton A, Andersson J (1999) Entwicklung einer Regel- und Abgasnachbehandlungssysteme für einen GDI-Motor. MTZ Motortechn. Zeitschrift 60(12), 800 – 807
- Lenz H P, Pucher E, Kohoutex P, Rennenberg H, Hahn J, Elstner E F, Hippels S (1993) Emissionen, Immissionen und Wirkungen von Abgaskomponenten. VDI-Fortschrittbericht, Reihe 12, Nr. 183
- Lipkea W, Johnson J (1978) The physical and chemical character of diesel particulate emissions - measurement techniques and fundamental considerations. *SAE-Paper* 780108
- MAK-Liste (1997) Deutsche Forschungsgemeinschaft: Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Mitteilung 33: MAK- und BAT-Werte-Liste. Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- Marquardt H, Schäfer S G (1994) Lehrbuch der Toxikologie, Wissenschaftsverlag Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich
- Mattes P, Rimmels W, Sudmanns H (1999) Untersuchungen zur Abgasrückführung am Hochleistungsdieselmotor. MTZ Motortechn. Zeitschrift 60(4), 234 – 243
- Mauderly J L, Jones R K, Griffith W C, Henderson R F, McClellan R O (1987) Diesel exhaust is a pulmonary carcinogen in rats exposed chronically by inhalation. *Fundamental and Applied Toxicology* 9, 208 – 221
- Mayer, A., Czerwinski, Scheidegger, W., Wyser-Heusi, M., Kieser, D., Weidhofer, J. (1998) VERT – Verminderung der Dieselemission im Tunnelbau. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 58 (1/2), 26 – 32
- Meurer S (1966) Der Wandel in der Vorstellung vom Ablauf der Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor. *Motortechn. Zeitschrift* 27(4), 131 – 139
- NIOSH (1988) Carcinogenic effects of exposure to diesel exhaust. NIOSH Current Intelligence Bulletin 50. DHHS (NIOSH) Publication No. 88-116. Centers for Disease Control, Atlanta, GA, USA
- Peters A, Wichmann H E, Tuch T, Heinrich J, Heyder J (1997) Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. *American Journal of Respiratory Diseases and Critical Care Medicine* 155, 1376 – 1383
- Pope C A III, Thun M J, Namboodiri M M, Dockery D W, Evans J S, Speizer F E, Heath C W (1995) Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. *American Journal of Respiratory Diseases and Critical Care Medicine* 151, 669 – 674
- Samet J M, Zeger S L, Birhane K (1995) The association of mortality and particulate air pollution. In: *Particulate Air Pollution and Daily Mortality: Replication and Validation of Selected Studies. The Phase I. A Report of the Particle Epidemiology Evaluation Project.* Health Effects Institute, Cambridge, MA, USA
- Scheepers P T J, Bos R P (1992) Combustion of diesel fuel from a toxicological perspective. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 64, 163 – 177



- Schröder O, Krahl J, Munack A, Bünger J (1998) Einfluss von Gemischen von Dieselmotorenkraftstoff und Biodiesel auf das Abgasverhalten, Fachtagung Biodiesel Landbauforschung Völknerode, Sonderheft 190, 143-149
- Seaton A, MacNee W, Donaldson K, Godden D (1995) Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet* 345, 176 – 178
- UFOP (2003) Wachstumsmarkt Biodiesel, Broschüre, 8 S. Download unter [http://www.ufop.de/RZ\\_Biodiesel-Markt\\_280703.pdf](http://www.ufop.de/RZ_Biodiesel-Markt_280703.pdf)
- Wachter F, Cartellieri W P (1987) Wege zukünftiger Emissionsgrenzwerte bei LKW-Dieselmotoren. 8. Int. Wiener Motorensymposium 1987, VDI-Bericht Nr. 86, VDI-Verlag Düsseldorf, 206 – 239
- Warnatz J, Maas U, Dibble R W (2001) Verbrennung – Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstofferkennung. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- WHO (1996) Diesel fuel and exhaust emissions: International program on chemical safety. World Health Organisation, Genf, CH
- Working Group on Public Health and Fossil-Fuel Combustion (1997) Short-term improvements in public health from global-climate policies on fossil-fuel combustion: an interim report. *Lancet* 350 (9088), 1341 – 1349

## 7 Anhang

### 7.1 Kraftstoffanalysen

Tabelle 7-2: Biodiesel (RME) nach DIN EN 14214

Eigenschaft		Resultat	Grenzwert gemäß DIN EN 14214
Dichte (15°C)	[g/mL]	0,883	0,860-0,900
kin. Viskosität (40°C)	[mm <sup>2</sup> /s]	4,55	3,5-5,0
C.F.P.P.	[°C]	-10	max. -20
Schwefelgehalt	[mg/kg]	<10	max. 10,0
Aschegehalt	[Gew.-%]	<0,01	max. 0,02
Wassergehalt	[mg/kg]	267	max. 500
Flammpunkt	[°C]	>170	min. 120
Cetanzahl	[-]	>55	min. 51
Koksrückstand	[Gew.-%]	<0,05	max. 0,30
Gesamtverschmutzung	[mg/kg]	2	max. 24
Kupfer-Korrosion	[-]	1	max. 1
Oxidationsstabilität	[h]	7,42	min. 6,0
Neutralisationszahl	[mg KOH/g]	0,173	max. 0,5
Methanol	[Gew.-%]	<0,3	max. 0,2
Monoglyceride	[Gew.-%]	0,39	max. 0,8
Diglyceride	[Gew.-%]	0,06	max. 0,2
Triglyceride	[Gew.-%]	0,04	max. 0,2
freies Glycerin	[Gew.-%]	<0,005	max. 0,02
Gesamtglycerin	[Gew.-%]	0,112	max. 0,25
Iodzahl	[-]	113	max. 120
Phosphorgehalt	[mg/kg]	<1	max. 10
Alkaligehalt	[mg/kg]	<1	max. 5

Tabelle 7-3: Dieselkraftstoff (DK) nach DIN EN 590

<b>Eigenschaft</b>		<b>Resultat</b>	<b>Grenzwert gemäß DIN EN 590</b>
Dichte (15°C)	[kg/m <sup>3</sup> ]	827,1	820-845
kin. Viskosität (40°C)	[mm <sup>2</sup> /s]	2,434	2,00-4,50
C.F.P.P.	[°C]	-15	max. -22
Schwefelgehalt	[mg/kg]	8	max. 50
Aschegehalt	[Gew.-%]	<0,001	max. 0,01
Wassergehalt	[mg/kg]	20	max. 200
Polyaromatengehalt	[Gew.-%]	5,1	max. 11
Flammpunkt	[°C]	69,0	min. 59
Cetanzahl	[-]	54,4	min. 51,0
Koksrückstand	[Gew.-%]	<0,05	max. 0,30
Gesamtverschmutzung	[mg/kg]	<10	max. 24
Kupfer-Korrosion	[-]	1	max. 1
Oxidationsstabilität	[g/m <sup>3</sup> ]	<10,0	max. 25
Neutralisationszahl	[mg KOH/g]	<0,05	max. 0,20
Destillat bei 250°C	[Vol.-%]	45,5	max. 65
Destillat bei 350°C	[Vol.-%]	93,5	min. 85
95% Punkt	[°C]	357	max. 360
Cloudpoint	[°C]	-10	max. -7
Cetanindex	[-]	52,8	min. 46,0
Schmierfähigkeit (60°C)	[µm]	430	max. 460
pH-Wert	[-]	6,7	-
Chloride	[mg/kg]	<5	
Leitfähigkeit (20°C)	[pS/mm]	90	
Geruch	[-]	normal	-

## 7.2 Einzeldarstellung der Emissionswerte

### 7.2.1 Kohlenwasserstoffe (HC)

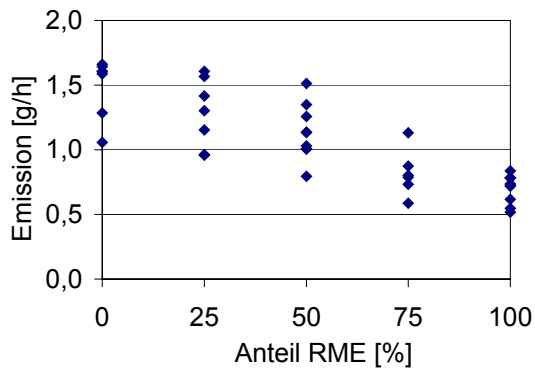


Abbildung 7-1:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 1

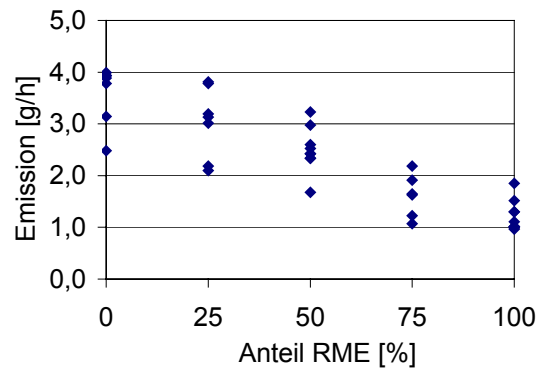


Abbildung 7-2:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 2

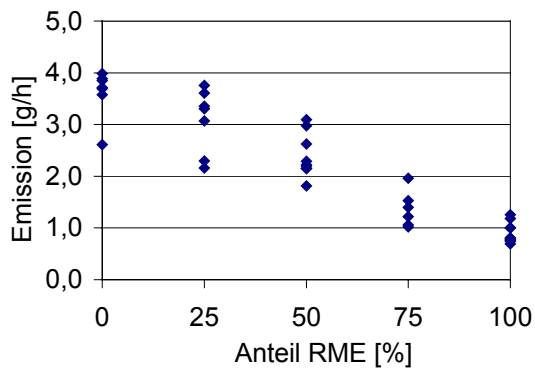


Abbildung 7-3:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 3

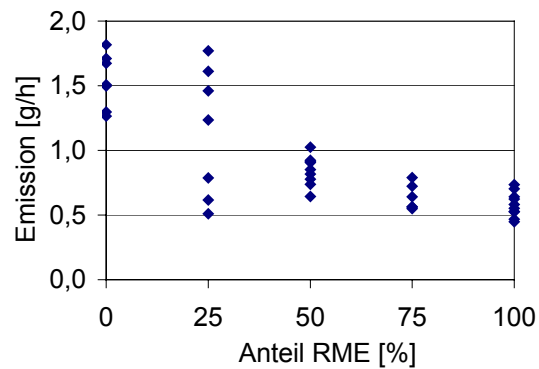


Abbildung 7-4:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 4

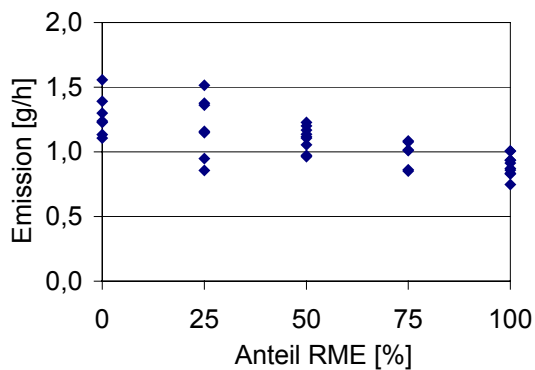


Abbildung 7-5:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 5

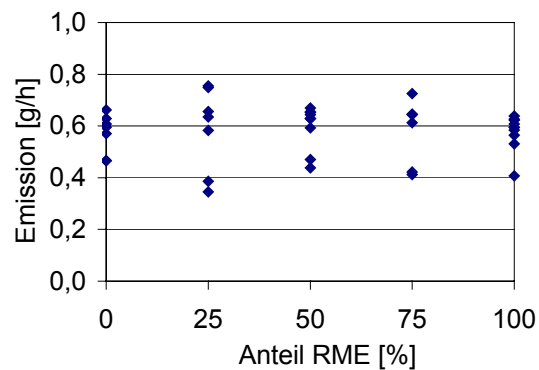


Abbildung 7-6:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 6

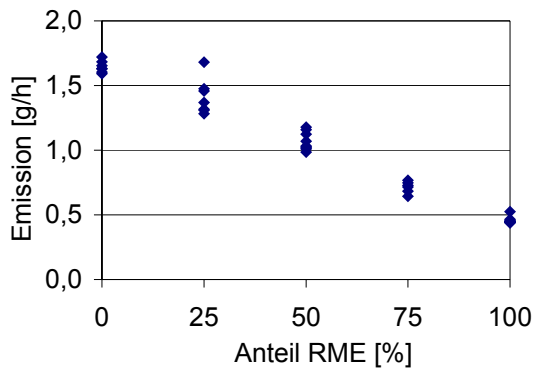


Abbildung 7-7:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 7

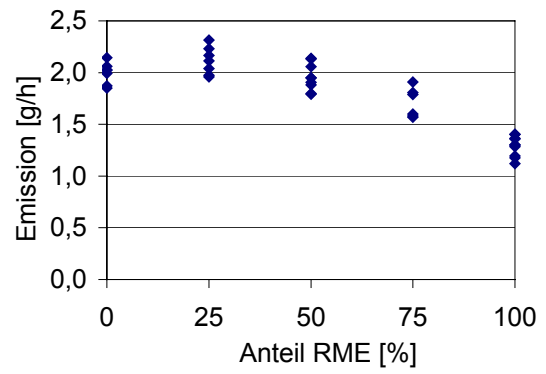


Abbildung 7-8:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 8

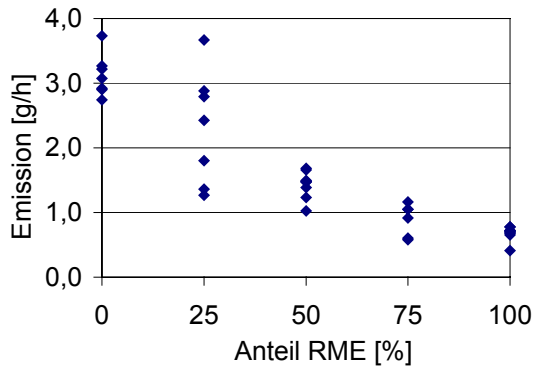


Abbildung 7-9:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 9

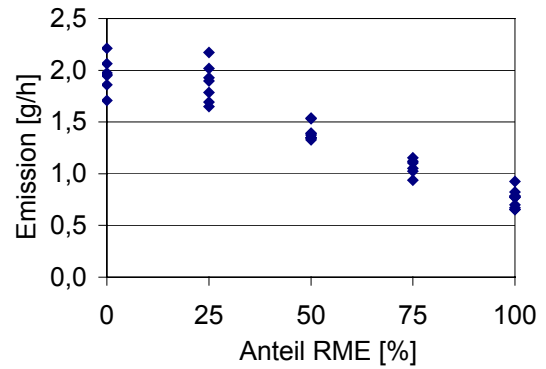


Abbildung 7-10:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 10

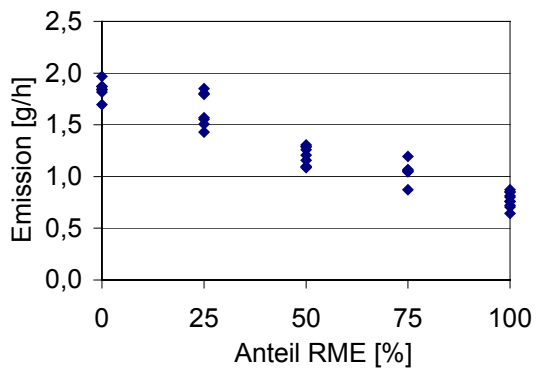


Abbildung 7-11:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 11

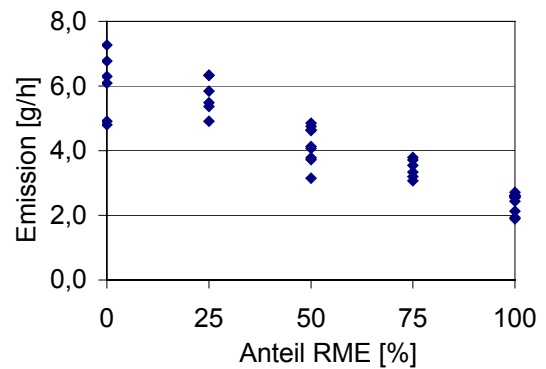


Abbildung 7-12:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 12

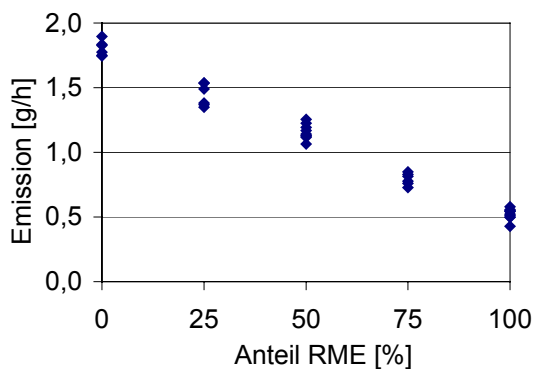


Abbildung 7-13:  
HC-Emissionen im Betriebspunkt 13

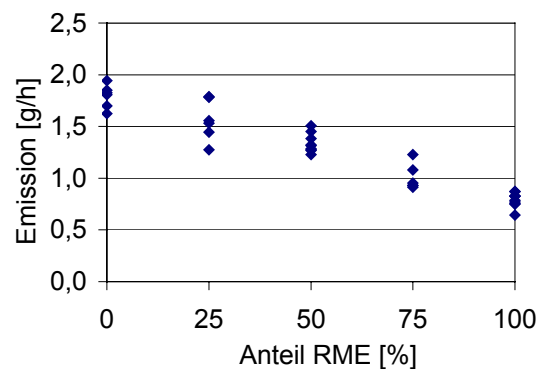


Abbildung 7-14:  
HC-Emissionen im 13-Stufen-Test

## 7.2.2 Kohlenstoffmonoxid (CO)

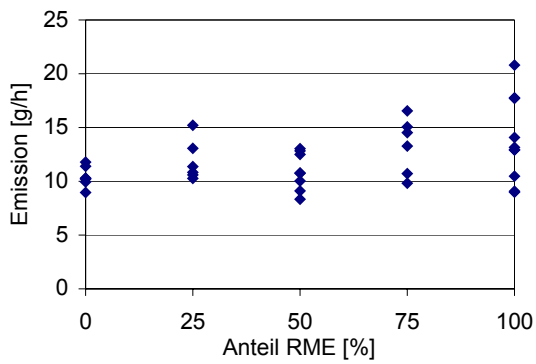


Abbildung 7-15:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 1

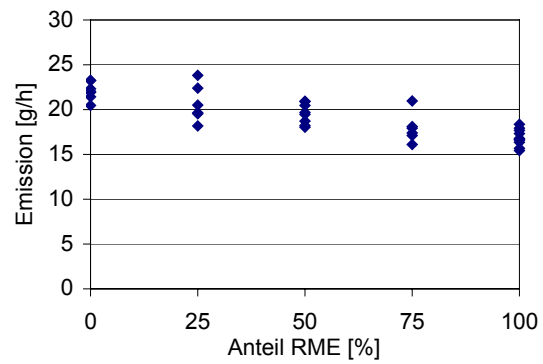


Abbildung 7-16:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 2

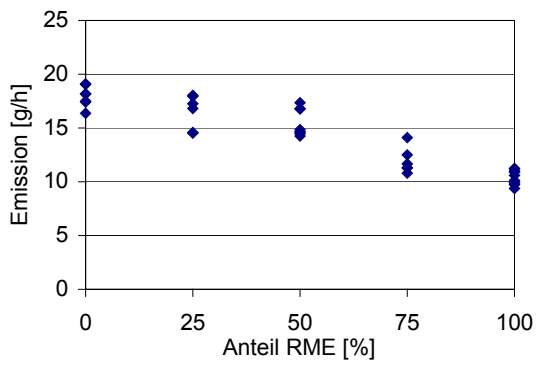


Abbildung 7-17:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 3

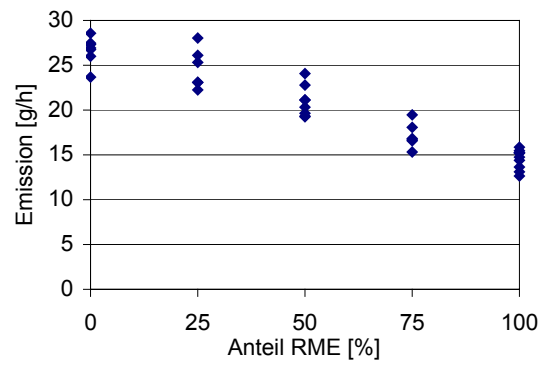


Abbildung 7-18:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 4

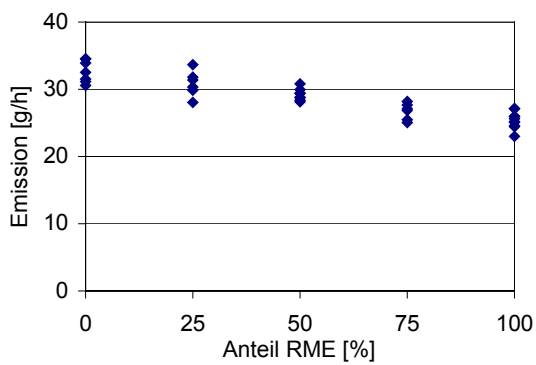


Abbildung 7-19:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 5

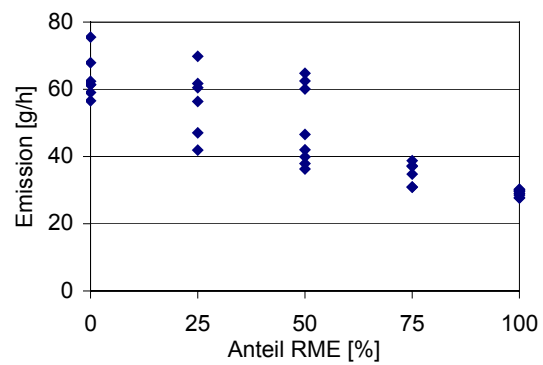


Abbildung 7-20:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 6

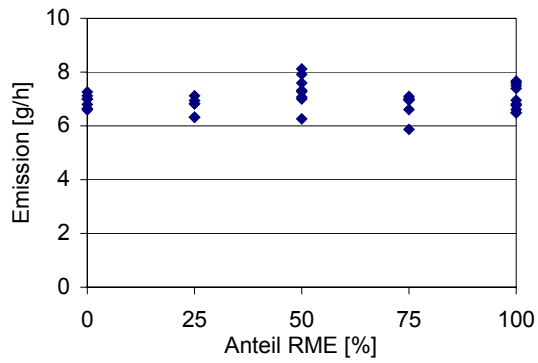


Abbildung 7-21:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 7

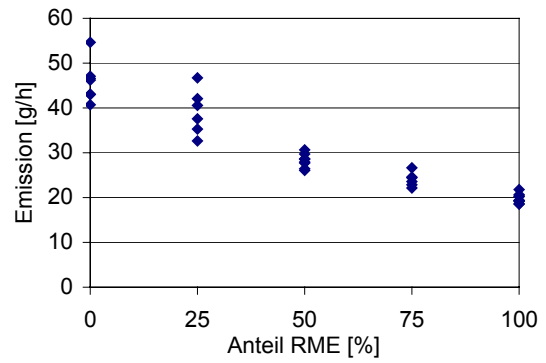


Abbildung 7-22:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 8

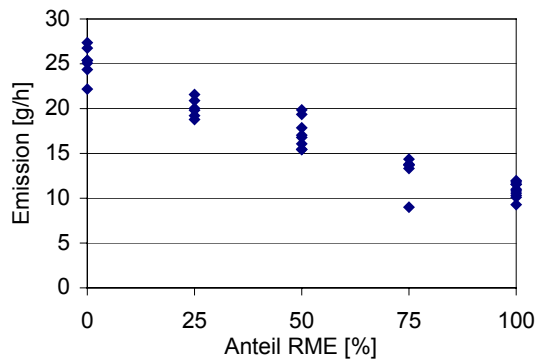


Abbildung 7-23:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 9

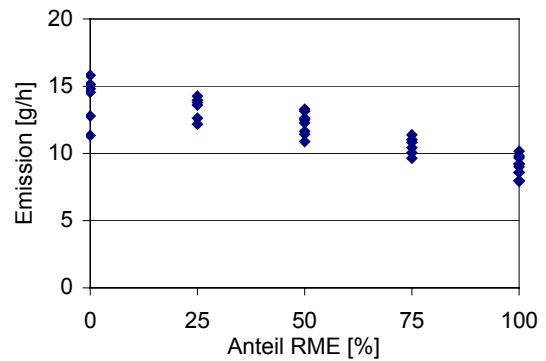


Abbildung 7-24:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 10

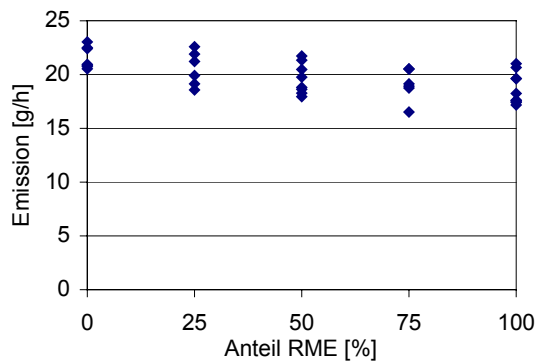


Abbildung 7-25:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 11

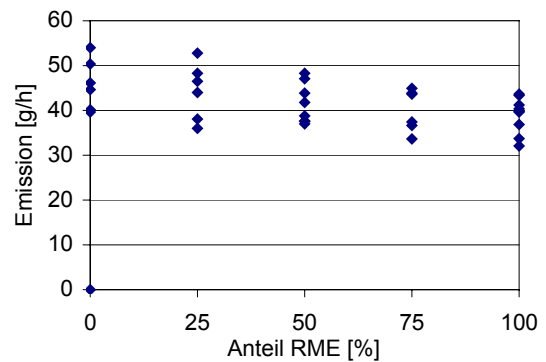


Abbildung 7-26:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 12

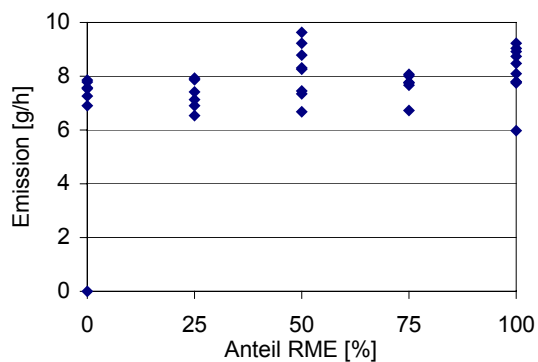


Abbildung 7-27:  
CO-Emissionen im Betriebspunkt 13

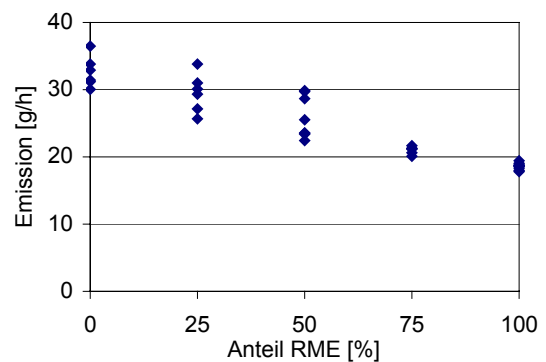


Abbildung 7-28:  
CO-Emissionen im 13-Stufen-Test

### 7.2.3 Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

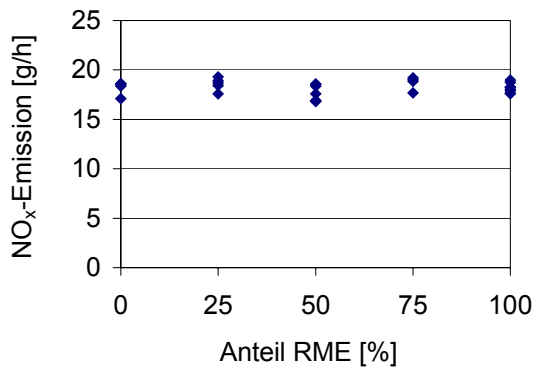


Abbildung 7-29:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 1

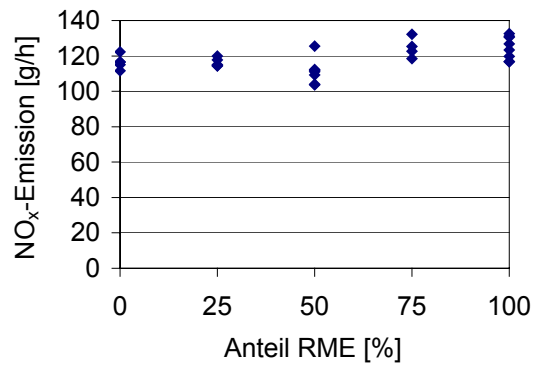


Abbildung 7-30:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 2

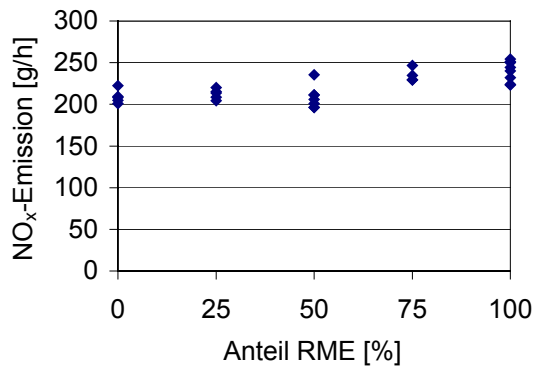


Abbildung 7-31:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 3

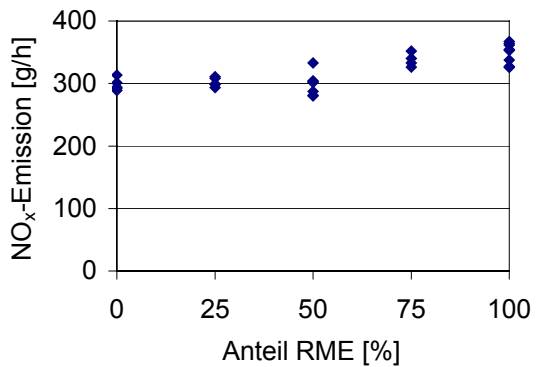


Abbildung 7-32:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 4

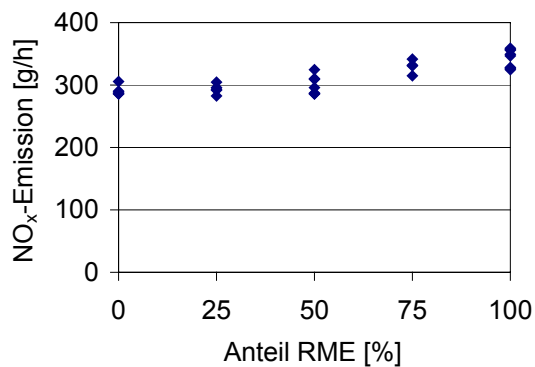


Abbildung 7-33:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 5

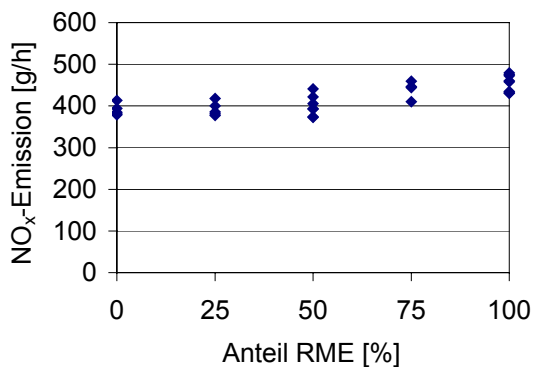


Abbildung 7-34:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 6



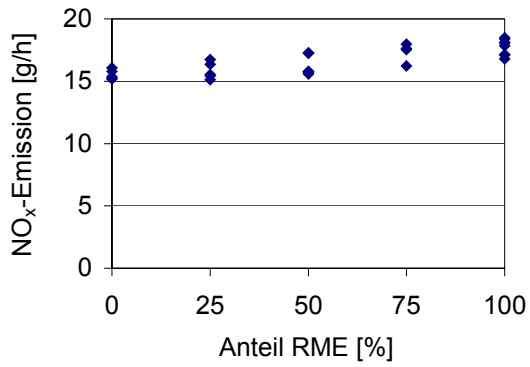


Abbildung 7-35:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 7

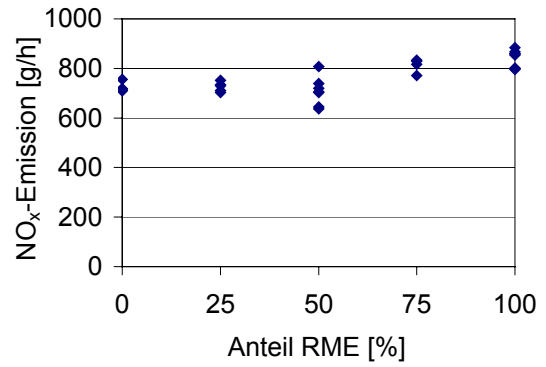


Abbildung 7-36:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 8

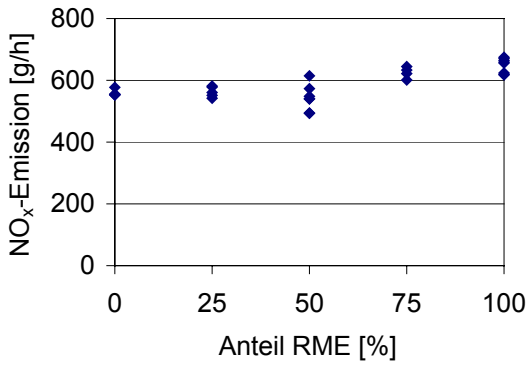


Abbildung 7-37:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 9

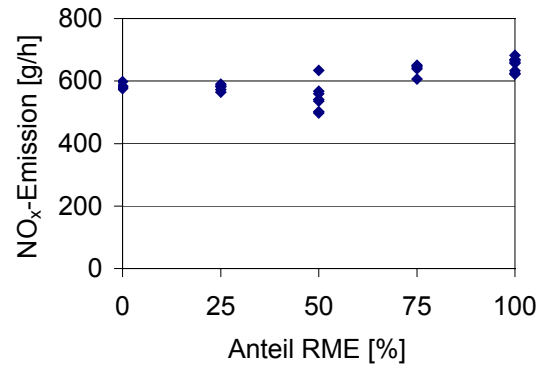


Abbildung 7-38:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 10

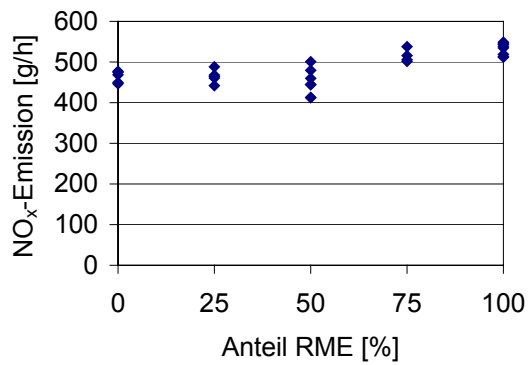


Abbildung 7-39:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 11

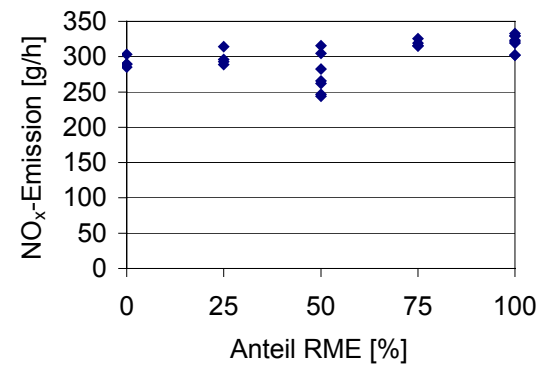


Abbildung 7-40:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 12

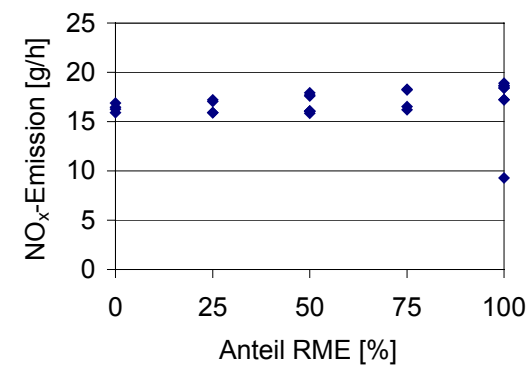


Abbildung 7-41:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betriebspunkt 13

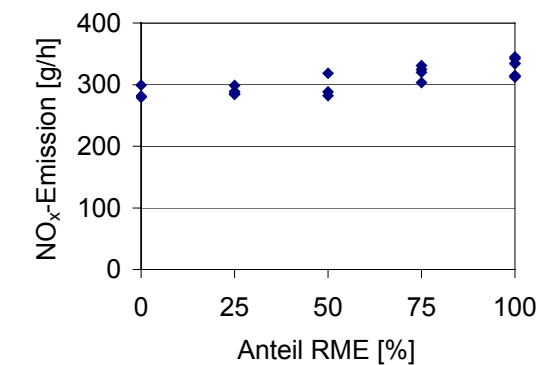


Abbildung 7-42:  
NO<sub>x</sub>-Emissionen im 13-Stufen-Test

### 7.3 Exemplarische Verläufe weiterer Parameter

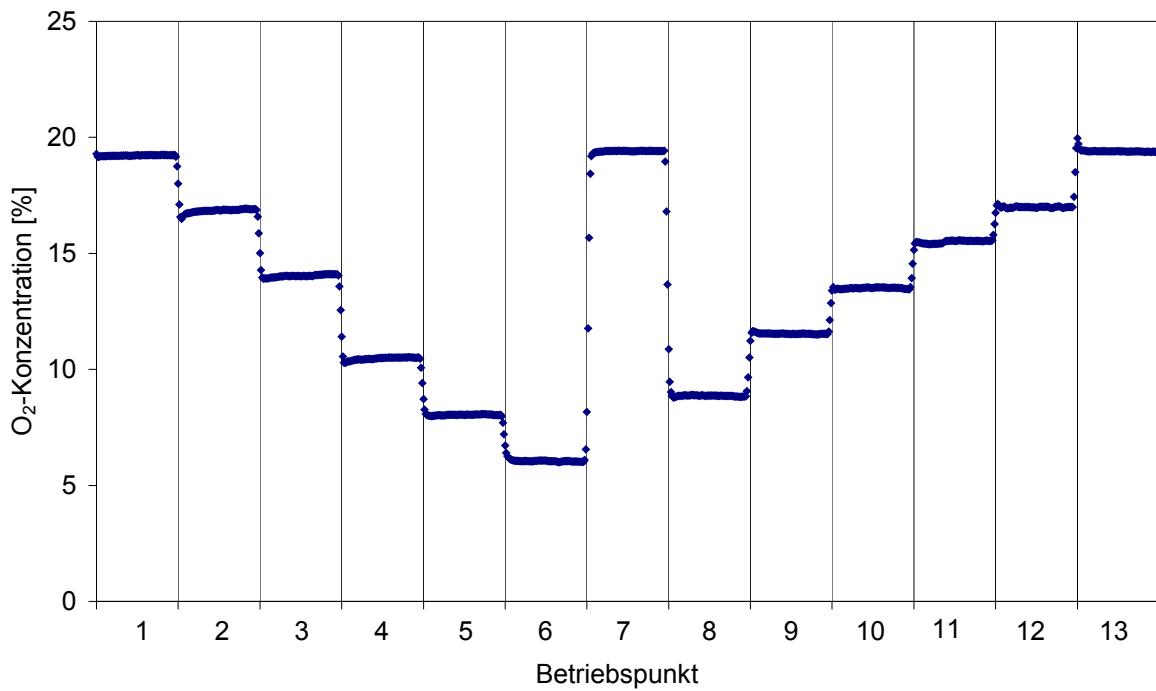


Abbildung 7-43: Exemplarischer Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Abgas im Verlauf des 13-Stufen-Tests

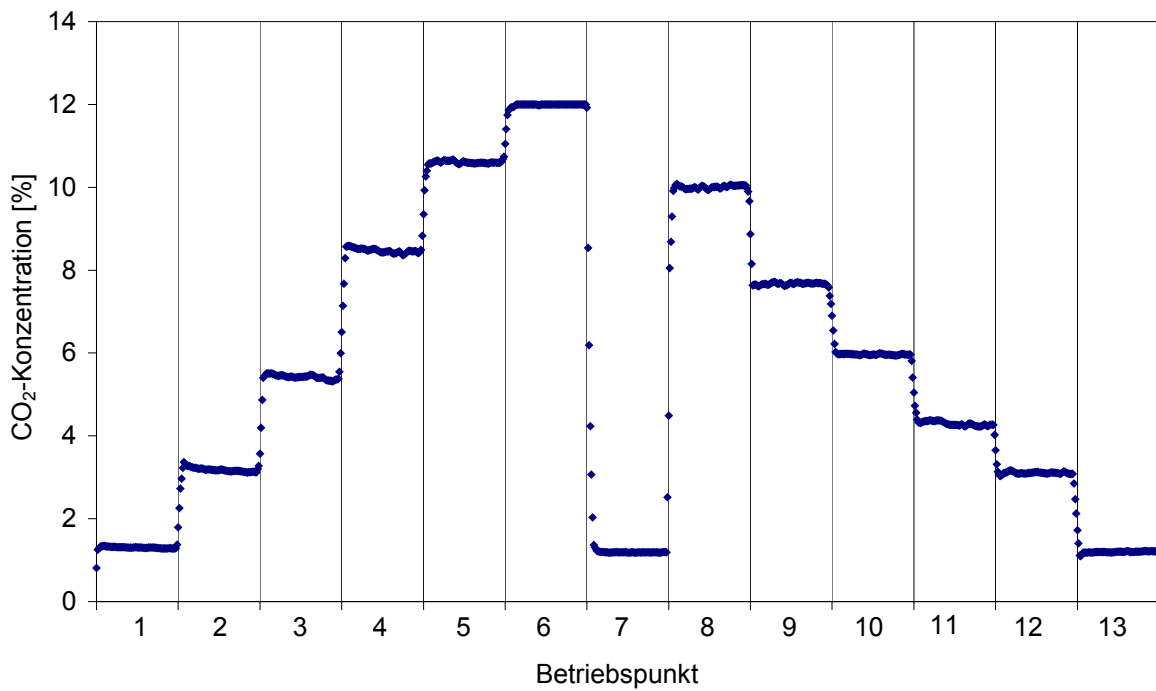


Abbildung 7-44: Exemplarischer Verlauf der Kohlenstoffdioxidkonzentration im Abgas im Verlauf des 13-Stufen-Tests

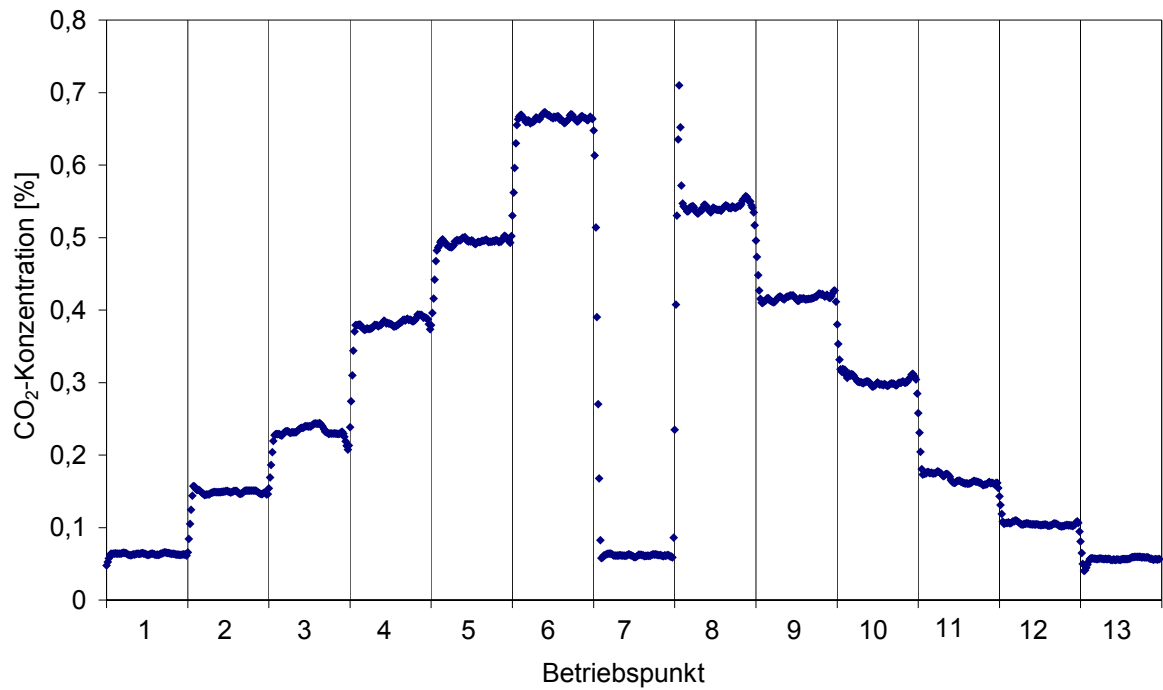


Abbildung 7-45: Exemplarischer Verlauf der Kohlenstoffdioxidkonzentration im Verdünnungstunnel im Verlauf des 13-Stufen-Tests

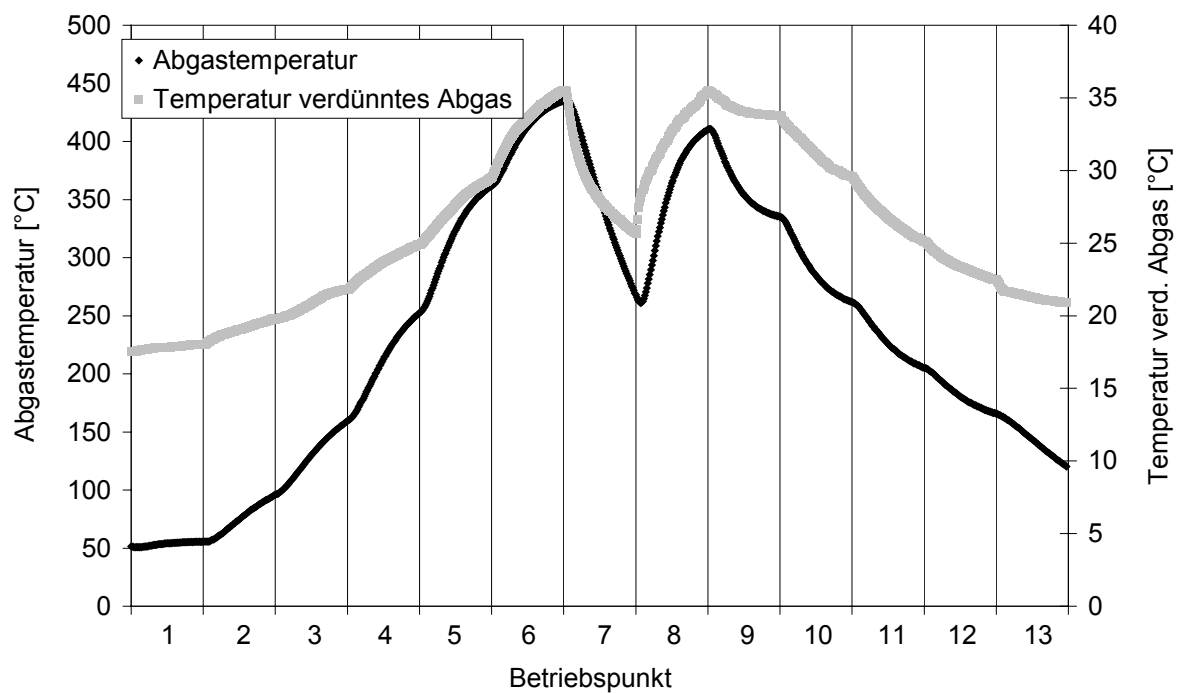


Abbildung 7-46: Exemplarischer Verlauf der Abgastemperatur und der Temperatur des verdünnten Abgases im Verdünnungstunnel im Verlauf des 13-Stufen-Tests

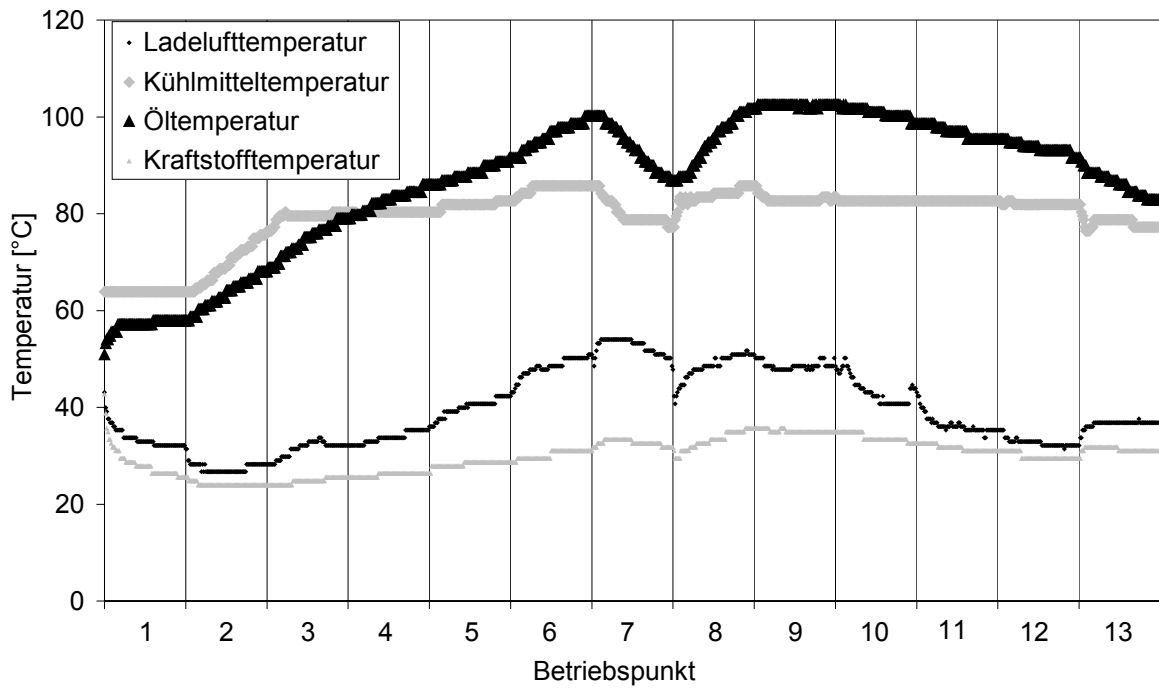


Abbildung 7-47: Exemplarischer Verlauf der Ladefluft-, Kühlmittel-, Öl- und Kraftstofftemperatur im Verlauf des 13-Stufen-Tests

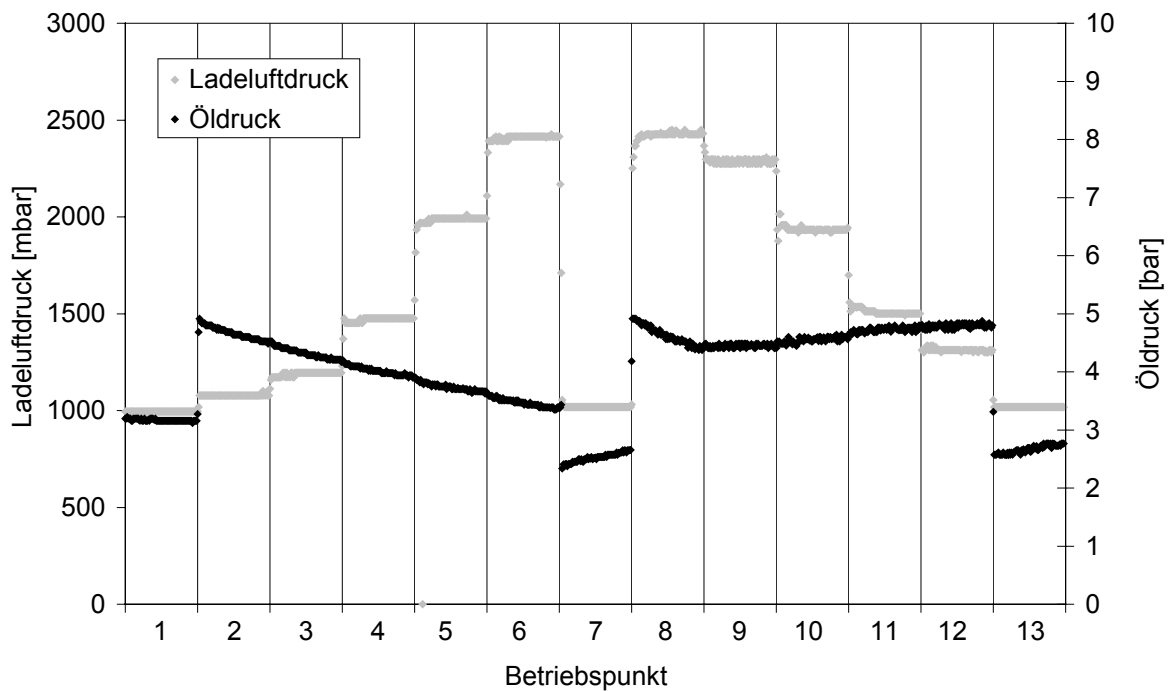


Abbildung 7-48: Exemplarischer Verlauf des Ladefluftdrucks sowie des Öldrucks im Verlauf des 13-Stufen-Tests

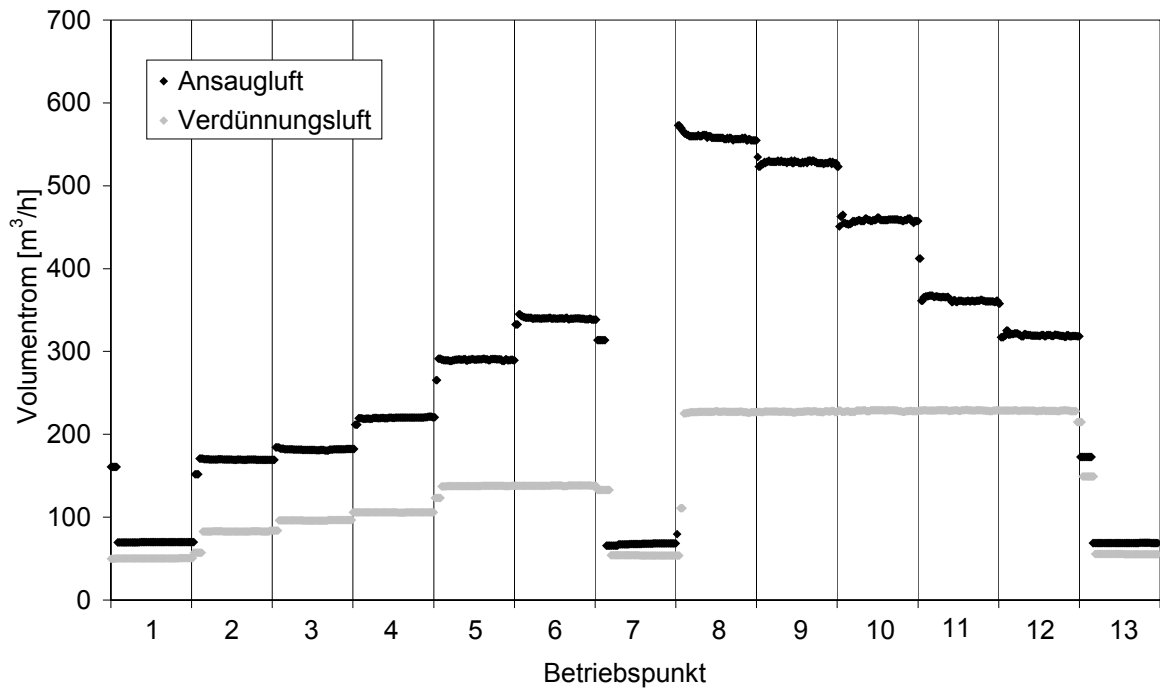


Abbildung 7-49: Exemplarischer Verlauf des Volumenstroms der Ansaugluft und der Verdünnungsluft im Verlauf des 13-Stufen-Tests

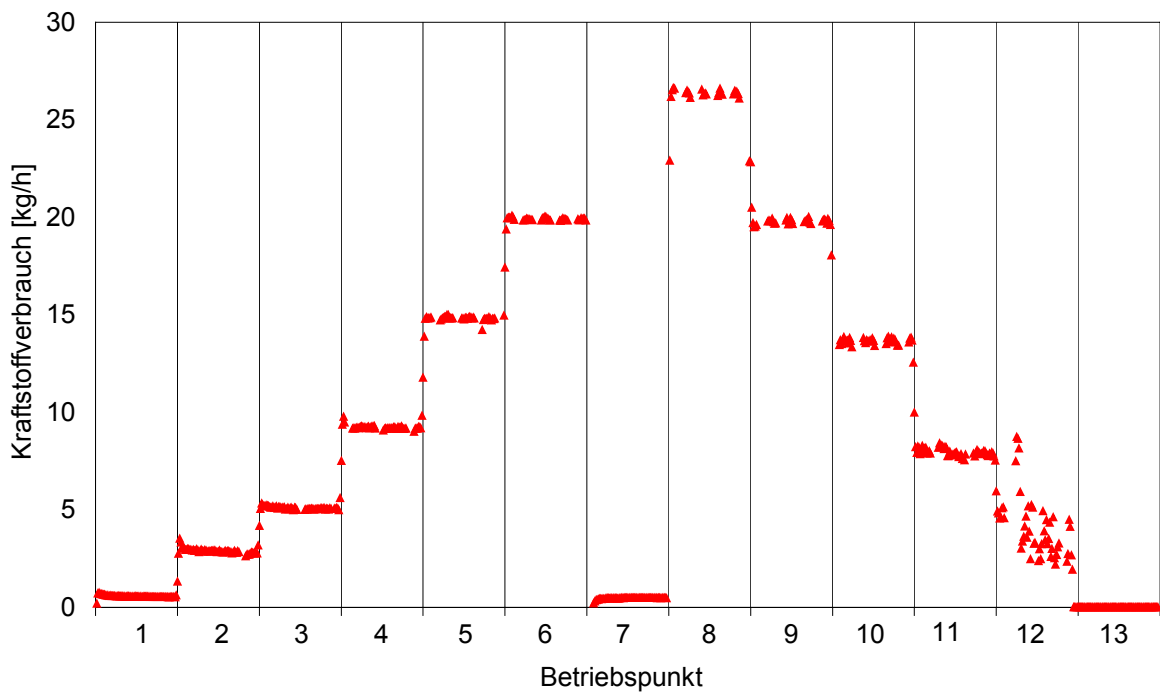


Abbildung 7-50: Exemplarischer Verlauf des Kraftstoffverbrauchs im Verlauf des 13-Stufen-Tests