

# **Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 94**

**bast**

# **Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen**

von

Erik Pellmann  
Steffen Schmidt  
Stefan Eckhardt  
Stefan Wagner

DEKRA Automobil GmbH

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 94**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv [ELBA](http://elba.bast.opus.hbz-nrw.de) zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

### Zusammenfassender Bericht zu den Forschungsprojekten:

**FE 84.0502/2010:** Konventionelle Kraftstoffe mit biogener Beimischung und biomassebasierte Reinkraftstoffe: Fahrzeugtechnische Voraussetzung für erhöhte Beimischung von Biokraftstoffen in 1. Generation

**FE 84.0503/2010:** Machbarkeitsstudie in Bezug auf die Einhaltung der Grenzwerte für limitierte Emissionen von Kraftfahrzeugen, die mit Biokraftstoffen betrieben werden

### Fachbetreuung

Hans Holdik  
Mechthild Lorig

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0 · Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53 · Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9307  
ISBN 978-3-95606-086-1

Bergisch Gladbach, Mai 2014

## Kurzfassung – Abstract

### Biokraftstoffe – fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen

Die hier vorgestellten Forschungsprojekte hatten die Aufgabenstellung,

- sinnvolle Obergrenzen für den biogenen Blend-Anteil im Kraftstoff aus ökonomisch-technischer Sicht aufzuzeigen sowie
- technische Anforderungen an Pkw aus Altbestand und Neufahrzeugen für den Betrieb mit solchen Kraftstoff-Blends zu untersuchen, insbesondere in Hinblick auf Aspekte der Dauerhaltbarkeit.

Auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche wurden zunächst sinnvolle Beimischungen ermittelt, die in 5 Fahrzeugen (3 Otto-Pkw, 2 Diesel-Pkw) auf einem Abgasrollenprüfstand getestet wurden.

Anschließend wurden zwei Fahrzeuge einer Dauerlaufuntersuchung (ca. 80.000 km) unterzogen. Hierbei wurden u. a. Emissionsverhalten, Kraftstoffverbrauch und Motorleistung bewertet und Motorölproben entnommen. Am Ende der Dauerlaufuntersuchungen wurden bei beiden Fahrzeugen Motor und Kraftstoffsystem sorgfältig inspiziert.

Aus fahrzeugtechnischer Sicht begrenzen bei Biodiesel vor allem die Ölverdünnung sowie der Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen den maximal möglichen Beimischungsanteil.

Bei Bio-Alkohol sind insbesondere die Materialverträglichkeit und der Kraftstoffverbrauch limitierende Faktoren für erhöhte Beimischungen.

Obwohl die betrachteten Euro-5-Fahrzeuge nicht für den Betrieb mit erhöhten Beimengungen an Biokraftstoffen ausgelegt waren, wurden die maßgeblichen Grenzwerte für die limitierten Emissionen im Verlauf der Untersuchungen nicht überschritten. Mit Ausnahme von  $\text{NO}_x$  bei den Dieselfahrzeugen wurden darüber hinaus sogar die Euro-6-Grenzwerte unterschritten.

### Biofuels – vehicle technical requirements and emissions

This paper has the following tasks,

- demonstration of useful borders for the biogenic blended proportion in the fuel from an economical/technical point of view, as well as
- investigation of technical requirements on cars from old stock and new vehicles for operation with such fuel blends especially regarding aspects of durability.

Based on extensive literature research useful additions that were used in 5 cars (3 petrol vehicles and 2 diesel vehicles) have been determined and examined on an exhaust roller dynamometer test bench.

Two vehicles participated in an endurance test of 80,000 km. Those vehicles have been valued regarding emission behaviour, fuel consumption and engine power and obtained an engine oil sample. At the end of the endurance test on both vehicles motor and fuel system has been inspected carefully.

From vehicle's technical point of view bio diesel limits the maximum possible incorporation rate especially by oil dilution as well as by the increase of  $\text{NO}_x$  emissions.

Limiting facts for higher bio alcohol components are compatibility of materials and fuel consumption.

Also if the examined Euro 5 vehicles were not designed for the usage with higher additions of bio fuels, the significant limits for limited emissions were not exceeded during the tests. With exception of  $\text{NO}_x$  for diesel vehicles even the Euro 6 limits were underscored.



## Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	6	<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b> .....	50
<b>1 Einleitung</b> .....	7	4.1	Zielstellung der praktischen Versuche .....	50
<b>2 Stand der Technik</b> .....	7	4.2	Erarbeitung von Prüfstands- versuchen .....	51
2.1 Anforderungen, Eigenschaften und Herstellung biogener Kraftstoffe .....	7	4.3	Versuchsfahrzeuge .....	53
2.1.1 Allgemeine Anforderungen an biogene Kraftstoffe .....	7	4.4	Versuchskraftstoffe .....	54
2.1.2 Erste Generation biogener Kraftstoffe .....	7	4.5	Verwendete Prüfstände .....	56
2.1.3 Zweite Generation biogener Kraftstoffe .....	9	<b>5</b>	<b>Auswertung der Versuchs- ergebnisse</b> .....	61
2.1.4 Weitere biogene Kraftstoffe .....	10	5.1	Messergebnisse Modul 1 „Eingangsuntersuchungen“ .....	61
2.1.5 Zusammenfassung .....	11	5.1.1	Diesel-Fahrzeuge .....	61
2.2 Emissionsbetrachtungen zu Otto- und Dieselmotoren .....	11	5.1.2	Versuchsträger Otto .....	65
2.2.1 Entstehung, Ursachen und Auswirkungen von Emissionen .....	11	5.1.3	Korrosionstests mit Kupfer- und Aluminiumstreifen .....	71
2.2.2 Abgasnachbehandlungssysteme für Otto- und Dieselmotoren .....	13	5.1.4	Vergleich der Erkenntnisse aus der Literatur und der Versuche .....	73
2.2.3 Gesetzliche Vorschriften und Abgasmessverfahren .....	15	5.2	Untersuchungsergebnisse Modul 2 „Dauerlauf“ und Modul 3 „Abschlussprüfung“ .....	74
<b>3 Vorbetrachtungen</b> .....	18	5.2.1	Dauerlaufprüfung Dieselfahrzeug mit B20 .....	74
3.1 Marktsituation und Relevanz biogener Kraftstoffe in Deutschland ...	18	5.2.2	Dauerlaufprüfung Ottofahrzeug mit E25 .....	91
3.1.1 Allgemeine gesetzliche Grundlagen ...	18	<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b> .....	104
3.1.2 Aktueller Verbrauch von biogenen Kraftstoffen .....	19	<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	109
3.1.3 Entwicklungsmöglichkeiten und Trend der biogenen Kraftstoffe .....	23			
3.2 Einflüsse biogener Kraftstoffe auf moderne Motoren .....	25			
3.2.1 Emissionsverhalten .....	25			
3.2.2 Dauerhaltbarkeit von Motor, AGN und Kraftstoffsystem .....	36			
3.2.3 Zusammenfassung .....	45			
3.3 Anpassungen moderner Motoren an biogene Kraftstoffe .....	46			

## Abkürzungen

AFEX-Verfahren	amonia fiber expansion	FAME	Fatty Acid Methyl Ester
Al	Aluminium	FFV	FlexFuelVehicle
AGN	Abgasnachbehandlung	FSN	filter smoke number
AGR	Abgasrückführung	FT-Synthese	Fischer-Tropsch-Synthese
ATG	Alternative Technology Group GmbH	GDI	direkteinspritzender Ottomotor
BHKW	Blockheizkraftwerk	GtL	Gas to liquid
Bio	biologisch	HC	Kohlenwasserstoffe
BtL	Biomass to liquid	HVO	hydrated vegetable oil
B0...B100	Gemisch von fossilem Diesel mit 0...100 Vol.-% Biodiesel	KME	Kokosnussölmethylester
C	Kohlenstoff	KW zu OT	Kurbelwinkel zu oberem Totpunkt
cal.	kalorisch	LME	Leinsamenölmethylester
CCS	Combined Combustion System	Mg	Magnesium
CeO <sub>2</sub>	Ceriumdioxid	NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzeugzyklus
CH	Kohlenwasserstoff	NH <sub>3</sub>	Ammoniak
CH <sub>4</sub>	Methangas	NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid	NO	Stickstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
CPC	Kondensationspartikelzähler	NO <sub>x</sub>	Stickoxide
CRT	Continuous Regeneration Trap	NSR	nichtselektive katalytische Reaktion
CtL	Coal to liquid	pH-Wert	negative dekadische Logarithmus
CVS	Consant volume sampling	PM	Partikelmasse
DeNO <sub>x</sub> -Katalysator	Stickoxidreduktions-Katalysator	PME	Palmölmethylester
DeNO <sub>x</sub> -System	System zur Reduzierung der Stickoxide	PN	Partikelzahl
DIN	Deutsche Industrie-Norm	REM	Rasterelektronmikroskop
DK	Diesekraftstoff	RME	Rapsöl-Methylester
DNS-Struktur	Desoxyribonukleinsäure	SCR	selektive katalytische Reaktion
DPF	Dieselpartikelfilter	SHED	Sealed Housing for Evaporative Determination
E0...E100	Gemisch von fossilem Benzin mit 0...100 % Alkohol	Si	Silizium
EG	Europäische Gemeinschaft	SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
ETBE	Ethyl-tert-butylether	SME	Sojaöl-Methylester
EU	Europäische Union	UDC	Urban Driving Cycle
EUDC	Ex-Urban Driving Cycle	VO	Verordnung
		VW	Volkswagen
		V8	8-Zylinder-Motor in V-Anordnung
		WLTC	Worldwide Harmonised Test Cycle
		WLTP	Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure

## 1 Einleitung

Heute sind Erdöl und Erdgas die am häufigsten verwendeten Rohstoffe zur Herstellung von Kraftstoffen. Diese Ausgangsbasis wird auch in den nächsten 20 Jahren noch eine entscheidende Rolle für die Herstellung von Treibstoffen zur Verwendung im Verkehrs- und Transportwesen spielen. Die Verknappung der Erdölvorkommen und die stetig wachsende Nachfrage auf dem Weltmarkt, aber auch Börsenspekulationen und politische Instabilität in wichtigen Erdölförderländern führten in den letzten Jahren zu einem drastischen Ölpreisanstieg. Dieser wird sich, entsprechend den Gesetzen des Marktes, unaufhaltsam fortsetzen. Hohe Ölpreise und Ressourcenverknappung erfordern ein Umdenken hinsichtlich der Energienutzung und der Energieträgerwahl. Aber auch die stärker in den Vordergrund tretenden Klimaschutzziele sind Anlass für die Entwicklung von alternativen Kraftstoffen.

Als möglicher Kraftstoffersatz für Benzin und Diesel kommen biogene Kraftstoffe oder deren Beimischungen zum Einsatz. In Veröffentlichungen werden diese biogenen Kraftstoffe oftmals pauschal als CO<sub>2</sub>-neutral bezeichnet. Die tatsächliche Klimabilanz ist jedoch stark abhängig von der Produktionstechnologie, den eingesetzten Rohstoffen und den landwirtschaftlichen Anbaubedingungen. Die immer höher werdenden Anteile von biogenen Kraftstoffen und deren spezifische physikalische und chemische Eigenschaften können zu technischen Problemen in den Kraftstoff- und Abgassystemen sowie an den Brennraum begrenzenden Teilen führen. In diesem Zusammenhang stellt sich unter anderem auch die Frage, inwieweit sich die anspruchsvollen Euro-5- und Euro-6-Grenzwerte für die limitierten Abgaskomponenten CHC, NMHC, CO, NO<sub>x</sub> und Partikel) dann noch einhalten lassen.

Diese Arbeit gibt einen Einblick zu derzeit eingesetzten alternativen Kraftstoffen in der Bundesrepublik Deutschland. Dargestellt werden auch bereits vorhandene Erkenntnisse bei dem Betrieb von Fahrzeugen mit biogenen Kraftstoffen hinsichtlich der Schadstoffemissionen und der Dauerhaltbarkeit. Auf Basis einer Literaturrecherche, durchgeführter Prüfstandversuche und Dauerläufe sollen eventuelle zukünftig relevante Beimischungen eingegrenzt werden. Im Fokus der Untersuchungen standen Pkw (M1), hilfsweise wurden jedoch im Rahmen der Literaturrecherche auch Erkenntnisse aus dem Nutzfahrzeugbereich hinzugezogen.

Im vorliegenden Bericht werden die beiden Projekte „Konventionelle Kraftstoffe mit biogener Beimischung und biomassebasierte Reinkraftstoffe: Fahrzeugtechnische Voraussetzungen für erhöhte Beimischung von Biokraftstoffen in 1. Generation“ und „Machbarkeitsstudie in Bezug auf die Einhaltung der Grenzwerte für limitierte Emissionen von Kraftfahrzeugen, die mit Biokraftstoffen betrieben werden“ zusammenfassend dargestellt. Die beiden Projekte wurden parallel zueinander bearbeitet, auf diese Weise konnten für beide Projekte Synergieeffekte genutzt werden.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Anforderungen, Eigenschaften und Herstellung biogener Kraftstoffe

#### 2.1.1 Allgemeine Anforderungen an biogene Kraftstoffe

Als biogene Kraftstoffe bezeichnet man flüssige oder gasförmige Kraftstoffe, die direkt aus Pflanzenmaterial oder pflanzlichen Rückständen hergestellt werden. „Biogen“ kommt aus dem Griechischen und bedeutet biologischen bzw. organischen Ursprungs.

Um diese pflanzlichen Kraftstoffe in heutigen Fahrzeugen zu verwenden, müssen deren spezifischen Eigenschaften und Anforderungen mit denen der konventionellen Kraftstoffe vergleichbar sein. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Anforderungen dargestellt.

#### 2.1.2 Erste Generation biogener Kraftstoffe

Als Biokraftstoffe der ersten Generation werden Pflanzenöle, Biodiesel und Bioethanol auf der Basis von zucker- und stärkehaltigen Pflanzen bezeichnet. Die Energiepflanzen werden dabei nur in Teilen für die Kraftstoffgewinnung verwendet. Bei Raps, als wichtigem Vertreter der Energiepflanzen in Deutschland, wird lediglich die Frucht zu Rapsöl oder Rapsmethylester verarbeitet. Damit wird nur ein Drittel der Pflanze für die Kraftstoffherstellung genutzt. Die Erträge an verwertbaren Rohstoffen, pro Hektar Land, für Biokraftstoffe sind trotz hohen Bedarfs an Düngemittel und Anbaufläche eher gering.



Fahrzeugeitige Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Energiedichte</li> <li>• variable Tankgestaltung</li> <li>• geringe Diffusionsverluste aus dem Kraftstofftank</li> <li>• geringe Aggressivität gegenüber dem Kraftstoffsystem</li> </ul>
Verbrennungstechnische Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Zündwilligkeit oder Klopfestigkeit</li> <li>• ausreichende Verdampfung bei geringen Temperaturen</li> <li>• keine Ablagerungsbildung</li> <li>• saubere Verbrennung und einfache Abgasnachbehandlung</li> <li>• Schmierstoffverträglichkeit</li> <li>• hoher Heizwert</li> <li>• geringer Schwefel- und Phosphorgehalt</li> </ul>
Sicherheitsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sichere Lager- und Transportfähigkeit, explosionsicher</li> <li>• geringe Verdunstungsverluste</li> <li>• keine Nutzungseinschränkungen in Bezug auf mineralische Kraftstoffe hinsichtlich Mischbarkeit</li> </ul>
Wirtschaftliche Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vertretbare Herstellungs- und Vertriebskosten</li> <li>• Versorgungssicherheit</li> <li>• Verfügbarkeit entsprechender Rohstoffmassen weltweit und national</li> </ul>
Anforderungen für die Gesundheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Gefährdung bei Hautkontakt oder Einatmen</li> <li>• nicht narkotisierend, ätzend oder allergieauslösend,</li> <li>• ungiftig</li> <li>• leicht abwaschbar</li> </ul>
Umweltanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Emissionen bei Herstellung, Transport und Lagerung</li> <li>• geringe Smog- und Ozonbildung</li> <li>• geringer CO<sub>2</sub>-Ausstoß</li> <li>• emissionsarme Verbrennung</li> </ul>

Tab. 1: Kraftstoffanforderungen nach [1]

### Pflanzenölkraftstoffe

Pflanzenöle werden durch Pressung aus Ölpflanzen gewonnen. Als Kraftstoffe werden hauptsächlich Rapsöl, Sonnenblumenöl, Maiskeimöl, Leinöl und Sojabohnenöl eingesetzt. Diese Öle sind Carbonsäureester, bestehend aus Fettsäuren und dem dreiwertigen Alkohol Glycerin. Bei dem Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff in den heutigen Fahrzeugen und den vorhandenen Logistikstrukturen sprechen folgende Eigenschaften für den Einsatz:

- kein Gefahrgut,
- frei von Schwermetallen und Schwefel,
- biologisch gut abbaubar,
- Reduzierung der Rußpartikel bei der Verbrennung.

Die hohe Viskosität, das hygroskopische Verhalten sowie die hohe Siedekennlinie von Pflanzenölen erfordern bei vielen Fahrzeugen eine aufwändige Umrüstung. Neben dem Kraftstoffeintrag in das Motoröl wird der Nutzer auch mit einem unzureichenden Tankstellennetz konfrontiert [2, 3].

### Biodiesel

Biodiesel ist ein Kraftstoff, der aus pflanzlichen Ölen wie Raps, Sonnenblumen, Sojabohnen und Tierfetten gewonnen wird. Der Unterschied zu den Pflanzenölen besteht in der Weiterverarbeitung der Öle und Fette durch Umesterung. Chemisch wird der Biodiesel als Fettsäuremethylester bzw. fatty acid methyl ester (FAME) bezeichnet. In Deutschland werden ca. 10 % der gesamten Anbauflächen für Raps und ferner Mais als Hauptrohstoffe für die Herstellung von Biodiesel genutzt.

Biodiesel wird als Beimischung zu fossilem Diesel oder direkt als reiner Kraftstoff vermarktet. Die DIN 51628 legt einen maximalen Volumenanteil von 7 % Biodiesel in Dieselmotoröl fest. Durch entsprechende politische Regelungen werden die Hersteller von DK zu einer Beimischungsquote verpflichtet. Für den Einsatz von Biodiesel aus Sicht der Fahrzeugtechnik sprechen folgende Eigenschaften:

- nahezu schwefelfrei,
- biologisch gut abbaubar,
- mit fossilem Diesel mischbar,

- hohe Verfügbarkeit,
- bessere Schmierfähigkeit als Diesel,
- gute Zündwilligkeit,
- geringere Schadstoffemissionen.

Das ungünstige Temperaturverhalten hinsichtlich Viskosität und Siedeverhaltens, die Tendenz zu Ablagerungen, der Kraftstoffeintrag ins Motoröl sowie sein erhöhtes chemisch aggressives Verhalten schränken die Nutzung von reinem Biodiesel auf vom Hersteller freigegebene Fahrzeuge ein [2, 3, 4].

### Bioethanol

Bioethanol, auch umgangssprachlich als Alkohol bezeichnet, wird aus zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen mit Hilfe von Enzymen und Hefepilzen durch Fermentation (lat. fermentum „Gärung“) hergestellt. In Deutschland werden als Rohstoffe hauptsächlich Zuckerrüben und Getreide wie Weizen oder Roggen verwendet.

Bioethanol wird hauptsächlich als Beimischung zu herkömmlichem Ottokraftstoff vermarktet. Entsprechend der Europäischen Norm DIN EN 228 ist eine Beimischung von Bioethanol zu herkömmlichem Benzin mit einem Volumenanteil von bis zu 5 % möglich. Seit 2011 wird E10 (enthält einen Volumenanteil von bis zu 10 % Bioethanol) nach DIN 51626-1, als Konsequenz der Richtlinie 2009/30/EG, an deutschen Tankstellen angeboten. Wie bei Dieselloststoff ist eine Beimischungsquote von Ethanol zum Ottokraftstoff vorgeschrieben. Für den Einsatz von Ethanol sprechen folgende Eigenschaften:

- höhere Oktanzahl,
- mit Ottokraftstoff mischbar,
- biologisch abbaubar,
- nahezu schwefelfrei.

Bei höheren Beimischungen mit einem Volumenanteil größer 5 % sind Herstellerfreigaben für die Fahrzeuge notwendig. Die hygroskopischen Eigenschaften von Ethanol erhöhen den Wasseranteil am Gesamtkraftstoffgemisch. Durch den geringeren Heizwert von Ethanol gegenüber konventionellem Ottokraftstoff steigt der Kraftstoffverbrauch. Weiterhin ist das aggressive Verhalten gegenüber Metallen und Kunststoffen kritisch [2, 3, 4].

Verlief die Beimischung von Biodiesel zu DK relativ unbemerkt ab, so führte die Erhöhung des Beimischungsanteils von Bioethanol am Ottokraftstoff zu starken gesellschaftlichen Diskussionen. Neben der Befürchtung von Fahrzeugschäden wurden die Nachteile der biogenen Kraftstoffe der ersten Generation wieder in den Vordergrund gerückt. Besonders die Nahrungsmittelkonkurrenz und die CO<sub>2</sub>-Bilanz werden in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert.

### 2.1.3 Zweite Generation biogener Kraftstoffe

Bei biogenen Kraftstoffen der zweiten Generation wird im Unterschied zur ersten Generation die gesamte Pflanze zur Kraftstoffgewinnung verwendet. Es werden keine Gewächse, welche zur Herstellung von Nahrungsmitteln dienen, genutzt. Mit der vollständigen Verwertung sind ein bis zu dreimal höherer Ertrag pro Hektar und somit eine höhere Effizienz möglich. Als Material kommen dabei Rohstoffe wie Stroh, Holz oder Grünabfälle zum Einsatz.

Diese Herstellungstechnologie ist momentan noch unzureichend verfügbar und zu kostenintensiv, um einen nennenswerten Beitrag zur Ablösung der aus Rohöl gewonnenen Kraftstoffe zu liefern. Einzig das Biomethan über den Weg der Einspeisung in das Erdgasnetz ist in den vorhandenen Strukturen verfügbar. Die Beimischung von Kraftstoffen der zweiten Generation kann jedoch einen gesellschaftlich akzeptierten Beitrag als Ersatz für die fossilen Ressourcen leisten.

### Biomass-to-Liquid (BtL)

BtL-Kraftstoffe sind unter dem Namen „Sunfuel®“ für Ottomotoren und „Sundiesel®“ für Dieselmotoren bekannt. Dieser Kraftstoff befindet sich zurzeit in der Erprobungsphase.

Durch eine mehrstufige thermochemische Umwandlung der Pflanzenmasse werden bei ca. 1.500 °C die relativ komplexen Kohlenwasserstoffe in einzelne Bestandteile zerlegt. Es entsteht ein Synthesegas bestehend aus einer Mischung von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenstoffmonoxid (CO). Der Kraftstoff wird mit Hilfe eines Katalysators unter Nutzung der Fischer-Tropsch-Synthese (Verfahren zur Herstellung flüssiger Kohlenwasserstoffe) gewonnen und damit gezielt auf optimierte Motorkonzepte abgestimmt. Für den Einsatz dieses Kraftstoffes sprechen folgende Fakten:

- Kraftstoffe können an Fahrzeuge und Brennvorfahren angepasst werden,
- verminderte Emissionen aller limitierten Schadstoffe,
- Nutzung vorhandener Vertriebsinfrastrukturen,
- hohe Erträge durch Nutzung der gesamten Pflanze,
- schwefel- und phosphorfrei.

Der weitere Forschungsaufwand, die hohen Herstellungskosten sowie der hohe Energieeinsatz verhindern zurzeit die Konkurrenzfähigkeit zu anderen biogenen Kraftstoffen [2, 3, 65].

### Bioethanol aus Lignocellulose

Bei der Verholzung von Pflanzenteilen wird in die Zellulosematrix, welche das Strukturgerüst der Pflanze bildet, Lignin eingelagert. Es entsteht die Lignocellulose. Um aus diesen Rohstoff Bioethanol herzustellen, wird Ammoniakgas nach dem Verfahren AFEX (ammonia fiber expansion) bei hohem Druck und hoher Temperatur der Biomasse zugegeben und abrupt abgelassen. Die anschließend zugefügten Enzyme wandeln die Biomasse in Zucker und durch Gärung und Destillation letztendlich in Bioethanol um. Das Produkt entspricht dem Bioethanol der ersten Generation und besitzt identische chemische und physikalische Eigenschaften.

Die Herstellung von Bioethanol aus Lignocellulose besitzt noch keine wirtschaftliche Bedeutung und befindet sich mit dem Projekt „Bioraffinerie 2021“ erst im Aufbau [5].

### HVO (Hydro treated Vegetable Oil)

Diesem Kraftstoff wird derzeit aus Sicht der Automobilhersteller sehr großes Potenzial zugesprochen. Auch hier wird als Ausgangsmaterial Pflanzenöl verschiedensten Ursprungs genutzt, wobei jedoch keine Veresterung wie beispielsweise bei RME stattfindet. Vielmehr scheinen derzeit zwei Verfahren praktikabel.

Einerseits kann die Herstellung direkt in den Mineralö Raffinerien stattfinden, wobei eine Beimischung von 10-30 % bei der Aufarbeitung des mineralischen Rohöls möglich ist. Es folgen die Fertigungsprozesse Hydrotreating und Hydrocracking oder Mitteldestillatentschwefelung.

Eine weitere Herstellungsmethode ist die Herstellung in Pflanzenölanlagen. Hierbei werden die verschiedenen Pflanzenöle oder Tierfette analog zu konventionellen Verfahren durch Feststoff- und Wasserabscheidung vorbehandelt. Im Anschluss folgt das Hydrotreatinverfahren, wobei unter Zugabe von Wasserstoff an Kobalt- und Nickelmolybdänkatalysatoren im Temperaturbereich zwischen 350-450 °C und unter hohem Druck der gewünschte Kraftstoff entsteht.

Das Ergebnis ist in jedem Fall ein Kraftstoff, welcher noch näher an den Spezifikationen von Dieselmotorkraftstoff liegt. Günstig ist vor allem, dass die Siedekennlinie im Bereich des konventionellen Dieselmotorkraftstoffes liegt und somit das Problem der Ölverdünnung sowie der Ölalterung entschärft werden könnte. Des Weiteren liegt die Cetanzahl mit einem Wert von etwa 99 deutlich höher als die von konventionellem Diesel und RME, der Kraftstoff ist sauerstoff- und aromatenfrei. Diese Eigenschaften könnten sich günstig auf die Abgasemissionen auswirken, wobei hier noch sehr wenige Erfahrungen bestehen. Die Kraftstoffdichte beträgt etwa 780 kg/m<sup>3</sup> und liegt damit als Reinkraftstoff nicht innerhalb der Spezifikation DIN EN 590 für Dieselmotorkraftstoff, kann aber laut Literatur als Beimischung auch in größeren Mengen verwendet werden. Ferner ist auch ein Blend bestehend aus konventionellem Diesel, Biodiesel (RME) und hydriertem Pflanzenöl (HVO) denkbar, wobei hier erhöhter Forschungsbedarf besteht [84, 86, 87]. HVO ist bereits seit dem Frühjahr 2011 als Beimischungskomponente im Tankstellennetz von OMV unter der Handelsbezeichnung „MaxxMotion – Premium Diesel“ erhältlich.

### 2.1.4 Weitere biogene Kraftstoffe

#### Biomethan

Dieser gasförmige Kraftstoff kann bei Fahrzeugen mit entsprechender Modifikation bzw. bei bivalenten Erdgasfahrzeugen auch ohne Umrüstung eingesetzt werden. Der Rohstoff Methan wird hauptsächlich durch einen Gärprozess mit Bioabfällen gewonnen. Das entstehende Methan wird durch eine Druckwasserwäsche von Kohlendioxid und Schwefel befreit. Biomethan wird in Biogasanlagen gewonnen und entsprechend den örtlichen Gegebenheiten in das Netz der Gasversorger eingespeist. Je nach Größenordnung der Einspeisung ist das Biomethan dann an den Erdgastankstellen verfügbar [2, 3].

## Biowasserstoff

Grundsätzlich kann Biomasse zur Herstellung von Wasserstoff genutzt werden.

Der Einsatz von Wasserstoff als biogenem Kraftstoff ist jedoch nur sinnvoll, wenn auch die Energie zur Herstellung aus regenerativen Quellen stammt. Derzeit kostet die Herstellung von Wasserstoff ein Vielfaches dessen, was die Herstellung von biogenen Kraftstoffen in Anspruch nimmt. Bei der Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff für Brennstoffzellen entstehen, anders als bei Antriebsmaschinen mit ottomotorischem Wirkprinzip, keine schädlichen Abgaskomponenten [6].

## Kraftstoffherstellung aus Mikroalgen

Mikroalgen als Basis für die 3. Generation von Biokraftstoffen haben den signifikanten Vorteil, dass sie deutlich mehr Biomasse als Landpflanzen pro Hektar Anbaufläche und Jahr produzieren. Grund dafür ist die deutlich höhere Photosyntheseleistung, in deren Folge ein beachtlicher Anteil von Kohlendioxid gebunden werden kann. Ein weiterer Vorteil bietet sich hinsichtlich der ganzjährigen Ernte sowie im Anbaubereich, welches nicht in Konkurrenz zum Nahrungs- bzw. Futtermittelanbau steht. Forscher schätzen, dass in einem Zeitraum von ca. 15 Jahren die nachhaltige Entwicklung für Algen so weit abgeschlossen ist, dass dieser Kraftstoff für die kommerzielle Nutzung zur Verfügung steht [7].

### 2.1.5 Zusammenfassung

In Bild 1 sind die wichtigsten biogenen Kraftstoffe entsprechend ihrer heutigen Klassifizierung dargestellt. Die wichtigsten Kriterien für die Beurteilung sind der Flächenbedarf bei der Erzeugung der Rohstoffe, die mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung und das Energieäquivalent.

Das Kraftstoffäquivalent bezeichnet einen Vergleich der Heizwerte unter Berücksichtigung der Dichte mit dem zu ersetzenden Kraftstoff. Aus Tabelle 2 wird ersichtlich, dass Bioethanol nur ein geringes Kraftstoffäquivalent bei vergleichsweise geringer CO<sub>2</sub>-Minderung aufweist. BtL besitzt im Vergleich zu Bioethanol ein hohes Kraftstoffäquivalent mit einer CO<sub>2</sub>-Minderung von über 90 %.

Unter Berücksichtigung, dass Biomethan ein gasförmiger Kraftstoff ist, können die Kraftstoffäquivalenz von Biomethan mit 1,4 und der Ertrag je Hektar Anbaufläche mit 3.540 kg angegeben werden [2].

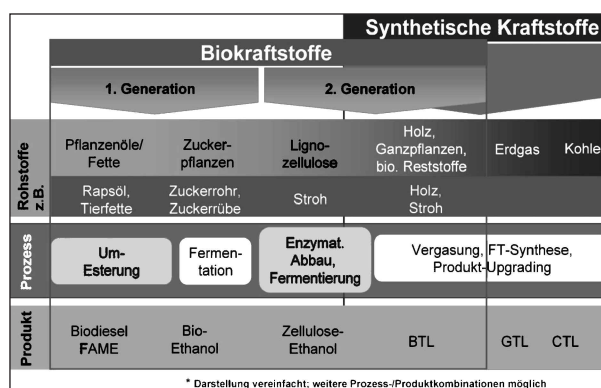


Bild 1: Übersicht biogene Kraftstoffe [53]

Kraft- stoffe	Jahres- ertrag in l/ha	CO <sub>2</sub> - Minde- rung	Kraftstoff- äquivalent [l]	Ver- gleichs- kraftstoff
Pflanzen- öl	1.460	größer 80 %	0,96	Diesel
Bio- diesel	1.550	größer 70 %	0,91	Diesel
Bio- ethanol	2.560	30-70 %	0,65	Ottokraft- stoff
BtL, Sundiesel	4.030	größer 90 %	0,97	Diesel

Tab. 2: Biokraftstoffe im Vergleich zum Jahresertrag nach [2]

Die biogenen Kraftstoffe in reiner Form und in Form von Beimischungen (Blends) zu fossilen Kraftstoffen treffen in der Realität auf einen Kraftfahrzeugbestand mit unterschiedlichen Motorenkonzepten und Motorentwicklungsständen. Für diese Fahrzeuge gelten hinsichtlich der Abgasemissionen gesetzlich vorgegebene Grenzwerte. Auch die Dauerhaltbarkeit der Fahrzeuge sollte durch die neuen Kraftstoffe nicht negativ beeinflusst werden.

## 2.2 Emissionsbetrachtungen zu Otto- und Dieselmotoren

### 2.2.1 Entstehung, Ursachen und Auswirkungen von Emissionen

Verbrennt ein Kraftstoff zusammengesetzt aus Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) gemeinsam mit Luft (78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff und 1 % andere Gase) unter idealen Bedingungen entstehen: Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Stickstoff (N<sub>2</sub>), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O).

Bei der realen Verbrennung, welche unvollständig abläuft, entstehen zusätzlich: unverbrannte Kohlen-

wasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Partikel (PM).

Diese zusätzlich entstehenden chemischen Verbindungen werden als limitierte Schadstoffe bezeichnet. Ihr Gesamtanteil an den Abgasen ohne Katalysator (Rohemissionen) beträgt ca. 1,1 % beim Ottomotor und 0,2 % beim Dieselmotor [74, 75, 76.] Ferner entstehen noch weitere Komponenten wie z. B.: N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> oder NO<sub>2</sub>, welche jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht reglementiert sind.

### Unverbrannte Kohlenwasserstoffe – HC

Unverbrannte Kohlenwasserstoffe entstehen durch nicht vollständige Verbrennung des Kraftstoffes. Diese findet infolge starker Abkühlung der entzündeten Flamme an der Zylinderwand oder im Quetschspalt zwischen Kolbenboden und Zylinderkopf statt. Eine weitere Ursache für die Entstehung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen sind Sauerstoffmangel und bei sehr mageren Gemischen ein zu langsamer Verbrennungsablauf. Der durchschnittliche Volumenanteil von HC an der Gesamtrohemission bei Dieselmotoren beträgt 0,008 % und bei Ottomotoren 0,09 %.

Unverbrannte HC-Verbindungen sind als Aldehyde, Aromaten, Olefine, Paraffine und als polyzyklische Verbindungen in den Abgasen nachweisbar. Zu Gesundheitsschädigung führen hauptsächlich die Aromaten Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), Toluol (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>) und Xylole (C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>), hier als Summenformel dargestellt. Benzol, als der gefährlichste Vertreter, führt beim Menschen zur Bildung hoch reaktiver Epoxide, welche für die Schädigung des Blutes (Krebs) und die Veränderung des Erbgutes verantwortlich sind [74, 75, 76].

Seit der Einführung der Euro-5-Grenzwerte für die Pkw-Ottomotoren sind auch speziell die Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) reglementiert. Die Ursache dafür ist, dass CH<sub>4</sub> aus der Betrachtung ausgeschlossen wird, da es als Spurengas in relativ hohen Konzentrationen in der Atmosphäre permanent vorkommt.

### Kohlenmonoxid – CO

Kohlenmonoxid entsteht bei der unvollständigen Verbrennung von Kraftstoffen. In Motoren ist dies auf Luftmangel (fehlendem Sauerstoff) und niedrige Verbrennungstemperaturen zurückzuführen. Der durchschnittliche Volumenanteil von CO an der Gesamtrohemission bei Dieselmotoren beträgt

0,008 % und bei Ottomotoren 0,9 %. Kohlenmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas und für den Menschen toxisch. Bei der Aufnahme über die Lunge bindet es sich durch die höhere Affinität an das zentrale Eisenatom des Hämoglobins und verhindert den Sauerstofftransport im Blut. Dieses kann zum Tod durch Erstickung führen [74, 75, 76].

### Stickoxide – NO<sub>x</sub>

Stickoxide entstehen bei Verbrennungstemperaturen über 2.100 K und bei Luftüberschuss während der Verbrennung. Der durchschnittliche Volumenanteil von NO<sub>x</sub> an der Gesamtrohemission bei Dieselmotoren beträgt 0,17 % und bei homogenen Ottomotoren 0,13 %. Unter dem Namen Stickoxide sind mehrere Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen zusammengefasst. Bei der Verbrennung wird fast ausschließlich Stickstoffmonoxid (NO) erzeugt. Bei Ottofahrzeugen werden die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Dreiwegekatalysator weitgehend reduziert. Bei Dieselfahrzeugen wird ein Teil des innermotorisch erzeugten NO im Oxidationskatalysator mit Sauerstoff zu NO<sub>2</sub> (Stickstoffdioxid) oxidiert. Die Summe der Stickoxide (NO + NO<sub>2</sub>) ändert sich hierbei nicht, daher ist eine zusätzliche Abgasnachbehandlung erforderlich.

NO ist ein Blutgift und bewirkt Lähmungserscheinungen. NO<sub>2</sub> hat eine stark reizende Wirkung und kann zur Verätzung der Schleimhäute führen. Zusätzlich trägt es in Bodennähe zur Entstehung von Ozon bei [74, 75, 76]. NO<sub>2</sub>-Emissionen sind bislang nicht limitiert.

### Partikel – PM

Partikel entstehen bei der inhomogenen Prozessführung von Motoren, verursacht durch Sauerstoffmangel oder durch frühes Abkühlen der Verbrennungsgase. Diese treten bei Dieselmotoren und direkt einspritzenden Ottomotoren als Ursache der unvollständigen Verbrennung in Bereichen mit  $\lambda_V < 0,8$  auf. Partikel bestehen aus unverbranntem Kohlenstoff (Ruß), aber auch aus unverbrannten Resten von Kraftstoff, Motoröl, Wasser, Abrieb, Sulfaten und Asche. Die Partikelrohemission von Dieselmotoren liegt bis zu drei Größenordnungen über der Partikelemission von direkt einspritzenden Ottomotoren.

Partikel werden entsprechend ihrer Größe klassifiziert. Die größte Gesundheitsgefahr für den Menschen stellen die „lungengängigen“ Partikel mit

einer Größe von 0,1  $\mu\text{m}$  und kleiner dar. Diese werden von den natürlichen Filtermechanismen der Lunge nicht mehr zurückgehalten und dringen in die Kapillare des Lungengewebes vor. Sie sind der Auslöser von Herz-, Kreislauf- und Atemwegserkrankungen und können Krebs verursachen [74, 75, 76].

### Nichttoxische Emissionen – $\text{CO}_2/\text{N}_2$

Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) ist ein farb- und geruchloses nicht brennbares Gas, welches bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Substanzen wie Kraftstoff freigesetzt wird. Es zählt zu den Atemgiften, wird aber in Hinblick auf die Abgasemission nicht als giftiger Bestandteil eingestuft.  $\text{CO}_2$  trägt massiv zum globalen Treibhauseffekt bei. Erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen können Kopfschmerzen, Herzklopfen, Bewusstlosigkeit, Atemnot und den sofortigen Tod zur Folge haben.

Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) ist ein lebensnotwendiger Bestandteil der Atmosphäre. Durch erhöhte Konzentrationen können Übelkeit, Kopfschmerzen und Atemnot auftreten [74, 75, 76].

### Schwefeloxide – $\text{SO}_x$

Schwefeloxide entstehen durch die Verbrennung von Kraftstoffen mit Schwefelanteil. Bei der Verbrennung von Schwefel treten hauptsächlich Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Schwefeltrioxid ( $\text{SO}_3$ ) auf. Durch weitere Oxidationsprozesse, beispielsweise im Oxidationskatalysator, kann es zur Bildung von Sulfaten und ferner von Schwefelsäure kommen. Schwefel gilt damit als Katalysatorgift. Ein schwefelarmer ( $\text{S} < 50 \text{ ppm}$ ) oder ein schwefelfreier ( $\text{S} < 10 \text{ ppm}$ ) Kraftstoff ist daher die Voraussetzung für moderne Abgasnachbehandlungssysteme. Gelangt Schwefeldioxid in die Umwelt, bewirkt es eine Herabsetzung des pH-Wertes und damit Versauerung von Böden und Gewässern. Auf den Menschen wirkt Schwefeldioxid besonders auf die Atemwege und Augen stark reizend [74, 75, 76].

### Ammoniak – $\text{NH}_3$ /Lachgas – $\text{N}_2\text{O}$ / Methangas – $\text{CH}_4$

Unter bestimmten Bedingungen können durch den Betrieb mit SCR-Katalysatoren merkliche Emissionen an Ammoniak- und Lachgasemission auftreten. Epidemiologisch bedenklich wirken beide Gase bei der Einatmung größerer Mengen. Lachgas hat

nach [10] die dreihundertfache Treibhauswirkung wie  $\text{CO}_2$ . Auf den Menschen wirkt es schwach narкотisch und muskellähmend.

Methangas ist ein farb- und geruchloses brennbares Gas, welches die 21fache klimaschädigende Wirkung wie  $\text{CO}_2$  hervorruft [74, 75, 76]. Methangas wird im höheren Maße bei Fahrzeugen mit gasförmigen Kraftstoffen wie Biomethan emittiert.

### 2.2.2 Abgasnachbehandlungssysteme für Otto- und Dieselmotoren

Die Abgasnachbehandlung wurde in den letzten Jahren stetig verbessert, um die steigenden gesetzlichen Anforderungen an die Minderung der schädlichen Bestandteile zu erfüllen und somit die Umwelt zu entlasten. In den nächsten Schemata wird der aktuelle Stand der Abgasnachbehandlung bei Otto- und Dieselmotoren mit chemischen Reaktionen dargestellt.

#### Ottomotor – Dreivegekatalysator für Konzepte $\lambda = 1$

Der Dreivegekatalysator, welcher in der Literatur auch oft als Einbett-Dreivege-Katalysator bezeichnet wird, hat die Eigenschaft, die Abgaskomponenten  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{HC}$  gleichzeitig zu konvertieren. Die Voraussetzung ist, dass das dem Motor zugeführte Gemisch und damit das Abgas im stöchiometrischen Verhältnis vorliegen. Somit stellt dieser in Zusammenhang mit der Lambdaregelung eine zurzeit sehr effektive Möglichkeit zur simultanen Reduzierung aller gesetzlich limitierten gasförmigen Schadstoffkomponenten dar. Bild 2 zeigt eine sehr typische Euro-5-/6-Abgasnachbehandlungssapplikation eines aufgeladenen direkteinspritzenden homogen betriebenen Ottomotors mit Abgasrückführung zur zusätzlichen innermotorischen Reduzierung der Stickoxide.

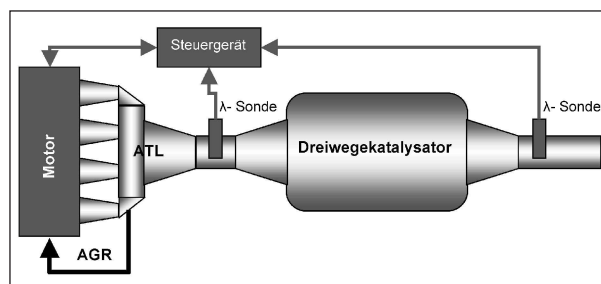
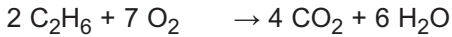


Bild 2: Dreivegekatalysator mit AGR

Chemische Reaktionen im Dreiwegekatalysator:



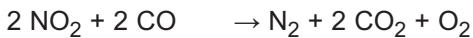
Formel 1: CO-Umwandlung im Dreiwegekatalysator



Formel 2: CH-Umwandlung im Dreiwegekatalysator



Formel 3: NO-Umwandlung im Dreiwegekatalysator



Formel 4: NO<sub>2</sub>-Umwandlung im Dreiwegekatalysator

### Ottomotor – NO<sub>x</sub>-Speicher-katalysator (NSR) für Konzepte $\lambda > 1$

Die NSR-Systeme (NO<sub>x</sub> storage and reduction catalyst) kommen vorrangig im direkteinspritzenden Ottomotor mit teilweiser heterogener Gemischbildung zum Einsatz. Da bei diesem Brennverfahren nicht in allen Betriebspunkten eine homogene Verbrennung realisiert wird, ergeben sich durch die heterogene Betriebsweise lokale Zonen im Zylinder mit O<sub>2</sub>-Überschuss und Temperaturen > 2.100 K. Das Ergebnis ist eine höhere Emission an Stickoxiden als im homogenen Betrieb mit einem stöchiometrischen Luft- zu Kraftstoffverhältnis. Im direkteinspritzenden Ottomotor zählt der NO<sub>x</sub>-Speicher-katalysator seit einigen Jahren zum Stand der Technik. Es ist hier jedoch anzumerken, dass ein derartiges Abgasnachbehandlungssystem aufgrund der hohen Kosten und einer aufwändigeren Applikation für Euro 5/6 bei weitem nicht die Regel ist [90]. Vielmehr verfolgt man das Ziel, die Einhaltung der NO<sub>x</sub>-Grenzwerte durch eine optimierte Abgasrückführung sowie weitere innermotorische Maßnahmen zu gewährleisten. Fahrzeuge mit NSR-System wurden in diesem Forschungsprojekt nicht untersucht.

Die Funktionsweise eines derartigen Systems ist wie folgt:

Im ersten Schritt, im Magerbetrieb ( $\lambda > 1$ ), werden die NO<sub>x</sub>-Anteile des Abgases chemisch zwischengespeichert. Die im Abgas überwiegend befindlichen NO-Anteile werden an Edelmetallkatalysatoren, wie Platin, zu NO<sub>2</sub> aufoxidiert. NO<sub>2</sub> kann ausschließlich als Nitratverbindung in einem Speicherelement angelagert werden.

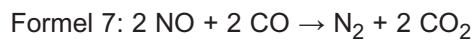
Bei der Einspeicherung mit einem Speicherelement aus Bariumoxid kommt es zu folgender Reaktion:



Mit zunehmender Menge an gespeicherten Stickoxiden nimmt die Fähigkeit, weitere Stickoxide zu binden, ab. Die Einspeicherphase wird beendet, wenn beispielsweise die Stickoxidkonzentration, nach dem Speicherkatalysator, zu hoch wird. Im zweiten Schritt, im fetten Betrieb ( $\lambda < 1$ ), kommt es zur Ausspeicherung mit der folgenden Reaktion:



Durch den platinbeschichteten Katalysator werden anschließend Stickoxide zu N<sub>2</sub> reduziert. Mögliche Reduktionsmittel sind dabei CO, HC und H<sub>2</sub>, wobei die folgenden Reaktionen ablaufen:



Durch NSR-Systeme, so genannte DENOX-Katalysatoren, können in einem eingeschränkten Temperaturbereich von etwa 300-400 °C Konvertierungsraten oberhalb von 90 % erreicht werden [90].

### Dieselmotor – kombiniertes Abgasnachbehandlungssystem

Bild 3 zeigt beispielhaft ein kombiniertes Abgasnachbehandlungssystem für eine Euro-VI-Applikation bestehend aus einem Oxidationskatalysator, einem Partikelfilter, einem SCR-System (selective catalytic reduction) sowie einer Abgasrückführung, welche meist gekühlt als Nieder- und Hochdruck-AGR ausgeführt ist.

SCR-Systeme sind sehr kostenintensiv, weitere Nachteile ergeben sich beispielsweise durch das erforderliche Mitführen einer wässrigen Harnstofflösung oder durch Ammoniak- bzw. Lachgasemissionen. Sie stellen allerdings derzeit die effektivste Methode zur Reduzierung von Stickoxiden dar. Daher stellt sich insbesondere bei größeren Fahrzeugen die Frage, ob die anspruchsvollen Euro-6-Grenzwerte auch ohne SCR-System eingehalten werden können.

Chemische Reaktionen im Oxidationskatalysator:



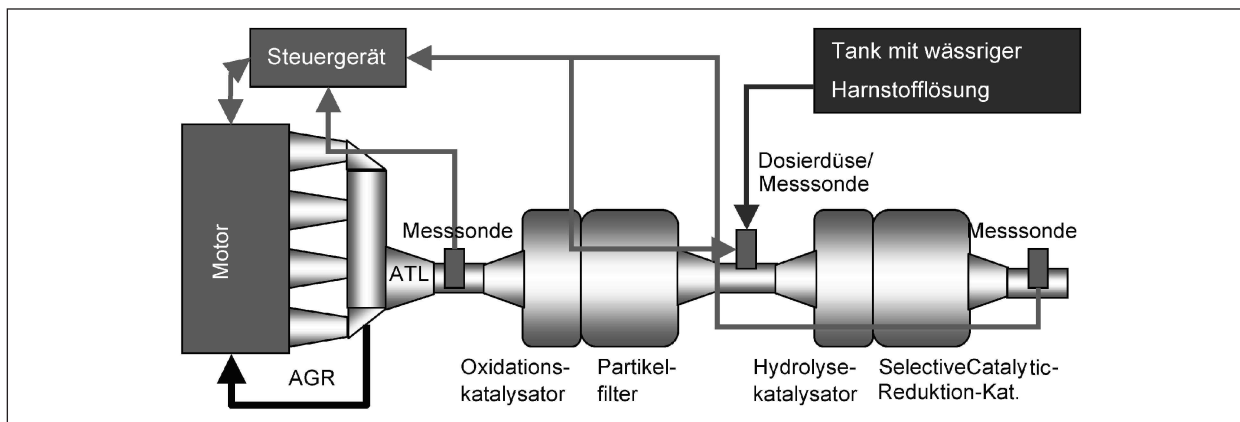
Formel 8: NO-Oxidation im Oxikat



Formel 9: CO-Oxidation im Oxikat

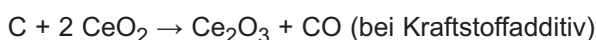


Formel 10: CH-Oxidation im Oxikat



**Bild 3:** Kombiniertes System Dieselmotorabgasnachbehandlung

Chemische Reaktionen im Dieselpartikelfilter:



Formel 11: C-Oxidation im DPF



Formel 12: C-Oxidation im DPF



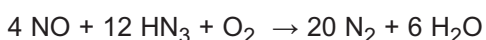
Formel 13: C-Oxidation im DPF

Chemische Reaktionen im Hydrolysekatalysator:

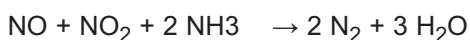


Formel 14:  $\text{NH}_3$ -Bildung im Hydrolysekat

Chemische Reaktionen im SCR-Katalysator:



Formel 15: NO-Reduktion im SCR-Kat



Formel 16:  $\text{NO}_x$ -Reduktion im SCR-Kat



Formel 17:  $\text{NO}_2$ -Reduktion im SCR-Kat

Für kleinere Fahrzeuge ist auch eine Abgasnachbehandlungsapplikation für Euro 6 ohne SCR-System (keine  $\text{NO}_x$ -Abgasnachbehandlung; nur AGR) oder ein NSR-System denkbar, wobei die Funktionsweise der Ottomotoren entspricht. Bei Euro-5-Applikationen kann hingegen in allen Fällen auf ein NSR- oder SCR-System verzichtet werden, wobei ein geschlossener Partikelfilter in jedem Fall zum Einsatz kommen muss.

In diesem Projekt wurden Fahrzeuge mit einer Abgasnachbehandlung in Form von einem Oxida-

tionskatalysator kombiniert mit einem Partikelfilter in Verbindung mit einer gekühlten Abgasrückführung betrachtet.

### 2.2.3 Gesetzliche Vorschriften und Abgasmessverfahren

Die aktuelle Verordnung der Europäischen Union zur Regelung von Abgasmessverfahren ist die VO (EG) Nr. 692/2008 zur Durchführung und Änderung der VO (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge. In dieser Verordnung werden sowohl die Abgasemissionsmessungen als auch die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs geregelt. Einzelne Passagen verweisen darüber hinaus zu weiterführenden Regelwerken wie der ECE-R 83 (Emissionsmessung) sowie der ECE-R 101 (Kraftstoffverbrauchsmessung).

Tabelle 3 soll einen Überblick über die gesetzlich vorgeschriebenen Messungen hinsichtlich der genannten Verordnungen geben.

Die Ermittlung der jeweiligen Schadstoffe ist gemäß der genannten gesetzlichen Grundlagen auf einem Abgasrollenprüfstand durchzuführen. Das Fahrzeug wird mit einem Referenzkraftstoff betankt sowie technisch auf die Messung vorbereitet. Durch eine Rollen Anpassung wird der Fahrwiderstand, welcher durch einen Ausrollversuch auf der Straße unter bestimmten Bedingungen zu ermitteln ist, am Rollenprüfstand eingestellt. Für Dieselfahrzeuge ist im Anschluss noch ein Vorkonditionierungszyklus beste-



Typ	Beschreibung	Art des Motors	Bemerkungen/Grenzwerte
I	Abgas-Massenemission nach einem Kaltstart (20...30 °C)	Otto/Diesel	NEFZ siehe Tabelle 4
II	CO-Konzentration im Leerlauf	Otto	3,5 Vol.-%
III	Gasemission aus dem Kurbelgehäuse	Otto	Nachweis Unterdruck
IV	Verdunstungsemissionen (Shed-Test)	Otto	2,0 g/Test
V	Dauerhaltbarkeit des Systems zur Abgasnachbehandlung	Otto/Diesel	Bestimmung Verschlechterungsfaktor
VI	Abgasemissionen bei niedrigen Temperaturen (-7 °C)	Otto	1,8 g/km HC 15,0 g/km CO
OBD	Test der Funktionalität der Onboard-Diagnosesysteme	Otto/Diesel	Fehlererkennung u. Schwellwerteeinhaltung

Tab. 3: Umfang der Abgasmessungen Emissionsmessungen nach VO (EG) Nr. 692/2008 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Lim. Schadstoffe		EU 1 1992	EU 2 1996	EU 3 2000	EU 4 2005	EU 5a 2009	EU 5b 2011	EU 6b 2014
<b>Ottomotor</b>								
CO	g/km	2,72	2,2	2,3	1,0	1,0	1,0	1,0
HC	g/km			0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
NMHC	g/km					0,068	0,068	0,068
NO <sub>x</sub>	g/km			0,15	0,08	0,06	0,06	0,06
HC + NO <sub>x</sub>	g/km	0,97	0,5					
PN (GDI)	#/km							6 · 10 <sup>12</sup>
PM (GDI)	g/km					0,005	0,0045	0,0045
<b>Dieselmotor</b>								
CO	g/km	2,72	1,0	0,64	0,5	0,5	0,5	0,5
NO <sub>x</sub>	g/km			0,5	0,25	0,18	0,18	0,08
HC + NO <sub>x</sub>	g/km	0,97	0,7	0,56	0,3	0,23	0,23	0,17
PN	g/km						6 · 10 <sup>11</sup>	6 · 10 <sup>11</sup>
PM	g/km	0,14	0,08	0,05	0,025	0,005	0,0045	0,0045

Tab. 4: EU-Emissionsgrenzwerte für Pkw nach Euro-Stufen

hend aus dreimal Teil 2 des NEFZ auf dem Rollenprüfstand zu fahren. In allen Fällen muss bis zur Emissionsmessung Typ I eine Vorkonditionierzeit von 6-36 h, in einer Soak-Area bei 20-30 °C und einer Luftfeuchte von  $5,5 \text{ g} \leq H \leq 12,2 \text{ g H}_2\text{O/kg}$  trockener Luft, eingehalten werden.

Erst nach Gewährleistung der beschriebenen Randbedingungen darf die Prüfung Typ I durchgeführt werden. Die Grenzwerte der Typ-I-Prüfung gemäß VO (EG) Nr. 692/2008 und der damaligen Rili 70/220/EWG, in der jeweils gültigen Fassung,

soll die Tabelle 4 darstellen. Ein Schema des Rollenprüfstands wird in Bild 4 dargestellt.

Bei der Betrachtung der Darstellung wird deutlich, dass das Abgas des Fahrzeuges durch den CVS-Tunnel mit Raumluft verdünnt wird. Der Luftstrom durch den Tunnel wird dabei durch eine Venturi-Düse konstant gehalten und ist bekannt. Ein definierter Teil des Abgases wird in Polyvinylfluorid-Beuteln gesammelt und steht anschließend für die Analyse zur Verfügung. Dabei wird nicht nur das Abgas des Fahrzeuges, sondern auch Raumluft ge-

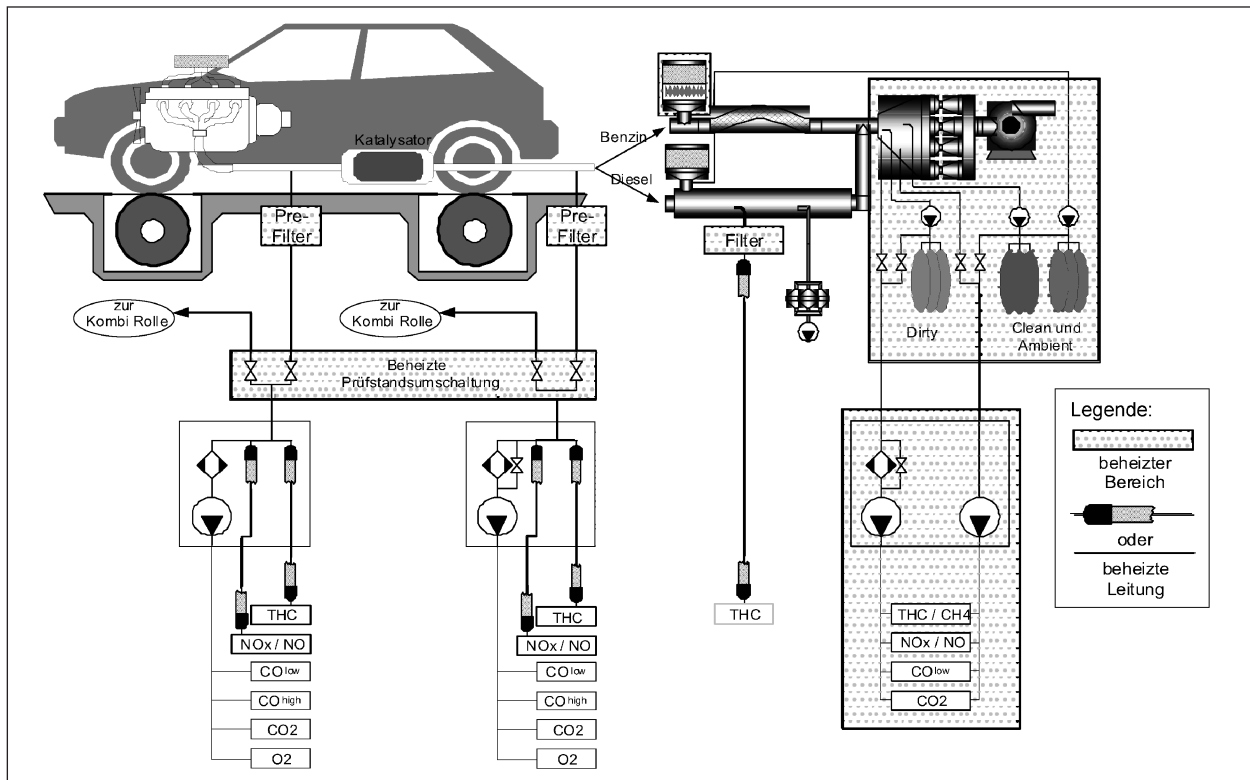


Bild 4: Schema Rollenprüfstand

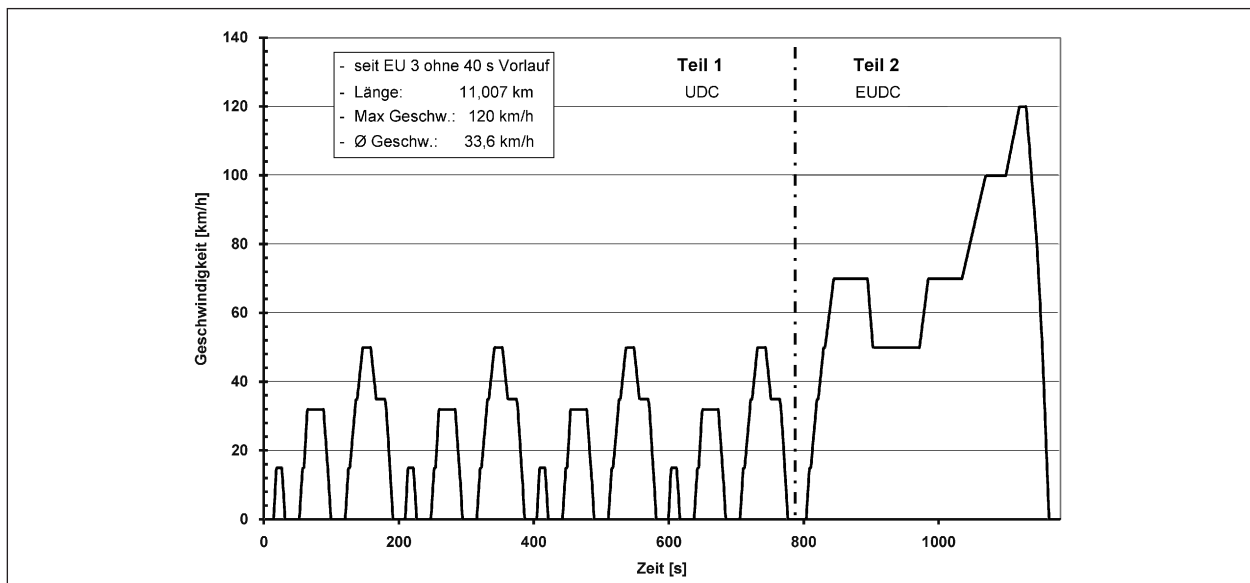


Bild 5: Neuer Europäischer Fahrzyklus

sammelt. Dies ist notwendig, um die Schadstoff-ergebnisse bezüglich der vorhandenen Schadstoffe in der Raumluft zu korrigieren. Der Sachverhalt verdeutlicht sich bei der  $\text{CO}_2$ -Messung in einem hohen Maße.

Bezüglich der Partikelmessung wird ein Teilstrom aus dem Tunnel mit einem definierbaren Durchfluss und unter definierten Randbedingungen durch kon-

ditionierte Polytetrafluorethylen-Filter (Rückhaltegrad > 99,4 %) geleitet, wodurch es zu einer Rußabscheidung kommt. Durch Differenzwägung nach einer weiteren Konditionierphase mit einer Hochpräzisionswaage in einer „Clean-Work-Bench“ kann die Partikelmenge in  $[\text{g}/\text{km}]$  berechnet werden. Aufgrund des geringen Partikelgrenzwertes von  $0,005 \text{ g}/\text{km}$  ist das Verfahren an der physikalischen Grenze hinsichtlich der Genauigkeit angelangt. Auf-

grund dessen ist seit der Einführung von Euro 5 zusätzlich das Partikelzählverfahren mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC) vorgeschrieben, wobei mit diesem optischen Messgerät kleine Partikel mit Größen von wenigen Nanometern bis Mikrometern analysiert und gezählt werden können.

Anders als bei den Pkw und den leichten Nutzfahrzeugen werden bei schweren Nutzfahrzeugen nur die Emissionen der Motoren geprüft. Da der Fokus dieses Projektes auf Euro-5-/Euro-6-Pkw lag, wird an dieser Stelle nicht weiter auf die Prüfprozeduren für schwere Lkw eingegangen.

In Bild 5 wird der „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) für die Typ-I-Prüfung von Pkw dargestellt.

### 3 Vorbetrachtungen

#### 3.1 Marktsituation und Relevanz biogener Kraftstoffe in Deutschland

##### 3.1.1 Allgemeine gesetzliche Grundlagen

Grundlage für biogene Kraftstoffe bildet die am 17. Mai 2003 in Kraft getretene „Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor“. Mit der Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 wurde erstmals ein rechtlicher Rahmen für die drei Energiesektoren Verkehr, Strom, Wärme/Kälte geschaffen, welche die Richtlinie 2003/30/EG am 1. Januar 2012 aufheben wird. Nach [10] ist der Zielwert für den Anteil aus erneuerbaren Quellen am Bruttoendenergieverbrauch im Jahr 2020 mit 18 % für Deutschland festgelegt. In Tabelle 5 ist für verschiedene Länder der Anteil erneuerbarer Energie am Bruttoendenergieverbrauch für das Jahr 2020 dargestellt.

Um diesen prozentualen Anteil bis 2020 realisieren zu können, wurde für Deutschland das Biokraftstoffquotengesetz im Oktober 2006 beschlossen. Die Quotenregelung wird dabei durch eine Änderung in der Durchführungsverordnung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vorgenommen. Das Ergebnis ist eine präzise Regelung der beizumischenden Mengen an Biokraftstoff. Dadurch besteht derzeit die Verpflichtung, Diesel mit 4,4 %

Länder	Zielwert für den Anteil von Energie aus erneuerbaren Quellen am Bruttoendenergieverbrauch im Jahr 2020
Deutschland	18 %
Schweden	49 %
Dänemark	30 %
Tschechische Republik	13 %
Frankreich	23 %

Tab. 5: Zielwert der Anteile von Energie aus erneuerbaren Quellen nach [10]

(cal.) und Ottokraftstoff mit 2,8 % (cal.) Biokraftstoff zu versetzen. Bei diesen prozentualen Angaben handelt es sich um energetische Quoten, bezogen auf den Energiegehalt der Kraftstoffe.

Für die Berechnung sind die Einzelquoten für Otto- bzw. Dieseldkraftstoffe von der Gesamtquote zu unterscheiden. Grundlage der Einzelquoten sind die in Verkehr gebrachten Mengen an Otto- und Dieseldkraftstoffen, zuzüglich der Otto- und Dieseldkraftstoff ersetzenden Biokraftstoffe. Die Gesamtquote wird auf Grundlage der jährlichen Gesamtabsatzmenge berechnet. In Bild 6 ist die tatsächliche Entwicklung der Biokraftstoffquote dargestellt.

Die Gesamtquote von 6,25 % (cal.) ist bis zum Jahr 2014 festgesetzt. Um diese zu erreichen, ist eine erhöhte Beimischungsmenge von bis zu 10 % (vol.) Ethanol für Ottokraftstoff und bis zu 7 % (vol.) Biodiesel (FAME) für Dieseldkraftstoff erforderlich.

Nach [11] ist ab dem Jahr 2015 ein Mindestanteil Otto- und Dieseldkraftstoff ersetzenden Biokraftstoffs in Verkehr zu bringen, durch den der Treibhausgasanteil zuzüglich des Otto- oder Dieseldkraftstoff ersetzenden Biokraftstoffs stufenweise um folgende Quoten gesenkt wird:

1. ab dem Jahr 2015 um 3,0 Prozent,
2. ab dem Jahr 2017 um 4,5 Prozent,
3. ab dem Jahr 2020 um 7,0 Prozent.

Der Referenzwert, gegenüber dem die Treibhausgasminderung zu erfolgen hat, berechnet sich nach den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten [kg/GJ] der Gesamtmenge Otto- und Dieseldkraftstoffs und des Otto- und Dieseldkraftstoff ersetzenden Biokraftstoffs [77]. Auf dieser Basis wird die energetische Quote auf die Treibhausgasminderungsquote umgestellt. Dies ist in Tabelle 6 zusammenfassend dargestellt.

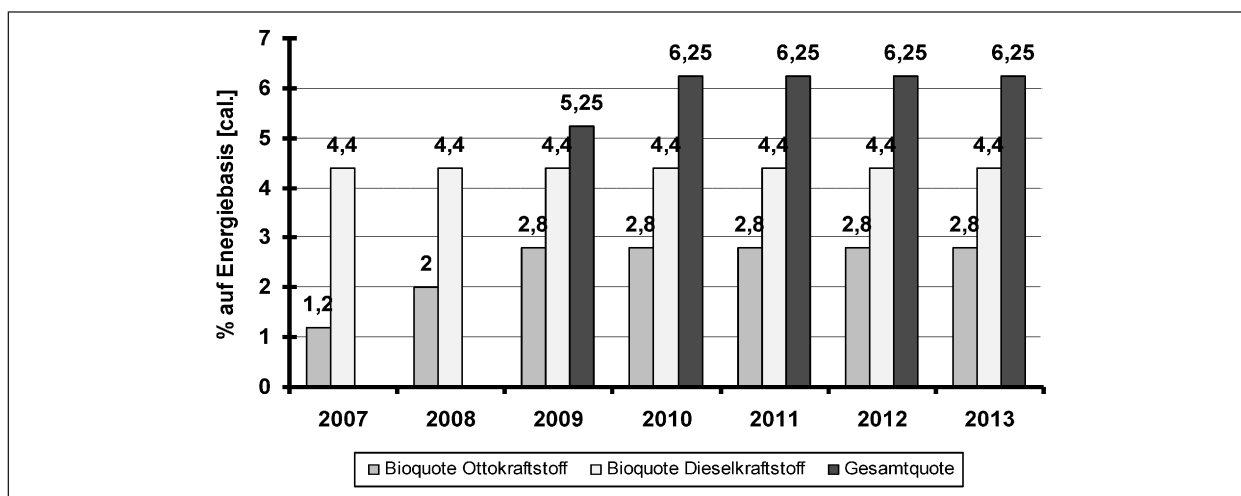


Bild 6: Biokraftstoffquote 2007-2013 nach [11]

Jahr	Biokraftstoffquote bis 2014	Treibhausgas-minderungsquote ab 2015	Biokraftstoffe in der Mischung
	cal. %	%	cal. %
2009	5,25		5,25
2010-2014	6,25		6,25
2015		3,0	6,00 <sup>1)</sup>
2017		4,5	7,50 <sup>1)</sup>
2020		7,0	10,0 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Berechnung aus Klimaschutzquote und Netto-Klimaschutzbeitrag der Biokraftstoffe durch [12]

Tab. 6: Klimaschutzquote für Biokraftstoffe ab 2015 [12]

### 3.1.2 Aktueller Verbrauch von biogenen Kraftstoffen

In den nächsten Jahren zeichnet sich für die weltweite Nachfrage und die damit verbundene Produktion von Ethanol und Biodiesel ein starkes Wachstum ab. Im Jahr 2009 wurden weltweit nach [14] ca. 76 Milliarden Liter Ethanol und 17 Milliarden Liter Biodiesel produziert. Die USA mit 41 Milliarden Litern und Brasilien mit 26 Milliarden Litern decken damit bei der Ethanolproduktion ca. 88 % der Weltproduktion ab. Bei der Biodieselproduktion sind Frankreich und Deutschland mit je 2,6 Milliarden Litern gefolgt von den USA mit 2,1 Milliarden Litern und Brasilien mit 1,6 Milliarden Litern die größten Produzenten. Der in der EU produzierte Anteil beläuft sich bei Ethanol auf 3,6 Milliarden und bei Biodiesel auf 8,9 Milliarden Liter. Folglich wurden mehr als 50 % des Biodiesels und nur ca. 5 % Ethanol in Europa hergestellt. In Bild 7 ist der prozentuale Anteil an erneuerbaren Energien am Kraft-

stoffverbrauch für die 27 EU-Länder zusammenfassend dargestellt. Der weltweite biogene Kraftstoffanteil beträgt derzeit nur ca. 3 % am Gesamtkraftstoffverbrauch. Es wird davon ausgegangen, dass sich bis 2035 dieser Anteil aufgrund des steigenden Welt-Kraftstoffbedarfs auf ca. 8 % ausbauen lässt.

Nach Auswertung aktueller Kraftstoffverbrauchsdaten für Deutschland lag der Gesamtverbrauch 2010 für Ottokraftstoff bei 19,6 Mio. t und für Diesekraftstoff bei 32,4 Mio. t. Aus Bild 8 ist ein rückläufiger Kraftstoffverbrauch für Ottokraftstoffe seit 2001 sowie voraussichtlich für Diesekraftstoff ab dem Jahr 2010 ersichtlich. Nach Prognosen des Mineralölwirtschaftsverbandes wird der Verbrauch von Ottokraftstoff auf 13,6 Mio. t und Diesekraftstoff auf 26 Mio. t im Jahr 2025 zurückgehen. Dies würde einem Rückgang von ca. 23 % entsprechen. Der rückläufige Kraftstoffverbrauch lässt sich zum einen mit dem Trend zum verbrauchsärmeren Dieselfahrzeug erklären. Die Zahl der Dieselfahrzeuge in privaten Haushalten ist nach [16] im Jahr 2000 bis 2008 um ca. 75 % gestiegen. Der Dieselfahrzeuganteil (Pkw) betrug 2008 in Deutschland 21 %. Bezüglich der Neuzulassungen beträgt der Dieselfahrzeuganteil heute bereits über 50 %. Eine weitere Ursache für den rückläufigen mineralischen Kraftstoffverbrauch stellen die steigenden biogenen Beimischungen dar.

Insgesamt wird der CO<sub>2</sub>-Eintrag aus dem Straßenverkehr in Zukunft abnehmen, zum einen aufgrund des prognostizierten Verbrauchsrückgangs von Kraftstoff aus fossilen Quellen, zum anderen weil ein Teil des Kraftstoffs aus nachwachsenden Rohstoffen stammt. Hybrid- und Elektrofahrzeuge haben derzeit einen sehr geringen Marktanteil in

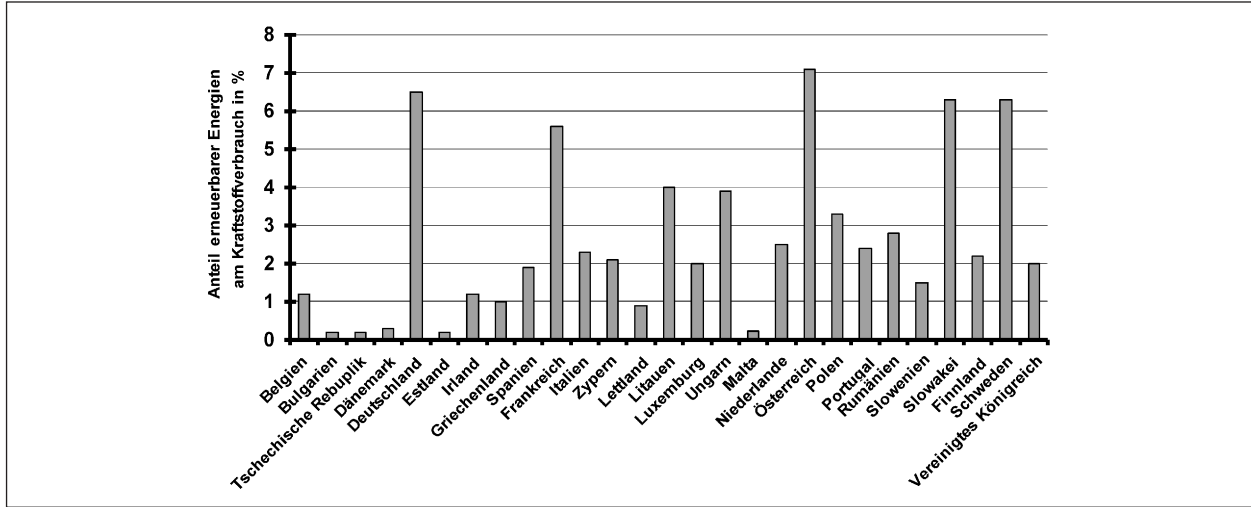


Bild 7: Anteil erneuerbarer Energien 2008 [15]

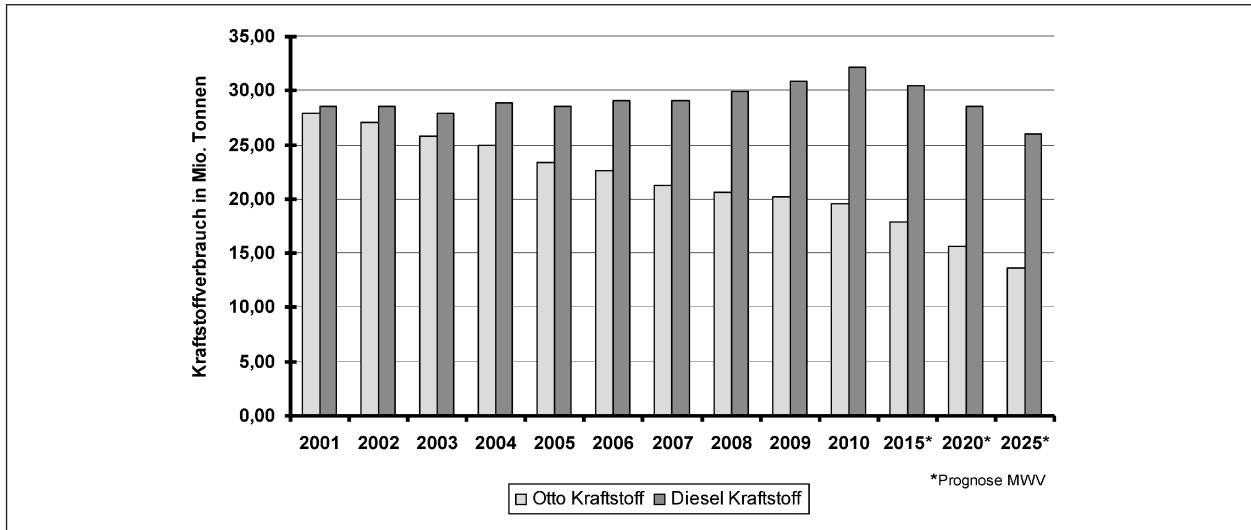


Bild 8: Kraftstoffverbrauch in Deutschland 2001-2025 nach [17, 18]

der Bundesrepublik Deutschland. Bis 2025 kann nach [57] der Anteil weltweit auf nur ca. 3 % gesteigert werden. Somit haben Elektro- und Hybridfahrzeuge bis 2025 nur einen sehr geringen Einfluss auf den Rückgang des Kraftstoffverbrauches sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Wie bereits beschrieben, wird die Biokraftstoffbeimischung durch eine Kraftstoffquotenregelung bis 2014 und im Anschluss durch eine Betrachtung der Klimaschutzquote geregelt. Durch theoretische Betrachtungen soll in Tabelle 7 aufgezeigt werden, wie sich die erforderlichen Anteile an Biokraftstoffen bis 2020 verändern werden. Dabei soll bezüglich der Unterquoten, eventuell geforderter Gesamtquoten sowie der Klimaschutzquote hinsichtlich des Gesamtkraftstoffverbrauches die theoretisch notwendige Menge an biogenen Treibstoffen berechnet wer-

den. Wie in Tabelle 7 dargestellt, wird das Jahr 2020 in verschiedene Szenarien eingeteilt. Unter Verwendung einer virtuellen Unterquote, zur Sicherstellung einer Grundbeimischung des jeweiligen Kraftstoffes, wird die benötigte Energie zur Erfüllung der Gesamtquote jeweils unterschiedlich auf Biodiesel und Bioethanol aufgeteilt.

Aus alleiniger theoretischer Betrachtung der gesetzlichen Regelungen bis 2020 ergibt sich, dass unter Beibehaltung eines flächendeckenden Kraftstoffes B7 Beimischungen zu Ottokraftstoff bis 25 % notwendig werden würden (E25). Sollte die Beimischung von Biodiesel zu einem B10 angehoben werden, könnte ein E20 erforderlich werden, um die entsprechende Klimaschutzquote zu erfüllen. Bei einem flächendeckenden Kraftstoff mit mehr als 10 % Biodieselbeimischung sinkt der Beitrag von

Jahr				Szenarien 2020		
	2007	2008	2010	B7 2020	B10 2020	B15 2020
Kraftstoffverbrauch Diesel [Mio t] [17] <sup>2</sup>	27,6	28,3	29,8	28,6 <sup>1</sup>	28,6 <sup>1</sup>	28,6 <sup>1</sup>
Unterquote Diesel [%] [12]	<b>4,40</b>	<b>4,40</b>	<b>4,40</b>	4,40	4,40	4,40
Biodiesel zur Erfüllung der Unterquote [Mio t]	1,41	1,45	1,52	1,46	1,46	1,46
entspricht vol. Beimischung [vol. %]	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
Kraftstoffverbrauch Otto [Mio t] [17] <sup>2</sup>	20,8	19,9	18,5	15,6	15,6	15,6
Unterquote Otto [%] [12]	<b>1,20</b>	<b>2,00</b>	<b>2,80</b>	2,80	2,80	6,00
Bioethanol zur Erfüllung der Unterquote [Mio t]	0,41	0,65	0,85	0,72	0,72	1,54
entspricht vol. Beimischung [vol. %]	1,85	3,08	4,32	4,32	4,32	9,25
Gesamtquote [12]			<b>6,25</b>	<b>10,0<sup>3</sup></b>	<b>10,0<sup>3</sup></b>	<b>10,0<sup>3</sup></b>
zusätzlicher Biokraftstoff zur Erfüllung der Gesamtquote [MJ]			5,2E+10	1,2E+11	1,2E+11	9,6E+10
Energie benutzt für Beimischung Biodiesel [%]			80	20	45	100
Energie benutzt für Beimischung Bioethanol [%]			20	80	55	0
Gesamtvolumenanteil Beimischung Biodiesel [vol. %]			<b>8,38</b>	<b>6,94</b>	<b>9,58</b>	<b>13,43</b>
eingesetzter Biodiesel Gesamt [Mio. t]			2,64	2,10	2,90	4,06
Gesamtvolumenanteil Beimischung Bioethanol [vol. %]			<b>6,28</b>	<b>25,64</b>	<b>18,98</b>	<b>9,25</b>
eingesetzter Bioethanol Gesamt [Mio. t]			1,24	4,26	3,16	1,54
<sup>1</sup> Hochrechnung nach [18]						
<sup>2</sup> ohne biogenen Anteil						
<sup>3</sup> Berechnet durch [12] aus Klimaschutzquote und Netto-Klimaschutzbeitrag						

Tab. 7: DEKRA-Berechnung des theoretischen Bedarfs an Biokraftstoffen und Betrachtung von möglichen Szenarien 2020; Stand 2012

	Heizwert [MJ/kg]	Heizwert [MJ/l]
Dieselmotorkraftstoff	43,1	35,87
Biodiesel	37,1	32,65
Ottomotorkraftstoff	43,9	32,48
Bioethanol	26,7	21,06

Tab. 8: Berechnungsgrundlagen zur Tabelle 7 nach [2]

Ethanol unter 10 %. Somit ergibt sich je nach Szenario ein Bedarf an Bioethanol von 1,5 bis 4,3 Mio. t und für Biodiesel von 2,1 bis 4,1 Mio. t.

Für die Betrachtung der Berechnungen in Tabelle 7 ist anzumerken, dass ein flächendeckender Kraftstoff errechnet wird. Es gibt neben diesem auch Reinkraftstoffe B100, Pflanzenöl, B0, E0 sowie E85, welche jedoch hinsichtlich der abgesetzten Menge sehr gering sind. Nach [12] ist auch das Inverkehrbringen von Reinkraftstoffen quotenpflichtig. Ferner wird eine gewisse Menge Ethyl-tert-

Butylether (ETBE) abgesetzt. ETBE wird als Qualitäts- und Oktanzahlverbesserer mit bis zu 15 % (vol.) zu Ottokraftstoffen beigemischt und setzt sich aus 45,1 % (vol.) Ethanol und 54,9 % (vol.) fossilem Isobuten zusammen [77]. Dieser Sachverhalt wurde bei der Betrachtung berücksichtigt.

In den Bildern 9 und 10 ist die Entwicklung des Bedarfs an Biodiesel und Bioethanol in Deutschland dargestellt. Weiterhin ist bei Ethanol die Höhe der Importmenge bzw. bei Biodiesel die mögliche Produktionskapazität ersichtlich.

Nach [2] ist für die hergestellte Menge Bioethanol 2010 eine Anbaufläche von ca. 240.000 ha erforderlich. Um den gesamten Ethanolabsatz in Deutschland zu decken, wäre mehr als die doppelte Fläche notwendig.

Der Rohstoff zur Biodieselherstellung ist in Deutschland fast ausschließlich Raps. Die Anbaufläche von Raps in Deutschland beträgt 2010 nach [12] ca. 1,5 Mio. ha und hat sich seit 2005 kaum verändert. Damit sind die Anlagen zur Herstellung von Biodiesel mit 40-50 % ausgelastet. Zur

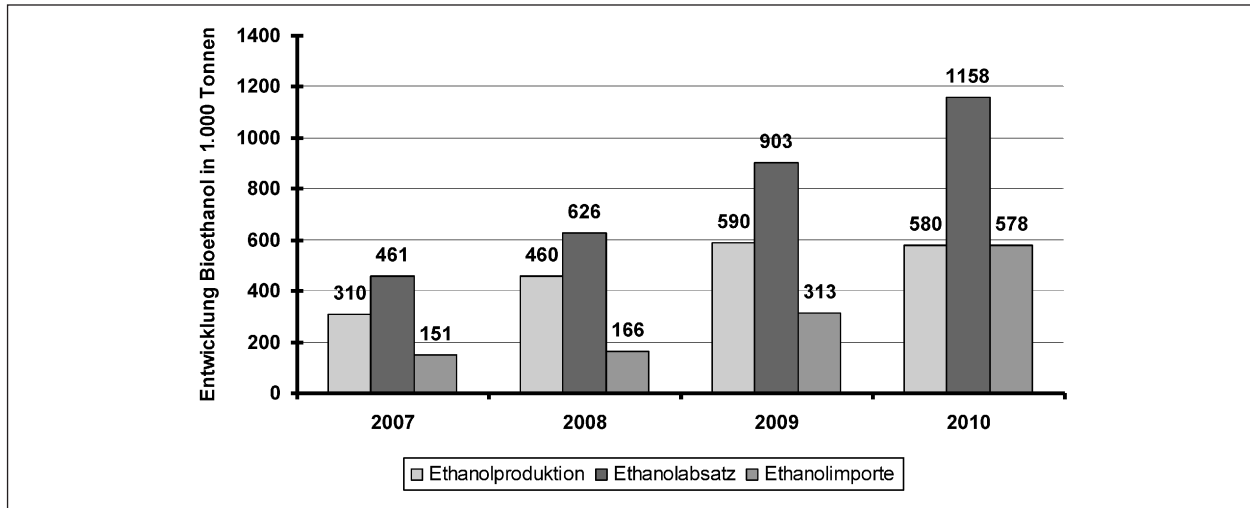


Bild 9: Entwicklung Bioethanolverbrauch in Deutschland 2007-2010 nach [17,18]

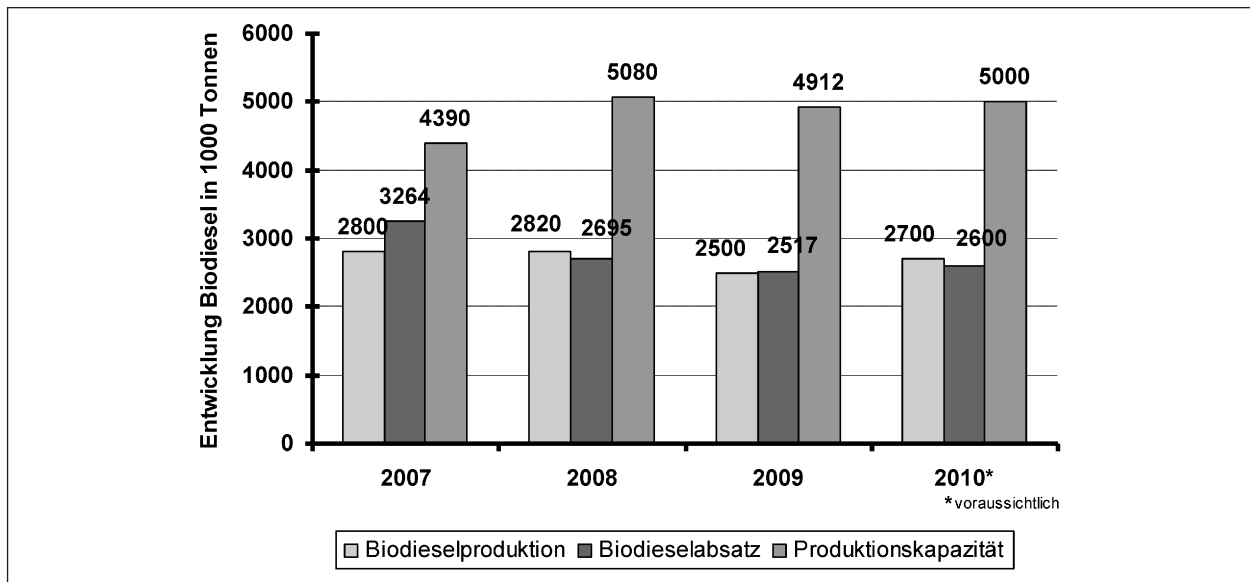


Bild 10: Entwicklung Biodieselerverbrauch in Deutschland 2007-2010 nach [17, 18]

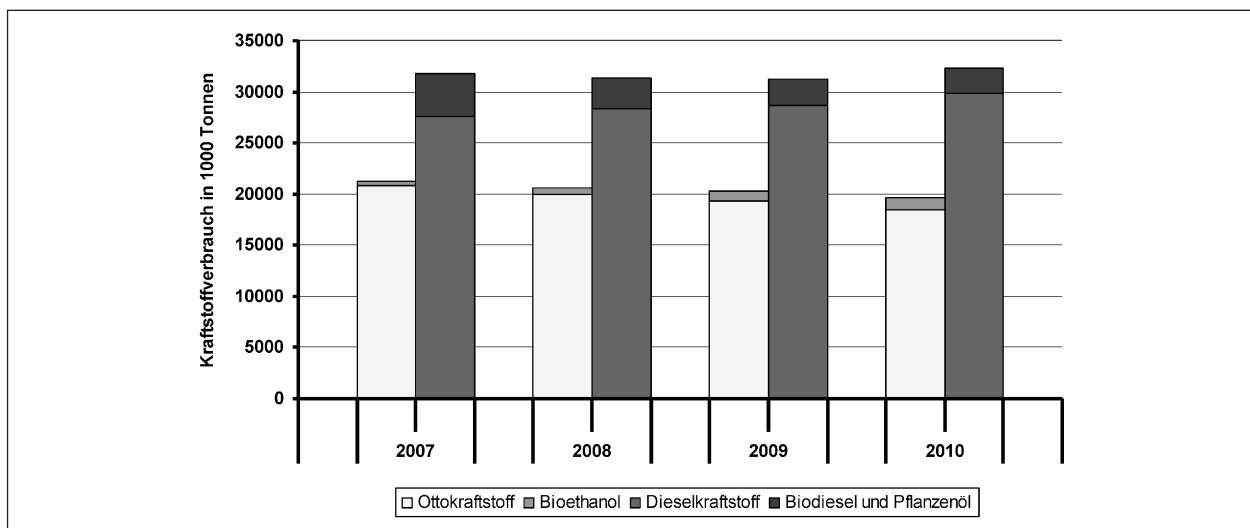


Bild 11: Biokraftstoffanteil am Gesamtkraftstoffverbrauch 2007-2010 nach [17]

Nutzung der gesamten Produktionskapazitäten ist deshalb im erheblichen Umfang ein Import von Pflanzenölen notwendig [19]. Betrachtet man theoretisch die maximalen Produktionskapazitäten für das Jahr 2010 in der Bundesrepublik Deutschland, so ergibt sich nach [12, 19, 24] für Biodiesel eine Kapazität von ca. 4,9 bis 5 Mio. t, wobei jedoch hohe Importe von Rohstoffen nötig sind. Für Bioethanol ergibt sich nach [12, 20, 77] ein Potenzial von 0,9 bis 1,1 Mio. t.

Für die Herstellung von Bioethanol befanden sich in 2010 Anlagen mit einer Kapazität von 0,56 Mio. t in Planung bzw. im Bau [20]. Aus diesen inländischen Produktionskapazitäten lässt sich eine maximale Beimischung bestimmen. Mit Bezug auf den Gesamtkraftstoffverbrauch könnte für Biodiesel eine theoretische Beimischung von 15 % (vol.) erreicht werden. Für Bioethanol kann selbst bei Vernachlässigung von ETBE-Beimischungen unter derzeitigen Bedingungen nur eine maximale flächendeckende Beimischung von 6 % (vol.) realisiert werden. Jedoch ist hier zu beachten, dass sowohl Kraftstoffe ohne Beimischungen als auch 100%ige Biokraftstoffe auf dem Markt erhältlich sind, in den Gesamtkraftstoffverbrauch einfließen und damit den Beimischungsanteil beeinflussen.

### 3.1.3 Entwicklungsmöglichkeiten und Trend der biogenen Kraftstoffe

Verschiedene Randbedingungen, wie gesetzliche Bestimmungen, zur Verfügung stehende Flächen, Preisentwicklung, gestalten es schwierig, einen genauen Trend zu prognostizieren.

Der derzeitige volumetrische Beimischungsanteil von bis zu 10 % Ethanol (E10) bei Ottokraftstoffen und bis zu 7 % Biodiesel (B7) bei Dieselmotoren wird

nur eine Übergangslösung darstellen. Um zukünftig gesetzlich festgelegte Quoten zu erreichen, wird ein erhöhter Beimischungsanteil unumgänglich.

Der Biodieselanteil könnte im Jahr 2020 durch volle Auslastung der Produktionskapazitäten einen energetisch äquivalenten Anteil von 4,9 bis 5 Mio. t Biodiesel erreichen, was ca. 15 % (vol.) Beimischungsanteil entspricht. Bei Ottokraftstoffen hingegen zeichnet sich, wie in Bild 6 ersichtlich, ein deutlich zurückgehender Kraftstoffverbrauch ab. In diesem Zusammenhang ist unter Voraussetzung der Verwendung von allen verfügbaren Kapazitäten der Getreide- und Zuckerrübenproduktion nach [21] im Jahr 2020 ein energetischer Anteil von 45 % möglich. Dies erfordert jedoch einen massiven Ausbau der Ethanolanlagen.

Mit Ausblick auf die nächsten 5 bis 10 Jahre und unter Berücksichtigung der Produktionskapazitäten sowie der gesetzlichen Forderungen ist für Biodiesel eine flächendeckende Beimischung von ca. 10 bis 15 % (vol.) realistisch. Des Weiteren könnte ein B10 durch einen Sonderkraftstoff mit 20-30 % (vol.) Biodieselbeimischung ergänzt werden.

Bei Ethanol ist mit Blick auf die verfügbaren Ressourcen von Getreide und Zuckerrüben, den rückläufigen Kraftstoffabsatz sowie hinsichtlich der gesetzlichen Rahmenbedingungen ein starkes Potenzial vorhanden. Eine Erhöhung des Ethanolanteils auf 20 % (vol.) wäre durchaus denkbar.

Betrachtet man jedoch die derzeitige Situation mit E10, wird deutlich, wie komplex sich dieses Thema darstellt. Die Akzeptanz der Bevölkerung hinsichtlich der Nahrungskonkurrenz sowie die Verunsicherung über die Fahrzeugverträglichkeit sind entscheidende Faktoren. In Bild 12 ist der Verbrauch der einzelnen Kraftstoffsorten von Januar 2010 bis Februar 2011 dargestellt.

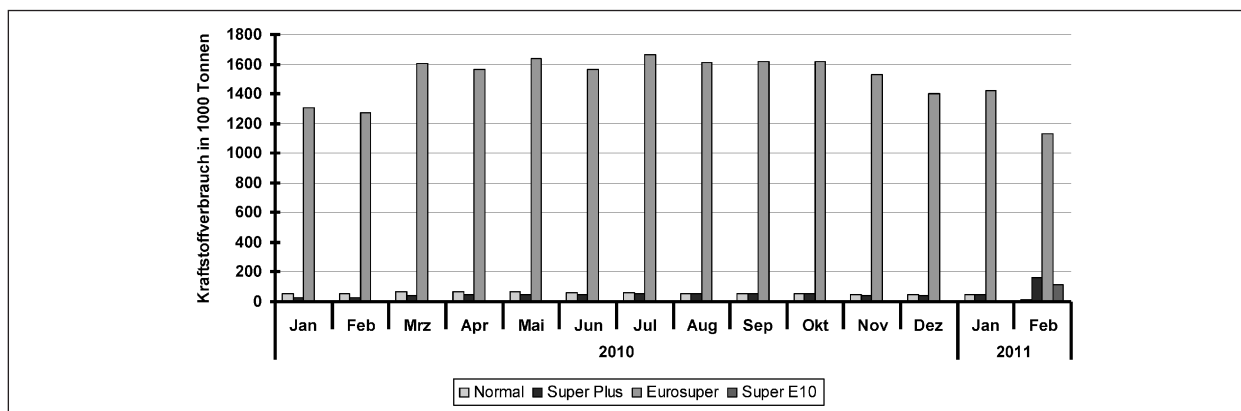


Bild 12: Kraftstoffverbrauch von Jan. 2010 bis Feb. 2011 nach [12]



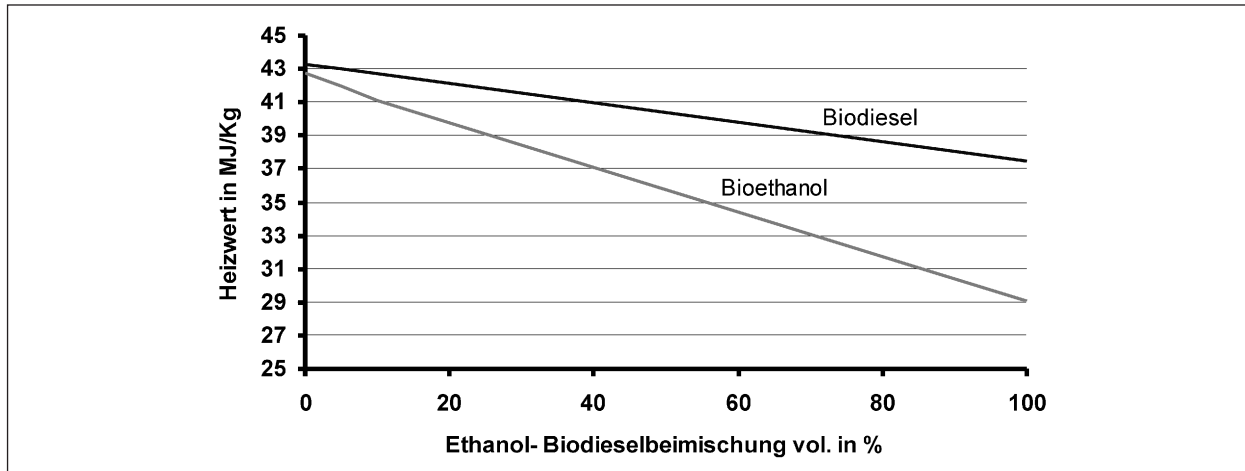


Bild 13: Heizwertabhängigkeit mit steigender Ethanol- bzw. Biodieselbeimischung

Es wird ersichtlich, dass im Februar 2011 mit Einführung von E10 der Verbrauch von Super Plus deutlich angestiegen ist. Diese Entwicklung zeigt die Verunsicherung der Bevölkerung. Trotz des höheren Preises von Super Plus wurde dieser mehr getankt als E10. Bereits hier ist zu erkennen, wie schwierig es ist, einen solchen Kraftstoff auf dem Markt zu etablieren. Zum einen stellt sich die Frage hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches. Bis zu welcher Größenordnung ist der Kunde bereit, einen Kraftstoffmehrverbrauch zu akzeptieren? Zum anderen ist eine zuverlässige Aussage zur Verträglichkeit mit dem Fahrzeug notwendig. In Bild 13 ist der Heizwert des Gemisches in Abhängigkeit von der prozentualen Beimischung ersichtlich. Eine vom Kunden noch akzeptierte Größenordnung des Mehrverbrauches könnte bei ca. 5 % liegen.

Bei Ethanol kommt der Kraftstoffmehrverbrauch aufgrund des um ca. 1/3 geringeren Heizwertes zustande. Je größer die Ethanolbeimischung gewählt wird, desto höher wird der Kraftstoffverbrauch. Aufgrund dieses Sachverhaltes ist der Ethanolbeimischung derzeit ein weiteres Hindernis gesetzt. Diese 5%-Grenze des Mehrverbrauches wird bei einer Beimischung ab ca. 15 % (vol.) Ethanol überschritten.

Bei Biodiesel ist der Heizwert im Vergleich zu Ethanol größer, sodass sich der Kraftstoffmehrverbrauch dementsprechend kleiner darstellt. Der Heizwertunterschied von Diesel mit 7 % (vol.) Beimischung zu reinem Biodiesel verursacht einen Kraftstoffmehrverbrauch von ungefähr 10 %.

Aus technischer Sicht sind die Ethanolbeimischungen größer 20-30 % kritisch zu betrachten. Mit hö-

herem Ethanolanteil nimmt die Reaktionsneigung mit Kunststoffen und Aluminiumlegierungen zu. Um höhere Beimischungen in den Fahrzeugen zu verwenden, ist eine entsprechende Material- und Komponentenauswahl notwendig. Der derzeitige Markt bietet so genannte „Flexible Fuel Fahrzeuge“ an. Diese können mit Benzin, reinem Ethanol und beliebigen Mischungen aus diesen Komponenten betrieben werden. Das Angebot dieser Fahrzeuge ist auf wenige Modelle beschränkt und müsste dementsprechend weiter ausgebaut werden.

Biodiesel wirkt ähnlich wie Ethanol korrosiv auf Kunststoffe und verschiedene Metalllegierungen. Ein weiteres Problem stellt der Kraftstoffeintrag ins Motoröl dar. Biodiesel besitzt eine hohe Siedetemperatur und verdampft nicht aus dem Öl. Der verbleibende Kraftstoff im Motoröl führt zur Ölverdünnung und damit zu erhöhtem Motorverschleiß. Diese Auswirkungen werden hinsichtlich erhöhter Beimischungen in der vorliegenden Studie betrachtet und explizit ausgewertet.

Aus dieser Studie wird ersichtlich, dass der Akzeptanz- und Entwicklungsprozess aus technischer Sicht sowie wirtschaftliche und ökologische Aspekte eine signifikante Rolle bei der Beimischungsmenge von Ethanol bzw. Biodiesel spielen werden. In Abwägung derzeitiger Erkenntnisse ist eine Beimischungsmenge von Ethanol größer 20 % (vol.) E20 und von Biodiesel größer 10 % (vol.) B10 flächendeckend mit der Option, einen Sonderkraftstoff von 30 % (vol.) B30 lokal anzubieten, eher unwahrscheinlich.

## 3.2 Einflüsse biogener Kraftstoffe auf moderne Motoren

### 3.2.1 Emissionsverhalten

#### Pflanzenölkraftstoffe

Pflanzenöle unterscheiden sich von konventionellem Diesel nur geringfügig im spezifischen Energiegehalt, sodass nur ein unerheblicher Leistungsverlust bzw. Kraftstoffmehrverbrauch zu erwarten ist.

Hinsichtlich der Verwendung als Kraftstoff ist eine andere physikalische Eigenschaft, die Viskosität, von entscheidender Bedeutung. Die höhere Viskosität von Pflanzenöl ist die Ursache für ein verändertes Strahlbild und Brennverhalten. Auch die Zündwilligkeit sowie das Siedeverhalten unterscheiden sich von Dieselmotoren (DK).

Aufgrund der veränderten physikalischen Eigenschaften ist eine Anpassung des Motors erforderlich. Bei nicht umgerüsteten Motoren ist nach [22] ein bis zu 50 % schlechteres Abgasverhalten hinsichtlich der limitierten Schadstoffkomponenten zu erwarten. Bedingt durch die höhere Viskosität entsteht ein ungünstiges Kraftstoff-Luftgemisch, welches zur unvollständigen Verbrennung führt. Die Zonen im Brennraum mit niedrigen Kraftstoffanteilen haben einen Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen und kraftstoffreiche Zonen einen Anstieg der Partikelemission zur Folge. Da Pflanzenöle nahezu schwefelfrei sind, emittieren diese nur sehr geringe Mengen an Schwefeldioxid und partikelgebundenen Sulfaten.

Pflanzenöle weisen einen hohen Gehalt an Calcium und Magnesium auf, wodurch es zu einer erhöhten Aschebildung kommt. Im Partikelfilter führt dies zu einer schnelleren Beladung, welche nicht reversibel ist. Dieser Effekt wird vor allem im Leerlauf und im

Teillastbereich beobachtet, da die nötigen Temperaturen und die Wirkung der erhitzten Zylinderwände fehlen, um den Kraftstoff entsprechend zu verdampfen [23].

Untersuchungen für Motoren in Blockheizkraftwerke (BHKW) haben gezeigt, dass vor allem die Kohlenwasserstoff-Emissionen durch die Verwendung von reinem Pflanzenöl herabgesetzt werden können. In [29] wurden Versuche am BHKW Typ 5-3 AP mit einem 3-Zylinder-Reihenmotor und 0,9 l Hubraum durchgeführt. Dieser Motor emittiert im Dieselmotorenbetrieb  $87 \text{ mg/m}^3$  HC, damit  $29 \text{ mg/m}^3$  mehr als im Rapsölbetrieb. In Hinblick auf die Partikelrohmission konnte durch Verwendung von reinem Rapsölkraftstoff gegenüber DK eine Reduzierung von  $133 \text{ mg/m}^3$  auf  $66 \text{ mg/m}^3$  festgestellt werden.

In [29] sind jedoch erhöhte Partikelrohmissionen von  $80 \text{ mg/m}^3$  im Vergleich zu Diesel mit  $60 \text{ mg/m}^3$  gemessen worden und lediglich die Nachoxidentationskatalysatoremissionen waren mit  $18 \text{ mg/m}^3$  gegenüber DK mit  $43 \text{ mg/m}^3$  geringer. Dieses Verhalten lässt sich durch den erhöhten organischen Anteil von reinem Rapsölkraftstoff erklären, welcher eine verbesserte Konvertierung im Oxidationskatalysator ermöglicht.

Durch eine aktuellere Untersuchung in 2009 nach [25] werden die oben aufgeführten Aussagen bestätigt. In dieser Studie wurden bei einem Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160, Baujahr 2005, und einem Fendt Farmer Vario 412, Baujahr 2003, mit Diesel-Direkteinjektion verringerte Werte bei CO und vor allem HC sowie höhere Werte für Stickoxide bei der Verwendung von Rapsöl festgestellt. In Bild 14 und Bild 15 wird dies vergleichend bei den Nenndrehzahlen der jeweiligen Traktoren und 50 % Last dargestellt.

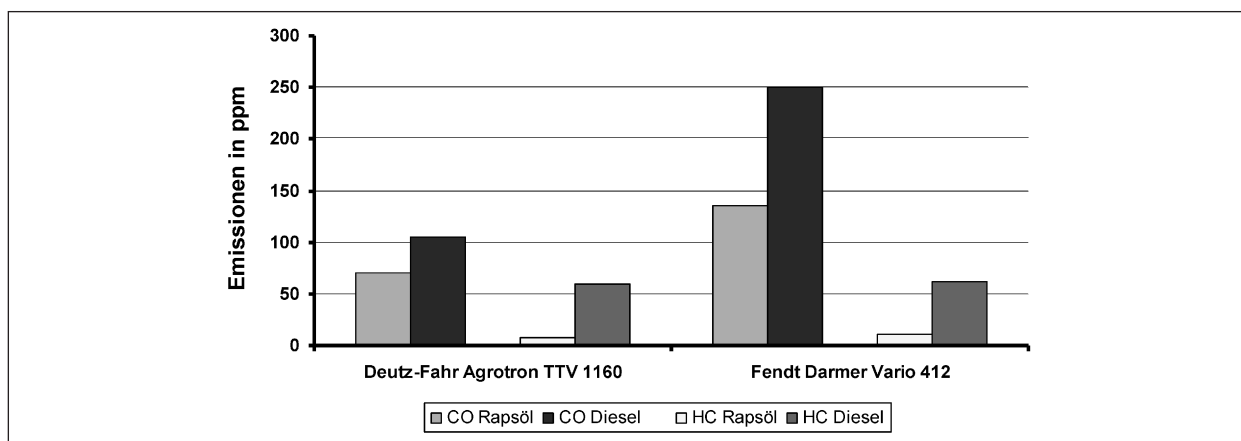


Bild 14: Einfluss verschiedener Kraftstoffe auf CO- und HC-Emissionen nach [25]

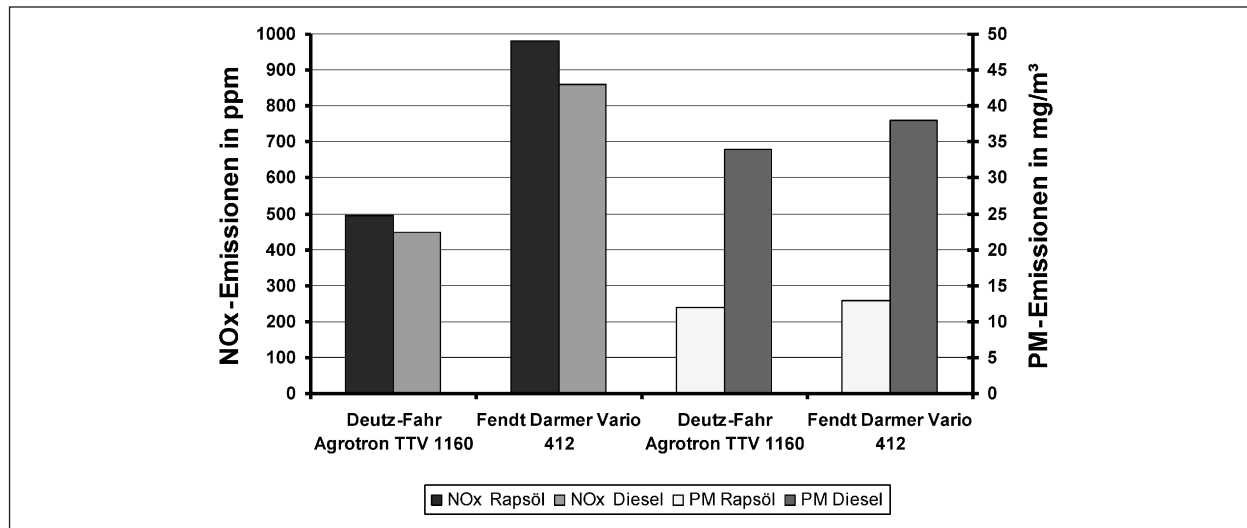


Bild 15: Einfluss verschiedener Kraftstoffe auf NO<sub>x</sub>- und PM-Emissionen nach [25]

### Biodiesel

Biodiesel (FAME, vergl. Kapitel 2.1.2) als Kraftstoff muss u. a. hinsichtlich Viskosität, Cetanzahl, Schwefelgehalts und Säurezahl genau definierte Qualitätsparameter erfüllen, die in der DIN-Norm 14214 definiert sind, jedoch von denen mineralischen DK abweichen. Die Cetanzahl als Maß für die Zündwilligkeit des jeweiligen Kraftstoffes ist mit 56-58 höher als bei DK mit 53-54. Der Flammpunkt von DK liegt bei ca. 60 °C, der von Biodiesel dagegen bei mindestens 120 °C. Durch die Ester-Funktionalität in der chemischen Verbindung hat Biodiesel einen höheren Sauerstoffanteil, wodurch die Verbrennung maßgeblich beeinflusst wird. Biodiesel wird in Deutschland größtenteils aus Raps hergestellt, daher wird die Bezeichnung Rapsölmethylester (RME) häufig gleichgesetzt. Mit Blick auf die Abgasnachbehandlung bei Dieselmotoren und damit speziell das Emissionsverhalten sowie Beladung und Regeneration des Partikelfilters lassen sich durch die veränderten Eigenschaften von RME auch Unterschiede zu konventionellem DK vermuten.

In [26] ist ein 4 Zylinder 1,9 l TDI-Reihenmotor mit 85 kW und Pumpe-Düse-Einspritzung hinsichtlich des Regenerationsverhaltens sowie der Beladung des Additiv unterstützten SiC-Partikelfilters im RME- bzw. DK-Betrieb untersucht worden. Die Partikelfilterregeneration ist in diesen Versuchen diskontinuierlich mit Hilfe später Nacheinspritzung erfolgt. Durch die späte Einspritzung verbrennt der Kraftstoff unvollständig oder gar nicht, wodurch die Aufheizung des Abgasstromes durch Umsetzung der Kohlenwasserstoffe im Oxidationskatalysator

bzw. an der katalytisch wirkenden Schicht erfolgt. Bei dem verwendeten Additiv handelt es sich um das eisenbasierte „Satacen 2®“. In den Untersuchungen wurde ein deutlich langsames Beladungsverhalten von RME gegenüber DK festgestellt. Jedoch ist bei gleicher Rußmasse von RME und DK eine höhere Druckdifferenz bei RME über dem Partikelfilter aufgetreten. Dieses Verhalten ist auf die unterschiedliche Beschaffenheit des Rußes zurückzuführen. Im Vergleich konnte mit RME eine vollständigere Regeneration erfolgen, welche nach der Regeneration durch eine geringere Druckdifferenz und kleineres Filtergewicht nachgewiesen wurde. Während der Regeneration sind bei beiden Kraftstoffen keine deutlichen Unterschiede in den Schadstoffkonzentrationen festzustellen.

Auch bei diskontinuierlich arbeitenden Partikelfiltern lässt sich bis zu einem gewissen Maß ein ähnlicher Effekt wie bei den kontinuierlich arbeitenden CRT-Systemen (continuously regenerating trap) beobachten. Bei RME ist dieser CRT-Effekt gegenüber DK etwas geringer ausgeprägt. In den Versuchen ist dies durch die stärkere Absenkung von NO<sub>2</sub> nach Dieselpartikelfilter (DPF) bei DK ersichtlich. Der CRT-Effekt bewirkt einen kontinuierlichen Abbrand des Rußes. Im Temperaturbereich von 250-450 °C wird das vom Oxikat umgewandelte NO<sub>2</sub> mit dem Kohlenstoff zu CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> umgesetzt. Aus diesem Grund muss ausreichend NO<sub>2</sub> zur Verfügung stehen, um die Funktion sicherzustellen.

Das Emissionsverhalten von RME gegenüber DK verändert sich aufgrund der oben aufgeführten Eigenschaften. Bedingt durch die Betriebsstrategie

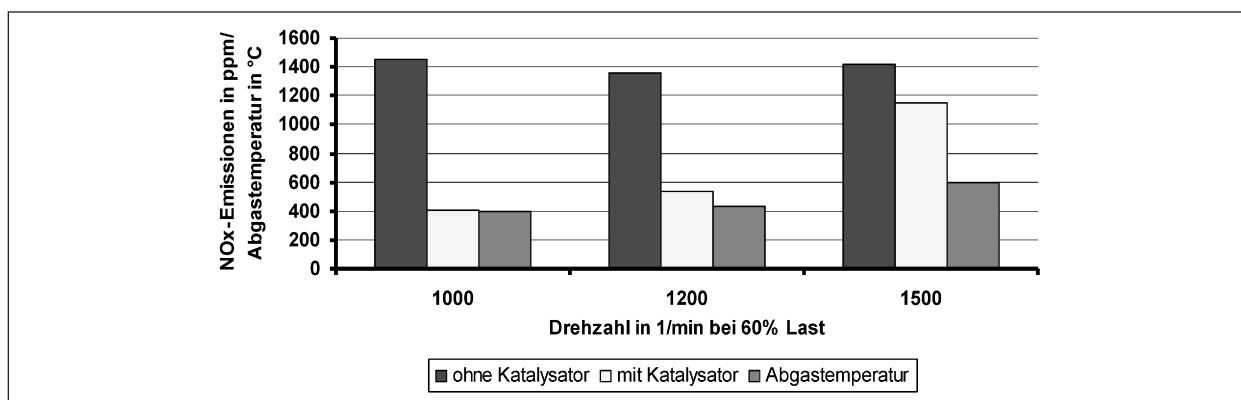


Bild 16: Drehzahleinfluss auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen mit und ohne Katalysator nach [29]

des Dieselmotors (Magerkonzept) wird dieser mit Luftüberschuss ( $\lambda > 1$ ) bzw. nicht stöchiometrischem Verbrennungsluftverhältnis betrieben. Die damit verbundene heterogene Verbrennung führt zu lokalen Unterschieden des Luft-Kraftstoff-Gemisches, wodurch die Entstehung von Stickoxiden begünstigt wird. Durch den höheren Sauerstoffanteil bei RME wird noch zusätzlicher Sauerstoff zur Verbrennung zugeführt, was ein lokales Ansteigen der Verbrennungstemperaturen und somit höhere Stickoxidemissionen gegenüber DK zur Folge hat. Die oben aufgeführte höhere Cetanzahl und der zusätzlich eingebrachte Sauerstoff verringern CO- und HC-Emissionen sowie den Rußausstoß.

Verschiedene Literaturstellen bestätigen diese Zusammenhänge beim Rohabgas von Dieselmotoren. So wurde nach [27] ein Vierzylinder Motor der Firma Mercedes Benz vom Typ OM 904 LA (Nutzfahrzeugmotor) mit 125 kW Turboaufladung und Ladeluftkühlung untersucht. Als Ergebnis wurde für RME gegenüber DK eine Erhöhung der Stickoxidemissionen von 10 % festgestellt. Eine Absenkung ist dagegen bei HC von 50 %, CO von 40 % und Partikelemissionen von 40 % aus diesem Versuch bekannt. Weiterhin standen nach [28] ein 6-Zylinder-Motor der Firma Mercedes Benz vom Typ OM 906 LA (Nutzfahrzeugmotor) mit 205 kW mit Turboaufladung und Ladeluftkühlung sowie der gleiche Motor in [27] zur Verfügung. Die Ergebnisse bestätigen tendenziell eine Steigerung der Stickoxidemission sowie eine Absenkung von HC, CO und Partikel.

In [29] wurde ein Nutzfahrzeugmotor vom Typ TBD 616 der Motorenwerke Mannheim AG (8-Zylinder-Motor in V-Anordnung) auf den Betrieb als 4-Zylinder-Reihenmotor umgebaut und verschiedenen Testläufen mit Biodiesel unterworfen. Aufgrund der Direkteinspritzung, Aufladung und Abgasnachbe-

handlung mittels Oxidationskatalysators und Partikelfilters zeigt diese Konfiguration deutliche Übereinstimmungen mit einer Euro-5-Applikation und lässt Schlussfolgerungen auf die Veränderungen durch den Betrieb mit Biodiesel zu. Der im Biodiesel enthaltene Sauerstoff verändert das Verbrennungsluftverhältnis lokal in Richtung mager. Die Folge sind veränderte Rohemissionen, wobei sich für CO und HC ein Vorteil durch den zusätzlichen Sauerstoff im Verbrennungsvorgang ergibt.

Die Konvertierungsrate für CO- und HC-Emissionen lag bei 200 °C bei ca. 60 % und ist bei ca. 600 °C auf 90 % angestiegen. In Bild 16 ist mit steigendem Massenstrom bzw. steigender Drehzahl ein Abfall der NO<sub>x</sub>-Konvertierungsrate aufgrund der kürzeren Verweildauer des Abgases im Katalysator zu beobachten. Die Stickoxidumwandlung erfolgt bei diesem System passiv durch den CRT-Effekt, wobei die Umwandlung im Temperaturbereich von 250-450 °C und bei einem Verhältnis von NO<sub>2</sub>/Ruß > 12 am effektivsten abläuft. Beim CRT-Effekt wird der Kohlenstoff mit dem im vorgeschalteten Oxidationskatalysator gebildeten NO<sub>2</sub> kontinuierlich umgesetzt.

In [30] wurde das Verhalten eines Euro-4-Nutzfahrzeug-Motors mit Harnstoffeinspritzung (SCR) untersucht. Verwendet wurde ein Motor der Firma IVECO vom Typ Tector Engine F4A mit Direkteinspritzung. In Bild 17 wurde als Ergebnis eine Reduzierung der HC- und CO-Emissionen festgestellt. Die Euro-4-Grenzwerte HC mit 0,46 g/kWh und CO mit 1,5 g/kWh wurden durch den verwendeten RME-Kraftstoff nicht überschritten. Bei den Stickoxidemissionen hingegen wurde der Euro-4-Grenzwert mit 3,5 g/kWh überschritten. Die Konvertierung des Katalysators ist nach 1.000 Betriebsstunden, wie in Bild 18 ersichtlich, signifikant gesunken. Sehr deutlich gestiegen ist der Ammoniakanteil nach Katalysator.

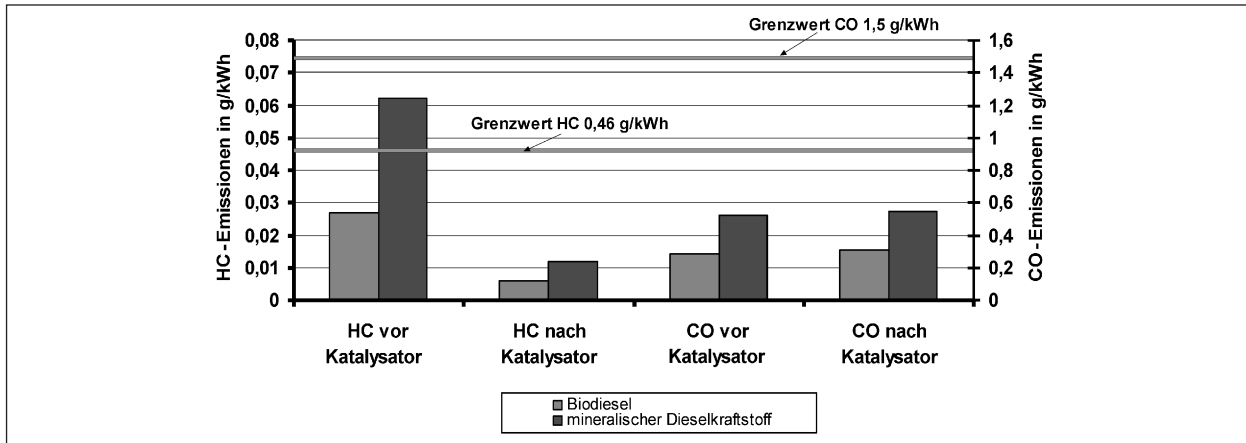


Bild 17: HC-/CO-Vergleich Biodiesel und mineralischer Diesel nach [30]

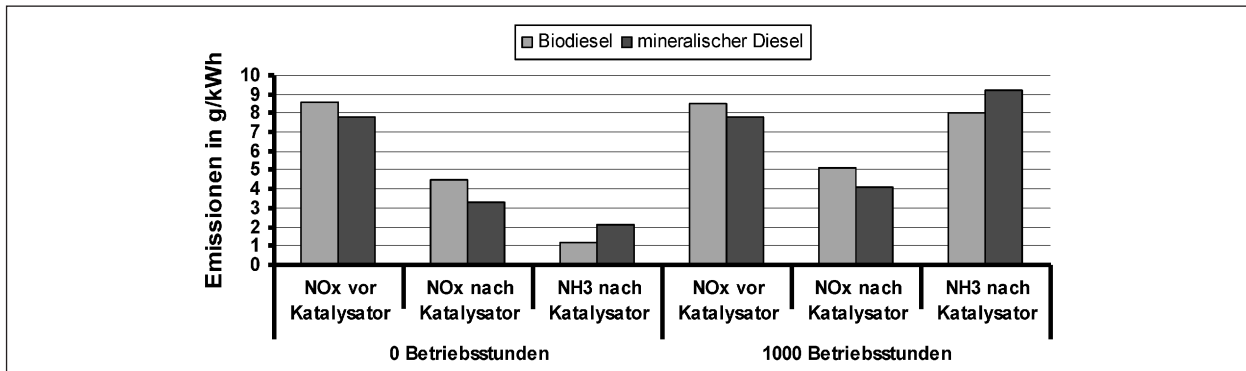


Bild 18: Langzeitverhalten eines Euro-4-Dieselmotors mit SCR nach [30]

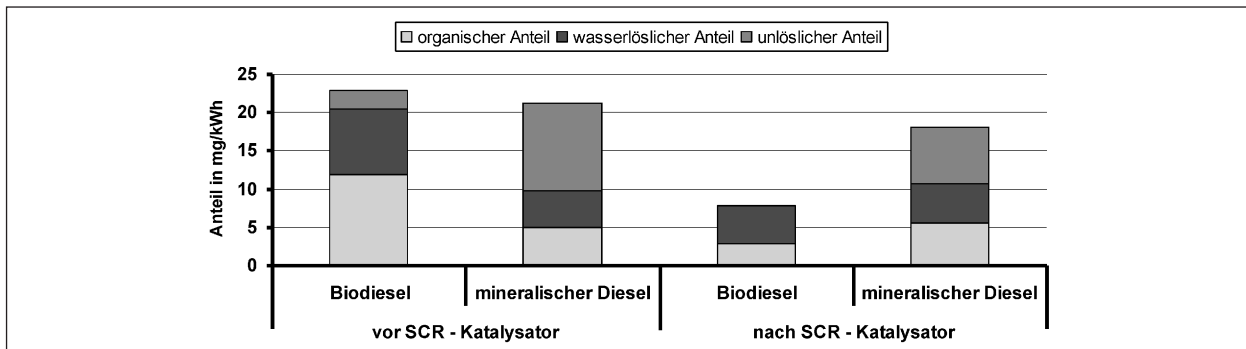


Bild 19: Einfluss des SCR-Katalysators auf Partikelzusammensetzung bei verschiedenen Kraftstoffqualitäten nach [30]

In Bild 19 wird ersichtlich, dass bei Biodiesel der organische sowie der wasserlösliche Teil der Partikel höher ist, diese aber durch den Katalysator besser konvertiert werden. Bei Verwendung von DK werden hauptsächlich nur unlösliche Stoffe umgewandelt. Bei genauer Analyse des wasserlöslichen Teils wurde bei Verwendung von Biodiesel ein erhöhter Phosphoranteil vor dem SCR-Katalysator bzw. ein reduzierter Phosphoranteil nach Katalysator festgestellt. Diese Reduzierung ist mit der Konvertierung und Anlagerung an die katalytische Schicht im Katalysator zu begründen, was zur Vergiftung des Katalysators führt.

Nach [33] wurde festgestellt, dass der chemische Alterungsprozess durch Ablagerungen im Eingangsbereich des Katalysators hervorgerufen wird. Die Ablagerungsschichten setzen sich dabei aus schmieröl- und treibstoffbasierten Additivelementen wie Zink (Zn), Magnesium (Mg), Calcium (Ca) und Phosphor (P) zusammen. Bei Phosphor ist zu beachten, dass dieser in den tieferen Schichten der katalytisch wirksamen Beschichtung eingelagert wird. Die Konvertierung des Katalysators wird durch die Einlagerung von Phosphor herabgesetzt. In Bild 20 wird dies aus den größer werdenden Anteilen an Phosphor in Form von Phosphat nach

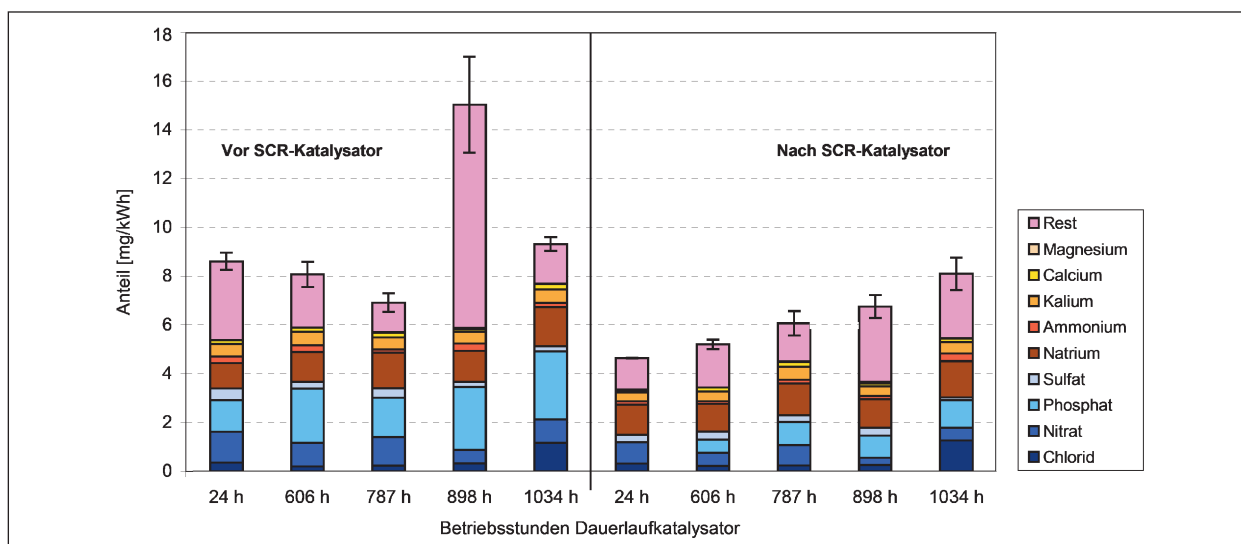


Bild 20: Betriebszeitabhängige Aufschlüsselung wasserlöslicher Partikelanteile vor/nach SCR aus [33]

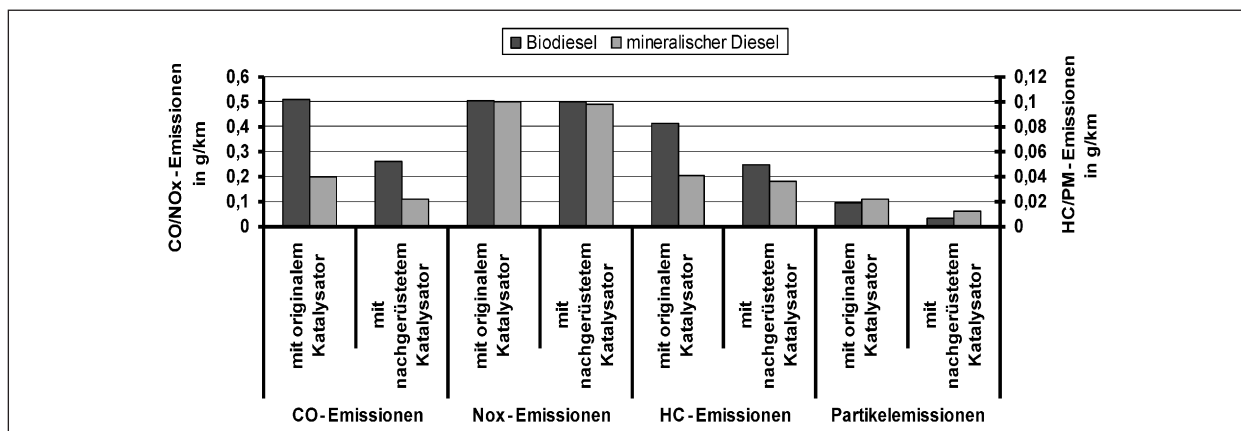


Bild 21: Einfluss der Katalysatorbauart auf CO/NO<sub>x</sub>- und HC/PM-Emissionen nach [35]

dem Katalysator deutlich. Daraus folgt, dass zusätzliche Verunreinigungen den positiven Aspekt der Schwefelfreiheit nahezu ausgleichen oder überkompensieren können.

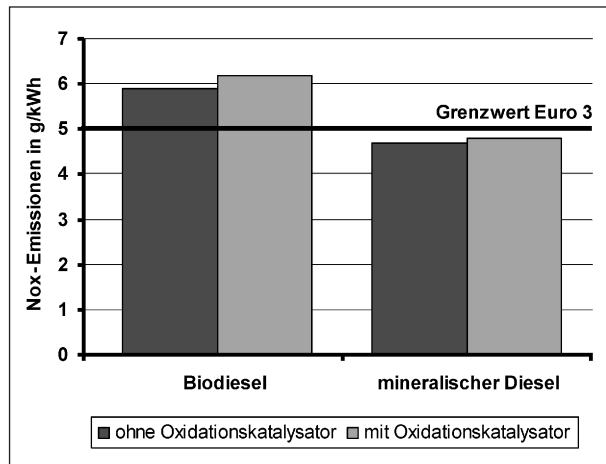
In [34] und [35] wurde in zwei Versuchsreihen mit einem Golf 4 TDI Euro 3 mit 74 kW und 125.000 km Laufleistung bzw. 66 kW und 110.000 km Laufleistung der Einfluss von Biodiesel auf die Abgasemission von Fahrzeugen mit serienmäßigem Oxidationskatalysator und einem nachgerüsteten System bestehend aus Oxidationskatalysator und Rußpartikelfilter untersucht. In Bild 21 sind die Ergebnisse von [35] dargestellt.

Als Ergebnis wird ersichtlich, dass bei Biodiesel CO- und HC-Emissionen im Vergleich zu DK angestiegen sind. Dies wird mit der erhöhten Siedekennlinie von Biodiesel und der damit verbundenen schlechteren Gemischbildung erklärt. Die Partikelemissionen konnten aufgrund des größeren Sauer-

stoffanteils sowie der leichter umzuwandelnden organischen Bestandteile reduziert werden.

In [34] ist nach 10.000 km ein zugesetzter Kraftstofffilter aufgetreten, wobei dies mit erhöhten Verunreinigungen im Biodiesel zu erklären ist. Diese Verunreinigungen im Kraftstoff sind nach [36] durch die Lösungsmittelleigenschaften und die damit verbundene reinigende Wirkung des Biodiesels auf das Kraftstoffsystem zurückzuführen. Aufgrund des dadurch entstandenen verringerten Durchsatzes magerte laut [34] das Kraftstoff-Luftgemisch ab und führte zu einem Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen.

In [37] wurde ein Euro-3-Nutzfahrzeugmotor der Firma Mercedes Benz vom Typ OM 906 LA untersucht. In diesen Versuchen konnte eine Minderung von HC- und CO-Emissionen nachgewiesen werden, was einem gegenläufigen Trend im Vergleich zu [35] entspricht. Partikelzahl und Partikelmasse sind bei Einsatz von RME abgesunken. Der NO<sub>x</sub>-



**Bild 22:** Einfluss des Katalysators auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen bei einem Euro-3-Nutzfahrzeugmotor nach [37]

Grenzwert für Euro 3 mit 5 g/kWh konnte wie in [38] beschrieben nicht eingehalten werden. Für RME ist bei diesem Motor eine Reduzierung der gesetzlich limitierten Emissionen mit Ausnahme von NO<sub>x</sub> festzustellen.

In [71] wurden Untersuchungen mit verschiedenen Beimischungskomponenten und Beimischungsanteilen in Hinsicht auf limitierte und nicht limitierte Schadstoffe durchgeführt. Als Versuchsträger kamen dabei Nutzfahrzeugmotoren der Firma Daimler vom Typ OM 906 LA mit der Abgasnorm Euro 3 sowie von MAN vom Typ D0836 LFL 51 mit der Abgasnorm Euro 4 zum Einsatz. Die verschiedenen Beimischungskomponenten auf Basis von Sojamethylester (SME), Palmölmethylester (PME), Kokosnussölmethylester (KME) und Rapsölmethylester (RME) sind im Vergleich zu konventionellem DK untersucht worden. Die Abgasemissionen von CO, HC und PM werden gegenüber DK deutlich verringert und bleiben unter den vorgeschriebenen Grenzwerten. Bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen ist ein signifikanter Anstieg bei SME, PME und RME zu verzeichnen, die Emissionen liegen über dem Euro-3-Grenzwert. Bei KME wird der Grenzwert nur knapp unterschritten. Für KME und PME sind die geringsten Schadstoff-Emissionen aufgetreten. Als Ergebnis konnten lineare und nicht lineare Zusammenhänge abgeleitet werden. Als linearer Zusammenhang stellt sich mit steigendem PME-Gehalt ein Absinken von CO, HC und PM ein. Bei den Stickoxiden konnte ein Minimum bei PME20 festgestellt werden. Bei SME hingegen lässt sich nur für die NO<sub>x</sub>-Emissionen ein linearer Zusammenhang feststellen. Ein Maximum der Schadstoffe konnte bei CO, HC und PM bei SME10 im Vergleich zu DK festgestellt werden, wobei bei reinem SME

die geringsten Schadstoffemissionen aufgetreten sind. Mit steigendem RME-Gehalt sind deutliche Absenkungen der HC-Emissionen sowie ein Ansteigen der NO<sub>x</sub>-Emissionen zu verzeichnen. Die Partikelzahl ist bei RME für die Beimischungen von 5 und 20 % (vol.) signifikant erhöht.

In einer weiteren Untersuchung sind die Emissionen mit gealtertem RME und den Additiven Ethanol und n-Butanol getestet wurden. Dabei ist der Kraftstoff B20 und B20E2B2 welcher mit den oben genannten Additiven versetzt ist, im frischen Zustand, sowie künstlich gealtert zum Einsatz gekommen. Im Ergebnis hat die Alterung keinen Einfluss auf die limitierten Schadstoffemissionen gezeigt. Hinsichtlich der Partikelemissionen konnten für den gealterten RME-Kraftstoff Verringerungen im Vergleich zum frischen Kraftstoff festgestellt werden.

In Bild 23 sind die Emissionen beim Betrieb mit verschiedenen Biodieselmotoren dargestellt. Die Versuche in diesem Forschungsprojekt wurden dabei an Nutzfahrzeugmotoren, einem Daimler OM 906 LA, Abgasnorm Euro 3 sowie einem MAN D0836 LFL 51 mit der Abgasnorm Euro 4, durchgeführt. Nach [84] erhöhten sich dabei die NO<sub>x</sub>-Emissionen bei einem teils deutlichen Absinken aller weiteren limitierten Schadstoffemissionen. Es zeigt sich auch, dass die Abgasemissionen zwischen den verschiedenen Kraftstoffen einen ähnlichen Trend aufweisen, aber dennoch signifikante Unterschiede vorhanden sein können. Zum Beispiel ist bei KME der Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emission schwächer ausgeprägt bei gleichzeitig höherem Minderungspotenzial bezüglich der Partikelemission. Die Messungen mit dem Versuchsträger OM 906 LA zeigen Bild 23 und Bild 24.

Des Weiteren wurde in diesem Projekt die Partikelanzahlverteilung bewertet, wobei analog zur Betrachtung der Partikelmasse deutliche Vorteile bei Verwendung der Biodieselmotoren festgestellt werden konnten. Auch konnte dargelegt werden, dass das Minderungspotenzial hinsichtlich der Partikelmasse sowie der Partikelanzahl mit steigender Beimischung zunimmt.

Mehrere Literaturstellen [66, 67, 68, 69, 70, 85] belegen das beschriebene Emissionsverhalten von Biodiesel im Vergleich zu DK. Demnach ist eine Reduzierung der Emissionen von CO-, HC-Partikel, Partikelanzahl sowie ein Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Biodiesel gegenüber DK zu erwarten. Die einzelnen Größenbereiche der Änderungen von Biodiesel zu DK gehen weit auseinander. Bei einem

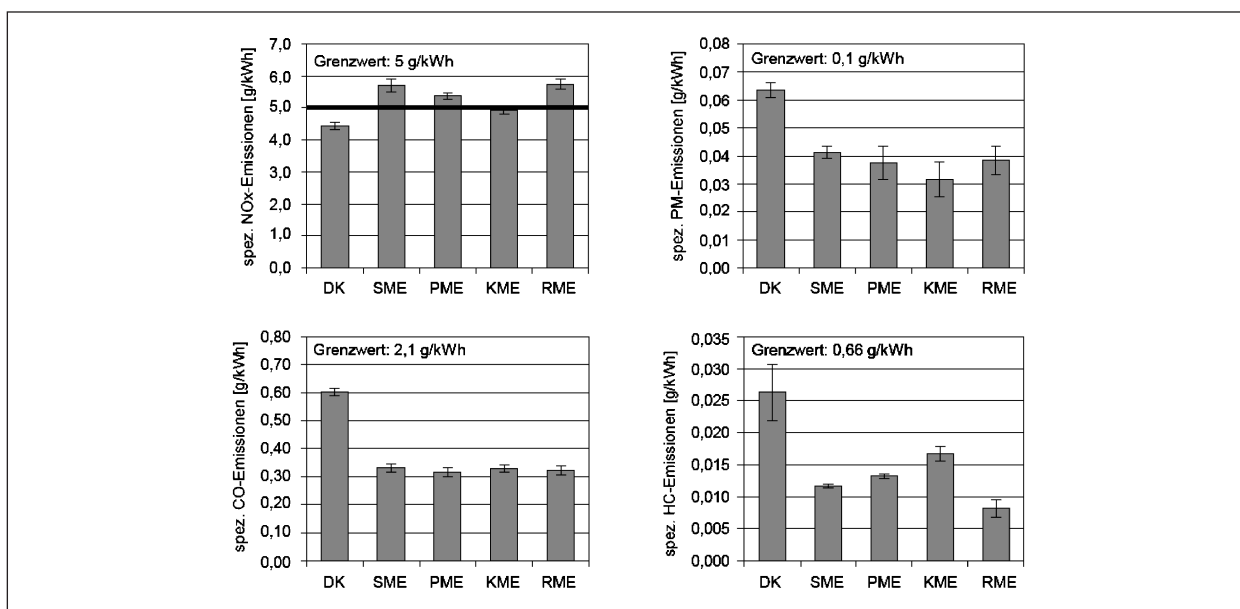


Bild 23: Vergleich der Emissionen von DK, SME, KME und RME [84]

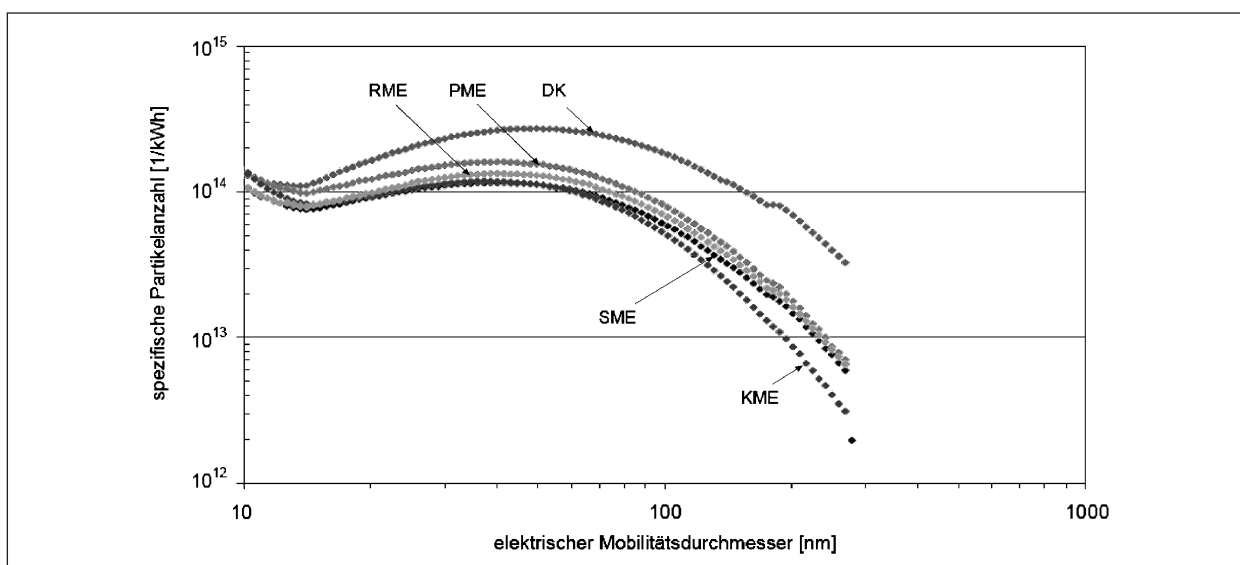


Bild 24: Partikelanzahlverteilung von DK, SME, KME und RME [84]

Volumenanteil von 20 % Biodiesel (B20) ist eine prozentuale Verringerung von CO im Bereich von 0 bis 50 %, von HC im Bereich von 0 bis 30 %, Partikel im Bereich von 16 bis 33 % und ein Anstieg bei NO<sub>x</sub> von 2 bis 13 % zu verzeichnen. Vereinzelt wird entgegen diesen Ergebnissen auch von gleichbleibenden bzw. steigenden CO- und HC-Emissionen berichtet.

### HVO-Kraftstoff

Zusätzlich zu den beschriebenen Versuchen wurde in [84] der derzeit relevante Blend B7 mit 3 % des neuartigen HVO-Kraftstoffes versetzt

(vgl. Kapitel 2.1.3). Die Ergebnisse mit dem Versuchsträger OM 906 LA werden in Bild 25 veranschaulicht.

Es wird deutlich, dass bei diesem Blend (B7HVO) keine negativen Auswirkungen bezüglich des Blends B7 festgestellt werden konnten. Ebenfalls befand sich die Partikelgrößenverteilung auf dem Niveau des Blends B7.

Es scheint, als wäre der HVO-Kraftstoff eine Alternative für eine weitere Steigerung der biogenen Komponente im Dieselmotorkraftstoff. Durch die geringere Siedekennlinie des HVO-Kraftstoffes sollte die Gefahr der Ölverdünnung bezüglich der Kraftstoff-



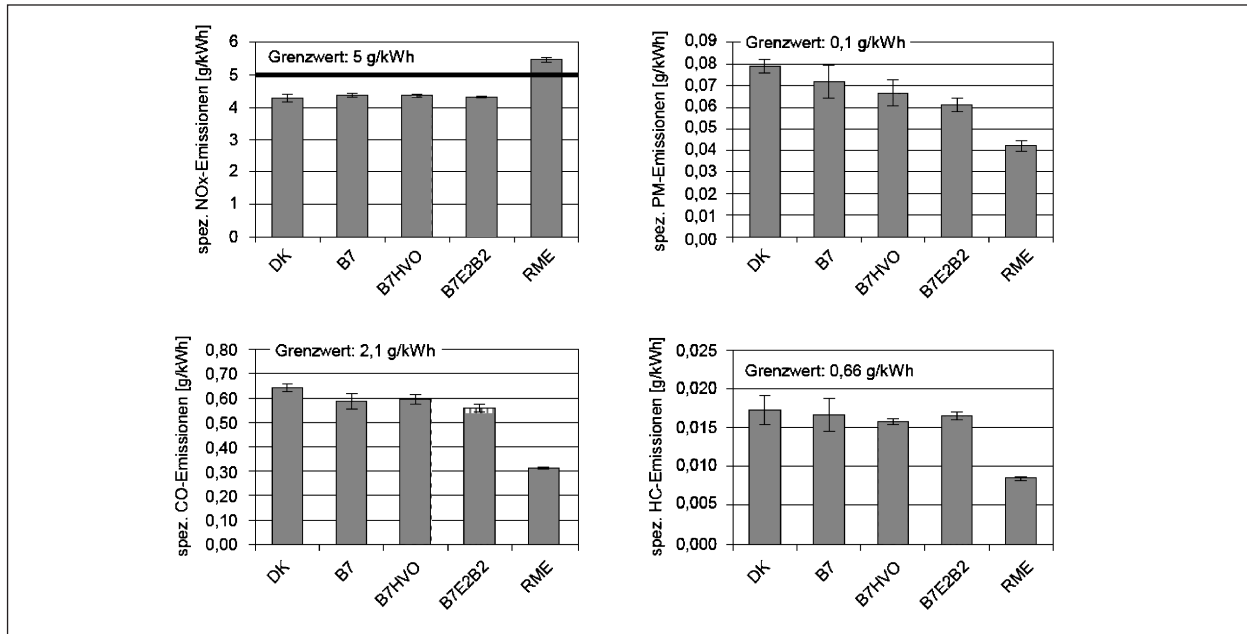


Bild 25: Emissionen bei Beimischung von HVO zu B7 [84], Grenzwerte nach Euro 3

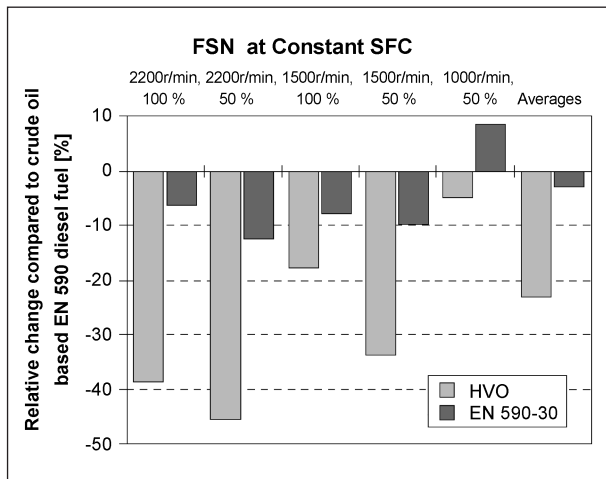


Bild 26: Einfluss auf die Partikelemission in den Rohabgasen [86]

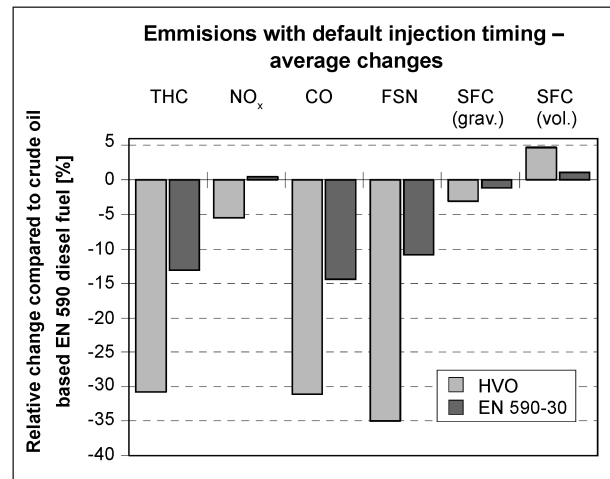


Bild 28: HC-, NO<sub>x</sub>-, CO-Partikel, spezifischer Kraftstoffverbrauch in Verbindung mit HVO und EN 590-HVO30 bei Variation des Einspritzzeitpunktes [86]

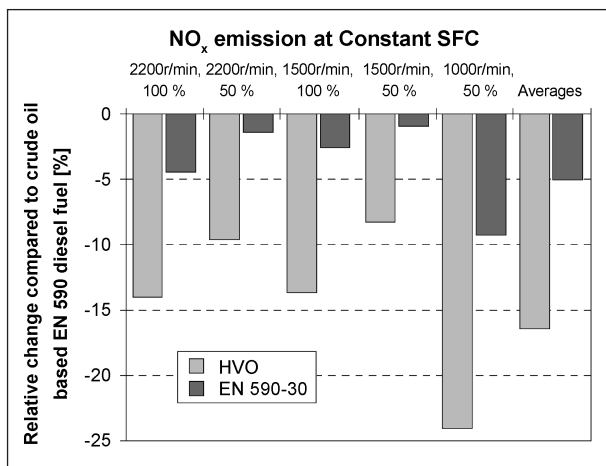


Bild 27: Einfluss HVO auf NO<sub>x</sub> in den Rohabgasen [86]

nacheinspritzung bei der Partikelfilterregeneration nicht so stark ausgeprägt sein.

Die Bilder 26 bis 28 resultieren aus Versuchen, welche mit einem turboaufgeladenen 8.4 Liter, 6-Zylinder-Nutzfahrzeugmotor aufgenommen wurden, wobei keine Abgasnachbehandlungssysteme verbaut waren und auch keine Abgasrückführung zum Einsatz kam [86]. Es wurde festgestellt, dass mit dem HVO-Kraftstoff sowie einem Blend aus einem konventionellen DIN-EN-590-Kraftstoff mit 30 % HVO erhebliche Emissionsminderungen erzielbar sind.

Es zeigt sich, dass in den Versuchen mit reinem HVO eine NO<sub>x</sub>-Minderung bei gleichzeitiger Sen-

kung der Partikelemissionen gegenüber Dieselmotoren festgestellt werden konnte.

Auch der Kraftstoffblend aus 30 % HVO und DIN-EN-590-Kraftstoff zeigt Potenzial bezüglich einer Emissionsminderung. Hinsichtlich der sehr relevanten Schadstoffkomponente  $\text{NO}_x$  konnte jedoch nicht in allen Versuchen ein positives Potenzial entdeckt werden. Aufgrund der geringen Dichte und des etwas geringeren volumetrischen Heizwertes von HVO steigt natürlich der volumetrische Kraftstoffverbrauch bei der Verwendung von 100 % HVO [86].

### Bio-Alkohole

Die Bezeichnung Bioalkohol ist ein markttypischer Begriff und wird im Zusammenhang mit Biokraftstoff auch als Bioethanol bezeichnet. Ethanol ist eine organische Verbindung mit der Summenformel  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  und wird hauptsächlich als Beimischungskomponente für Ottokraftstoff verwendet. Die Gemischbildung im Ottomotor erfolgt entweder außerhalb, durch Einspritzung in das Saugrohr, oder direkt im Brennraum. Bei der Saugrohreinjection liegen Luft und Kraftstoff im gleichen Mischungsverhältnis vor ( $\lambda \approx 1$ ). Die Direkteinspritzung bietet den Vorteil, den Motor durch die Qualitätsregelung zu betreiben. Im Teillastbereich kann der Motor somit ungedrosselt Luft ansaugen, wodurch ein globales Luftverhältnis von ( $\lambda > 1$ ) entsteht. Durch die alkoholische Sauerstoffverbindung im Ethanol besitzt auch der Blendkraftstoff gegenüber konventionellem Ottokraftstoff einen höheren Sauerstoffanteil. Der in den Verbrennungsvorgang zusätzlich eingebrachte Sauerstoff führt teilweise zu lokalem Sauerstoffüberschuss, wodurch die Brennraumtemperaturen steigen und somit die Stickoxidbil-

dung unterstützt wird. In [39] haben VW-FSI-Motoren, in einem Bauabschnitt von wenigen Jahren, für E10 keine Freigabe, was auf den beschriebenen Effekt zurückzuführen ist. Ferner kann der Phosphorgehalt zu einer Vergiftung des DeNO<sub>x</sub>-Katalysators führen, mit dem diese Fahrzeugbaureihe ausgestattet ist.

In [41] wurden die Emissionsauswirkungen von Ethanol auf einen 4-Zylinder-Motor mit 1,5 l Hubraum vom Typ Toyota Tercel 3A mit einer Leistung von 52 kW untersucht. In der Auswertung ergab sich bei einer Beimischung von 20 % Ethanol zu fossilem Kraftstoff folgender Sachverhalt: Wie in Bild 29 ersichtlich, sinken CO- und HC-Emissionen bis 20 % Ethanolbeimischung und danach steigen diese wieder signifikant an. Aufgrund der Tatsache, dass Schadstoffe in der EU in g/kWh oder in g/km angegeben werden, ist die Darstellung in Bild 29 durch die Angabe der HC-Emissionen in ppm kritisch zu bewerten. Bei allen Schadstoffen ausgenommen HC ist die Schadstoffdichte bei verschiedenen Ethanolblends annähernd gleich und dadurch unkritisch. Die HC-Dichte bei der Berechnung der Schadstoffmassen bei Ethanol beträgt bei E5-Benzin etwa 0,63 g/l und bei E85 etwa 0,93 g/l. Dieser signifikante Unterschied von ca. 1/3 ist bei der Umrechnung von ppm in g/kWh oder g/km von großer Bedeutung.

Erfolgt diese Umrechnung, ergeben sich mit steigendem Beimischungsanteil annähernd gleiche Werte für die HC-Emission in g/km. Dadurch ist der in Bild 29 dargestellte HC-Emissionsverlauf, welcher in ppm angegeben ist, nur bedingt aussagekräftig. Dies muss natürlich in diesem Kapitel bei der Betrachtung der verschiedenen Darstellungen beachtet werden.

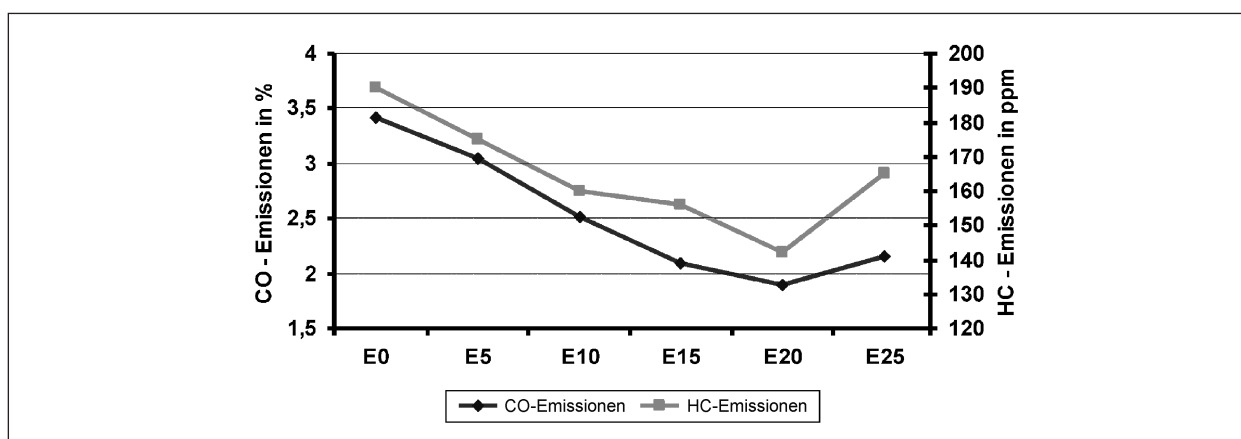


Bild 29: Emissionsvergleich Ethanolbeimischungen nach [41]

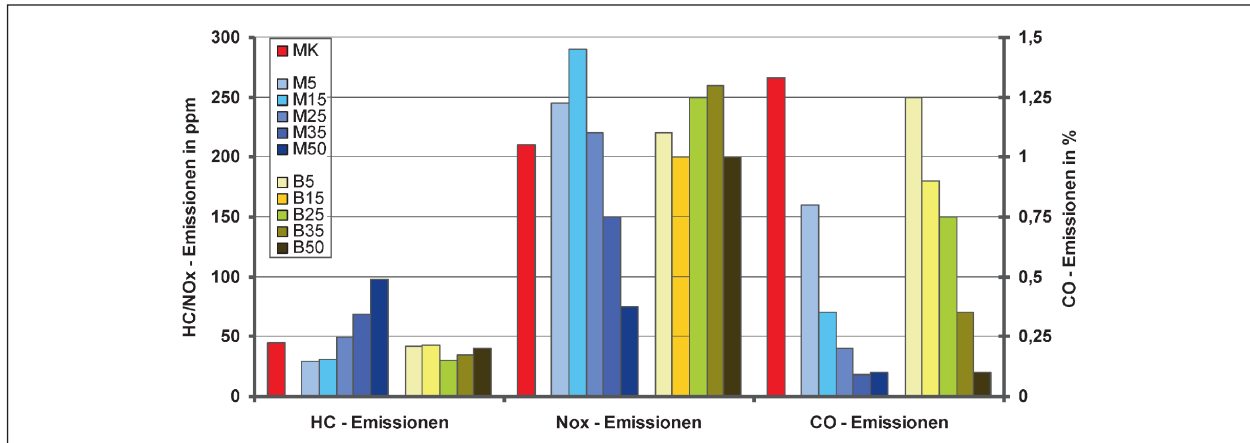


Bild 30: Emissionsvergleich Alkoholbeimischungen aus [40]

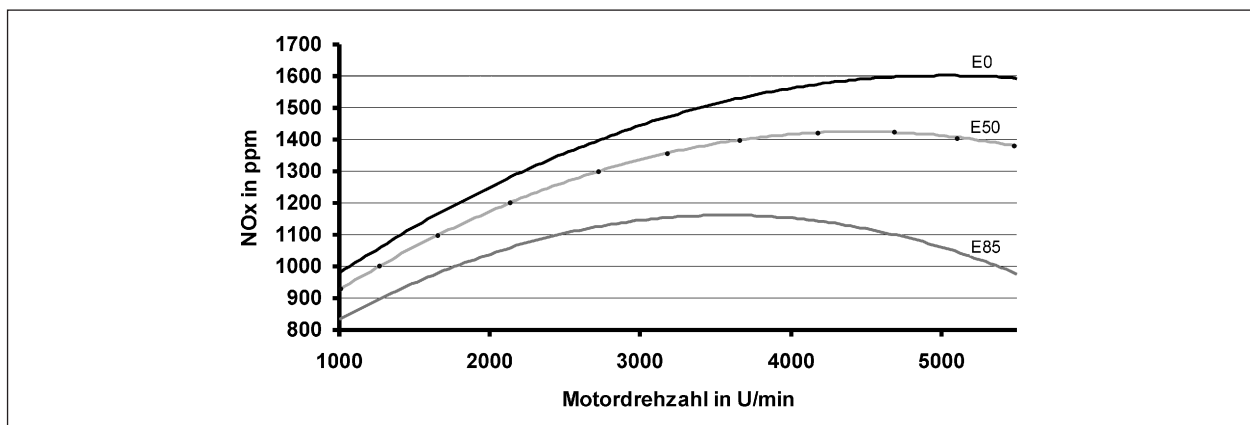


Bild 31: Einfluss des Ethanolanteils an der  $\text{NO}_x$ -Emission aus [43]

In [40] wurde ein Einzylindermotor mit  $340 \text{ cm}^3$  bei Verwendung von Methanol ( $\text{CH}_4\text{O}$ ) und Butanol ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ ) als Kraftstoff untersucht. Diese beiden Stoffe zählen wie Ethanol zu den Alkoholen und sind deshalb in den Abgasemissionen vergleichbar. In Bild 30 sind die Ergebnisse der Blends von Methanol und Butanol dargestellt. Die Bezeichnung B5 steht für einen volumetrischen Beimischungsanteil von 5 % Butanol sowie M25 einen Anteil von 25 % Methanol und MK für reinen mineralischen Kraftstoff. Mit Blick auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen wird ein Maximum bei Methanol von 20 % und bei Butanol von 35 % Beimischungsanteil deutlich, welche im Vergleich den mineralischen Kraftstoff übersteigen. Die CO-Emissionen sind gegenüber dem mineralischen Kraftstoff deutlich geringer und sinken mit größerem Beimischungsanteil weiter ab. HC steigt ab einer Methanolbeimischung von 25 % über den Wert des mineralischen Kraftstoffes. Bei Butanol ist hingegen ein annähernd gleiches Verhalten wie bei konventionellem Kraftstoff zu beobachten. Das Absinken der  $\text{NO}_x$ - und CO-Emissionen

bei Methanol ist auf das bessere Siedeverhalten zurückzuführen.

Nach [43] wurden in einem Einzylindermotor die Ethanolmischungen E50 und E85 im Vergleich zu fossilem Kraftstoff untersucht. Es bestätigte sich, dass CO- und HC-Emissionen mit steigender Ethanolbeimischung im Vergleich zu fossilem Kraftstoff sinken. Weiterhin wurden die Ergebnisse in [40] bestätigt, indem die Stickoxidemissionen, wie in Bild 31 ersichtlich, bei höheren Beimischungen geringer werden.

In [57] ist ein 4-Zylinder-Ottomotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung mit den Kraftstoffen E85 und Superbenzin (S98) auf sein Abgasverhalten untersucht worden. Als Ergebnis konnte eine Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen von bis zu 40 % festgestellt werden.

Die oben aufgeführten Ergebnisse lassen sich in [44] bestätigen. Hierbei wurde ein 4-Zylinder-Turbomotor mit Direkteinspritzung untersucht. Aufgrund

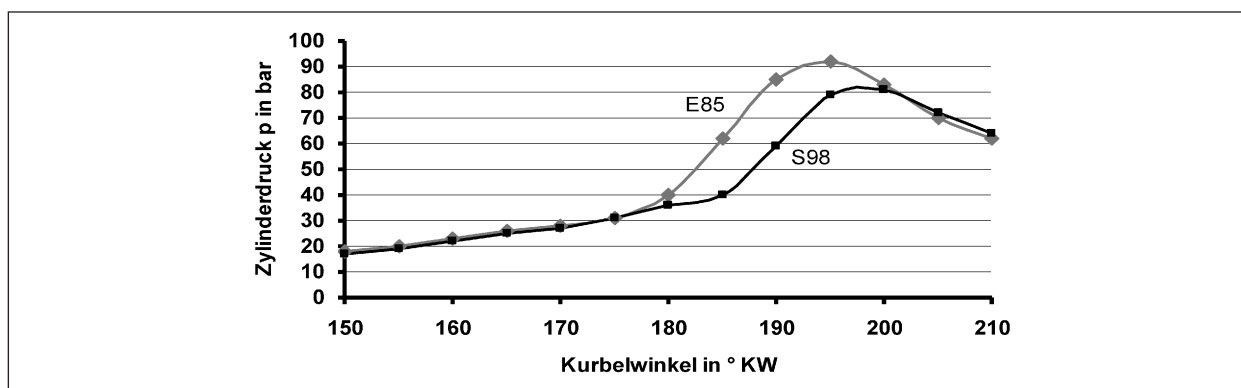


Bild 32: Zylinderdrücke E85/Super-Benzin aus [44]

der FlexFuel-Anpassung, d. h. geänderten Einspritzventilen und Einspritzpumpe, konnten bei geringer Last eine bessere Verdampfung des Kraftstoffes und somit eine bessere Gemischbildung erzielt werden. Daraus folgt eine Senkung der Stickoxidwerte gegenüber fossilem Kraftstoff. Durch den enthaltenen Sauerstoff steigen aufgrund der hohen Belastungen des Motors die entsprechenden Spitzendrücke, wodurch eine konstruktive Anpassung des Motors berücksichtigt werden muss. In Bild 32 ist der Verlauf des Zylinderdruckes im Vergleich von E85 zu Super-Benzin ersichtlich. Der Spitzendruck von E85 beträgt dabei 92 bar im Vergleich zu Super-Benzin von 81 bar.

Annähernd gleiche Erkenntnisse konnten nach [45] mit einer Honda CG125 aus dem Baujahr 2004, unter Verwendung von E10-Kraftstoff, und nach [46] durch ein weiteres 125-cm<sup>3</sup>-Motorrad, mit verschiedenen Ethanolbeimischungen, gewonnen werden. Grundsätzlich konnte die Reduzierung von CO-, HC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen festgestellt werden. Durch die bessere Motorsteuerung im Motorrad können die ethanolhaltigen Kraftstoffe mit höherer Klopfestigkeit für den Verbrennungsvorgang im erhöhten Maß genutzt werden. Dieses Verhalten ist hinsichtlich der Auslegung von Personenkraftwagen nicht vergleichbar.

### Biomass to Liquid – BtL

BtL-Kraftstoff ist aufgrund seines speziellen Herstellungsverfahrens (vgl. Kapitel 2.1.3) frei von schadstoffbildenden Bestandteilen wie Schwefel, Phosphor und Aromaten. Durch das Fehlen dieser Komponenten ergibt sich eine Reduzierung der Schadstoffemissionen. Aufgrund der Nutzung von Biomasse ist BtL nahezu CO<sub>2</sub>-neutral. Demnach wird bei der Verbrennung nur so viel CO<sub>2</sub> freige-

setzt, wie die Pflanzen bei ihrem Wachstum aufgenommen haben.

In [48] ist GtL (Gas to Liquid) als Kraftstoff zur Verwendung gekommen. Durch die Herstellung nach der Fischer-Tropsch-Synthese ist ein ähnliches Verhalten der Schadstoffemissionen im Vergleich zu BtL zu erwarten. In diesen Untersuchungen konnte ein VW Golf TDI mit Euro-3-Norm aufgrund der geringeren Schadstoffbestandteile die Abgasnorm Euro 4 erreichen. Folgende Reduzierung konnte erreicht werden: NO<sub>x</sub>-Emissionen um 6,4 %, HC-Emissionen um 63 %, CO-Emissionen um 91 % und der Partikelaustritt um 26 %. Diese Ergebnisse zeigen ein deutliches Potenzial für diesen Bio-Kraftstoff, welcher in naher Zukunft von größerer Bedeutung werden könnte.

### Biomethan

Nach [47] können Fahrzeuge, die für Erdgas ausgelegt sind, auch Biogas ohne technische Umrüstung nutzen. Methan wird als Ottokraftstoff eingesetzt und bietet aufgrund seiner Eigenschaften Vorteile. Durch die höhere Oktanzahl (von ROZ 130) können Wirkungsgrad und Leistung durch höhere Kompression gesteigert werden. Wird der Motor jedoch nicht explizit auf den Kraftstoff abgestimmt, werden durch den geringeren Heizwert ein höherer Kraftstoffverbrauch sowie eine geringe Leistung deutlich. Die Schadstoffemissionen können durch die bessere Verbrennung gesenkt werden. NO<sub>x</sub>-Emissionen zeigen eine leichte Reduzierung, wobei die HC-Emissionen sich um ca. 50 % senken lassen. Die CO-Emissionen verändern sich aufgrund des Motorbetriebs im fetten Bereich nicht. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz wird aufgrund des geschlossenen Kreislaufs gegenüber Erdgas nochmals gesenkt.

### 3.2.2 Dauerhaltbarkeit von Motor, AGN und Kraftstoffsystem

#### Pflanzenölkraftstoffe

Biogene Kraftstoffe haben durch ihre unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften nicht nur Einfluss auf das Abgasverhalten, sondern auch Auswirkung auf Funktion und Haltbarkeit von Motorkomponenten sowie kraftstoffführende Teile. Signifikante Unterschiede zeigen sich vor allem in der kinematischen Viskosität von Pflanzenöl, dieses erreicht erst ab ca. 100 °C, wie in Bild 33 ersichtlich, die gleichen viskosen Eigenschaften wie DK. Somit ergeben sich technische Einschränkungen hinsichtlich Fließ- und Pumpfähigkeit des Pflanzenölkraftstoffes zum Motor hin bzw. bei der Zerstäubung des Kraftstoffes im Brennraum.

Da Pflanzenölkraftstoff eine ca. 40 bis 80 K höhere Siedekennlinie aufweist, verdampft dieser langsamer und führt zu unzureichender Gemischbildung. Deshalb ist eine Anpassung der Einspritzkomponenten für Pflanzenölkraftstoff sinnvoll, um Motorschäden infolge von Ablagerungen oder durch Eintrag ins Motoröl zu verhindern [23]. Durch die höhere Viskosität von Pflanzenölkraftstoffen bei Umgebungstemperatur ergeben sich Probleme hinsichtlich der Einspritzung.

Wie aus Bild 34 ersichtlich, kommt es zu größeren Strahleindringtiefen als mit konventionellem DK. Die Strahleindringtiefe wird maßgeblich von der Viskosität, Oberflächenspannung sowie der Austrittsgeschwindigkeit beeinflusst. Rapsöl hat wie bereits erwähnt eine höhere Viskosität sowie Oberflächenspannung. Die größere Oberflächenspannung erschwert das Aufbrechen des Einspritzstrahles, wodurch es im Vergleich zu DK zur deutlichen Einschnürung und Verlängerung kommt. Durch die sig-

nifikante Verlängerung kann der Einspritzstrahl auf die kühle Zylinderwand gelangen und sich dort mit dem Schmierölfilm vermischen. Anschließend wird durch die Kolbenbewegung der vermischte Schmierölfilm in das Kurbelgehäuse gespült, wobei dies zum erhöhten Eintrag ins Motoröl führt. Durch das Anheben der Rapsöltemperatur auf ca. 70 °C können die Verlängerung und Einschnürung des Einspritzstrahles vermindert und damit der Einspritzverzug und die Gemischbildung positiv beeinflusst werden. Die Erkenntnisse haben Gültigkeit bei nocken gesteuerten Einspritzsystemen sowie bei der Common-Rail-Einspritzung. Somit ist eine für DK gefertigte Einspritzanlage bei Verwendung von Rapsöl keine Lösung hinsichtlich der Gemischbildung. Die Erwärmung des Rapsöls kann die Folgen mindern, aber nicht beseitigen. Um eine optimale Gemischbildung zu gewährleisten, müssten Düsengeometrie und Einspritzanlage optimiert werden.

Nach [23] ist eine Anpassung des Motors an Pflanzenöl mit Blick auf seine Haltbarkeit dringend erforderlich. Durch das Verdampfen von Pflanzenöl werden so genannte „Lackbildner“ freigesetzt. Als Folge davon entstehen, wie in Bild 35 ersichtlich, Verkokungen an Einspritzventilen, Kolben und Einspritzdüse sowie im Brennraum.

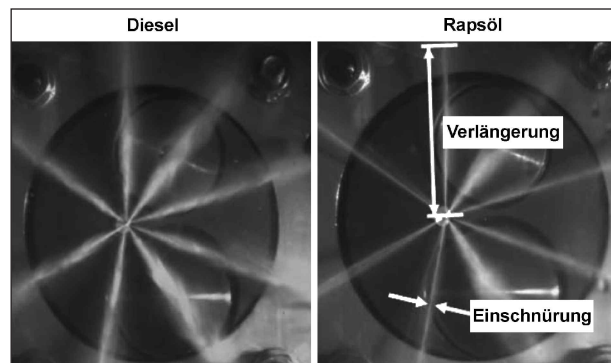


Bild 34: Verlängerte und eingeschnürte Einspritzstrahlen aus [23]

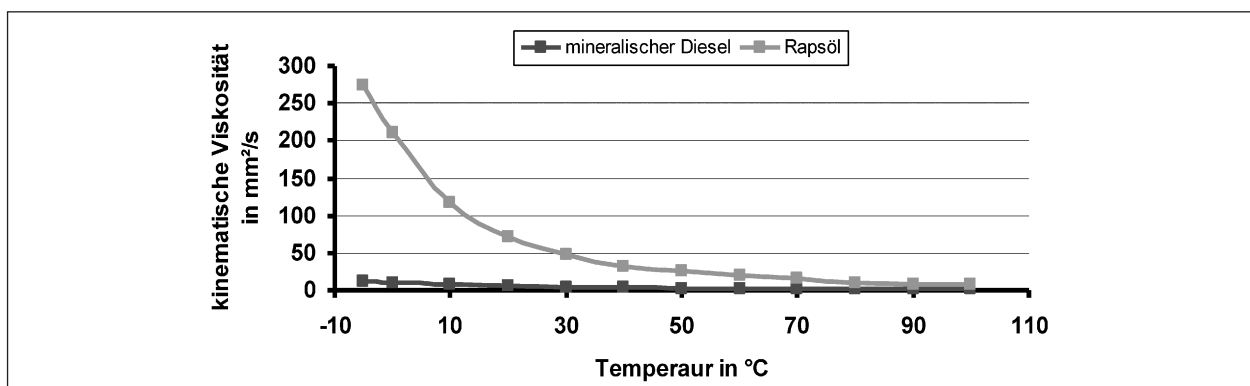


Bild 33: Viskosität Pflanzenöl/Diesel nach [23]

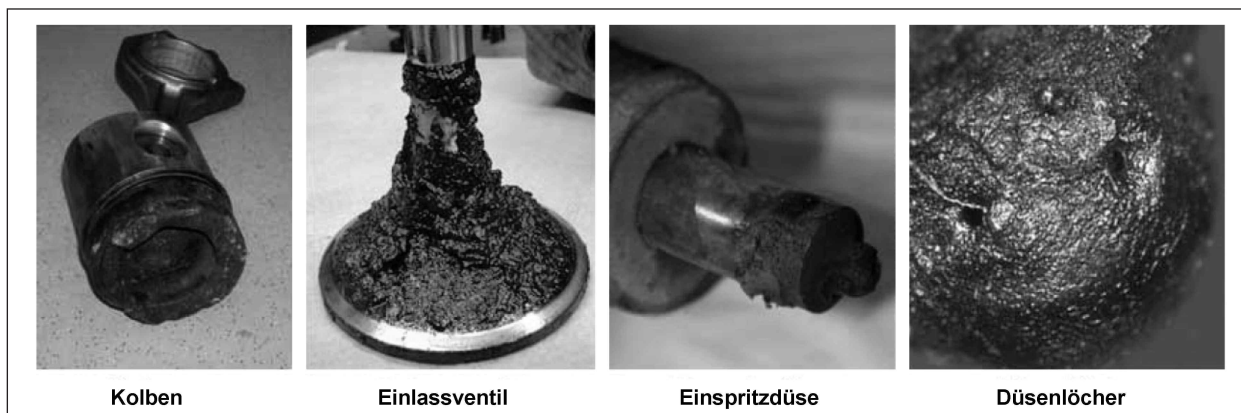


Bild 35: Verkokungen durch Pflanzenöl [23]

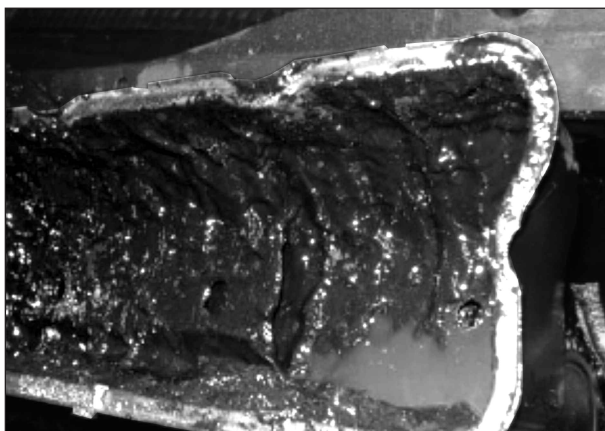


Bild 36: Polymerisation von Motoröl infolge Pflanzenöleintrags [23]

Durch Ablagerungen an der Einspritzdüse kann es zu einer Beeinträchtigung des Einspritzstrahles und der damit verbundenen Gemischbildung kommen. Ferner kommt es durch die Benetzung der Zylinderwand zu einem erheblichen Kraftstoffeintrag ins Motoröl. Dies kann durch die Viskositätsabnahme des Öles zum Abriss des Schmierfilms und als Folge der Überhitzung der entsprechenden Lagerstellen zu einem kapitalen Motorschaden führen. Weiterhin kann es durch den Kraftstoffeintrag ins Motoröl zur Ölverdickung, der so genannten „Polymerisation“, kommen.

Freie Fettsäuren führen zur Korrosion und reagieren mit Bestandteilen vom Motoröl. Das Motoröl wird dickflüssig bis hin zu einer gelartigen Flüssigkeit. In Bild 36 ist eine Ölwanne mit eingedicktem Motoröl dargestellt. In [49] wurde ein 6-Zylinder-Traktormotor mit 147 kW der Firma John Deere bei Betrieb mit Rapsölkraftstoff untersucht. Hinsichtlich der Injektoren ist ein Wechsel nach ca. 3.200 Betriebsstunden erforderlich. Ähnlich starke Ablagerungen traten in [50] schon nach 50 Betriebsstunden

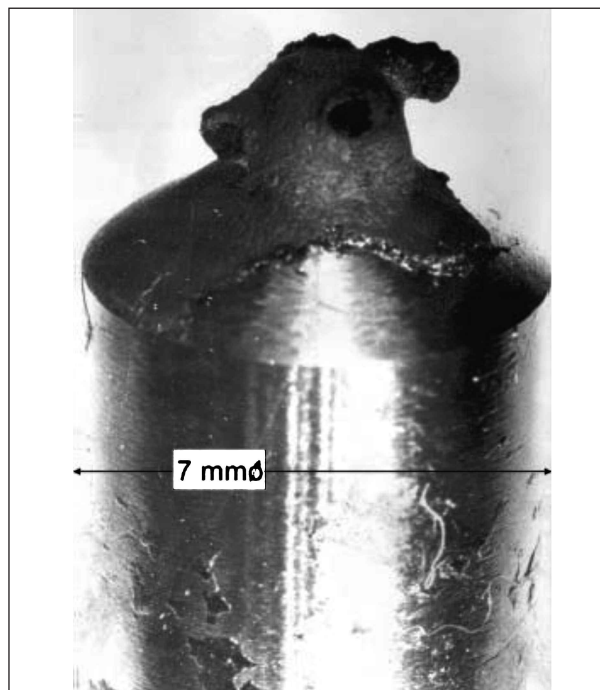


Bild 37: Ablagerungen durch Pflanzenöl an Einspritzdüse aus [50]

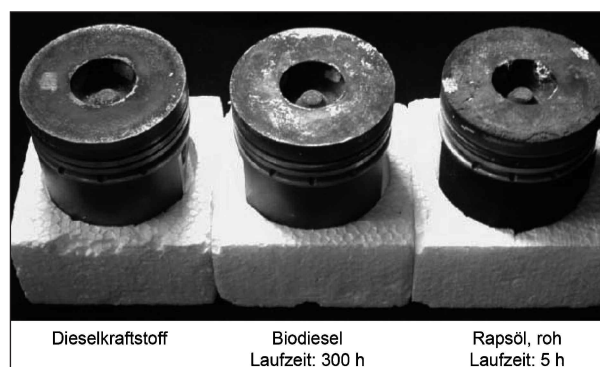


Bild 38: Vergleich der Kolbenoberfläche bei Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffen aus [50]

den mit Pflanzenöl wie in Bild 37 dargestellt auf. Weiterhin sind in Bild 38 Ablagerungen der Kolben

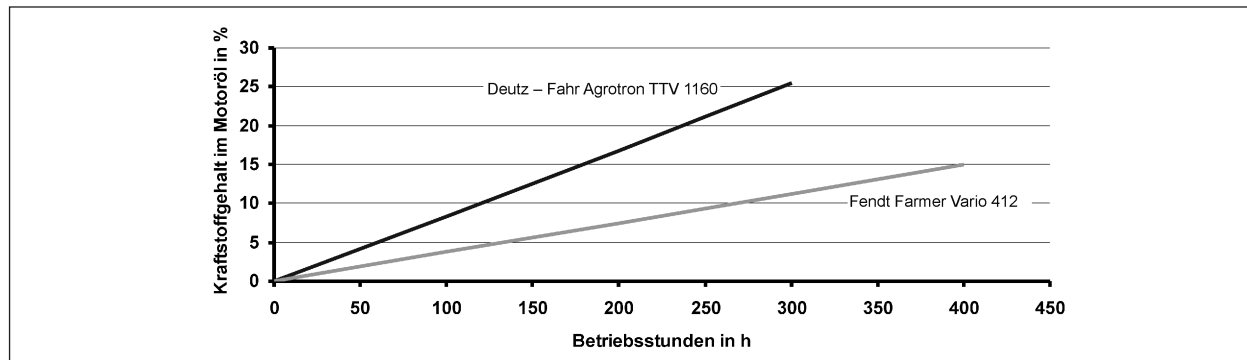


Bild 39: Pflanzenöleintrag in das Motoröl nach [51]

im Vergleich von DK, Biodiesel und Rapsöl aufgezeigt. Besonders auffällig sind die nach 5 Betriebsstunden starken Ablagerungen von Rapsöl.

In [49] wurde der Eintrag von Pflanzenölkraftstoff in das Motoröl an einem Traktor der Firma John Deere vom Typ 7920 mit 147 kW untersucht. Nach 700 Betriebsstunden ist ein Anteil von 7.5 % Kraftstoff im Motoröl aufgetreten. Dieser erhöhte Befund ist durch die Einspritzstrahlverlängerung aufgrund der veränderten Eigenschaften des Kraftstoffes zu erklären. Allerdings wurden in der Untersuchungsphase mehr als 8 Liter Motoröl nachgefüllt, wodurch sich das Ergebnis verfälscht.

In [51] wurden die Kraftstoffeinträge an Traktoren der Firma Deutz und Fendt vom Typ Agrotron TTV 1160 und Farmer Vario 412 im Betrieb mit Rapsöl untersucht. Der Kraftstoffeintrag betrug nach 250 Betriebsstunden 13 % bei Deutz sowie nach 350 Betriebsstunden 20 % bei Fendt. Hierbei wird ein Tausch des Motoröls aufgrund der schlechteren Viskosität nach ca. 200 Betriebsstunden empfohlen (s. Bild 39).

In [51] sind die charakteristischen Ablagerungen wie in [50] an den Injektoren zu erkennen. Dieser Effekt ist bei Deutz stärker aufgetreten als bei Fendt. Im Vergleich zu DK konnte an anderen Komponenten keine erhöhte Abnutzung festgestellt werden.

Aus diesen Ausführungen folgt somit ein besonderes Augenmerk auf Injektoren und deren Geometrie sowie Einspritzsteuerzeiten, um Wirkungsgrad, Abgasemissionen, Ablagerungsverhalten und vor allem die Ölverdünnung bei der Verwendung reiner Pflanzenölkraftstoffe an die Verwendung konventioneller Kraftstoffe anzupassen.

Aufgrund der großen Unterschiede in den physikalischen und chemischen Eigenschaften von Rapsöl

gegenüber konventionellem DK ist eine Nutzung in modernen Common-Rail-Motoren ausgeschlossen und selbst bei robusteren Landmaschinenmotoren nicht unproblematisch.

### Biodiesel

Derzeit darf in der Bundesrepublik Deutschland dem herkömmlichen DK maximal 7 Vol.-% Biodiesel beigemischt werden. Die Spezifikation für Biodiesel ist in der DIN EN 14214 bzw. für Dieselmotorkraftstoff in der DIN EN 590 mit Eigenschaften und den entsprechenden Grenzwerten festgelegt. Betrachtet man diese Normen, so stellt man Unterschiede in den Eigenschaften sowie den dazugehörigen Grenzwerten fest. Chemisch wird Biodiesel als polares Lösungsmittel bezeichnet, DK dagegen ist unpolar. Aufgrund dieser grundlegenden Aussage wird deutlich, dass DK nicht ohne weiteres durch Biodiesel ersetzt werden kann. Als Folge davon treten bei Mischung dieser Kraftstoffe Probleme bei Lagerung, Verbrennung sowie Materialverträglichkeit auf.

Nach [52] besteht das Problem der Sedimentbildung in Abhängigkeit vom Beimischungsanteil und der Lagerungsdauer. Im Biodiesel enthaltene Stoffe besitzen eine antioxidative Wirkung, die jedoch durch Oxidation und Lichteinwirkung mit voranschreitender Zeit verloren gehen. In Bild 40 sind verschiedene Biodieselbeimischungen für einen Zeitraum von 9 Wochen unter Einwirkung von Sonnenlicht auf ihr Verhalten untersucht worden. Es ist ersichtlich, dass B0, B10 und B20 eine Verfärbung und Trübung aufweisen. Gemische unterhalb von B20 besitzen einen geringeren Anteil von Antioxidantien und sind somit hinsichtlich Verfärbung und Sedimentbildung besonders empfindlich.

Wie in Bild 41 ersichtlich, ergibt sich kein linearer Zusammenhang zwischen Sedimentbildung und

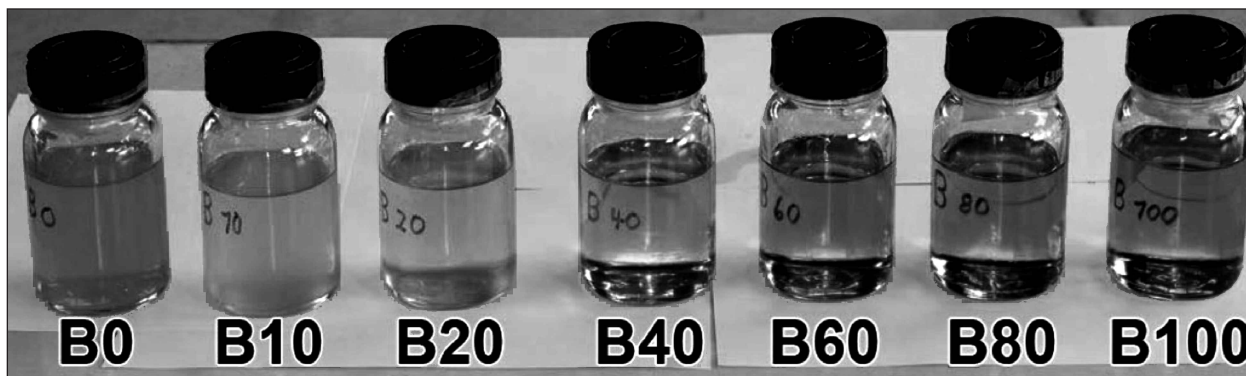


Bild 40: Einfluss von Sonnenlicht auf Biodieselblends [52]

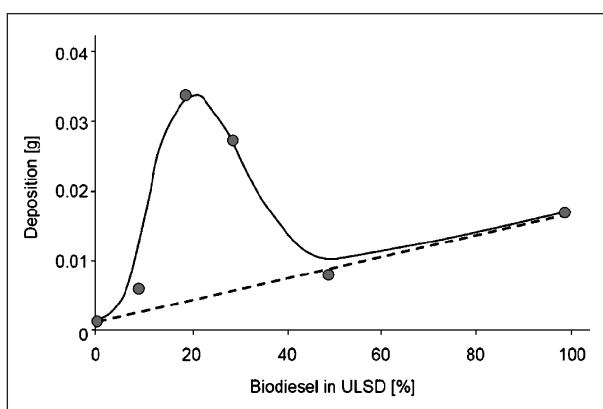


Bild 41: Realer und erwarteter Sedimentverlauf [52]

Beimischungsanteil von Biodiesel. Das Maximum ist in diesen Untersuchungen bei einem Anteil von 20 % aufgetreten, wobei die Kraftstoffzusammensetzung und Additivierung einen entscheidenden Faktor aufweisen. Weiterhin sind nach [52] kurzkettige Alkohole zur Lösung von Sedimenten gut geeignet. In diesem Zusammenhang wäre eine geringe Beimischung von Ethanol durchaus denkbar, um die Trübung und Sedimentbildung zu verhindern. Jedoch besitzen Alkohole einen geringeren Flammpunkt als DK, wodurch es bei Mischung dieser Komponenten zur Unterschreitung des festgelegten Flammpunktes von 55 °C in der DIN EN 590 kommen kann und diese hinsichtlich des höheren Sicherheitsrisikos im Umgang und Lagerung des Kraftstoffes überarbeitet werden müsste. Somit ist die alleinige Verwendung von Alkoholen, um die Sedimentbildung zu verhindern, nicht zielführend.

Als Resultat der Sedimentbildung bzw. der Oxidation der Abbauprodukte des Biodiesels sind eine erhöhte Korrosion an Injektoren und Kraftstoffpumpen sowie Ablagerungen festzustellen. Die Korrosion von kraftstoffführenden Komponenten ist auf

die erhöhte hygroskopische Eigenschaft von Biodiesel zurückzuführen. Demnach wird mehr Wasser vom Biodiesel als im Gegensatz zu herkömmlichen DK gebunden.

Wegen der pflanzlichen Basis von Biodiesel und des höheren Wassergehalts wird das Wachstum von Mikroorganismen begünstigt, welche den biologischen Zerfall und somit die verstärkte Korrosion hervorrufen. Aufgrund der Bakterien kann es zur Ausbildung eines Bio-Films auf kraftstoffführenden Teilen kommen (z. B. K.-Filter), was im Extremfall bis zur Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr führen kann. In diesem Zusammenhang ist die längere Lagerung von Biodiesel nicht zu empfehlen. Wenn dies nicht anders realisierbar ist, muss auf einen möglichst hohen Flüssigkeitsstand geachtet werden, da sonst vermehrt Kondenswasser auftritt und dies zu den oben beschriebenen Folgen führen kann [53].

Durch die lösungsmittelähnlichen Eigenschaften von Biodiesel werden Materialien wie Kupfer, Aluminium, Oberflächenbeschichtungen und verschiedene Kunststoffe angegriffen und unterliegen einer erhöhten Korrosion.

Nach [54] wurden die Materialien Kupfer, Aluminium und Edelstahl auf ihre korrosive Wirkung im Vergleich von DK zu Biodiesel in einem Zeitraum von 600 h bzw. 1.200 h bei einer Kraftstofftemperatur von 80 °C untersucht. Aus den Ergebnissen in Bild 42 wird ersichtlich, dass Kupfer und Aluminium mit Biodiesel eine deutlich größere Korrosionsgeschwindigkeit in miles pro year (mpy) aufweisen.

Vergleichend sind die Oberflächen in Bild 43 dargestellt. Aus den Ergebnissen wird eine deutlich höhere Lochfraßkorrosion bei Kupfer (Cu) und Aluminium (Al) unter Verwendung von Biodiesel ersicht-



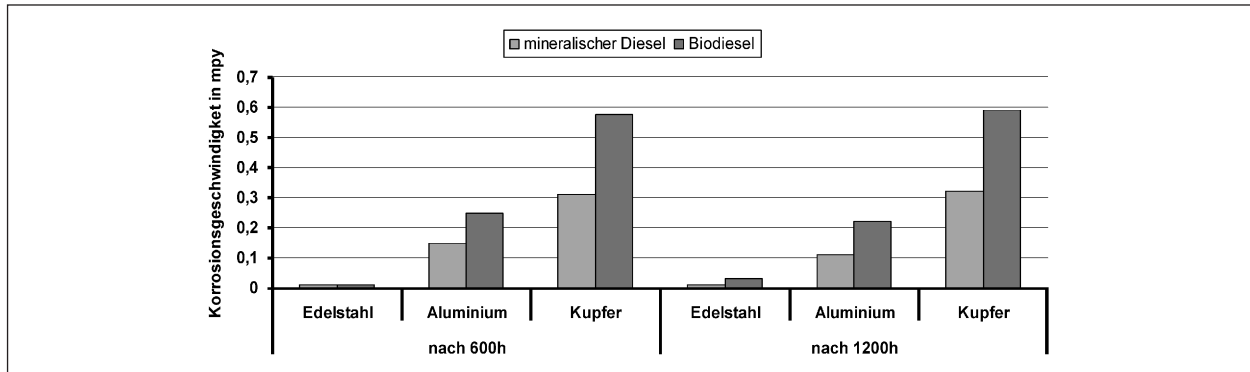


Bild 42: Korrosionsgeschwindigkeit von Metallen unter Einwirkung von DK/Biodiesel nach [54]

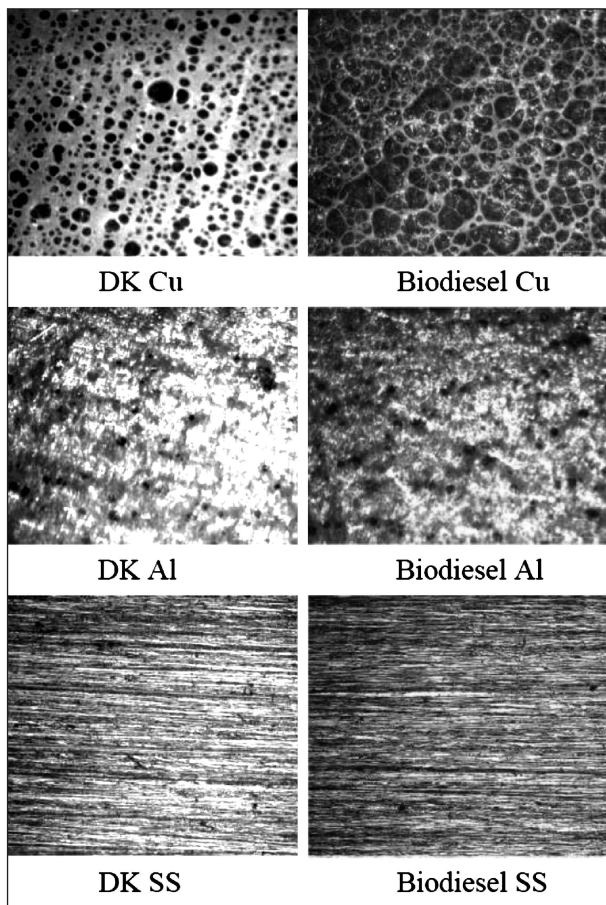


Bild 43: Korrosion von Metallen unter Einwirkung von Diesel/Biodiesel aus [54]

lich. Nur bei Edelstahl (SS) gibt es bezüglich der Oberflächenkorrosion keine deutlichen Unterschiede im Vergleich von DK zu Biodiesel.

Weiterhin kann es durch den verlängerten Einspritzstrahl zu Kondensationseffekten an der Zylinderwand kommen und somit zum Kraftstoffeintrag ins Motoröl. Die zulässige Ölverdünnung liegt in einem Bereich von ca. 5-8 %. Bei Überschreitung dieses Verhältnisses kann unter bestimmten Lastbedingungen der Schmierfilm nur unzurei-

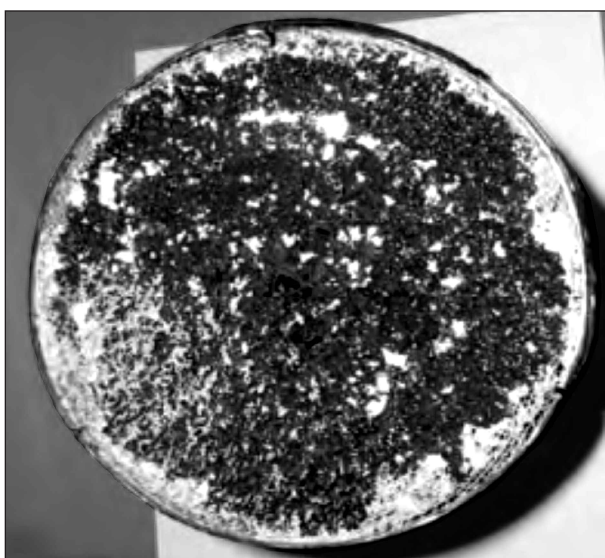
chend oder gar nicht aufgebaut werden. Durch die erhöhte Reibung an den Lagerstellen kommt es zu übermäßigem Verschleiß, was mit zunehmender Zeit zu einem kapitalen Motorschaden führen kann.

In [55] wurde ein VW-Dieselmotor 2.0 TDI mit der Abgasnorm Euro 5 und einer Leistung von 103 kW bei 4.200 1/min untersucht. Die Euro-5-Norm wird bei diesem Aggregat, durch einen Oxidationskatalysator mit nachgeschaltetem Dieselpartikelfilter und Niedertemperatur-AGR-Kühlung erreicht. Ziel des Versuches war es, die Abhängigkeit von B10 auf den Kraftstoffeintrag sowie Kraftstoffaustrag und Veränderung auf die Ölviskosität festzustellen. Als Ergebnis wurden die höchsten Kraftstoffkonzentrationen im 8-Stunden-Prüflauf mit Regenerationsbetrieb und später Nacheinspritzung festgestellt. Der Biodieselanteil betrug 3,5 %, wobei insgesamt ein Kraftstoffeintrag von 9 % aufgetreten ist. Bei einer Öltemperatur von 100 °C wurde eine Viskositätsverringerung von 31,3 % festgestellt. Ohne Regenerationsbetrieb betrug der Kraftstoffeintrag ins Motoröl insgesamt 0,8 %, wobei der Anteil Biodiesel bei 0,4 % lag. Die Viskositätsverringerung lag dabei mit 6,1 % noch innerhalb des vorgeschriebenen Grenzwertes. Somit lässt sich ein massiver Kraftstoffeintrag bei später Nacheinspritzung zur Regeneration des Dieselpartikelfilters in das Motoröl feststellen. Aus diesem Grund muss die späte Nacheinspritzung verbessert werden, um durch den zukünftig ansteigenden Biokraftstoffanteil diesen Effekt so gering wie möglich zu halten.

Um kapitale Motorschäden aufgrund der Motorölverdünnung oder Polymerisation im reinen Biodieselbetrieb zu vermeiden, werden häufig die Ölwechselintervalle der Fahrzeuge halbiert. Bei den in Zukunft favorisierten Blends von B5 bis B20 treten diese Effekte abgemindert im Verhältnis zu reinem Biodiesel auf. Zur Diskussion stehen esterba-



**Bild 44:** Katalysator betrieben mit Dieseldieselkraftstoff nach 200.000 km aus [70]



**Bild 45:** Katalysator betrieben mit Biodiesel mit zu hohem Erdalkaligehalt nach 200.000 km aus [70]

sierte Motoröle, die eine bessere Verträglichkeit mit Biodiesel aufweisen [56].

In [70] ist die Beeinflussung von Biodiesel mit zu hohem Erdalkaligehalt im Vergleich zu DK auf die Haltbarkeit des Katalysators untersucht wurden. Die Bilder 44 und 45 zeigen die unterschiedlichen Zustände des Katalysators nach einer Laufleistung von 200.000 km bei dem Betrieb mit DK und Biodiesel.

Aus Bild 45 im Vergleich zu Bild 44 wird deutlich, dass sich durch die Verwendung von Biodiesel mit zu hohem Erdalkaligehalt eine signifikante Schädigung

des Katalysators einstellt. Die schwarzen Bereiche in Bild 45 sind zugesetzte Kanäle, wodurch die Konvertierungsrate des Katalysators deutlich reduziert wird. Infolge der zugesetzten Kanäle stellen sich ein geringerer Durchsatz des Abgasstromes sowie erhöhter Abgasgegendruck ein. Dies kann zu einer erhöhten thermischen Belastung und damit zur Einschränkung der Haltbarkeit des Motors führen.

### Bio-Alkohol

In Deutschland ist derzeit ein maximal volumetrischer Beimischungsanteil von 10 % Ethanol zulässig. In der DIN EN 51626-1 sind die Qualitätsmerkmale und Anforderungen an den Kraftstoff mit bis zu 10 % (vol.) Beimischungsanteil festgelegt. Neben diesem Kraftstoff wird E85 mit einem Beimischungsanteil von Ethanol mit 85 % (vol.) angeboten. Die entsprechenden Qualitätsmerkmale sind in der DIN EN 51625 geregelt. Die veränderten Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen Ottokraftstoffen wie die hygroskopische Wirkung und die Eigenschaft von Ethanol als Lösungsmittel bewirken hinsichtlich des Einsatzes als Kraftstoff verschiedene Probleme der Materialhaltbarkeit sowie -beständigkeit.

In [57] wurde ein Vergleich von E85 mit Benzin auf die Verträglichkeit von verschiedenen Materialien durchgeführt. Ethanol hat in dieser Gegenüberstellung keinen Einfluss auf die Verträglichkeit mit verschiedenen Metallen wie Stahl, Edelstahl und Aluminium aufgezeigt. Nach dieser Übersicht ist die Materialverträglichkeit von Ethanol mit Metallen sowie Kunststoffen nicht problematisch und weist sogar eine bessere Verträglichkeit als Benzin auf. Durch verschiedenste Literaturstellen ist das oben beschriebene Verhalten jedoch äußerst kritisch zu betrachten. Nach [58, 59, 60] findet eine gegenteilige Aussage über das Ergebnis statt. Es wird berichtet, dass Ethanol eine hohe Aggressivität gegenüber Metallen und Elastomeren aufweist. Besonders kritisch ist die hygroskopische Wirkung von Ethanol. Durch den erhöhten Wasseranteil können Salze aus der Materialoberfläche gelöst werden, wodurch es zu Korrosion bei Metallen und Legierungen kommen kann. Ferner können Elastomere durch Ethanol aufquellen und ihre spezifischen Eigenschaften verlieren. Bei geringeren Beimischungsanteilen wie E10 ist dies im Verhältnis zu E85 nur vermindert zu erwarten. Nach [61] lässt sich die Korrosion von kraftstoffführenden Teilen

Werkstoff	Anwendungsbeispiele
EN AW – Al 99,5	Draht, Elektroleitungen
EN AW – AlMgSi1	Kraftstoffförderpumpen
EN AW – AlMg3	Maschinenbau
EN AC – AlSi7Mg0,3	Zylinderkopf, Rails für Einspritzsysteme
EN AC – AlSi10Mg – wa	Zylinderkopf, Kraftstoffförderpumpen

Tab. 9: Untersuchte Werkstoffe nach [61]

wie folgt untergliedern: Es wird in flächige Korrosion, „Alkoholatkorrosion und wässrige Korrosion“ unterschieden. Die flächige Korrosion tritt verstärkt in Tanks und Komponenten der Kraftstoffversorgung auf. Deutlich wird diese durch eine gleichmäßige Korrosion der Oberfläche, wodurch als Folge eine Änderung der Materialstärke oder Gewichtsabnahme auftreten kann. Die Stoffe Magnesium, Aluminium und Blei sind besonders anfällig für Alkoholatkorrosion. Alkoholate, auch als Alkoxide bezeichnet, entstehen als Folge der Polarität des Ethanol-Moleküls. Die aus der Verbindung entstandenen Alkoholate sind Salze, die im nassen Zustand eine seimige Konsistenz aufweisen. Bei einem Wassergehalt größer 0,5 % kommt es zu einer Trennung von Wasser und Kraftstoff. Bedingt durch die höhere Dichte setzt sich das Wasser unten ab und führt dort zur wässrigen Korrosion mit der Folge der Oxidbildung. In [61] wurden die in Tabelle 9 aufgeführten Werkstoffe auf ihre Korrosionsbeständigkeit geprüft. Die Auswahl der Werkstoffe wurde mit Bezug auf die Fahrzeugtechnik getroffen.

Alle untersuchten Werkstoffe weisen eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit sowie Schweiß- und Bearbeitbarkeit auf.

Für den Versuch wurde ein Prüfkraftstoff mit 10 % Ethanol- und 90 % ASTM-Kraftstoff verwendet. Die verschiedenen Werkstoffe wurden jeweils bei Temperaturen von 110 °C, 120 °C und 130 °C mit einer Dauer von maximal 168 h untersucht. Bei den Versuchstemperaturen ergaben sich Drücke von 2,2 bar bei 110 °C, 2,8 bar bei 120 °C und 3,5 bar bei 130 °C. Das Abbruchkriterium ist aufgrund der Betriebsdrücke auf 5 bar festgelegt. In den Bildern 46 bis 50 sind die Ergebnisse aus den Versuchen dargestellt.

Aus den Bildern 46-50 wird ersichtlich, dass die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf das Korrosionsverhalten der verschiedenen Werkstoffe

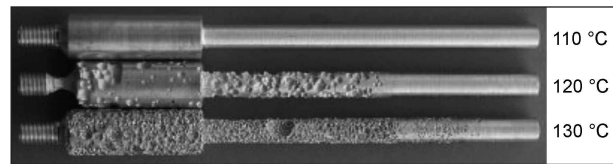


Bild 46: Ethanolkorrosion am Material Al 99,5 aus [61]

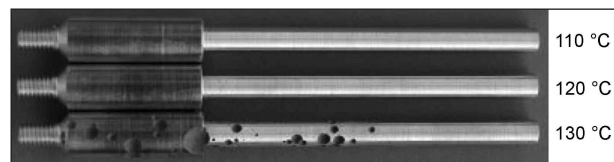


Bild 47: Ethanolkorrosion am Material AlMg3 aus [61]

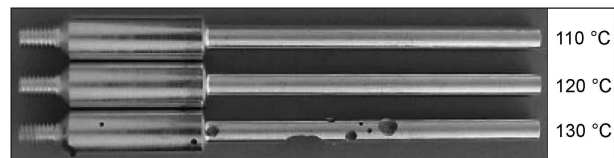


Bild 48: Ethanolkorrosion am Material AlMgSi1 aus [61]

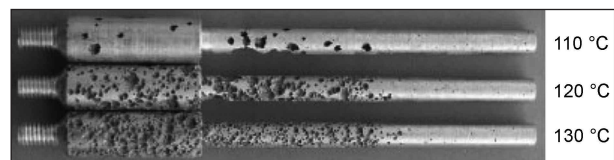


Bild 49: Ethanolkorrosion am Material AlSi7Mg0,3 aus [61]

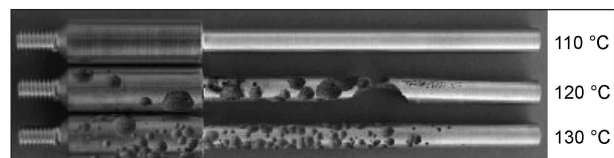


Bild 50: Ethanolkorrosion am Material AlSi10Mg-wa aus [61]

hat. Weiterhin lässt sich anhand der Temperatur ein unterschiedliches Aussehen der Korrosion erkennen. Bei Temperaturen von 130 °C sind mehr, aber dafür kleinere Korrosionsstellen zu erkennen. Der Gusswerkstoff AlSi7Mg0,3 zeigt gegenüber den anderen Werkstoffen bereits bei 110 °C deutliche Korrosion. Am besten sind die Werkstoffe AlMgSi1 und AlMg3 aufgrund der beginnenden Korrosion bei 130 °C geeignet.

Weitere Literaturstellen können dieses Verhalten bestätigen. In [62] wurden Teile eines Kraftstoffsystem, Ethanolbeimischungen von 5 %, 10 % und 15 % (vol.) ausgesetzt. Als Ergebnis wurden besonders Kupfer und Stahl bei 15 % Ethanolbeimischung (vol.) angegriffen. In Bild 51 ist der Masseverlust über 144 Tage ersichtlich.

Aus [59] geht hervor, dass sich Ablagerungen durch den so genannten Blow-by-Effekt am Kolben infol-

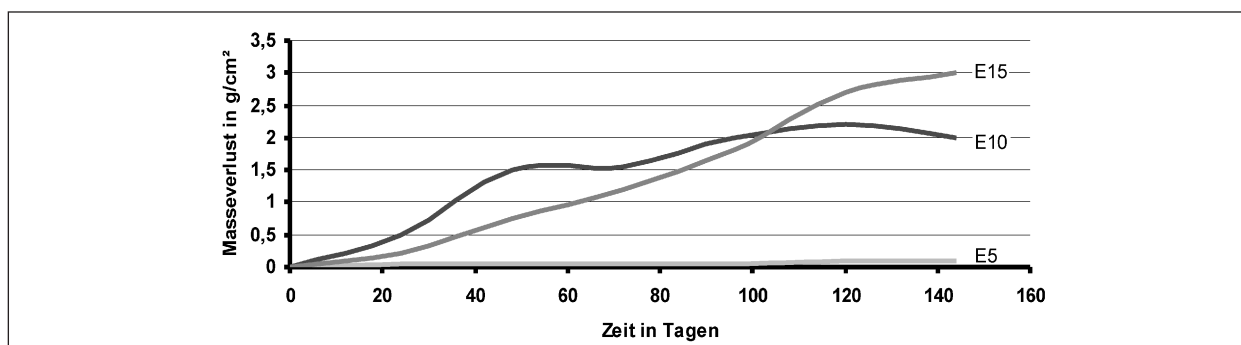


Bild 51: Kupferlegierungskorrosion eines Dichtrings [62]

ge von Ethanolbeimischungen bilden können. Unter „Blow-by“ ist die nicht vollständige Abgrenzung des Arbeitsraumes bei Kompression zu verstehen, sodass Arbeitsgas an den Kolbenringen vorbei in das Kurbelgehäuse gelangt. Bild 52 zeigt die Auswirkung eines E20-Ethanolblends durch den Blow-by-Effekt. Es werden deutliche Ablagerungen am Kolbenschaft im Bereich unter den Kolbenringen ersichtlich.

In Bild 53 werden die Ablagerungen in den Kanälen der Auslassventile sichtbar. Der weiße Pfeil zeigt die deutlich krustigen Ablagerungen. Die Rückstände am Kolben sowie in den Kanälen der Auslassventile könnten Auslöser für erhöhten Verschleiß in der Laufbuchse bzw. am Ventilschaft mit der Folge eines Motorschadens sein.

Weiterhin stellt sich die Frage, wie Ethanolbeimischungen auf Elastomere und Dichtungswerkstoffe speziell im Motorbereich wirken. Dichtungswerkstoffe sollten dabei möglichst gegenüber allen alternativen Kraftstoffen resistent sein. Die Elastomere müssen eine möglichst geringe Änderung der mechanischen Eigenschaften sowie eine geringe Quellung im Kontakt mit dem entsprechenden Kraftstoff aufzeigen. Elastomere, speziell Wellendichtringe, O-Ringe oder Ventilschaftdichtungen, sind für die Dauerhaltbarkeit eines Motors von signifikanter Bedeutung. Die Hauptaufgabe liegt im dauerhaften Abdichten von zwei Medien zueinander. Die Veränderung der Eigenschaften, wie Quellung und der damit verbundene Festigkeitsverlust, kann zu erhöhtem Verschleiß und Beeinträchtigung der Dichtfunktion führen.

Die Dichtungen werden chemisch von Ethanol nicht angegriffen. Jedoch führt der steigende Sauerstoffanteil des Kraftstoffgemisches im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen zu Einwirkungen auf die Dichtungsmaterialien. Dazu zählen Faktoren wie Phasentrennung bei Temperaturen  $< 10\text{ °C}$  und

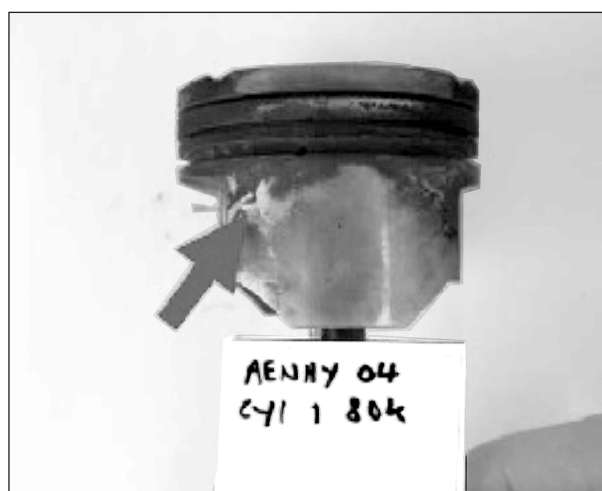


Bild 52: Ablagerungen am Kolben durch Blow-by-Effekt aus [59]

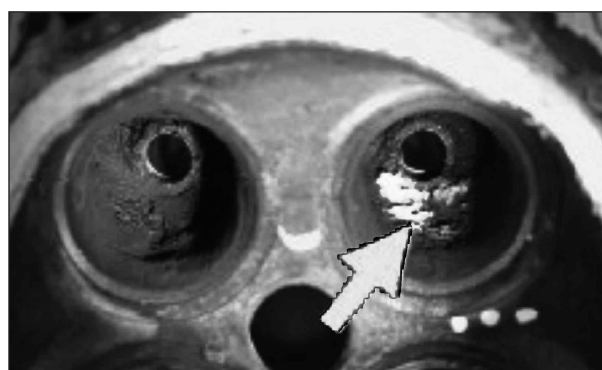
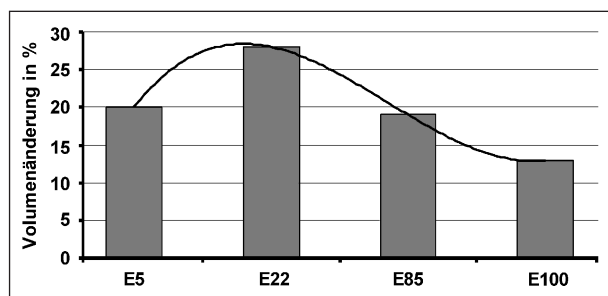


Bild 53: Ablagerungen in den Kanälen der Auslassventile aus [59]

Wassergehalten von mehr als 0,5 % (vol.), ein höherer Wasseranteil im Blow-by-Gas, erhöhte Korrosionsgefahr, Ablagerungen an Motorkomponenten durch Additive aufgrund des hohen Säuregehaltes und der Eintrag ins Motoröl, wodurch die Schmier Eigenschaften deutlich herabgesetzt werden. In Untersuchungen ist das Material Fluorkautschuk (FKM) für den Einsatz mit verschiedenen Ethanolbeimischungen getestet und auf Eigenschaften wie

Zugfestigkeit, Reißdehnung, Härte und Verträglichkeit geprüft worden. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 60 °C über die Dauer von 168 h durchgeführt. Als Ergebnis konnte für die aus speziellen Fluorkautschukmischungen hergestellten Dichtungskomponenten keine Beeinträchtigung der Dichtfunktion festgestellt werden. Mit steigendem Fluorkautschukanteil nimmt die chemische Beständigkeit zu, jedoch verschlechtert sich das Tieftemperaturverhalten. Somit stellt der ausgewählte Fluorkautschukanteil eine Kompromisslösung aus diesen beiden Eigenschaften dar. Man würde vielleicht erwarten, dass die Quellung mit zunehmendem Ethanolgehalt zunimmt. Tatsächlich wurde in den Untersuchungen jedoch gezeigt, dass sich eine maximale Quellung im Bereich von 20-50 % (vol.) Ethanolbeimischung einstellt. In Bild 54 ist dieses Verhalten ersichtlich. Weiterhin trifft diese Aussage auch auf die mechanischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Reißdehnung zu. Demnach ist bei höheren Ethanolbeimischungen eine geringere Beeinflussung der Eigenschaften festzustellen. Zusammenfassend in Bezug auf Dichtungsmaterialien ist ein geringerer Ethanolanteil < 15 % oder ein sehr hoher Ethanolanteil wie E85 aus Sicht der Eigenschaften wie Quellung und Festigkeit sinnvoll [62].

In [62] wird vermutet, dass die Gasgemische der Ethanolblends Werkstoffe stärker angreifen als konventionelle Kraftstoffe. Durch den oben beschriebenen Blow-by-Effekt gelangen die Gasgemische in das Kurbelgehäuse und stellen eine Gefahr für Dichtungen dar. Durch Untersuchungen mit verschiedenen Medien wie Säure, Motoröl und E22 mit anschließender Prüfung der mechanischen Eigenschaften konnte keine signifikante Volumenänderung der Fluorkautschukwerkstoffe festgestellt werden. Demnach ist dies als unkritisch zu betrachten. Ein größeres Problem stellt der Kraftstoffeintrag ins Motoröl dar. Besonders bei Stadtfahrten mit kurzen



**Bild 54:** Volumenquellung bei Änderung der Ethanolbeimischung nach [62]

Fahrzyklen und geringen Öltemperaturen kann der Kraftstoff nicht vollständig aus dem Öl verdampfen. Durch den höheren Eintrag kommt es zu einem Anstieg von Wasser und Säuregehalt, wodurch die Eigenschaften des Motoröls, speziell die Additive für Korrosions- und Alterungsschutz, verschlechtert werden. Als Ergebnis konnte in den Untersuchungen festgestellt werden, dass Elastomere gegen frisches Motoröl besonders empfindlich in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften reagieren. Durch die noch vollständig vorhandenen Additive im frischen Motoröl werden diese im Gegensatz zu Altöl besonders beeinflusst. Mit Blick auf die steigenden Ethanolblends werden entsprechend neue Additive verwendet, wodurch die Verträglichkeit mit neuen Dichtungswerkstoffen zu prüfen ist.

In [59] wurde die Lebensdauer eines 1,8 l Reihenvierzylindermotors mit Saugrohreinspritzung und 92 kW auf einem Prüfstand untersucht. Ziel war es, die Verschleißrate von E85 im Vergleich zu konventionellem Ottokraftstoff festzustellen. Durch verschiedene Testläufe im Kalt- und Heißbetrieb konnten Aussagen über das Verschleißverhalten und die Ölalterung getroffen werden. Im Kaltlauf mit E85 ist ein Anteil von 15 % Kraftstoff und Wasser im Motoröl aufgetreten. Dies entspricht einer Gewichtsschwankung von ca. 800 g. Vergleichend dazu ist mit Super-Kraftstoff nur ein Gewichtsunterschied von 200 g festzustellen. Grund dafür ist die Kondensation des Kraftstoffes und des Wassers im Zylinder und Ansaugbereich, wodurch es zum erhöhten Eintrag ins Motoröl kommt. In der Kaltlaufphase ist der Verbrauch auf ca. das Doppelte angestiegen. Dies ist einerseits auf den Energiegehalt des Kraftstoffes und andererseits auf den Eintrag ins Motoröl zurückzuführen. Der erhöhte Kraftstoffanteil im Motoröl führt zu einer deutlich größeren Viskositätsänderung im Vergleich zu Super-Kraftstoff. Bei Erreichen der Betriebstemperatur (Heißphase) wird der Kraftstoff fast vollständig aus dem Motoröl verdampft, wodurch die Werte für Ölverdünnung und Viskositätsänderung bis auf geringe Abweichungen in den Ausgangszustand zurückgehen. Demnach ist die Kaltphase für das Verschleißverhalten von signifikanter Bedeutung. Bei Betrieb mit E85 ist in der Kaltphase eine erhöhte Riefenbildung im Zylinder zu beobachten. Anhand von Kontaktdruckverläufen an Pleul- und Hauptlager konnte Mischreibung, also Materialabtragung, festgestellt werden. Für das Verschleißverhalten der Hauptlager ist die Fahrweise ein entscheidender Faktor. Aus diesen Gegebenheiten

lässt sich eine für den Motor verkürzte Lebensdauer ableiten. Wie hoch diese ist, hängt von verschiedenen Randbedingungen wie Fahrweise und Fahrzyklus ab. Weiterhin ist ein Verschleiß der Steuerkette mit 20 % bei E85-Betrieb in diesen Untersuchungen angegeben. Durch die Kürze der Versuche ist eine Beurteilung des Verschleißes nur schwer möglich und müsste in einem Dauerlauf näher bestimmt werden. Hauptauslöser für die erhöhte Abnutzung ist der Eintrag ins Motoröl. Durch zusätzliche Additive, wie z. B. Zink-Dithiophosphate, können die Beanspruchung und der Ver-

schleiß stark reduziert werden, jedoch stehen diese wiederum in Wechselwirkung mit anderen Inhaltsstoffen des Motoröls. Daher ist eine einfache Modifikation des Motoröls durch Aufaddierung eines die tribologischen Eigenschaften verbessernden Additivs kritisch einzustufen.

### 3.2.3 Zusammenfassung

Die in den letzten beiden Kapiteln gesammelten Informationen sind in den Tabellen 10 und 11 zusammenfassend dargestellt.

	Pflanzenölkraftstoff	Biodiesel
CO	↓↓	↓↓
HC	↓↓	↓↓
NO <sub>x</sub>	↑	↑
PM nach Kat.	↓↓	↓↓
Dauerhaltbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkokungen an Einspritzventilen, Einspritzdüsen, Kolben und Brennraum</li> <li>• schnellere Beladung des Partikelfilters durch Aschebildung</li> <li>• durch höhere Viskosität erhöhter Kraftstoffeintrag ins Motoröl, dadurch schlechtere Schmiereigenschaften</li> <li>• durch erhöhten Kraftstoffeintrag, Gefahr von Polymerisation des Motoröles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bei geringen Beimischungen erhöhte Gefahr von Sedimentbildung – Zusetzen des Kraftstofffilters</li> <li>• wirkt hygroskopisch – dadurch erhöhte Korrosion an kraftstoffführenden Bauteilen</li> <li>• besitzt lösungsmittelähnliche Eigenschaften – Korrosion von Metallen und Schädigung von Dichtungsmaterialien</li> <li>• erhöhter Kraftstoffeintrag ins Motoröl, Verschlechterung der Schmiereigenschaften</li> <li>• Vergiftung des Katalysators durch Additivelemente wie Phosphor</li> </ul>
Legende: Trend steigend/fallend: ↑/↓ stark steigend/stark fallend: ↑↑/↓↓ gleichbleibend: →		

Tab. 10: Zusammenfassung Emission und Dauerhaltbarkeit Pflanzenöl und Biodiesel

	Bioalkohole		BtL	Biogas
	< E25	> E25		
CO	↓↓	↓↓	↓↓	↓
HC	↑	↑	↓↓	↓↓
NO <sub>x</sub>	↑	↓	↓	↓
PM nach Kat.	k. A.	k. A.		k. A.
Dauerhaltbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wirkt hygroskopisch – Korrosion von Metallen</li> <li>• durch erhöhten Sauerstoffanteil Schädigung von Dichtungsmaterialien aus Kunststoff (Aufquellen)</li> <li>• besonders bei Ethanolgemischen um 20 %</li> <li>• Ablagerungen an Bauteilen wie Kolben und Zylinderkopf möglich</li> <li>• in Kaltlaufphase erhöhter Kraftstoffeintrag ins Motoröl – Verschlechterung der Schmiereigenschaften</li> </ul>		-	-
Legende: Trend steigend/fallend: ↑/↓ stark steigend/stark fallend: ↑↑/↓↓ gleichbleibend: →				

Tab. 11: Zusammenfassung Emission und Dauerhaltbarkeit Bioalkohol, BtL und Biogas

### 3.3 Anpassungen moderner Motoren an biogene Kraftstoffe

#### Pflanzenöl

Pflanzenöle müssen durch den beschriebenen Viskositätsunterschied im Vergleich zu konventionellem DK auf das Fahrzeug abgestimmt werden. Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten: zum einen den Kraftstoff durch Umesterung zu RME an den Motor und zum anderen den Motor an den Kraftstoff anzupassen. Nachfolgend wird nur die Motoranpassung betrachtet. Im Allgemeinen sind die Modifikationen vom Fahrzeug, Motortyp und dem jeweiligen Umrüsterhersteller abhängig. Die Umbaumaßnahmen betreffen größtenteils das Kraftstoffsystem. Zum Teil wird auch durch konstruktive Bauteilveränderungen der Verbrennungsverlauf an die Gegebenheiten des Pflanzenöls angepasst. Grundsätzlich kann die Umrüstung des Kraftstoffsystems in zwei Arten, das Ein-Tank-System und Zwei-Tank-System, unterschieden werden. Beide Systeme erlauben den Betrieb mit Pflanzenöl, Dieselkraftstoff oder eine Mischung der beiden Kraftstoffarten.

Das Ein-Tank-System versorgt das entsprechende Fahrzeug aus einem Tank und hat den Vorteil, dass es dadurch ausschließlich mit Pflanzenöl betrieben werden kann. Bei dieser Umrüstungsvariante ist eine Erwärmung des Pflanzenöls durch einen Elektro-Heizer oder Wärmetauscher, der in den Kühlkreislauf eingebunden ist, erforderlich. Zusätzlich kommen Kraftstoffleitungen mit größerem Querschnitt, geänderte Glühkerzen, modifizierte Einspritzdüsen (eventuell beheizt) zum Einsatz. Bei einigen Fahrzeugmodellen muss zusätzlich die Einspritzpumpe geändert werden, da diese für Pflanzenöl nicht geeignet ist. Diese Variante findet verstärkt Anwendung bei Vor- und Wirbelkammermotoren mit indirekter Einspritzung, somit bei Dieselmotoren der älteren Generation. Das Zwei-Tank-System ermöglicht den Betrieb mit Pflanzenöl, selbst wenn der Motor nicht mit Pflanzenöl gestartet werden kann. Dies macht den Einbau eines Zweitanks, der meist in der Reserveradmulde untergebracht wird, erforderlich. Das System ist somit nicht unabhängig vom Dieselkraftstoff, da dieser beim Start und bei Abstellen des Motors benötigt wird. Das System wird nach Ende des Pflanzenölbetriebs mit Diesel gespült, damit Ablagerungen an Einspritzdüsen verhindert werden und diese für den nächsten Startvorgang mit DK gefüllt sind. Dies macht den Einsatz einer zusätzlichen Kraftstoffpumpe notwendig, die nach Abstellen des Motors

das Kraftstoffsystem automatisch mit Diesel spült. Der DK wird somit für den Start- und Abstellvorgang benötigt. Bei Erreichen der Betriebstemperatur kann dann automatisch oder manuell auf Pflanzenölbetrieb umgeschaltet werden. Diese Variante der Umrüstung kommt bei allen Fahrzeugen, die nicht mit einem Ein-Tank-System ausgerüstet werden können, was bei neueren Fahrzeugmodellen mit Common-Rail oder Pumpe-Düse-Systemen der Fall ist, zum Einsatz. In [23] ist die Anpassung von Dieselmotoren auf Pflanzenölkraftstoff untersucht worden. Aus diesen Versuchen geht hervor, dass eine Modifikation der Einspritzdüsen bzw. der Einspritzdüsengeometrie unbedingt erforderlich ist. Nur mit dieser Anpassung sind eine ausreichende Zerstäubung des Kraftstoffes und die damit erforderliche Gemischbildung gewährleistet. Durch diese Optimierung sind ein verbessertes Emissionsverhalten, geringerer Eintrag ins Motoröl und geringere Ablagerungen festzustellen. Diese Faktoren sind entscheidend für die Haltbarkeit des Motors. Neben den veränderten Einspritzdüsen ist es auch erforderlich, Einflussgrößen wie Einspritzbeginn und -ende an das Pflanzenöl anzupassen. Nur die Kombination aus den aufgeführten Maßnahmen führt zum störungsfreien Betrieb des Motors sowie der Abgasmachbehandlungssysteme. Weiterhin sollte die Regeneration des DPF nicht mittels später Nacheinspritzung, sondern durch eine externe Heizung realisiert werden, um den Eintrag ins Motoröl so gering wie möglich zu halten.

Die Umrüstung von Fahrzeugen mit geschlossenem Partikelfilter kann wegen des hohen technischen Aufwands und des Verlusts von Herstellergarantieansprüchen generell nicht empfohlen werden [63, 64].

#### Biodiesel

Um Biodiesel oder FAME-DK-Blends im Kraftfahrzeug verwenden zu können, sind bei erster Betrachtung keine technischen Umbauten notwendig. Der grundsätzliche Betrieb stellt durch die guten Fließeigenschaften des Esters kein Problem dar, da dieser den Eigenschaften von fossilem Diesel sehr nahekommt. Durch die DIN/EN-Qualitätsnorm ist eine Mindestqualität der angebotenen Treibstoffe gesichert und damit sind Verunreinigungen im Biodiesel auf das zulässige Maß beschränkt. Verstopfte Kraftstofffilter sind daher sehr selten. Die erhöhte Aggressivität des Esters bezüglich der verwendeten Metalle und Kunststoffe führt aber zu häufi-

gerem Wechsel der betroffenen Bauteile, wie zum Beispiel kraftstoffführende Teile oder Kraftstofffilter.

Wie schon im Kapitel 3.2.2 („Dauerhaltbarkeit ...“) berichtet, ist die Ölverdünnung das größte zu lösende Problem. Es resultiert hauptsächlich aus der erforderlichen Partikelfilterregeneration mittels Kraftstoffnacheinspritzung. Daher soll in diesem Kapitel verstärkt auf diesen Sachverhalt eingegangen und einzelne Mechanismen kurz dargelegt werden.

Die wesentliche Herausforderung in der Partikelfiltertechnologie besteht nicht in der Partikelfiltration, sondern in der Regeneration des Filters durch die Verbrennung der angesammelten Partikelmasse im gesamten Motorkennfeld. Dabei stellt sich die Oxidierbarkeit der Rußpartikel als erheblicher Vorteil dar. Für eine effiziente Verbrennung eines C-Partikels mit Sauerstoff werden im Allgemeinen Temperaturen von mehr als 600 °C benötigt. Durch die Nacheinspritzung von Kraftstoff ist die Möglichkeit gegeben, die Abgastemperatur für die diskontinuierliche, aktive und thermische Regeneration in diesen Temperaturbereich anzuheben und die im Partikelfilter gesammelten Rußanteile vollständig zu oxidieren. Dabei wird in einem definierten Kurbelwinkel eine Kraftstoffmasse in den Zylinder eingespritzt. Der Winkelbereich der Nacheinspritzung variiert dabei zwischen 25 °KW nOT und 120 °KW nOT.

Bezüglich des Zeitpunktes der innermotorischen Nacheinspritzung unterscheidet man folgende Grenzfälle:

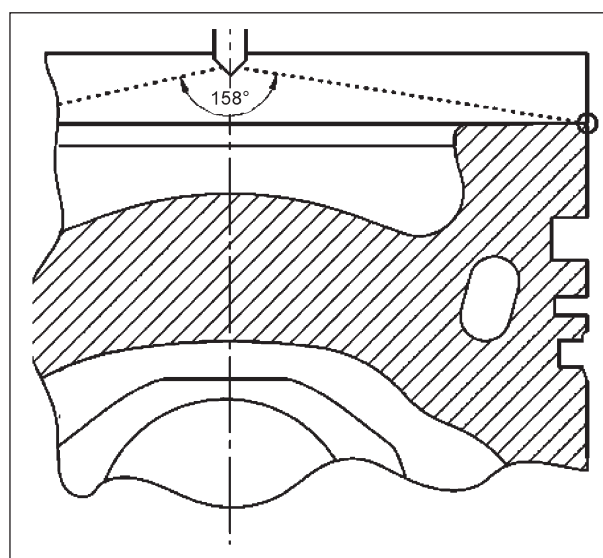
- Frühe Nacheinspritzung: Durch den Einsatz einer frühen Nacheinspritzung lässt sich die Abgastemperatur auf die maximal zulässige Eingangstemperatur erhöhen. Diese beträgt für Abgasturbolader üblicherweise zwischen 750 und 800 °C, reicht jedoch wegen des Temperaturabfalls über der Turbine meist für eine erfolgreiche Regeneration motorferner Filter nicht aus. In diesem Fall wird die eingespritzte Kraftstoffmenge nahezu vollständig im Zylinder zu einem späten Zeitpunkt verbrannt.
- Späte Nacheinspritzung: Bei später Nacheinspritzung wird die eingespritzte Kraftstoffmenge nicht oder unvollständig an der Verbrennung teilnehmen. Die Aufheizung des Abgasstromes wird durch Umsetzung der Kohlenwasserstoffe im Oxidationskatalysator oder an der katalytischen Beschichtung des Filters gewährleistet.

Durch diese Möglichkeit der Temperaturanhebung ist auch die Regeneration motorferner positionierter Filter gegeben. Durch die geringeren Wärmeverluste ist in diesem Fall auch ein geringerer Kraftstoffeinsatz notwendig.

Betrachtet man die Konstellation, in der sich das Triebwerk bei einer Nacheinspritzung befindet, so stellt man fest, dass der Kolben bereits große Teile der Zylinderwand freigegeben hat. Folglich fehlt die Abschirmung der Zylinderwand durch den Kolben, bzw. die Kolbenmulde. Bei einer standardmäßigen Haupteinspritzung wird der Kraftstoff unter hohem Druck in die Brennraummulde eingespritzt. Während der Nacheinspritzung kann der Kraftstoff jedoch auf die Zylinderwand treffen und sich mit dem Ölfilm vermischen. Der Ölfilm verdünnt sich oder wird im ungünstigsten Fall sogar abgewaschen, woraus ein hoher Zylinderverschleiß resultiert. Die auf dem Ölfilm der Zylinderwand kondensierten Kraftstoffteilchen werden beim nächsten Kolbenhub durch den Ölabstreifring in den Ölsumpf mitgerissen und tragen somit zu einem Anstieg des Kraftstoffanteiles im Schmieröl bei [80, 81].

Bild 55 beschreibt die Konstellation des Triebwerkes zum Zeitpunkt der innermotorischen Kraftstoffnacheinspritzung, wobei die dargestellten gestrichelten Linien den theoretischen Verlauf des Kraftstoffstrahls nachempfinden sollen.

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einbringen des unverbrannten Kraftstoffes durch die Blow-by-Gase, welche bei jedem Triebwerk existent sind. Unter Blow-by versteht man das vorbeiströmende



**Bild 55:** Konstellation des Triebwerkes bei Nacheinspritzung 30° nOT [58]



Gas an den Kolbenringen vom Arbeitsraum in das Kurbelgehäuse infolge unvollständiger Abdichtung. Diese Gase betragen selbst bei optimaler Abdichtung ca. 0,5 bis 2 % des gesamten Gasvolumenstromes [82]. Messungen im Kurbelgehäuseentlüftungsrohr belegen, dass die im Durchblasgas enthaltenen kondensierbaren Stoffe reinem Kraftstoff entsprechen [81].

Die beiden beschriebenen Mechanismen der Ölverdünnung sind bei allen Kraftstoffen prinzipiell ähnlich. Jedoch können sich die Effekte aufgrund abweichender Kraftstoffparameter teilweise erheblich verstärken. Dies soll im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

Der Kraftstoffgehalt im Schmierölkreislauf ist vom Siedeverhalten des Kraftstoffes in einem großen Maße abhängig. Ein Kraftstoff mit einer sehr hoch liegenden Siedekennlinie wie Biodiesel wird nach einer bestimmten Anzahl an Betriebsstunden (Regeneration/Erholung) einen höheren Anteil im Schmieröl aufweisen als ein Kraftstoff mit deutlich niedrigerem Siedeverlauf. Der Grund hierfür liegt einerseits am stark eingeschränkten Aussieden aus dem Motorenöl und andererseits an der verzögerten Verdampfung während der Einspritzung sowie der damit verbundenen Verlängerung der flüssigen Phase des Kraftstoffstrahls. Dadurch wird die Gefahr der Wandfilmbildung stark erhöht und fördert, wie beschrieben, die Verdünnung des Motoröls.

Bei einem Betrieb mit Biodiesel kann es ferner zu einer verstärkten Verkokung der Einspritzdüsen kommen, was sich auf das Strahlbild erheblich auswirkt. Die Viskosität und Dichte des verwendeten Kraftstoffes stellen weitere Parameter dar. Bei regenerativen Kraftstoffen sind diese Parameter signifikant abweichend (s. Bild 56).

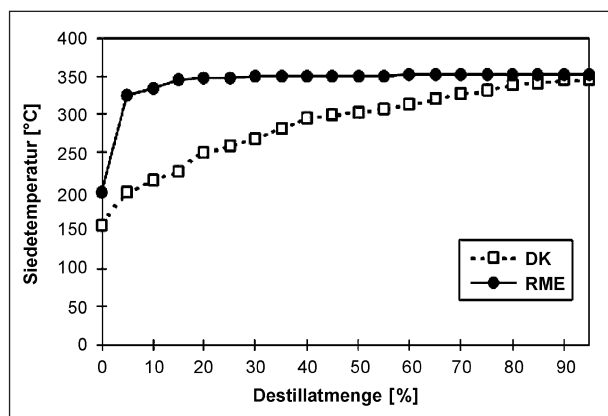


Bild 56: Vergleich des Siedeverlaufs von Diesel- und Biodieselskraftstoff [83]

Durch die höhere Siedelage des Biodiesels (etwa 350 °C konstant) besteht somit ein prinzipielles Problem. Ein Aussieden aus dem Motorenöl ist aufgrund der viel geringeren Motorölbetriebstemperatur nicht möglich. Eine zu hohe Ölverdünnung bringt jedoch tribologische Probleme mit sich. Somit wird deutlich, dass nur eine Anpassung von Motorparametern zum Erfolg führen kann. Einzelne Versuche sowie eigene Ansätze werden in den folgenden Passagen aufgezeigt.

Um den in [55] beschriebenen Kraftstoffeintrag von Biodiesel in das Motoröl zu verringern, wurde in [58] versucht, die Einspritzzeiten und -mengen zu optimieren. Im normalen Fahrbetrieb besteht der Einspritzvorgang des verwendeten 2 l TDI von VW aus zwei Voreinspritzungen und einer Haupteinspritzung. Bei notwendiger Dieselfilterregeneration werden im ersten Schritt zwei zusätzliche Nacheinspritzungen vorgenommen, die früh nach der Haupteinspritzung stattfinden. Im zweiten Schritt, dem eigentlichen Regenerationsbetrieb, wird nun eine weitere Nacheinspritzung nahe dem unteren Totpunkt des Kolbens vorgenommen. Man teilte in [58] diese späte Nacheinspritzung in zwei Stufen und variierte die in den insgesamt vier Nacheinspritzungsstufen eingespritzten Kraftstoffmengen und Einspritzzeitpunkte. Zur Erprobung wurden unterschiedliche Kraftstoffe verwendet, deren Siedelinien in Bild 57 dargestellt werden.

Der Betriebspunkt für die Versuchsreihen wurde bei 2.140 1/min und 30 Nm Last gewählt. Gerade bei geringen Lasten und damit geringen Brennraumtemperaturen und Gasdichten nimmt die Strahleindringtiefe einer späten Nacheinspritzung erheblich zu.

Es zeigte sich, dass im Regenerationsmodus der Kraftstoffeintrag in das Motorenöl mit steigendem Biodieselgehalt zunimmt, wobei Viskositätsabfälle bis zu 33 % beobachtet werden konnten. Dabei war der Anteil an RME im Motorenöl stets deutlich höher. Des Weiteren steigt der Kraftstoffeintrag bei Einspritzzeitpunkten in Richtung des unteren Totpunktes, was an der stetig abnehmenden Gasdichte und Temperatur liegt. Durch die beschriebene Splitting (insgesamt 7 Einspritzvorgänge) der späten Nacheinspritzung konnte der Kraftstoffeintrag von Diesel und RME um bis zu 27 % verringert werden. Ferner wurde herausgefunden, dass sich diese Splitting besonders positiv auf den RME-Eintrag während der Regeneration auswirkt. Dies zeigt Bild 58.

Die Ursache dieser Verbesserung liegt in der deutlichen Verringerung des Strahlimpulses, wobei der Kraftstoffauftrag auf die Zylinderwand minimiert wird. Negative Auswirkungen der neuen Applikation hinsichtlich des Regenerationsvermögens sowie der gasförmigen Schadstoffe konnten nicht beobachtet werden [58].

Schlussfolgernd kann somit ausgesagt werden, dass eine Aufteilung der späten Kraftstoffnacheinspritzung und die Anpassungen der frühen Nacheinspritzungen sowie der Haupteinspritzung hohes Potenzial bei der Reduzierung der Motorölverdünnung hinsichtlich DK und RME aufweisen, jedoch noch sehr viel Forschung benötigen.

Es ist auch bekannt, dass, wenn die Einspritzzeitpunkte der Nacheinspritzungen in den Heizverlaufschwerpunkt (50 % Kraftstoffumsatz) der vorherigen Einspritzung gesetzt werden, sich die Ölver-

dünnung reduzieren lässt. Dies erklärt sich dadurch, dass zum Einspritzzeitpunkt erhöhte Brennraumtemperaturen sowie hohe Gasdichten vorliegen, die einerseits den Strahlimpuls abbremsen, andererseits die flüssige Phase reduzieren. Folglich wird der Kraftstoffauftrag auf der Zylinderwand reduziert. Diese Überlegungen benötigen jedoch eine ständige Brennraumdruckindizierung und eine Online-Heizverlaufsberechnung im Fahrzeugsteuergerät. Der Aufwand an Peripherie sowie an Grundlagenforschung ist immens.

Des Weiteren haben natürlich Systeme mit regenerationsunterstützenden Kraftstoffadditiven einen Vorteil bezüglich der Ölverdünnung, da die Abgas-temperatur vor Partikelfilter nicht auf 600 °C, sondern deutlich geringer angehoben werden muss. Das Ergebnis ist, dass weniger Kraftstoff für die Regeneration des Partikelfilters benötigt wird. Diese Systeme haben jedoch den Nachteil der zusätz-

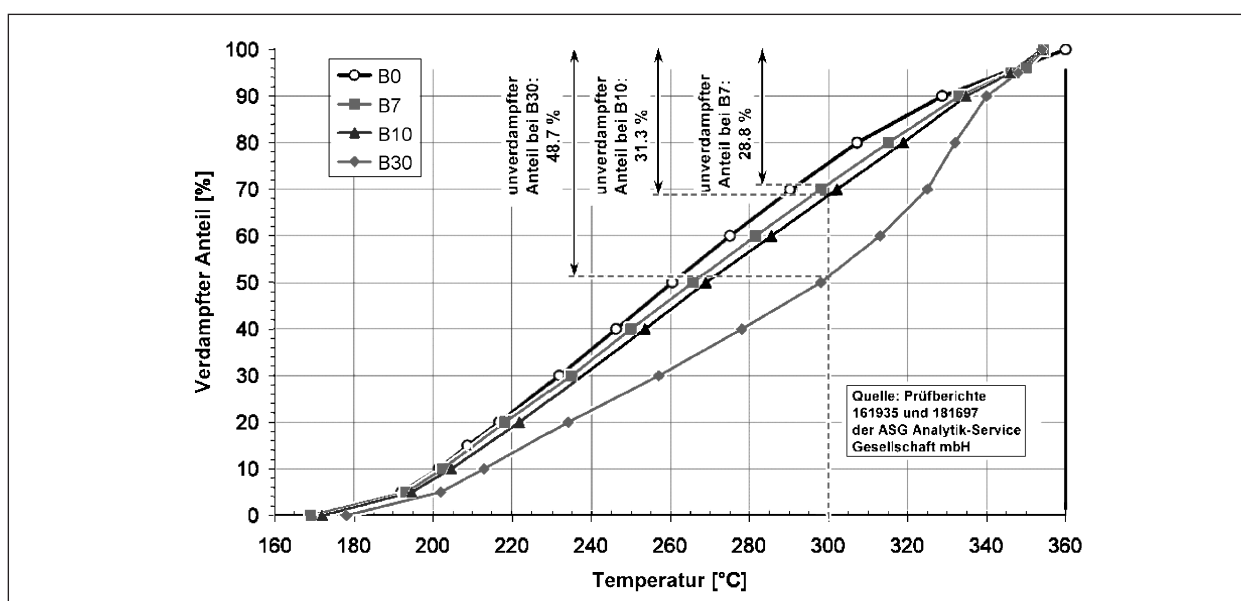


Bild 57: Siedekurven von Biodieselmischungen aus [58]

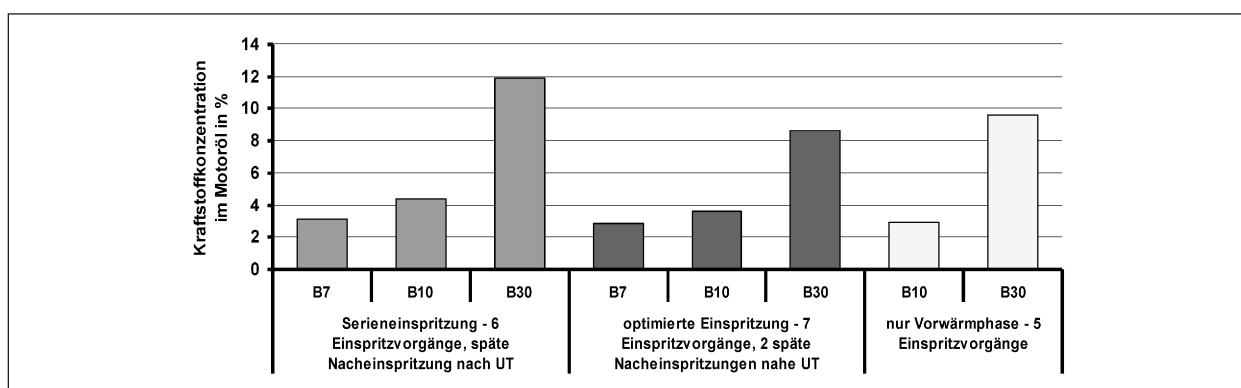


Bild 58: Rapsölmethylester eintrag in das Motoröl nach [58]

lichen Bauteile und eines aufzufüllenden Mediums. Ferner kommt es bei hohen Additivzugaben im Kraftstoff zu Veraschungseffekten im Partikelfilter und damit zu höheren Wartungskosten infolge von Austausch und Reinigung.

Abschließend zu diesem Abschnitt kann gesagt werden, dass höhere Beimischungen an Biodiesel enorme fahrzeugtechnische Anpassungen hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit der Motoren benötigen. Dabei spielt hauptsächlich die Motorölverdünnung eine entscheidende Rolle, welche allein durch eine Verkürzung von Ölwechselintervallen nicht gelöst werden kann. Verkokungen an Einspritzdüsen sowie Materialverträglichkeiten spielen eine weitere wichtige Rolle. Daher scheint es zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll, moderne Fahrzeuge mit aktiv regenerierenden Partikelfiltern mit reinem Biodiesekraftstoff, also B100, zu betreiben.

### Bio-Alkohole

Ottomotoren können prinzipiell mit Ethanol oder Ethanolbeimischungen betrieben werden. Die Eigenschaften von Ethanol zeigen im Vergleich zu Normalbenzin signifikante Unterschiede bei Dichte, Heizwert, Oktanzahl, Verdampfungswärme und Materialverträglichkeit. Besonders der um 1/3 geringere Heizwert sowie die höhere Oktanzahl haben sehr großen Einfluss auf den Verbrennungsprozess im Motor. Weiterhin stellt sich das Thema der Materialverträglichkeit, wie in Kapitel 3.2.2 schon beschrieben, als problematisch dar. Diese Gesichtspunkte machen eine Anpassung der Fahrzeuge bzw. Motoren sowie kraftstoffführenden Teile an das Ethanol erforderlich.

Einige Hersteller haben aus diesem Grund so genannte Flexible Fuel Vehicle (FFV) auf den Markt gebracht. Als FFV werden Kraftfahrzeuge bezeichnet, die mit reinem Ethanol oder Methanol sowie unterschiedlichen Beimischungen mit Benzin betrieben werden können. In diesen Fahrzeugen können Ethanolbeimengungen von 0 bis 85 % (vol.) zu konventionellem Ottokraftstoff erfolgen. Der Hauptunterschied zum Benzinfahrzeug besteht in der angepassten Einspritzanlage mit entsprechender Sensorik, um das Motormanagement auf das gefahrene Ethanolgemisch abzustimmen. Dadurch werden Einflussgrößen wie Zündzeitpunkt und Einspritzmenge speziell an das vorhandene Ethanolgemisch angepasst. Durch den geringeren Heizwert von Ethanol muss die Kraftstofffördermenge erhöht werden, wodurch eventuell eine Anpassung der Kraft-

stoffpumpe erforderlich ist. Weitere Maßnahmen wie die Vorwärmung des Zylinderblocks sowie eine höhere Batteriekapazität sollen die unzureichenden Kaltstarteigenschaften des Ethanols kompensieren. Aufgrund der höheren Verdampfungswärme werden Ventile und Sitzringe thermisch stärker belastet was den Einsatz von härteren Materialien sowie ein kürzeres Intervall des Zündkerzenwechsels erforderlich macht. Mit Blick auf die Materialverträglichkeit ist es notwendig, alle kraftstoffführenden Teile aus beständigen Materialien und/oder korrosionsfesten Oberflächenbeschichtungen zu fertigen.

Neben diesen von den Herstellern angepassten Fahrzeugen hat sich ein großes Spektrum an Firmen gebildet, die Umrüstsets für Ethanolbetrieb anbieten. Diese Umrüstsets beinhalten meist ein Steuergerät, welches zwischen das originale Motorsteuergerät und die Einspritzdüsen geschaltet wird. Dadurch werden die Einspritzparameter an den gegebenen Kraftstoff angepasst. Diese Zusatzsteuergeräte werden für Motoren mit Zentral- oder Direkteinspritzung angeboten und sind somit für fast alle Fahrzeugmodelle erhältlich. Die größten Unterschiede bei diesen Sets zeigen sich im Umfang der Einbindung der vorhandenen Motorelektronik und der damit verbundenen manuellen oder automatischen Umschaltung zwischen Benzin und Ethanol. Bei manchen Firmen werden Lambdasonde oder Unterdruck-Sensor mit in die Steuerung einbezogen. Dies ermöglicht eine Ermittlung des Lastzustandes, wodurch sich ein Verbrauchsvorteil für diese Systeme ergibt. Jedoch erfolgt keine Anpassung der verwendeten Materialien, was die Dauerhaltbarkeit dieser Umrüstungsvariante in Frage stellt. Betrachtet man den Umrüstungsaufwand mit einem Zusatzsteuergerät, so stellt sich dieser als relativ gering dar. Steckverbindungen sind meist schon fahrzeugspezifisch vorbereitet, sodass ein problemloser Einbau möglich ist [72, 73].

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Zielstellung der praktischen Versuche

Die praktischen Versuche haben die folgende Zielstellung:

- Klärung der Fragestellung, inwieweit marktrelevante Fahrzeuge Beimischungen oder Reinkraftstoffe von Biokraftstoffen der 1. Generation erlauben.

- Schwerpunkt 1: Prüfung der Einhaltung der Abgasgrenzwerte für limitierte Emissionen von Kraftfahrzeugen, die mit biogenen Kraftstoffen oder Beimischungen betrieben werden:
  - Typ-I-Prüfung im NEFZ,
  - Shed-Test,
  - -7°C-Kalttest.
  - Dauerhaltbarkeit hinsichtlich der Einhaltung der Abgasgrenzwerte.
- Schwerpunkt 2: Fahrzeugtechnische Voraussetzungen für erhöhte Beimischungen oder Reinkraftstoffe von Biokraftstoffen der 1. Generation:
  - Einflüsse auf Motorleistung,
  - Einflüsse auf das Kraftstoffsystem
  - Einflüsse auf die Motormechanik,
  - Veränderungen im Betriebsverhalten des Motors,
  - Erarbeitung möglicher Anpassungen.
- Schwerpunkt 3: Erarbeitung und Ableitung von Empfehlungen für sinnvolle Beimischungsgrenzen von Biokraftstoffen der ersten Generation und Beschreibung des fahrzeugtechnischen Mehraufwands für eine mögliche Anpassung der Fahrzeuge.

## 4.2 Erarbeitung von Prüfstandsversuchen

In Bild 59 wird der modulare Aufbau der Versuche deutlich. Die Arbeitsumfänge innerhalb der Module werden in den Bildern 60, 61 und 63 näher erörtert.

Im Zuge der Abgasmessungen innerhalb der einzelnen Module wurden neben den limitierten Emissionen auch die NO<sub>2</sub>- und (bei den Ottofahrzeugen) Formaldehyd-Emissionen ermittelt. Da die Formaldehyd-Emissionen stets an der Nachweisgrenze lagen, wird auf diesen Schadstoff im Folgenden nicht weiter eingegangen.

### Modul 1: Eingangsuntersuchungen Otto/Diesel

Im ersten Versuchsmodul wurden 5 Fahrzeuge ausgewählt, beschafft und gemäß Bild 60 und Bild 61 untersucht und in einer Typ-I-Prüfung nach VO (EG) Nr. 715/2007 mit den verschiedenen Kraftstoffblends eingemessen. Dabei kam ein Referenzkraftstoff (Otto = E5; Diesel = B5) als Vergleichsbasis zum Einsatz. Der Kraftstoffwechsel erfolgte durch eine vollständige Entleerung und Neubefüllung des Fahrzeugtanks und ein anschließendes Einlaufprogramm bestehend aus einer 30-min-Konstantfahrt bei 80 km/h gefolgt von einem Vorkonditionierzyklus (Otto: 1 x Teil 1 u. 2 x Teil 2 NEFZ; Diesel: 3 x Teil 2 NEFZ). Die gewonnenen

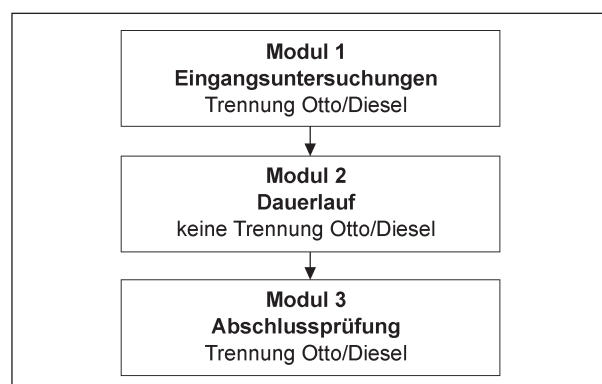


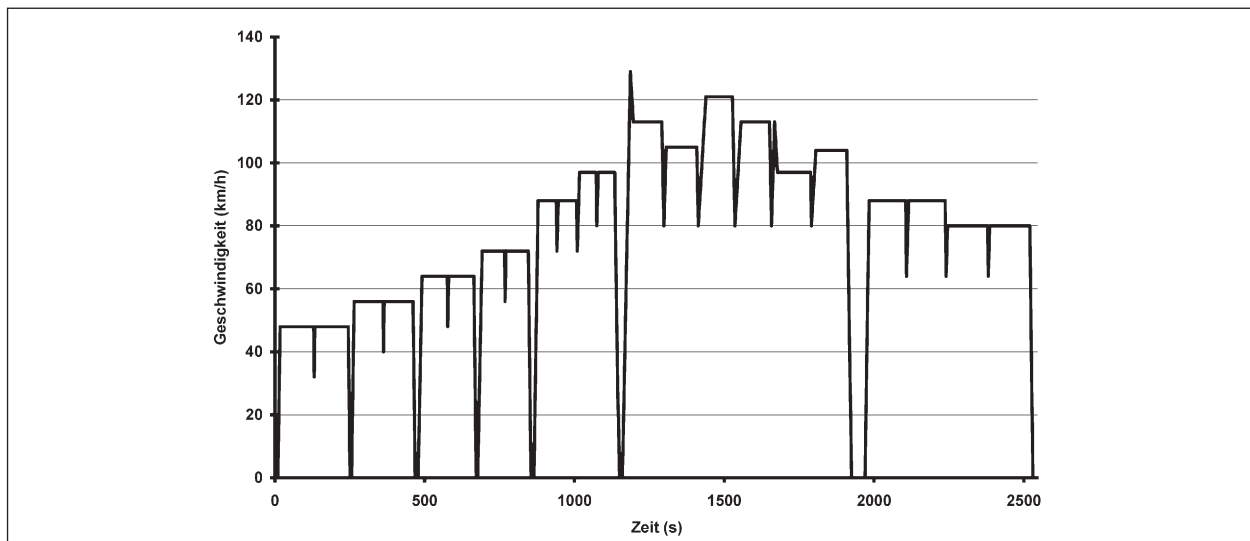
Bild 59: Versuchsablauf modular

Modul	Untergliederung des Versuchspunktes	Bemerkungen
10	Endoskopie relevanter Komponenten	zu Beginn des Versuchs
	Prüfung des Kraftstoffsystems	zu Beginn des Versuchs
	Prüfung Motorsteuergerät/Fehlerspeicher	zu Beginn des Versuchs
	Leistungsmessung auf Leistungsrollenprüfstand	jeweils konventioneller Kraftstoff/verschiedene Blends
	Abgasmessung auf Abgasrollenprüfstand	jeweils konventioneller Kraftstoff/verschiedene Blends; Beutel und modal: CO, HC, NMHC, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , PM, PN
	Shedprüfung	ausgewählter Blend für den Dauerlauf
	-7 °C Cold CO-, HC-Messung	ausgewählter Blend für den Dauerlauf
	Formaldehyde	ausgewählter Blend für den Dauerlauf
	Ölwechsel mit Filter	zu Beginn des Versuchs

Bild 60: Eingangsuntersuchungen Otto

Modul	Untergliederung des Versuchspunktes	Bemerkungen
1D	Endoskopie relevanter Komponenten	zu Beginn des Versuchs
	Prüfung des Kraftstoffsystems	zu Beginn des Versuchs
	Prüfung Motorsteuergerät/Fehlerspeicher	zu Beginn des Versuchs
	Leistungsmessung auf Leistungsrollenprüfstand	jeweils konventioneller Kraftstoff/verschiedene Blends
	Leistungsmessung auf Leistungsrollenprüfstand	jeweils konventioneller Kraftstoff/verschiedene Blends
	Abgasmessung auf Abgasrollenprüfstand	jeweils konventioneller Kraftstoff/verschiedene Blends; Beutel und modal: CO, HC, NMHC, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , PM, PN
	Ölwechsel mit Filter	zu Beginn des Versuchs

**Bild 61:** Eingangsuntersuchungen Diesel



**Bild 62:** Standardstraßenfahrzyklus nach VO (EG) Nr. 692/2008

Ergebnisse fanden bei der Auswahl der Kraftstoffe und der Fahrzeuge für den späteren Dauerlauffest Berücksichtigung. Jede Emissionsmessung nach VO (EG) 715/2007 (Typ-I-Prüfung im NEFZ) wurde hierbei mindestens zweimal durchgeführt. Somit war es möglich, Messfehler auszuschließen und durch Mittelwertbildung die Messgenauigkeit zu erhöhen.

## Modul 2: Dauerlaufuntersuchungen Otto/Diesel

Im Anschluss an das Modul 1 fanden nach Auswahl eines Otto- und eines Diesel-Fahrzeugs sowie der dazugehörigen Kraftstoffblends die Dauerlaufuntersuchungen statt. Dabei wurde eine Gesamtdistanz von 80.000 km je Fahrzeug zurückgelegt. Die Versuche wurden in festen Sequenzen auf dem DEKRA-Test-Oval mit einem GPS gestützten Fah-

rerleitsystem, zur Kontrolle der Einhaltung des Fahrzyklus, und auf einem Dauerlaufrollenprüfstand mit Fahrroboter durchgeführt. In beiden Fällen wurde der Standardstraßenfahrzyklus nach VO (EG) Nr. 692/2008 gefahren (s. Bild 62).

Abbruchkriterien für den Dauerlauf wären gewesen:

- Nichteinhaltung der limitierten Emissionen in der Typ 1-Prüfung,
- schwerwiegende Fehler, welche durch das OBD-System gegebenenfalls ausgelesen worden wären,
- schwerwiegende Schäden im Kraftstoffsystem,
- schwerwiegende Schäden an der Motormechnik,

Modul	Untergliederung des Versuchspunktes	Bemerkungen
20D	Ausrüstung des Fahrzeuges mit Fahrerleitsystem	vor Start Dauertest
	zyklische Überwachung des OBD-Fehlerspeichers	visuelle Prüfung und Datenauswertung OBD Mitschrieb
	zyklische Sichtprüfung	täglich im Werkstattbereich unter Nutzung von Hilfsmitteln
	Endoskopie relevanter Komponenten	in Stützstellen alle 10.000 km
	Prüfung des Kraftstoffsystems	in Stützstellen alle 10.000 km
	Leistungsmessung auf Leistungsrollenprüfstand	in Stützstellen alle 10.000 km
	Abgasmessung auf Abgasrollenprüfstand	Typ 1 in Stützstellen aller 10.000 km; Beutel und modal: CO, HC, NMHC, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , PM, PN
	Feststellung der Motorölmenge	in Stützstellen alle 10.000 km
Analyse der Motorenölproben	in Stützstellen alle 10.000 km	

Bild 63: Arbeitsumfänge Dauerlauf

Modul	Untergliederung des Versuchspunktes	Bemerkungen
30	Prüfung Motorsteuergerät/Fehlerspeichedr	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Endoskopie relevanter Komponenten	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Leistungsmessung auf Leistungsrollenprüfstand	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Abgasmessung auf Abgasrollenprüfstand	Dauerlaufblend; Beutel und modal: CO, HC, NMHC, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , PM, PN
	Analyse der Motorenölproben	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Zerlegung des Kraftstoffsystems und Dokumentation	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Shedprüfung	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	-7 °C Cold CO, HG Messung	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Formaldehyde	bei Versuchsende, Dauerlaufblend

Bild 64: Abschlussprüfungen Otto

Modul	Untergliederung des Versuchspunktes	Bemerkungen
3D	Prüfung Motorsteuergerät/Fehlerspeichedr	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Endoskopie relevanter Komponenten	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Leistungsmessung auf Leistungsrollenprüfstand	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Abgasmessung auf Abgasrollenprüfstand	Dauerlaufblend; Beutel und modal: CO, HC, NMHC, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , PM, PN
	Analyse der Motorenölproben	bei Versuchsende, Dauerlaufblend
	Zerlegung des Kraftstoffsystems und Dokumentation	bei Versuchsende, Dauerlaufblend

Bild 65: Abschlussprüfungen Diesel

- zu hohe Ölverdünnung.

Bild 63 zeigt die detaillierten Arbeitsumfänge.

### Modul 3: Abschlussprüfungen Otto/Diesel

Im Anschluss an die Dauerläufe wurden die Fahrzeuge abschließend eingehend geprüft, wobei es auch zu Zerlegungen kam (Bild 64 und Bild 65).

## 4.3 Versuchsfahrzeuge

Insgesamt standen 5 verschiedene Versuchsfahrzeuge zur Verfügung, die in Verbindung mit unterschiedlichen Kraftstoffblends getestet wurden. Dabei kamen 3 Fahrzeuge mit Ottomotor (direkt- oder saugrohreinspritzend) sowie 2 Fahrzeuge mit Common Rail Dieselmotor zum Einsatz. Alle Fahrzeuge erfüllten die Emissionstufe Euro 5.

Modell/Typ	Leistung kW/min <sup>-1</sup>	Hubraum cm <sup>3</sup>	Motor- kennung	Einspritzung	Aufladung	AGN	Schadstoff- norm
Volkswagen (Golf)/ TSI 1.2	77/5.000	1.198	CBZ	Benzin- Direkteinspritzung	Ja	G-KAT	Euro 5
Audi A4/ 1.8 TFSi	88/3.650	1.798	CDHA	Benzin- Direkteinspritzung	Ja	G-KAT	Euro 5
Opel Corsa/1.2	63/5.600	1.229	A12 XER	Multi-Point- Benzineinspritzung	Nein	G-KAT	Euro 5
Volkswagen Touran/ TDI 2.0	103/4.200	1.968	CFHC	Common-Rail- Direkteinspritzung	Ja	Oxikat + DPF	Euro 5
Renault Megane/ dCi 130	96/3.750	1.870	F9QN870	Common-Rail- Direkteinspritzung	Ja	Oxikat + DPF	Euro 5

Tab. 12: Kurzbeschreibung Versuchsträger

Als Vertreter der Dieselfahrzeuge kamen Fahrzeuge des VAG- und des PSA-Konzerns zum Einsatz. Die Auswahl ist auf einen VW Touran 2.0 TDI und einen Renault Megane dCi 130 gefallen. Diese Versuchsträger, speziell mit ihren Motorisierungen, besitzen einen hohen Marktanteil, wodurch die gewonnenen Ergebnisse für ein großes Spektrum des Fahrzeugbestandes in Deutschland zutreffend sind. Ferner entsprechen beide Fahrzeuge dem aktuellen Stand der Technik.

Als Vertreter der Ottofahrzeuge kamen Fahrzeuge des GM- und des VAG-Konzerns zum Einsatz. Dabei ist die Wahl auf einen Opel Corsa 1.2, einen VW Golf 1.2 sowie einen Audi A4 1.8 gefallen. Der Corsa, der Golf sowie teilweise der A4 entsprechen mit ihrem geringen Hubraum dem heutigen Trend des „Downsizing“. Auch hier bilden die Motorisierungen eine große Marktpalette ab, sodass die Ergebnisse für einen großen Fahrzeugbestand in Deutschland zutreffend sind.

In Tabelle 12 sind technische Eckdaten zu den Versuchsfahrzeugen aufgeführt.

## 4.4 Versuchskraftstoffe

### Ottokraftstoffe

Als Basis für die Ottokraftstoffe kam ein E5-Zertifizierungskraftstoff der Firma Halterman, welcher die Anforderungen der VO (EG) Nr. 692/2008 an den Zertifizierungskraftstoff Typ I erfüllt, zum Einsatz. Dieser wurde mit einem normgerechten Kraftstoff nach DIN 51 625 (E85) zu den einzelnen Prüfmustern geblendet. Das Blendedergebnis wurde im Anschluss von der Firma ASG Analytik-Service Gesellschaft, einem akkreditierten Prüflabor, auf die verschiedenen Prüfparameter untersucht. Ausge-

wählte Parameter, welche den Kraftstoff ausreichend genau für die Berechnungen beschreiben, sind in Tabelle 13 dargestellt. Der maximale Fehler bezüglich der Blendgenauigkeit inklusive der Auswerteverfahren wird mit 5 % angegeben.

### Dieselmotorkraftstoffe

Als Basis für die Dieselmotorkraftstoffe kam ein B5-Zertifizierungskraftstoff der Firma Halterman, welcher die Anforderungen der VO (EG) Nr. 692/2008 an den Zertifizierungskraftstoff Typ I erfüllt, zum Einsatz. Dieser wurde mit einem normgerechten Kraftstoff nach DIN EN 14 214 (B100) zu den einzelnen Prüfmustern geblendet. Der weitere Ablauf ist identisch zum Punkt Ottokraftstoffe. Anzumerken ist, dass kritische Parameter wie Oxidationsstabilität ebenfalls überwacht wurden (Tabelle 14).

### Kraftstoffdatenbasis für die Prüfstands - berechnungen

Da die VO (EG) Nr. 692/2008 prinzipiell die Berechnungsmethoden für die einzelnen Bezugskraftstoffe (E5 und B5) vorgibt, kommt es teilweise zu erheblichen Abweichungen bei der Berechnung der einzelnen Schadstoffmassen sowie des Kraftstoffverbrauchs bei der Messung abweichender Kraftstoffblends. Deshalb muss die Berechnung am Abgasrollenprüfstand dynamisch gestaltet werden. Als Eingangsgrößen für das Rechenmodell werden die Ergebnisse der Elementaranalysen des Kraftstoffes, wie im vorherigen Punkt gezeigt, benötigt. Ferner findet eine Anpassung der Schadstoffdichte auf Basis der Kraftstoffzusammensetzung statt, da gerade bei den unverbrannten Kohlenwasserstoffen erhebliche Abweichungen durch die zusätzlichen Sauerstoffverbindungen entstehen können.

Prüfmuster	Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Einheit
E 5	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	752,00	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	85,10	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	13,18	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	1,80	% (m/m)
	Ethanolgehalt	DIN EN ISO 22854	4,90	% (V/V)
E 10	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	756,00	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	83,16	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	13,16	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	3,70	% (m/m)
	Ethanolgehalt	DIN EN ISO 22854	10,00	% (V/V)
E 20	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	759,00	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	79,68	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	12,91	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	7,42	% (m/m)
	Ethanolgehalt	DIN EN ISO 22854	20,73	% (V/V)
E 25	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	761,30	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	77,84	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	12,92	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	9,23	% (m/m)
	Ethanolgehalt	DIN EN ISO 22854	25,90	% (V/V)
E 85	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	786,20	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	56,00	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	13,00	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	29,50	% (m/m)
	Ethanolgehalt	DIN EN ISO 22854	84,30	% (V/V)

Tab. 13: Kraftstoffparameter Zertifizierungskraftstoff Otto

Prüfmuster	Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Einheit
B 5	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	834,30	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	85,50	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	13,51	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	0,60	% (m/m)
	Fettsäuremethylester-Gehalt	DIN EN 14078	5,10	% (V/V)
B 10	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	837,10	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	85,00	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	13,46	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	1,20	% (m/m)
	Fettsäuremethyl-ester-Gehalt	DIN EN 14078	10,20	% (V/V)
B 20	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	842,00	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	83,50	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	13,21	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	2,30	% (m/m)
	Fettsäuremethylester-Gehalt	DIN EN 14078	20,40	% (V/V)
B 50	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	857,20	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	81,10	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	12,87	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	3,92	% (m/m)
	Fettsäuremethylester-Gehalt	DIN EN 14078	50,10	% (V/V)
B 100	Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	881,10	kg/m <sup>3</sup>
	Kohlenstoffgehalt	DIN 51 732	76,60	% (m/m)
	Wasserstoffgehalt	DIN 51 732	12,20	% (m/m)
	Sauerstoffgehalt	DIN 51 732 mod.	9,00	% (m/m)
	Fettsäuremethylester-Gehalt	DIN EN 14078	96,90	% (V/V)

Tab. 14: Kraftstoffparameter Zertifizierungskraftstoff Diesel



1. Berechnung der spezifischen Emissionen HC [g/km]; CO [g/km]; CO<sub>2</sub> [g/km];

(Formel 1-8)

$$M[\text{g/km}] = \frac{C_s \cdot \rho_s \cdot V_{\text{mix}}}{d}$$

$$C_s[\text{ppm}] = C_R - C_L \cdot \left(1 - \frac{1}{\text{DF}}\right)$$

$$\text{DF} [-] = \frac{x}{C_{\text{CO}_2} + (C_{\text{HC}} + C_{\text{CO}}) \cdot 10^{-4}}$$

$$x = \frac{100 \cdot \chi}{\chi + \frac{y}{2} + 3,76 \cdot \left(\chi + \frac{y}{2} - \frac{z}{2}\right)} \quad \text{für einen Kraftstoff } C_x H_y O_z$$

alle Gleichungen ineinander eingesetzt ergibt:

$$M[\text{g/km}] = \frac{(C_R - C_L \cdot \left(1 - \frac{\left(\chi + \frac{y}{2} + 3,76 \cdot \left(\chi + \frac{y}{2} - \frac{z}{2}\right)\right)}{\left(C_{\text{CO}_2} + (C_{\text{HC}} + C_{\text{CO}}) \cdot 10^{-4}\right)}\right) \cdot \rho_s \cdot V_{\text{mix}}}{(100 \cdot \chi) \cdot d}$$

dieses Ergebnis eingesetzt in:

2. Berechnung des Kraftstoffverbrauches durch die spezifischen Emissionen

$$\text{Verbrauch} \left[ \frac{l}{100 \text{ km}} \right] = \frac{K1}{\rho_{\text{Kraftstoff}}} \cdot \left[ (C_{\text{Anteil}}_{\text{HCAbgas}} \cdot \text{HC}) + (0,429 \cdot \text{CO}) + (0,273 \cdot \text{CO}_2) \right]$$

mit K1:

$$K1 = \frac{0,1}{C_{\text{Anteil}}_{\text{Kraftstoff}}}$$

ergibt:

$$\text{Verbrauch} \left[ \frac{l}{100 \text{ km}} \right] = \frac{0,1}{\rho_{\text{Kraftstoff}} \cdot C_{\text{Anteil}}_{\text{Kraftstoff}}} \cdot \left[ (C_{\text{Anteil}}_{\text{HCAbgas}} \cdot \text{HC}) + (0,429 \cdot \text{CO}) + (0,273 \cdot \text{CO}_2) \right]$$

Annahmen und Formelzeichen:

- Kraftstoff verbrennt nur zu HC, CO, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O.
- HC-Zusammensetzung im Kraftstoff entspricht der HC-Zusammensetzung im Abgas.
- Es gilt: Masse der C-Atome im Kraftstoff entspricht der Masse der C-Atome im Abgas.

M Masse des Schadstoffes [g/km]

Cs korrigierter Schadstoff [ppm]

$\rho_s$  Dichte des Schadstoffes → Berechnung erfolgt durch Molmasse [g/l]

$V_{\text{mix}}$  Volumen im Verdünnungstunnel [l]

d Fahrtstrecke [km]

CR unkorrigierter Schadstoff [ppm]

CS Schadstoff in der Verdünnungsluft [ppm]

DF Verdünnungsfaktor

HC, CO, CO<sub>2</sub> jeweiliges Schadstoffergebnis in [g/km]

C Kohlenstoffgehalt [wt] → ermittelt durch Elementaranalyse

$\rho_{\text{Kraftstoff}}$  Dichte des Kraftstoffes → ermittelt durch Elementaranalyse

x Kohlenstoffgehalt → ermittelt durch Elementaranalyse

y Wasserstoffgehalt → ermittelt durch Elementaranalyse

z Sauerstoffgehalt → ermittelt durch Elementaranalyse

## 4.5 Verwendete Prüfstände

### Rollenprüfstand



Bild 66: Rollenprüfstand Versuchsaufbau

Hersteller	MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG
Typ/Bauart	ECDM-48L 150 kg
Spezifikation	Scheitelrolle
Anwendung	Kleinkraft, Kraft, Trike, Quad, 1-achsgetriebene Pkw
<b>Parameter</b>	
Rollendurchmesser	48" (1.219,2 mm)
Rollenbreite	700 mm
Abstand Rolleninnenkante	900 mm
Abstand Rollenaußenkante	2.300 mm
Auswuchtgüte	Q 2,5
max. Geschwindigkeit	200 km/h
max. Leistung	150 kW
max. Zugkraft	6.000 N
Grundträgheit pro Rollensatz	3.000 lbs
minimale Massensimulation	250 lbs
maximale Massensimulation	7.000 lbs
Einstellbare Schrittweite	1 lbs
<b>Peripherie</b>	
<b>Gebälse</b>	
Hersteller	MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG
Typ/Bauart	WgB60 Lg1303
Spezifikation	Axialgebläse
Eigenschaft	35.000 h³/h, geschwindigkeitsproportional

Tab. 15: Technische Daten – Kombirollenprüfstand

### Shed-Kammer



Bild 67: Shed-Kammer

Hersteller	Weiss Umwelttechnik GmbH
Typ/Bauart	VT 56/15 IU
Spezifikation	VT-Shed
Anwendung	für alle Wirtschaftskreise weltweit
<b>Parameter</b>	
Kammervolumen	56 m³ (6,8 x 2,7 x 3 m)
Nutzhöhe	2,2 m
Temperaturbereich	15 °C-45 °C geregelt; burn outs bis 80 °C
Betankungsprüfung	ist vorbereitet aber momentan nicht möglich
<b>Peripherie</b>	
<b>Emissionsmessung</b>	
Hersteller	Pierburg Instruments
Typ/Bauart	FID 4000 (low emission)
Messbereich	10 und 100 ppm

Tab. 16: Technische Daten – Shed-Kammer

## Klimakammer und 4x4 Abgasrollenprüfstand



Bild 68: Klimarollenprüfstand

Hersteller	MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG
Typ/Bauart	ECDM-48L 4x4
Spezifikation	Allrad-Scheitelrolle
Anwendung	1- und 2-achsgetriebene Pkw
<b>Parameter</b>	
Rollendurchmesser	48" (1.219,2 mm)
Rollenbreite	700 mm
Abstand Rolleninnenkante	900 mm
Abstand Rollenaußenkante	2.300 mm
variabler Achsabstand	2,0 bis 4,2 m
Auswuchtgüte	Q 2,5
max. Geschwindigkeit	200 km/h
max. Leistung	150 kW
max. Zugkraft	12.000 N
Grundtragheit pro Rollensatz	3.000 lbs
minimale Massensimulation	1.000 lbs
maximale Massensimulation	11.000 lbs
Einstellbare Schrittweite	1 lbs

Tab. 17: Technische Daten – Klimarollenprüfstand

<b>Peripherie</b>	
<b>Gebläse</b>	
Hersteller	MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG
Typ/Bauart	WgB60 Lg1303
Spezifikation	Axialgebläse
Eigenschaft	35.000 h <sup>3</sup> /h, geschwindigkeitsproportional
<b>Klimakammer</b>	
Hersteller	Imtech Deutschland GmbH & Co. KG
<b>Spezifikation</b>	
Klimabereich	-20 °C bis 45 °C
Abkühl.-Geschw.	10 grd/h
Aufheiz.-Geschw.	10 grd/h
Regelgenauigkeit	+/-1K; +/-3 % r .F.

Tab. 17: Fortsetzung

## Dauerlaufrollenprüfstand mit Fahrroboter



Bild 69: Dauerlaufrollenprüfstand

Hersteller	MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG
Typ/Bauart	ECDM-48L 4x4
Spezifikation	Allrad-Scheitelrolle
Anwendung	1- und 2-achsgetriebene Pkw
<b>Parameter</b>	
Rollendurchmesser	48" (1.219,2 mm)
Rollenbreite	700 mm
Abstand Rolleninnenkante	900 mm
Abstand Rollenaußenkante	2.300 mm
variabler Achsabstand	2,0 bis 4,2 m
Auswuchtgüte	Q 2,5
max. Geschwindigkeit	250 km/h
max. Leistung	250 kW
max. Zugkraft	12.000N
Grundtragheit pro Rollensatz	3.000 lbs
minimale Massensimulation	1.000 lbs
maximale Massensimulation	10.000 lbs
Einstellbare Schrittweite	1 lbs
<b>Peripherie</b>	
<b>Gebläse</b>	
Hersteller	Witt & Sohn
Typ/Bauart	P-N8L5/V1.05/1400/GD/8
Spezifikation	Radialgebläse
Eigenschaft	160.000 h³/h, geschwindigkeitsproportional

Tab. 18: Technische Daten – Dauerlaufrollenprüfstand und Fahrroboter

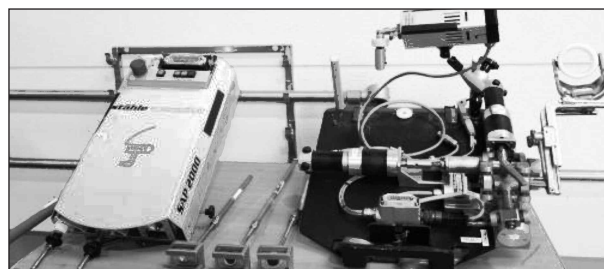
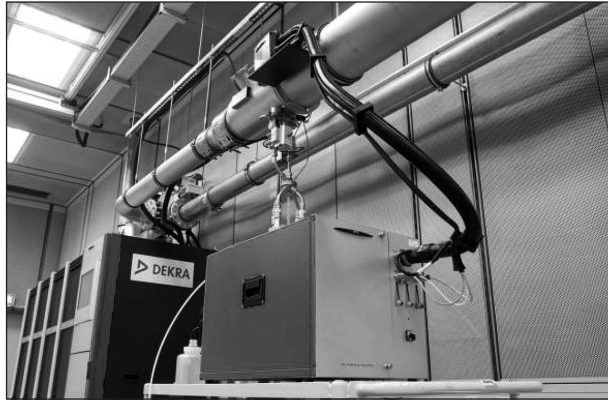


Bild 70: Fahrroboter

<b>Fahrroboter</b>	
Hersteller	Stähle GmbH
Typ/Bauart	SAP 2000
<b>Fahrzeuffesselung</b>	
Hersteller	S. Bleyer GmbH
Art	Stangenfesselungssystem für Abschleppöse und Zugvorrichtung
<b>Betankung</b>	
Hersteller	Führer & Weingartner GmbH
Art	automatische Betankung von 4 Kraftstoffqualitäten möglich
<b>Sicherheitseinrichtung</b>	
Art	CO <sub>2</sub> -Löscheinrichtung mit Gas- und Brandmeldern

Tab. 18: Fortsetzung

## Abgasanalytik



**Bild 71:** CVS, Partikelzähler, temperierte Schränke für Abgasbeutel

Hersteller	Pierburg Instruments
Typ/Bauart	AMA 4000
Spezifikation	1 modal verdünnt und Beutel- und 2 Rohgaslinien
Anwendung	für alle Wirtschaftskreise weltweit
<b>Parameter</b>	
1 Linie für verdünnte Messungen	
Abgaskomponenten	CH, CH <sub>4</sub> , NO, NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
2 Rohgaslinien	
Abgaskomponenten	CH, NO, NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> mit vorgeschaltetem beheizten Filter und beheizter Entnahmeleitung
<b>Partikelsammler Kombirolle</b>	
Hersteller	AVL List GmbH
Typ/Bauart	PSS i 60
Spezifikation	EU und US Sonde
<b>Partikelsammler Klimakammer</b>	
Hersteller	Pierburg Instruments
Typ/Bauart	FFP
Spezifikation	EU und US Sonde

**Tab. 19:** Technische Daten – Abgasmesstechnik

<b>Partikelwaage</b>	
Hersteller	Sartorius AG
Typ/Bauart	SE2-F
Spezifikation	0,0001 mg Ablesegenauigkeit
<b>Partikelzähler</b>	
Hersteller	AVL List GmbH
Typ/Bauart	AVL 489 Particle Counter
<b>Peripherie</b>	
<b>CVS-Anlage Kombirolle</b>	
Hersteller	Pierburg Instruments
Typ/Bauart	CVS CFV 12 WT LE
Spezifikation	Quatroventuri mit dem Einzeldurchsatz 1; 2; 4; 5 Nm <sup>3</sup> /min
<b>CVS-Anlage Klimarolle</b>	
Hersteller	Pierburg Instruments
Typ/Bauart	CVS CFV 20 WT LE
Spezifikation	Quatroventuri mit dem Einzeldurchsatz 1,5; 3; 6; 9 Nm <sup>3</sup> /min

**Tab. 19:** Fortsetzung

## 5 Auswertung der Versuchsergebnisse

### 5.1 Messergebnisse Modul 1 „Eingangsuntersuchungen“

Im Folgenden sollen die Messergebnisse des Versuchsteils Modul 1 dargelegt und erläutert werden. Auch wenn die verwendeten Fahrzeuge lediglich die Euro-5-Abgasnorm erfüllen müssen, werden die Euro-6-Grenzwerte bei den folgenden Auswertungen als Bewertungsmaßstab hinzugezogen.

#### 5.1.1 Diesel-Fahrzeuge

##### VW Touran 2.0 TDI

Die Bilder 72 bis 74 stellen die gewonnenen Erkenntnisse bei Verwendung der Kraftstoffblends B5, B10 und B20 dar.

Bei Betrachtung von Bild 72 wird ein fallender Trend der HC-, CO- sowie der NMHC-Emissionen mit steigendem Biodieselanteil deutlich. Betrachtet man jedoch die Größenordnungen der einzelnen Emissionen sowie deren Reduzierung, liegen diese im Bereich von wenigen mg/km. Der resultierende Unterschied der HC- und CO-Emissionen ist somit sehr gering und macht eine Aussage zum Trend nur sehr schwer möglich. Werden die Emissionen über den Euro-5-/Euro-6-Grenzwert von CO mit 0,5 g/km skaliert, wird diese Aussage sehr deutlich.

Auch wenn eine Trendanalyse hier sehr schwierig erscheint, ist jedoch die Aussage zutreffend, dass der steigende biogene Anteil bei den betrachteten Kraftstoffen keine negativen Auswirkungen auf die Emissionen HC und CO aufweist.

Hinsichtlich der Stickoxidemissionen wäre laut der dargelegten Literaturrecherche ein Anstieg von bis zu 13 % zu erwarten. Wie aus den Bildern 73 und 74 ersichtlich, steigen die  $\text{NO}_x$ -Emissionen mit zunehmendem Biokraftstoffanteil von B5 zu B20 um ca. 7 % an, bleiben aber noch unter dem Euro-5-Grenzwert. Dieser Anstieg ist hauptsächlich auf den zusätzlichen Sauerstoff im Biodiesel zurückzuführen. Bedingt durch den höheren Sauerstoffanteil steigen lokal das Verbrennungsluftverhältnis und die Brennraumtemperatur, wodurch die Bildung von  $\text{NO}_x$  begünstigt wird. Der in Bild 74 dargestellte  $\text{NO}_2$ -Anstieg beträgt 8 % und skaliert damit mit dem Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Durch die noch giftigere Wirkung von  $\text{NO}_2$  auf die Atemwege des Men-

schon ist dieser Anstieg besonders kritisch zu diskutieren. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass  $\text{NO}_2$  durch eine Beutelmessung von  $\text{NO}$  ermittelt wurde. Eine genaue Messmethode ist derzeit noch nicht vorgeschrieben.

Nach Literaturangaben ist ein Absinken der Rohemission an Partikeln von bis zu 33 % möglich. Bei den hier vorgenommenen Untersuchungen scheint die Partikelmasse um etwa 50 % gesunken zu sein. Beachtet werden muss jedoch, dass das untersuchte Fahrzeug mit einem Dieselpartikelfilter ausgerüstet ist. Das geschlossene System ist in der Lage, bis zu 99 % der Partikelemissionen zu filtern, und wird anschließend durch Kraftstoffnacheinspritzung in den Brennraum aktiv regeneriert. Somit kommt es durch den DPF zu einem Überblendungseffekt der eigentlichen Rohemission des Verbrennungsmotors. Somit kann in Anbetracht der sehr hohen Abscheidegrade im Filtersystem von eher stochastischen Einflüssen bei der gravimetrischen und Par-

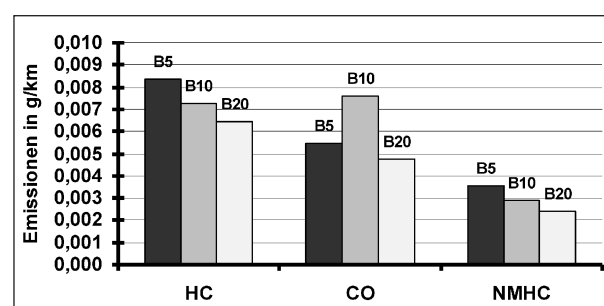


Bild 72: VW Touran, HC-, CO- und NMHC-Emission

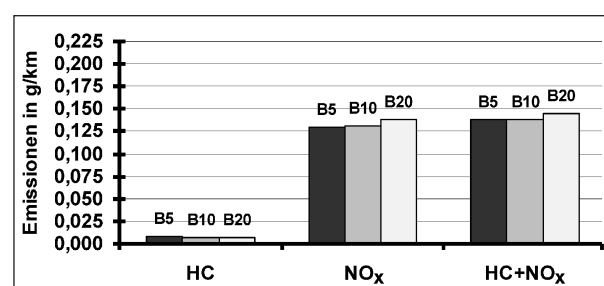


Bild 73: VW Touran, HC-,  $\text{NO}_x$ -Emission

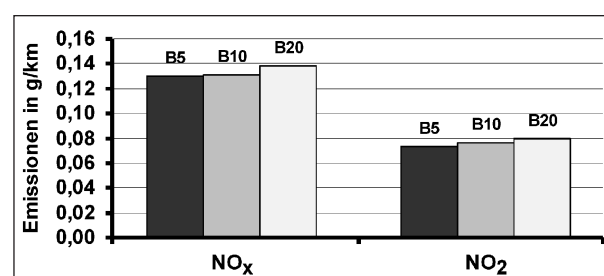


Bild 74: VW Touran,  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NO}_2$ -Emission

tikelanzahlmessung ausgegangen werden. Ein weiterer sehr wichtiger Punkt ist das Emissionsniveau. Bei Betrachtung von Bild 75 wird sofort klar, dass bei einem Euro-5b-Grenzwert von 0,0045 g/km für die Partikelmasse sowie  $6 \cdot 10^{11}$  für die Partikelanzahl, die gemessenen Werte um Größenordnungen unter diesen (sowie auch dem Euro-6-)Grenzwerten liegen. Dies belegt klar, dass der DPF im vorliegenden Fall einwandfrei funktionierte. Ferner zeigen sich hier bezüglich des gravimetrischen Messverfahrens der Partikel deutliche Grenzen bei der Messgenauigkeit aufgrund des geringen Emissionsniveaus.

Da bezüglich der Motorrohmission keine Messung durchgeführt wurde, kann an dieser Stelle nur auf die Literatur, speziell auf die Literaturrecherche in den vorherigen Kapiteln, verwiesen werden. Hier wurde allgemein nachgewiesen, dass bezüglich der Partikelrohmission durch den zusätzlichen Sauerstoffgehalt im Kraftstoff eher mit Verbesserungen

hinsichtlich der Partikelemission zu rechnen ist. Auch bezüglich des Regenerationsvermögens durch aktive Systeme oder mittels CRT-Effekts konnten keine negativen Eigenschaften dargelegt werden. Dies zeigt sich auch deutlich in den hier gezeigten Untersuchungen, wobei die Regenerationsfähigkeit, die Langzeitstabilität sowie sonstige Einflüsse im Block Modul 2 „Dauerlauf“ in diesem Projekt genauer untersucht werden.

Aus Bild 76 wird ein steigender Kraftstoffverbrauch mit zunehmender Biodieselbeimischung ersichtlich. Der Verbrauch ist um ca. 3,5 % von B5 zu B20 angestiegen. Dieser Mehrverbrauch lässt sich hauptsächlich auf den geringeren C-Gehalt zurückführen, wobei auch der Wasserstoffgehalt mit steigender Beimischung leicht sinkt. Der geringere C-Gehalt hat einen geringeren Heizwert des Kraftstoffes zur Folge, woraus gemäß der Gleichung (9) eine geringere Wärmemenge für den Verbrennungsprozess resultiert.

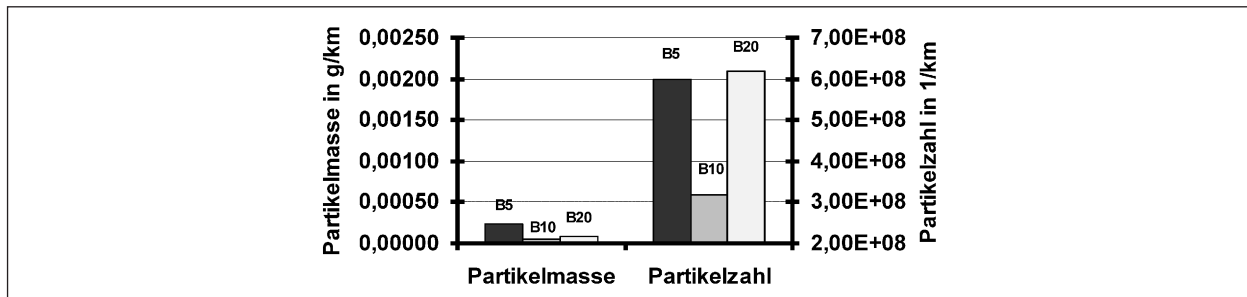


Bild 75: VW Touran, PM und PN

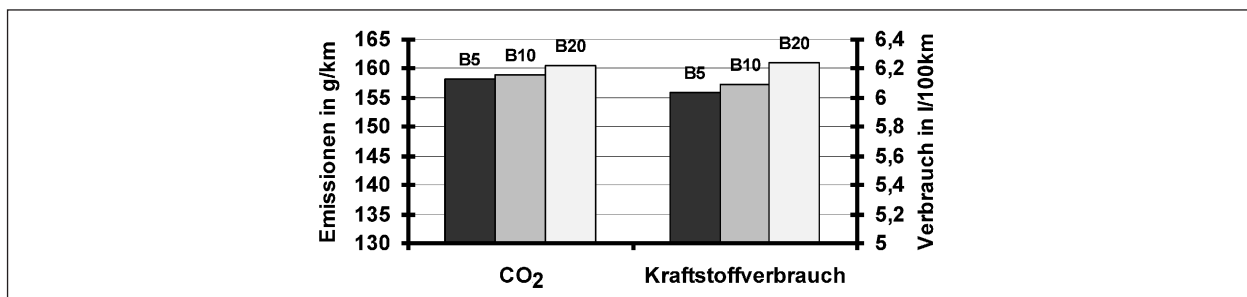


Bild 76: VW Touran, CO<sub>2</sub> und Kraftstoffverbrauch

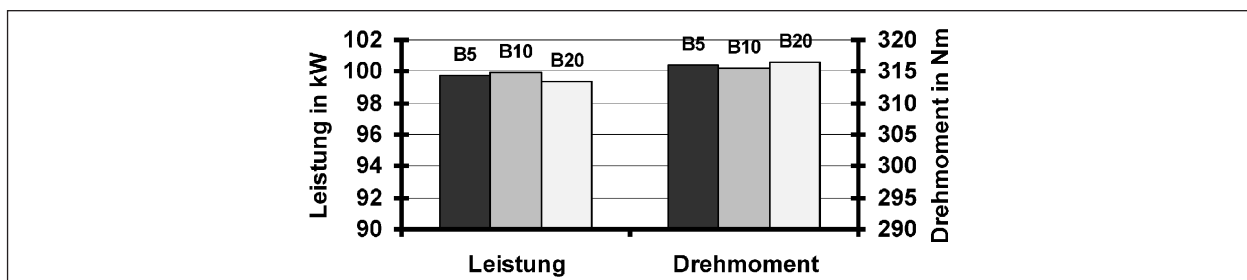


Bild 77: VW Touran, Leistung und Drehmoment

$$\dot{Q}_{zu} = m_K * H_U \quad (9)$$

Um die entsprechenden Lastpunkte im Fahrzyklus einzuhalten, muss der geringere Heizwert durch eine größere Kraftstoffmenge ausgeglichen werden. Dies führt zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch und einem entsprechend größeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

Wie aus Bild 77 ersichtlich, ergeben sich für die maximale Leistung bei Nenndrehzahl und das maximale Drehmoment nur geringfügige Abweichungen mit zunehmender Biodieselbeimischung. Dies ist dadurch zu erklären, dass durch Mehreinspritzung von Kraftstoff der geringere Heizwert ausgeglichen wird, was ein nahezu konstantes Leistungs- und Drehmomentverhalten zur Folge hat. Lediglich dem B20 kann hier ein leichter Leistungseinbruch attestiert werden, wobei hier jedoch die Prüfstandsmessunsicherheit des Rollenleistungsprüfstands zu beachten ist.

### Renault Megane dCi 130

Für den Renault Megane dCi 130 sind, gegenüber dem VW Touran 2.0 TDI, zusätzlich noch die Kraftstoffe B50 und B100 untersucht worden. Dies wird in den folgenden Abbildungen deutlich. Grund dafür war, dass die Auswahl für den Dauerlauf auf den VW Touran 2.0 TDI gefallen ist und dieser nicht unnötig als Versuchsträger belastet werden sollte. Die Begründung für diese Auswahl erfolgt im Anschluss dieser Auswertung.

Aus Bild 78 wird ersichtlich, dass HC-, CO- und NMHC-Emissionen mit größer werdender Biodieselbeimischung bzw. bei reinem Biodiesel deutlich ansteigen. Dieser Trend stellt sich entgegengesetzt zu

den Ergebnissen aus der Literaturrecherche dar. Die HC-Emissionen sind von B5 auf B20 um ca. 12 %, von B5 auf B100 um ca. 90 % sowie CO von B5 auf B20 um ca. 13 % und von B5 auf B100 um ca. 83 % angestiegen. Im Vergleich mit dem VW Touran sind die Emissionen mit dem Referenzkraftstoff B5 bei dem Versuchsträger Renault grundsätzlich deutlich höher. Der Euro-5/Euro-6-Grenzwert von 0,5 g/km für CO wird jedoch für die Biodieselblends bzw. reinen Biodiesel nicht überschritten. Als mögliche Ursache für dieses Verhalten ist der Unterschied von Siedekennlinie, Viskosität und Dichte von DK zu Biodiesel in Verbindung mit der Einspritzdüsengeometrie, dem Motormanagement sowie der Brennraumgestaltung des Renault Megane zu nennen. Bedingt durch die höhere Siedekennlinie von Biodiesel ist für die Verdampfung des Kraftstoffes eine höhere Temperatur im Vergleich zu konventionellem DK erforderlich. Ferner kann es aufgrund von Kondensationseffekten auf brennraumbegrenzenden Bauteilen zu einer erhöhten HC-Emission kommen. Des Weiteren sind für den Anstieg von CO- und HC-Emissionen die höhere Viskosität sowie die größer werdende Dichte mit steigendem Biodieselanteil verantwortlich. Die höhere Viskosität sowie die Oberflächenspannung des Einspritzstrahles erschweren ein Aufbrechen des Strahlkerns. Damit verbunden ist ein längerer flüssiger Strahlkern (bedingt durch die höher liegende Siedekennlinie), wodurch die Verlängerung und Einschnürung des Einspritzstrahles des Biodieselblends gegenüber DK resultieren. Dadurch erhöht sich die Gefahr der Wandfilmbildung, welche ein höheres Emissionsniveau hervorruft und zur Ölverdünnung beiträgt.

Wie aus Bild 79 ersichtlich, sind die Stickoxidemissionen von dem Kraftstoffblend B5 zu B20 um ca. 2 % und zu B100 um 16 % angestiegen. Dieses

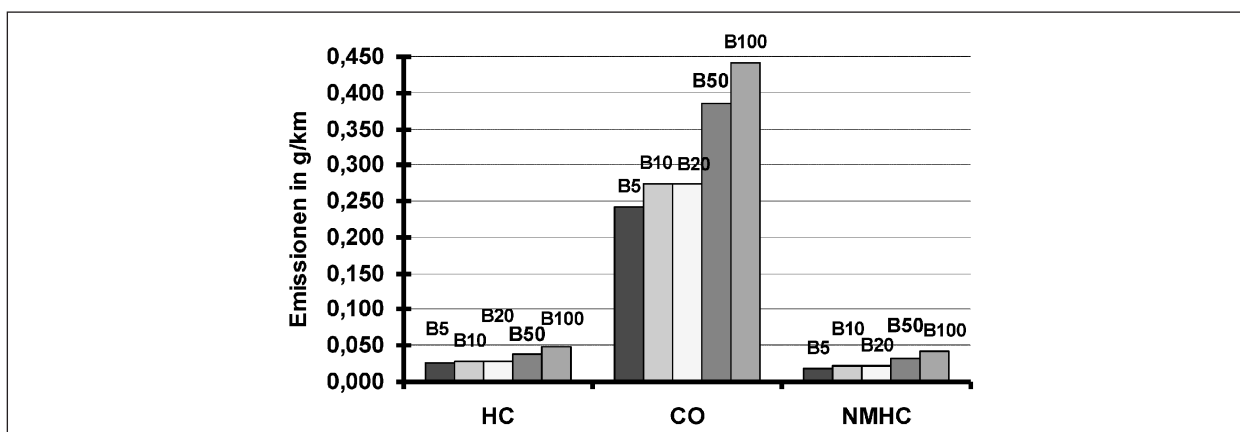


Bild 78: Renault Megane, HC-, CO- und NMHC-Emissionen



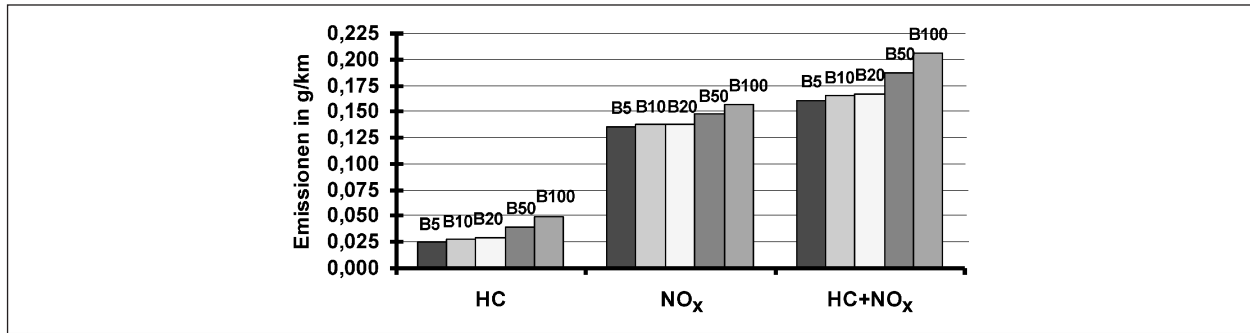
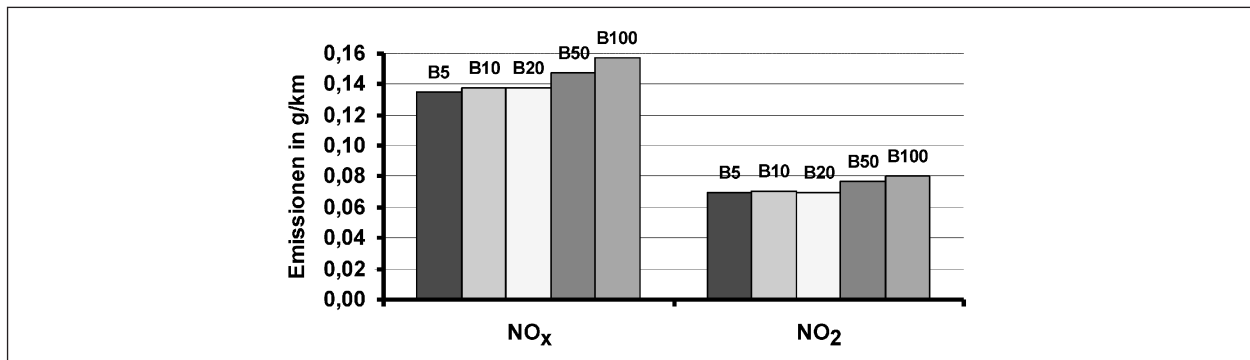
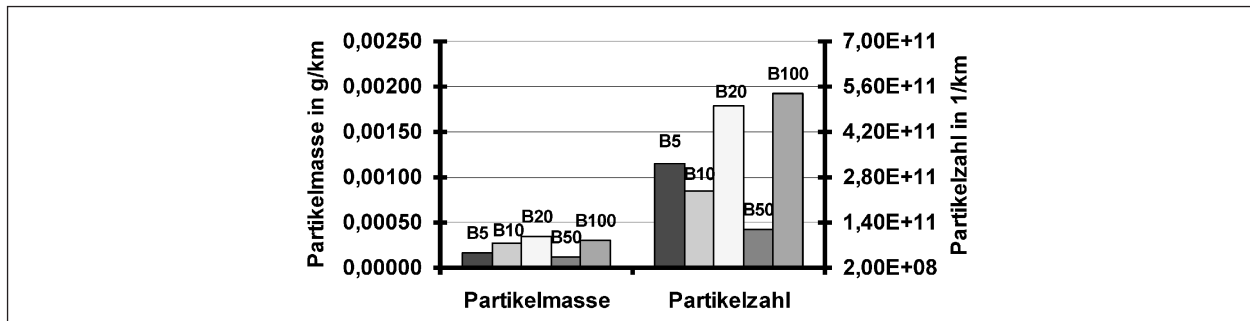
Bild 79: Renault Megane, HC-, NO<sub>x</sub>-EmissionenBild 80: Renault Megane, NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen

Bild 81: Renault Megane, PM und PN

Verhalten skaliert mit den Erwartungen aus der Literatur sowie mit dem Verhalten des VW Touran.

Der Sauerstoffgehalt ist für B100 auf 7 % angestiegen. Der damit zusätzlich eingebrachte Sauerstoff in den Verbrennungsvorgang hat einen lokalen Temperaturanstieg der Verbrennung zur Folge, wodurch die Bildung von NO<sub>x</sub> begünstigt wird. Auch in diesem Fall werden die Euro-5-Grenzwerte für NO<sub>x</sub> mit 0,18 g/km und HC + NO<sub>x</sub> mit 0,23 g/km nicht überschritten.

Wie schon beim VW Touran beschrieben, ist ein Absinken der Partikel laut einschlägiger Literatur von bis zu ca. 1/3 möglich, jedoch ist auch hier die Größenordnung der Partikel aufgrund des Partikelfilters im Bereich der Nachweisgrenze (Partikelmasse im

Bereich von 0,012 mg auf Teflonfilter), sodass keine konkrete Aussage über den Trend der Partikelroh-emission getroffen werden kann.

Aus Bild 82 wird ein steigender Kraftstoffverbrauch mit zunehmender Biodieselbeimischung ersichtlich. Der Verbrauch ist um ca. 2,5 % von B5 zu B20 und um ca. 9 % im Vergleich zu B100 angestiegen. Dieser Mehrverbrauch lässt sich auf den höheren Sauerstoffanteil, den geringeren C-Gehalt und den damit verbundenen um ca. 15 % geringeren massebezogenen Heizwert von Biodiesel zurückführen. Durch den entstehenden Kraftstoffmehrverbrauch steigt dementsprechend der CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

Der abfallende Motorleistungstrend, welcher sich bereits beim VW Touran bezüglich des B20 gezeigt

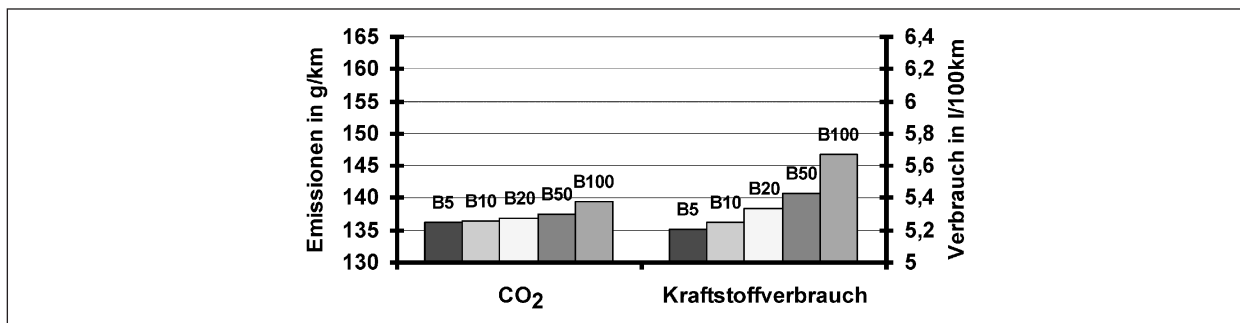


Bild 82: Renault Megane, CO<sub>2</sub> und Kraftstoffverbrauch

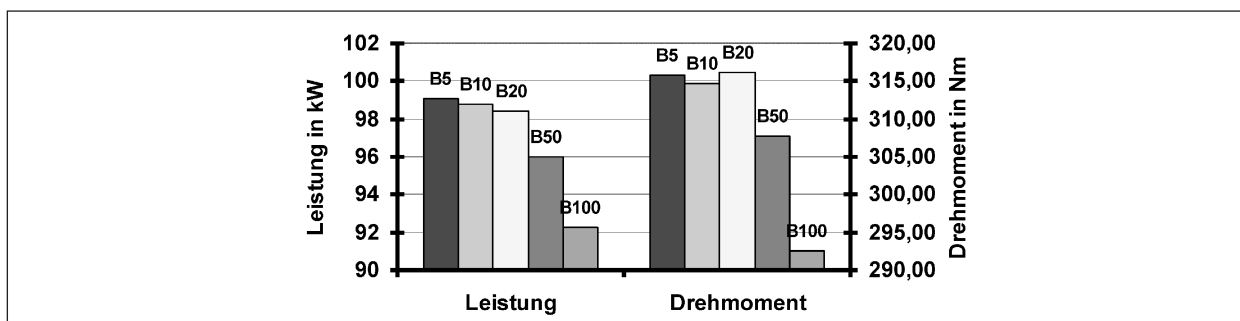


Bild 83: Renault Megane, Leistung und Drehmoment

hat, kann hier nun sehr deutlich herausgearbeitet werden. Durch den geringeren Heizwert von Biodiesel ist die maximale Leistung bei Nenndrehzahl von B5 auf B20 um ca. 2 % und bezüglich B100 um ca. 9 % abgefallen. Zu einem geringen Teil wird der Unterschied des Heizwertes durch die höhere Cetanzahl von Biodiesel hinsichtlich der Motorleistung ausgeglichen. Bedingt durch die bessere Zündwilligkeit des Biodiesels gegenüber DK ist ein effizienterer Motorbetrieb möglich. Die Motorsteuerung scheint, im Nennleistungspunkt und bei maximaler Drehmomentanforderung, jedoch nicht in der Lage zu sein, den Heizwertunterschied mit einer steigenden Einspritzmenge auszugleichen. Bezüglich der Untersuchungen zum Kraftstoffverbrauch konnte noch eine gegenteilige Aussage getroffen werden, was aber an den deutlich geringeren Lastpunkten im NEFZ liegt.

#### Auswahl Dauerlauffahrzeug Diesel

Die Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen wurden als Grundlage zur Auswahl des Versuchsträgers im Dauerlauf genutzt. Ferner kommt das Diesellaggregat von Volkswagen mit 2 Liter Hubraum und Common-Rail-Einspritzung in vielen Fahrzeugen des VAG-Konzerns zum Einsatz. Aus diesen Gesichtspunkten ist der VW Touran als Vertreter der Dieselfahrzeuge für den Dauerlauf ausgewählt

worden. Der Renault Megane, welcher nicht für den Dauerlauf zum Einsatz kam, ist nach den Emissionsmessungen mit B5, B10 und B20 zusätzlich mit dem Kraftstoff B50 und B100 zur Untersuchung gekommen. Diese beiden Kraftstoffblends kamen in dem VW Touran wegen einer eventuellen Schädigung des Motors, des Einspritzsystems sowie der Kraftstoffanlage nicht zur Verwendung.

#### 5.1.2 Versuchsträger Otto

##### Opel Corsa 1.2

Die Bilder 84 bis 88 sollen die gewonnenen Erkenntnisse bei Verwendung der Kraftstoffblends E5, E10, E20 und E25 darstellen.

Wie aus Bild 84 ersichtlich, ist für den Opel Corsa ein geringfügig ansteigender Verlauf der HC- und CO- sowie der NMHC-Emissionen mit steigendem Ethanolanteil zu verzeichnen. Dieser Trend stimmt mit den in der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnissen nur teilweise überein. Auch hier sind die Größenordnungen der Emissionsunterschiede zu betrachten, welche sich als sehr gering darstellen. Der Anstieg der HC-Emissionen ist dabei nicht hauptsächlich durch eine höhere Konzentration im Abgas zu erklären. Vielmehr steigt die Dichte des Schadstoffes HC durch den eingebrachten O<sub>2</sub> stark an, wodurch es zu einer Erhöhung der Emission bei

der Berechnung des massebezogenen Schadstoffwertes kommt.

Das Minimum für den Kraftstoffblend E10 ist möglicherweise auf die Messungenauigkeit des Messverfahrens zurückzuführen. Insgesamt ist der Trend bei dieser betrachteten Konstellation als steigend zu bewerten, die Euro-5- und auch die Euro-6-Grenzwerte werden jedoch nicht überschritten.

Wie in Bild 85 dargestellt, steigen die Stickoxid- sowie die NO<sub>2</sub>-Emissionen des Opel Corsa mit zunehmendem Beimischungsanteil von Ethanol an. Dieses Verhalten findet man ebenfalls in den bereits dargestellten Literaturstellen. Hier ist die Grö-

ßenordnung der NO<sub>x</sub>-Emissionsunterschiede sehr deutlich, sodass der sich darstellende steigende Trend die vorher gewonnenen Ergebnisse bestätigt. Das Ansteigen der NO<sub>x</sub>-Emissionen ist wie auch bei Biodiesel mit dem zunehmenden Sauerstoffgehalt der Ethanolblends zu erklären. Der zusätzlich eingebrachte Sauerstoff in den Verbrennungsvorgang hat eine Erhöhung der Verbrennungstemperaturen zur Folge, wodurch die Bildung von Stickoxidemissionen lokal begünstigt wird. Der Euro-5-/Euro-6-Grenzwert für NO<sub>x</sub> wird nicht überschritten.

Hinsichtlich der Partikelemission lässt sich aufgrund der extrem kleinen Absolutmengen kein eindeutiger Trend feststellen (siehe Bild 86).

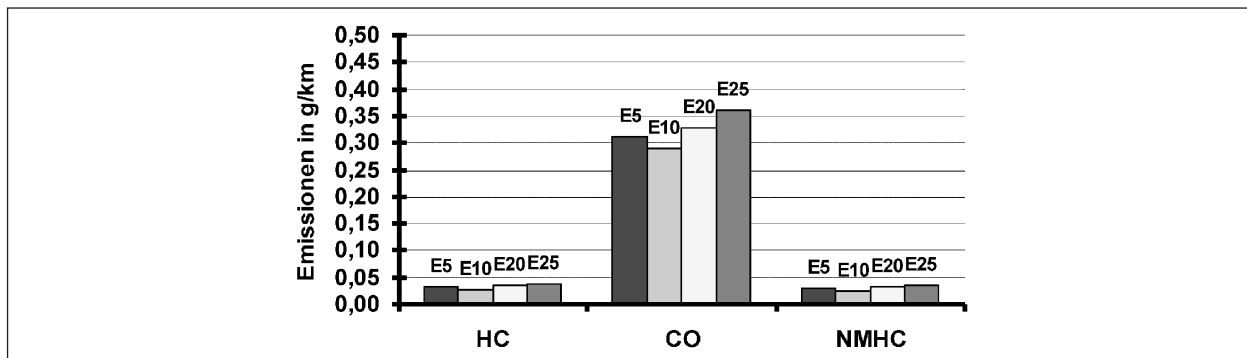


Bild 84: Opel Corsa, HC-, CO- und NMHC-Emissionen

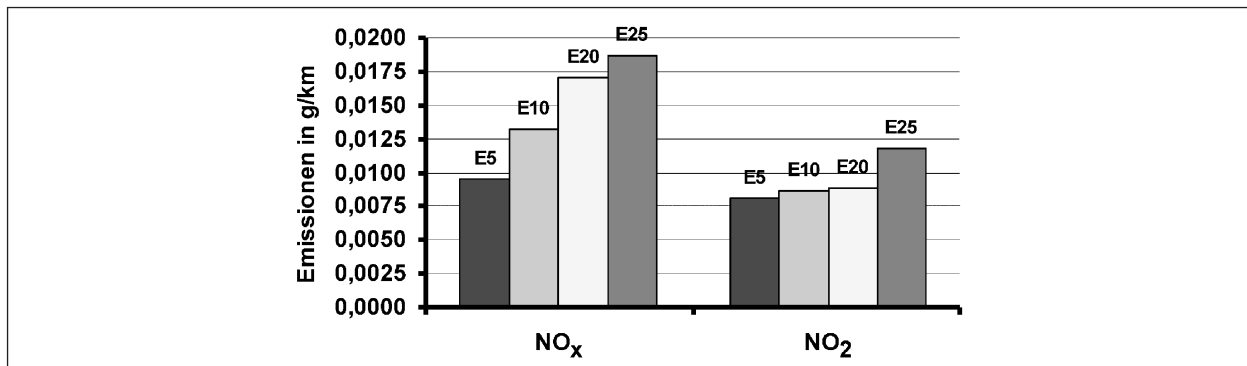


Bild 85: Opel Corsa, NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen

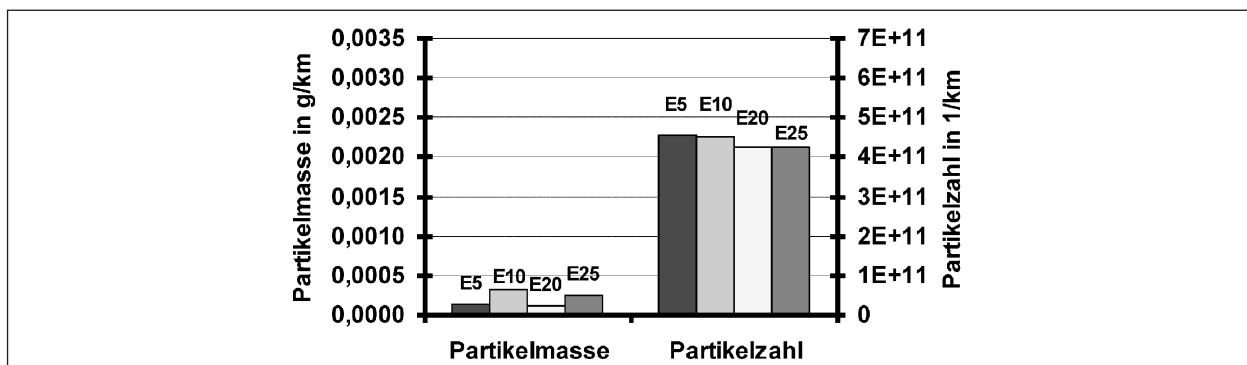


Bild 86: Opel Corsa, PM und PN

Aus der sehr geringen Emission an Partikeln folgt, dass die Partikelmasse sowie die Partikelzahl als nahezu konstant betrachtet werden müssen. Dieses Verhalten des Versuchsträgers lässt sich mit der homogenen Verbrennung resultierend aus der Saugrohreinjection erklären. Dadurch, dass Luft und Brennstoff global im stöchiometrischen Mischungsverhältnis vorliegen, sind die Bedingungen für eine erhöhte Partikelbildung während der Verbrennung nicht gegeben. Bei der Multi-Point-Einjection wird für eine gleichmäßige Gemischbildung der Kraftstoff in das Saugrohr vor das Einlassventil gespritzt. Um den Kraftstoff schnellstmöglich zu verdampfen, wird dieser direkt auf das heiße Einlassventil gegeben, wodurch die größtmögliche Zeit zur Verdampfung vor dem Einströmen des Kraftstoffes in den Brennraum entsteht. Die damit verbundene homogene Verbrennung hat nur sehr geringe Partikelemissionen zur Folge, da sowohl das globale als auch lokale Verbrennungsluftverhältnis stets  $> 0,8$  ist. Grenzwertüberschreitungen sind daher an dieser Stelle nicht zu erwarten.

Aus Bild 87 wird ein steigender Kraftstoffverbrauch mit zunehmendem Ethanolanteil ersichtlich. Dieser ist von E5 zu E25 um 10 % gestiegen. Als Ursache

für den Mehrverbrauch ist auch hier der geringere Heizwert von Ethanol gegenüber konventionellem Ottokraftstoff zu nennen. Im Vergleich zu den Biodieselblends ist der Mehrverbrauch mit den Ethanolblends deutlich höher. Grund dafür ist der höhere Heizwertunterschied von Ethanol zu Benzin gegenüber Biodiesel zu Diesel. Durch den erhöhten Kraftstoffverbrauch steigt entsprechend der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß von E5 auf E25 um 2 % an. Auffällig wird hier jedoch, dass der steigende Kraftstoffmehrverbrauch in Höhe von 10 % sehr schlecht mit dem steigenden  $\text{CO}_2$ -Ausstoß korreliert. Im Idealfall sollte dies relativ genau der Fall sein. Dieser Aspekt soll am Beispiel des VW Golf im Folgenden näher beleuchtet werden, da hier dieses Phänomen noch deutlicher ausgeprägt ist.

Wie in Bild 88 dargestellt, zeichnet sich für Leistung und Drehmoment ein nahezu konstanter Verlauf ab. Bedingt durch die höhere Oktanzahl von Ethanol ist mit steigendem Ethanolanteil eine Mehrleistung zu erwarten. Als mögliche Ursache für die konstante Leistung ist anzunehmen, dass für das Motorsteuergerät kein entsprechendes Kennfeld für die erhöhte Oktanzahl zur Verfügung steht. Dadurch ist ein Ausnutzen der höheren Oktanzahl des Ethanolblends nicht möglich. Weiterhin sind für die kon-

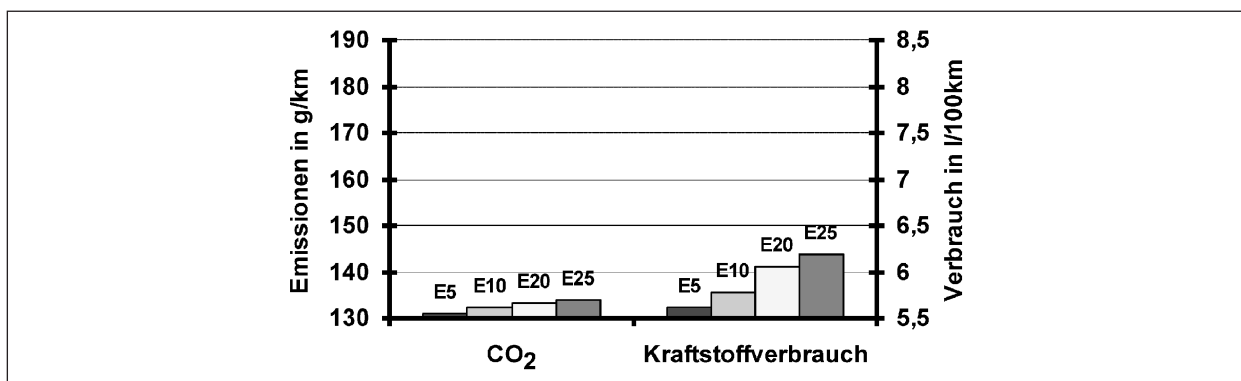


Bild 87: Opel Corsa, CO<sub>2</sub>- und Kraftstoffverbrauch

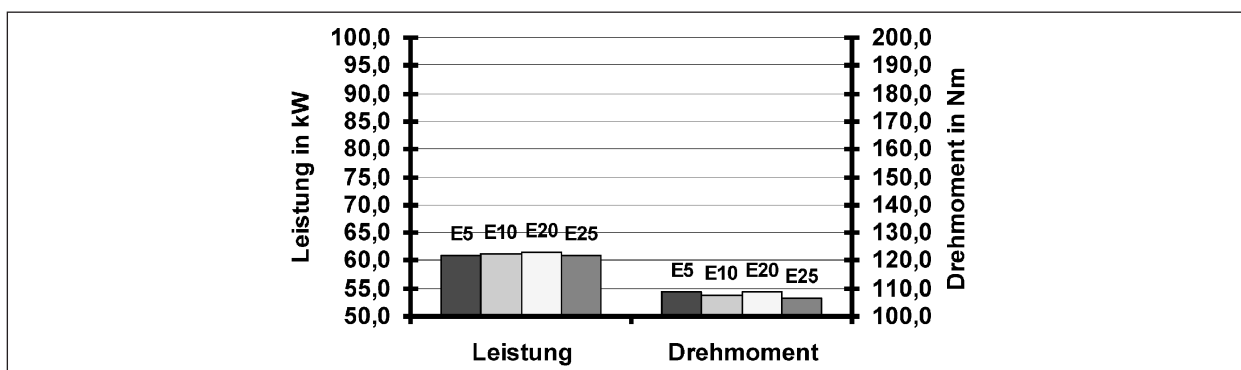


Bild 88: Opel Corsa, Leistung und Drehmoment

stante Leistung sowie das Drehmoment der nicht aufgeladene Motor mit relativ kleinem Hubraum und der geringere Heizwert des Kraftstoffs mit steigendem Ethanolgehalt zu nennen. Der Heizwertunterschied von Benzin zu 100 % Bioethanol wird mit ca. 1/3 angegeben.

Die Messung der Verdunstungsemissionen des Opel Corsa in der SHED-Kammer mit dem Kraftstoffblend E25 ergab für die HC-Emissionen einen Messwert von 0,64 g. Demnach fand keine Überschreitung des festgelegten Grenzwertes von 2 g statt.

In der -7°C-Messung konnte für den Kraftstoffblend E25 keine Grenzwertüberschreitung für HC- und CO-Emissionen sowie kein verändertes Kaltstartverhalten des Versuchsträgers festgestellt werden.

### VW Golf 1.2

In Bild 89 ist für den VW Golf 1.2 ein leicht ansteigender Trend der HC-, CO- und NMHC-Emissionen ersichtlich. Vergleicht man die Ottofahrzeuge untereinander, zeigen beide die gleiche Tendenz der Schadstoffemissionen auf. Der Unterschied zum

Opel Corsa liegt in den Absolutwerten der emittierten Schadstoffe. Die Emissionsunterschiede sind sehr gering, sodass das Minimum bei E20 als Messunsicherheit gewertet werden kann. Auch in diesem Fall hat sich entgegen der Literatur ein Anstieg der CO-Emissionen von E5 auf E25 um ca. 27 % dargestellt. Das Verhalten der HC-Emissionen kann als nahezu konstant angesehen werden, da die entsprechenden Unterschiede sehr gering ausfallen und damit fast an der Nachweisgrenze liegen. Die Euro-5/Euro-6-Grenzwerte werden bei allen drei Abgaskomponenten nicht überschritten.

Aus Bild 90 ist für den VW Golf ein steigender Trend der  $\text{NO}_x$ - sowie ein nahezu konstantes Verhalten der  $\text{NO}_2$ -Emissionen ersichtlich. Diese Tendenz stimmt mit den Ergebnissen aus der Literatur überein. Dieser geringe Anstieg ist, wie schon beim Opel Corsa, auf den steigenden Sauerstoffgehalt der Ethanolblends zurückzuführen, was die Bildung von Stickoxiden begünstigt. Der Euro-5-/Euro-6-Grenzwert wird nicht überschritten.

In Bild 91 stellt sich mit zunehmender Ethanolbeimischung ein absinkender Trend der Partikel dar. In der Literatur gibt es hierzu keine Aussagen. Der fallende Trend bei den Partikeln dürfte aber auf den

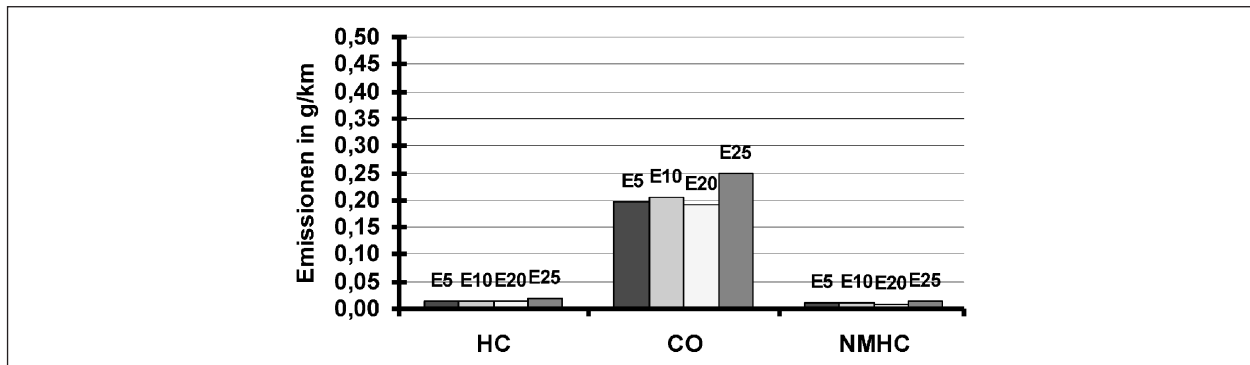


Bild 89: VW Golf, HC-, CO- und NMHC-Emissionen

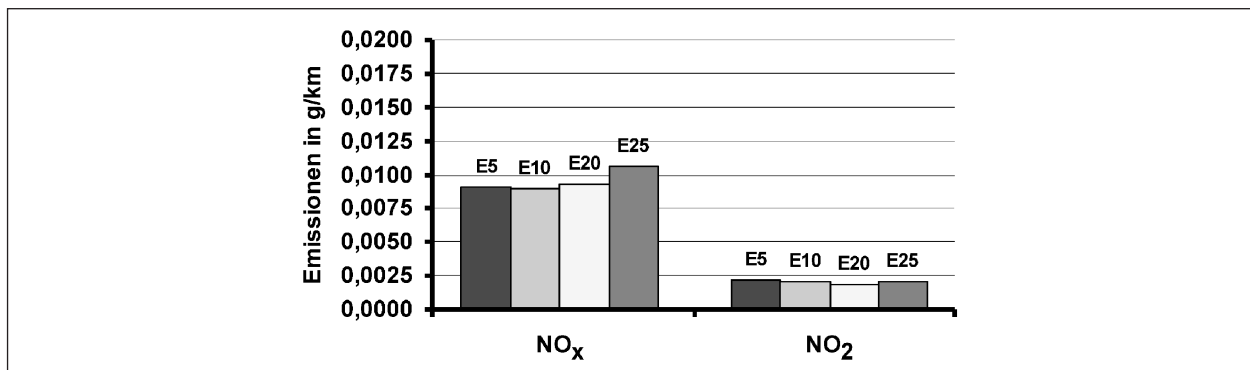


Bild 90: VW Golf,  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NO}_2$ -Emissionen

zunehmenden Sauerstoffgehalt zurückzuführen sein. Dadurch findet eine bessere Partikelnachoxidation statt. Die Partikelmasse ist bei diesem Versuchsträger von E5 auf E25 um ca. 43 % und die Partikelzahl um ca. 44 % abgesunken. Im Vergleich zum Opel Corsa ist das Gesamtniveau der Partikelmasse beim VW Golf um eine 10er-Potenz höher. Der Grund dafür liegt in der Benzindirekteinspritzung, welche ein geringeres Zeitfenster für die homogene Gemischbildung mit Arbeitsweise  $\lambda = 1$  zulässt. In diesem Zusammenhang bilden sich Zonen mit  $\lambda < 1$ , die höhere Partikelbildung begünstigen. Gerade hinsichtlich des einzuführenden Partikelanzahlgrenzwertes für direkteinspritzende Ottomotoren bildet sich hier ein sehr positiver Aspekt heraus.

Auch bei diesem Versuchsträger stellt sich ein steigender Kraftstoffverbrauch dar, welcher mit der Einbringung der biogenen Komponente sehr gut skaliert. Der Kraftstoffmehrerverbrauch beträgt von E5 zu E25 ca. 6 %. Wie schon beim Opel näher erläutert, ist der geringere Heizwert von Ethanol gegenüber Benzin dafür verantwortlich. Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen weisen hier sehr auffällig ein gegenläufiges Verhalten bezüglich des Kraftstoffverbrauches auf und sinken von E5 zu E25 um ca. 2 % ab (Bild 92). Ein

besonderes Verhalten zwischen der Skalierung des Kraftstoffverbrauchs und der  $\text{CO}_2$ -Emissionen wurde bereits beim Opel Corsa festgestellt und scheint sich hier weiter zu fokussieren. Dass der geringe Prozentsatz keine Abweichung aufgrund von Messunsicherheiten darstellt, wurde durch mehrere Messungen belegt. Auch bestätigen frühere bei DEKRA durchgeführte Messungen an einem Audi A4 mit 1.8 Liter Hubraum und 92 kW, welcher vom Motormanagement und der Peripherie mit dem VW Golf vergleichbar ist, diese Erkenntnisse. Dieses Fahrzeug ist mit Ethanolblends E0, E5, E10 und E20 auf sein Emissionsverhalten hin untersucht wurden. Dabei hat sich ein gleiches Verhalten hinsichtlich der  $\text{CO}_2$ -Emission wie beim VW Golf 1.2 aufgezeigt. Die Absenkung der  $\text{CO}_2$ -Emission lag von E0 bezüglich E20 bei ca. 1,7 %. Die Ergebnisse zeigt Bild 93.

Wie schon ausführlich beschrieben, müssten mit steigendem Kraftstoffverbrauch die  $\text{CO}_2$ -Emissionen im annähernd gleichen Verhältnis ansteigen. Dies gilt jedoch nur bei konventionellen Kraftstoffen. Bedingt durch den höheren Sauerstoffgehalt, den etwa gleichbleibenden Wasserstoffgehalt und den damit verbundenen geringeren C-Gehalt des Kraftstoffs wird dieses Verhalten entsprechend her-

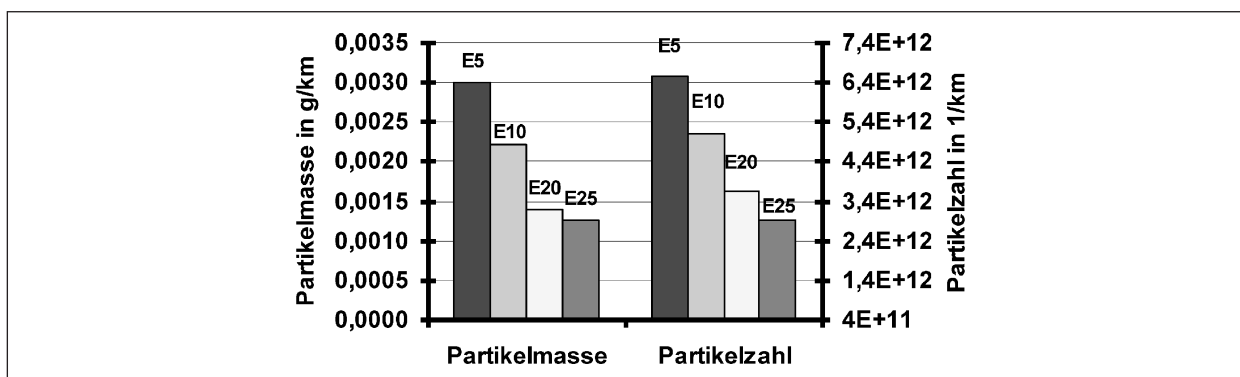


Bild 91: VW Golf, PM und PN

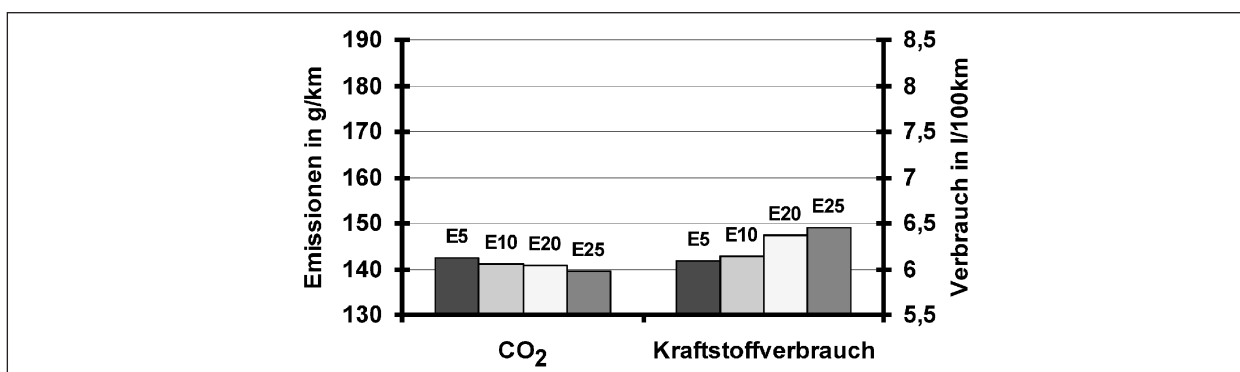


Bild 92: VW Golf, CO<sub>2</sub>- und Kraftstoffverbrauch

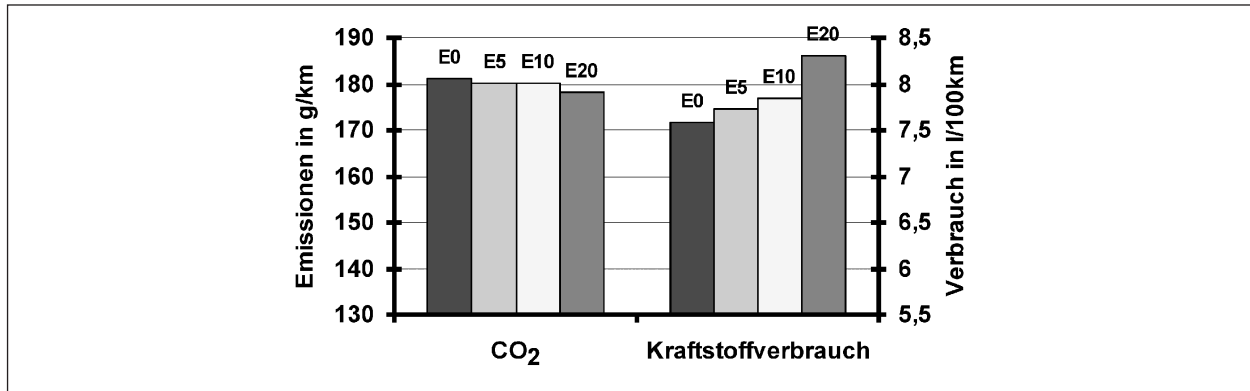


Bild 93: Audi A4 1.8 TFSI, CO<sub>2</sub>- und Kraftstoffverbrauch

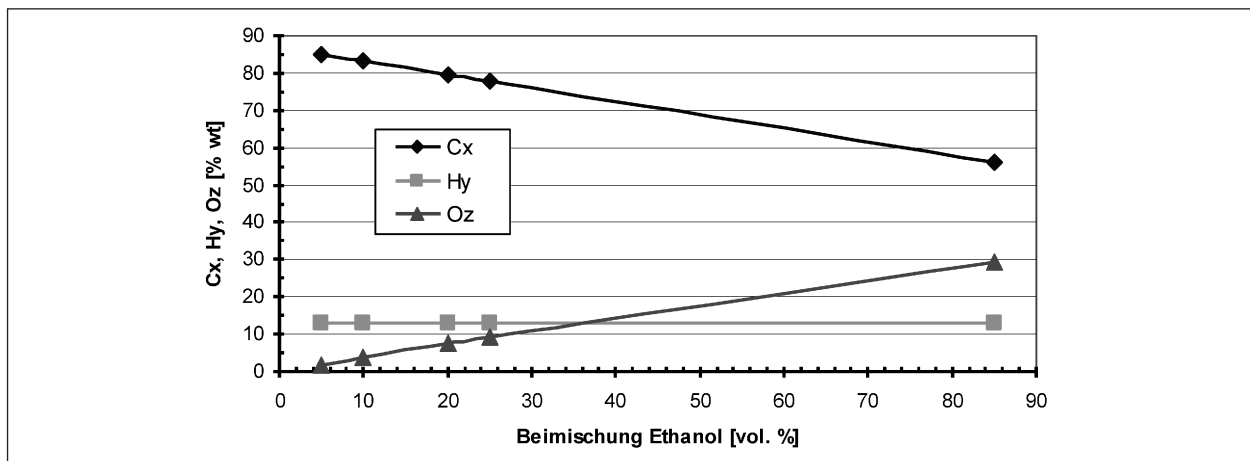


Bild 94: Kraftstoffkomponenten in Abhängigkeit des Blends

vorgeliefert. Bild 94 soll den Verlauf von Cx, Hy und Oz, wodurch ein Kraftstoff beschrieben werden kann, darlegen.

Es wird also deutlich, dass an dieser Stelle im Gegensatz zu konventionellem Kraftstoff eine Entkopplung zwischen Kraftstoffmehrverbrauch und CO<sub>2</sub> bei einem Vergleich mit verschiedenen Ethanolblends entsteht, da sich das Wasserstoff- zu Kohlenstoffverhältnis ändert.

Weiter präzisiert verschieben sich die Resultate der theoretischen vollständigen Verbrennung, bestehend aus CO<sub>2</sub> und Wasser zugunsten des Wassers. Bei Biodiesel ist dieser Sachverhalt aufgrund des deutlich kleineren Absinkens des C-Gehalts und des Entgegenwirkens der höher werdenden Kraftstoffdichte wesentlich geringer ausgebildet.

Somit stellt sich die Frage, warum sich beim Opel Corsa „nur“ eine Trendverkleinerung ergibt und beim VW Touran und Audi A4 sogar eine Trendumkehr.

Zum einen sind hier natürlich die unterschiedlichen Gemischbildungsverfahren (Saugrohreinjection,

Direkteinspritzung mit Aufladung) der verschiedenen Motorenkonzepte zu nennen. Laut einem Experten von DEKRA Umwelt ist der Unterschied auch durch die Bildung von verschiedenen Sekundäremissionen zu erklären, wobei hier vorrangig Formaldehyd und Glykol infrage kommen würden. Formaldehyd befand sich bei den vorgenommenen Tests stets im Bereich der unteren Nachweisgrenze und die Emissionen an Glykol wurden bei diesen Versuchen nicht gemessen. Es zeigt sich, dass hier weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich möglicher Sekundäremissionen besteht.

Aus Bild 95 ist ein Anstieg für Leistung und Drehmoment ersichtlich. Von E5 auf E25 sind die maximale Leistung um ca. 1 % und das maximale Drehmoment um ca. 5 % angestiegen. Dies ist mit der höheren Oktanzahl von Ethanol zu erklären. Das im Steuergerät hinterlegte Kennfeld ist in der Lage, die höhere Oktanzahl des Ethanolblends in ein größeres Drehmoment des aufgeladenen Motors umzusetzen. Der geringere Heizwert wird somit überkompensiert. Bei höheren Beimischungen an Ethanol, auch in Verwendung mit Zusatzsteuergeräten

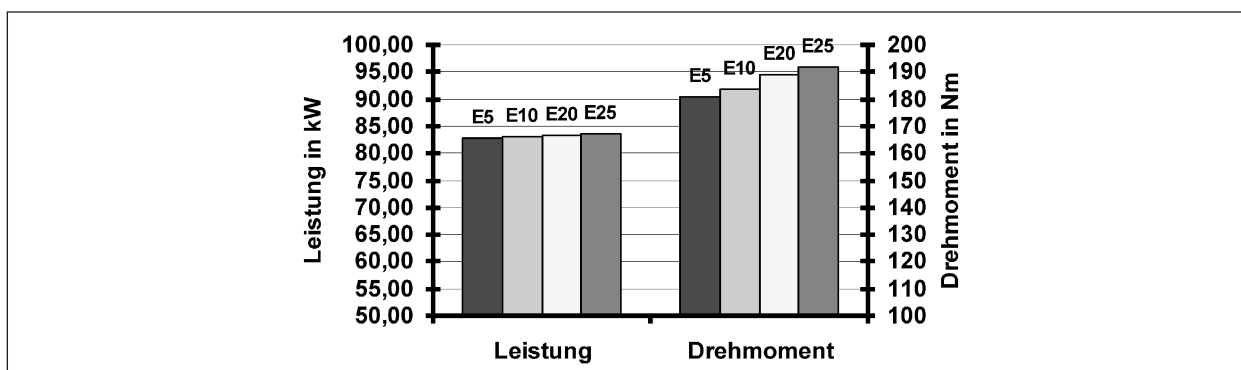


Bild 95: VW Golf, Leistungs und Drehmoment

vom freien Markt, muss hier eine maximal zulässige Leistungssteigerung laut § 30 StVZO von 5 % beachtet werden.

Die Messung der Verdunstungsemissionen des VW Golf in der SHED-Kammer mit dem Kraftstoffblend E25 ergab für die HC-Emissionen einen Messwert von 0,99 g. Demnach fand keine Überschreitung des festgelegten Grenzwertes von 2 g statt. Aufgrund der geringeren Siedetemperatur von Ethanol im Vergleich zu Benzin sowie des aggressiven Verhaltens gegenüber Dichtungen wäre eine Überschreitung des vorgegebenen Grenzwertes der Verdunstungsemissionen infrage gekommen. Jedoch war natürlich zu diesem Zeitpunkt der Kraftstoff noch relativ kurz im Einsatz, sodass eine Schädigung des Aktivkohlefilters noch nicht erwartet werden konnte. Im Anschluss an das Modul 2 „Dauerlauf“ wurde daher ein weiterer Shed-Test durchgeführt.

Bezüglich der  $-7^{\circ}\text{C}$ -Messung konnten für den Kraftstoffblend E25 keine Grenzwertüberschreitung für HC- und CO-Emissionen sowie kein verändertes Kaltstartverhalten des Versuchsträgers festgestellt werden.

### Audi A4 1.8

Der 1.8 TFSi Motor des Audi A4 mit 88 kW und  $1.798\text{ cm}^3$  Hubraum ist ein turboaufgeladenes Triebwerk mit Benzindirekteinspritzung und gleicht in etwa dem des VW Golf. Daher sind wie erwartet die Schadstoffemissionen tendenziell gleich ausgeprägt. Auch hier bestätigt sich die bereits gewonnene Erkenntnis, dass mit steigendem biogenem Anteil die Partikelemission entsprechend niedriger ausfällt. Eine Grenzwertüberschreitung findet auch bei diesem Fahrzeug bei keinen der limitierten Schadstoffe statt.

### Auswahl Dauerlauffahrzeug Otto

Auch hier sind die Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen als Grundlage zur Auswahl des Versuchsträgers für den Dauerlauf zur Verwendung gekommen. Der VW Golf 1.2 ist bei den Emissionsuntersuchungen der einzelnen Ethanolblends stabil. Weiterhin ist der Motor mit Aufladung und Benzindirekteinspritzung ein viel verbautes Motorenkonzept des VAG-Konzerns, wodurch eine große Bandbreite dieses Motorentyps am Markt vertreten ist. Die Wahl des Versuchsträgers als Vertreter der Ottofahrzeuge für den Dauerlauf ist aus diesen Aspekten auf den VW Golf 1.2 gefallen.

### 5.1.3 Korrosionstests mit Kupfer- und Aluminiumstreifen

In Anlehnung an die Europäische Norm EN ISO 2160 wurde ein Korrosionstest mit Kupfer und Aluminiumstreifen für die Kraftstoffe, welche für die Fahrzeuge der Emissionsuntersuchungen Verwendung fanden, durchgeführt.

#### Proben

Die Kupferstreifen wurden in einer Länge von 50 mm, in einer Breite von 10 mm und einer Dicke von 2 mm aus Elektrolytkupfer mit einem Reinheitsgrad von 99,9 % hergestellt. Die Aluminiumstreifen wurden in den gleichen Abmaßen aus Aluminium mit einem Reinheitsgrad von 99,5 % angefertigt. Die Oberflächen der Probestreifen aus Aluminium und Kupfer entsprachen der EN ISO 2160.

#### Versuchskraftstoffe

- Dieselmotorkraftstoffblends: B5, B10, B20, B100,
- Ottomotorkraftstoffblends: E5, E10, E25, E85.



### Versuchsdurchführung

Die Kupfer- und Aluminiumstreifen wurden 3h in handelsüblichen Reagenzgläsern gemeinsam mit 30 ml der unterschiedlichen Blends einer Temperatur von  $50\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ausgesetzt. Die Reagenzgläser befanden sich zu 90 % in einem Wasserbad und waren mit einem Gummistopfen mit Entlüftungsloch verschlossen. Die Diesekraftstoffblends wurden in einer weiteren Versuchsreihe unter gleichen Bedingungen einer Temperatur von  $95\text{ °C}$  ausgesetzt. Als Vergleich für die Bewertung der Kupferstreifen kamen eine Farbskala (ASTM Copper Strip Corrosion Standards) und die Tabelle 1 der EN ISO 2160 zum Einsatz. Für die Bewertung der Aluminiumstreifen standen keine Vergleichswerte zur Verfügung.

### Auswertung

Die Kupferstreifen in Bild 96 weisen in den Biodieselblends leichte bis mäßige Verfärbungen auf. Der stärkste Korrosionsgrad ist bei dem Kraftstoffblend B20 zu verzeichnen. Dieser Probestreifen lässt sich in die Kategorie 1b einordnen. Die Korrosionsgrade verlaufen in Abhängigkeit von der Beimischungsmenge des Biodiesels nicht linear. Es ist ein Peak bei B20 zu erkennen. Die Korrosionsgrade bei geringen bzw. höheren Beimischungen sind in die Kategorie 1a einzuordnen. Der gleiche Versuch wurde bei einer Temperatur von  $95\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  mit gleichem Ergebnis durchgeführt. Diese Ergebnisse lassen sich mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche bestätigen. In der Literatur wurde für den Kraftstoffblend B20 die stärkste Sedimentbildung festgestellt. Als Folge davon traten für B20 verstärkte Korrosionserscheinungen auf.

Für die Kupferstreifen in den unterschiedlichen Ethanolblends sind keine auswertbaren Verfärbungen zu erkennen.

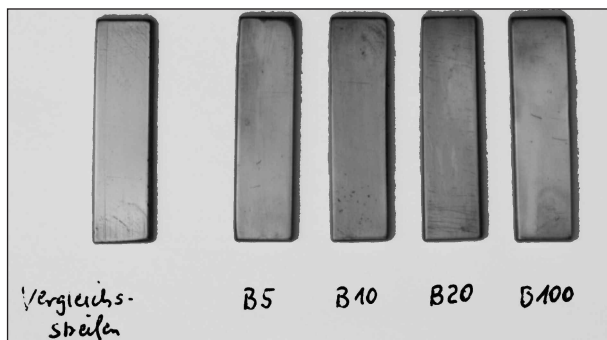


Bild 96: Korrosionswirkung von Biodieselblends auf Kupfer

Für die Aluminiumstreifen konnten keine sichtbaren Veränderungen der Oberfläche oder Verfärbungen bei Verwendung der einzelnen Biodiesel- und Ethanolblends nachgewiesen werden.

### Langzeitverifizierung Kupferstreifen und Biodiesel

Da bereits bei den Voruntersuchungen bei den Kupferstreifen in Verbindung mit B20 leichte Veränderungen an der Oberflächenstruktur aufgetreten sind, wurde der folgende Versuch durchgeführt:

Über einen Zeitraum von 56 Tagen wurden Kupferstreifen bei Raumtemperatur den Biodieselblends B100 und B20 ausgesetzt. Wie bereits bei den Versuchen in Anlehnung an die EN ISO 2160 ist der Kupferstreifen in B20 am stärksten korrodiert und ist in die Kategorie 1b mit Tendenz zu 2a einzuordnen. Der Streifen in B100 kann in die Kategorie 1a eingeordnet werden. Das Ergebnis der erhöhten Aggressivität bezüglich des B20 konnte hier auch mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche nachgewiesen werden.

### Zusammenfassung

Bei dem Korrosionstest in Anlehnung an die EN ISO 2160 konnten lediglich bei dem Kupferstreifen-test in den Diesekraftstoffblends Unterschiede aufgezeigt werden. Von den getesteten Kraftstoffen hinterließ der B20 bei Kupfer die größte Korrosionswirkung. Bei Aluminium konnten keinerlei Veränderungen festgestellt werden.

Bei den Tests über 56 Tage bestätigte sich bei B20 wieder die größte Korrosionswirkung bezüglich des Kupfers (s. Bild 97). Bei Aluminium konnten keinerlei Veränderungen nachgewiesen werden.

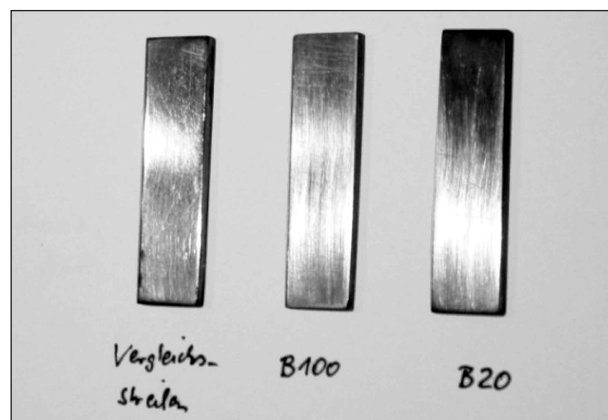


Bild 97: Korrosionswirkung von B100 und B20 auf Kupfer in 56 Tagen

Bei den Ethanolblends konnten keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden.

#### 5.1.4 Vergleich der Erkenntnisse aus der Literatur und der Versuche

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den einzelnen Emissionsuntersuchungen sowie Leistungsmessungen sind zusammenfassend in Tabelle 20 dargestellt. Die Pfeile geben für den jeweiligen Versuchsträger den Trend bei den einzelnen Schadstoffemission wieder. Die horizontale Ausrichtung des Pfeils kennzeichnet ein nahezu unverändertes Emissionsverhalten und die vertikale Ausrichtung mit Pfeilspitze nach oben oder unten steht für ein steigendes bzw. fallendes Emissionsverhalten. Die entstandenen Trends der Untersuchungen werden mit den Ergebnissen aus der Literaturrecherche verglichen. In der Literatur wurden gerade hinsichtlich Biodiesel sehr viele Nutzfahrzeugmotoren untersucht. Die dort gewonnenen Erkenntnisse können aufgrund vergleichbarer Verbrennungskonzepte und Abgasnachbehandlungssysteme in einem hohen Grad auf Pkw-Anwendungen übertragen werden. Durch das beschriebene Verhalten des Partikelfilters ist für die Dieselfahrzeuge hinsichtlich der Partikelmasse und der Partikelanzahl keine Bewertung in dieser Übersicht dargestellt.

Im Ergebnis ist für alle Versuchsträger festzuhalten, dass bei keinem der untersuchten Ethanol- und

Biodieselblends eine Grenzwertüberschreitung der limitierten Schadstoffemissionen aufgetreten ist. Demnach ist die Einhaltung der Euro-5-Abgasnorm für alle 5 Fahrzeuge im Versuch Modul 1 „Einganguntersuchungen“ mit den Kraftstoffblends nachgewiesen. Die resultierenden Unterschiede der einzelnen Schadstoffkomponenten liegen teilweise in Bereichen von wenigen mg/km, wodurch eine Interpretation des sich darstellenden Trends nur bedingt bzw. nicht möglich ist. In Tabelle 20 sind die Ergebnisse der Versuche vergleichend zur Literaturrecherche ersichtlich. Demnach hat sich der erwartete stark fallende Trend von CO-Emissionen aus der Literatur nicht bestätigt. CO weist entgegen dieser Annahmen im Trend einen Anstieg der Emissionen auf. Bei den HC-Emissionen konnten für Bioethanol der steigende Trend sowie für Biodiesel ein absinkendes Verhalten der Emissionen nicht bestätigt werden. Ein eindeutiges Ansteigen hinsichtlich der NO<sub>x</sub>-Emissionen hat sich für alle Versuchsträger aufgezeigt. Dieses Verhalten stimmt mit den Erwartungen aus der Literatur überein. Für NMHC und NO<sub>2</sub> liegen keine konkreten Aussagen zum Emissionsverhalten aus der Literatur vor. Hinsichtlich der Partikel ist für den Opel Corsa ein konstantes Verhalten sowie für den VW Golf ein Absinken der Emissionen zu beobachten. Bezüglich des Verbrauchs ist bei allen 5 Versuchsfahrzeugen ein Anstieg zu verzeichnen. Diese Tendenz korreliert mit den Erwartungen, basierend auf dem geringeren C-Gehalt im Kraftstoff, aus der Literatur. Das

	Ottofahrzeuge/Bioethanol			Dieselfahrzeuge/Biodiesel		
	Opel Corsa	VW Golf/ Audi A4	Trend aus Literatur	Renault Megane	VW Touran	Trend aus Literatur
HC	→	→	↑	↑	→	↓↓
CO	↑	↑	↓↓	↑↑	→	↓↓
NMHC	→	→	-	↑	→	-
NO <sub>x</sub>	↑	↑	↑	↑	↑	↑
NO <sub>2</sub>	↑	→	-	↑	↑	-
PM	→	↓	-	-	-	↓↓
PN	→	↓	-	-	-	-
CO <sub>2</sub>	↑	↓	-	↑	↑	-
Verbrauch	↑↑	↑↑	↑	↑	↑	↑
Leistung	→	→	↑	↓↓ <sup>1</sup>	→	→
Drehmoment	→	↑	↑	↓↓ <sup>1</sup>	→	→

<sup>1</sup> für B50/B100  
Legende:  
Trend steigend/fallend: ↑/↓ stark steigend/stark fallend: ↑↑/↓↓ gleichbleibend: →

Tab. 20: Zusammenfassung Emissionen Bioethanol, Biodiesel

Leistungs- und Drehmomentverhalten für die Ottofahrzeuge stellt sich entgegen dem Trend aus der Literatur als eher konstant dar. Für die Dieselfahrzeuge, besonders für den mit reinem Biodiesel betriebenen Renault Megane, ist ein deutlicher Leistungsabfall bei höheren Blends ersichtlich. Beim VW Touran stellt sich ein nahezu konstantes Leistungsniveau ein. Für Shed- und  $-7^{\circ}\text{C}$ -Messung konnte keine Überschreitung der Grenzwerte festgestellt werden. Schlussfolgernd aus diesen Ergebnissen führt eine volumetrische Beimischung von Bioethanol und Biodiesel von bis zu 20 % nur zu geringfügigen Abweichungen hinsichtlich des Emissionsverhaltens bei Euro-5-Fahrzeugen, wobei diese Aussage zu diesem Zeitpunkt nur für den kurzzeitigen Betrieb mit diesen Kraftstoffblends getroffen werden kann. Abschließende Aussagen können entsprechend nach Beendigung des Dauerlaufs getroffen werden. Ferner ist zu beachten, dass diese Ergebnisse mit dem NEFZ-Fahrzyklus erlangt wurden. Aufgrund der geringen Durchschnittsgeschwindigkeit in diesem Zyklus kann es bezüglich der Emissions-, Verbrauchs- und Leistungswerte unter realen Fahrbedingungen und damit höherem Leistungsbedarf zu Abweichungen kommen.

## 5.2 Untersuchungsergebnisse Modul 2 „Dauerlauf“ und Modul 3 „Abschlussprüfung“

Für den Dauerlauf sind als Vertreter der Ottofahrzeuge der VW Golf 1.2 und als Vertreter der Dieselfahrzeuge der VW Touran 2.0 zum Einsatz gekommen. Die Auswahl der verwendeten Kraftstoffblends erfolgte auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus den Emissionsuntersuchungen sowie anhand der Ergebnisse der in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Materialverträglichkeitsprüfungen. Dadurch sind für das Dieselfahrzeug der Kraftstoffblend B20 und für das Ottofahrzeug E25 ausgewählt worden. Für den Kraftstoffblend B20 wird in der Literatur über erhöhte Korrosionsmerkmale berichtet, dies wurde auch hier bei dem Kupferstreifenfest festgestellt. Damit ist eine nähere Untersuchung dieses Kraftstoffblends unter realen Einsatzbedingungen im Fahrzeug von großer Bedeutung, um eventuelle Korrosionsschäden im Motor sowie des Kraftstoffsystems festzustellen. Aufgrund der Ergebnisse aus der Literatur hinsichtlich der schlechteren Materialverträglichkeit mit steigendem Ethanolanteil ist für das Ottofahrzeug im Dau-

erlauf eine volumetrische Beimischung von 25 % Ethanol erfolgt. Auch hier ist eine Untersuchung unter realen Einsatzbedingungen erforderlich, um die Materialverträglichkeit und das Emissionsverhalten mit steigender Kilometerlaufleistung zu untersuchen.

Zur Erfassung des Emissionsverhaltens und der Materialverträglichkeit wurden beide Versuchsträger in Intervallen von ca. 10.000 km gemäß der Aufgliederung des Moduls 2 „Dauerlauf“ geprüft. Die Materialverträglichkeit sowie eventuelle Beschädigungen des Brennraums wurden dabei durch Endoskopie der einzelnen Zylinder begutachtet. Diese Endoskopien sind mit einem Videoendoskop der Firma PCE-Instruments mit Bildspeicherungsfunktion zur Dokumentation der Ergebnisse ausgeführt worden. Bei den beiden Versuchsträgern wurden alle 4 Zylinder systematisch auf die relevanten Bauteile geprüft. Dabei wurden Ein- und Auslassventil, Kolbenboden, Feuersteg, Zylinderwand, Einspritzdüse sowie Zünd- und Glühkerze nach ihrem Zustand bewertet. Weiterhin wurden zyklisch Motorölproben entnommen, welche von einem Labor auf ihre Zusammensetzung geprüft wurden. Dadurch ist es möglich, eine Aussage über den Kraftstoffeintrag ins Motoröl sowie zu Ursachen von eventuellem Verschleiß zu treffen. Nachdem beide Fahrzeuge eine Strecke von ca. 80.000 km zurückgelegt hatten, wurden die Abschlussuntersuchungen gemäß Modul 3 durchgeführt. Dabei wurden die Aggregate der Versuchsträger sowie das Kraftstoffsystem zerlegt und auf das Korrosions- und Verschleißverhalten untersucht, um auf diese Weise auch Hinweise auf eine potenzielle Verschlechterung des Emissionsverhaltens zu erhalten.

### 5.2.1 Dauerlaufprüfung Dieselfahrzeug mit B20

Im Folgenden soll am Beispiel des VW Touran dargestellt werden, ob eine signifikante Schädigung des Abgasnachbehandlungssystems, der Motormechnik oder des Kraftstoffsystems vorlag.

Dazu sollen in einem ersten Schritt die Emissionen sowie die Veränderungen hinsichtlich der Motorleistung und des Motordrehmoments des Fahrzeuges diskutiert werden. Zu beachten ist dabei, dass es sich bei den Messungen in den jeweiligen Stützstellen im Gegensatz zu den Eingangs- und Abschlussmessungen um Einzelmessungen handelt. Die Abgasmessungen wurden analog zu den Eingangs- und Abschlussmessungen im NEFZ durch-

geführt (siehe Bild 5). Das Fahrzeug wurde zwischen diesen einzelnen Stützstellen im Standardstraßenfahrzyklus betrieben (siehe Bild 62), und zwar abwechselnd zu etwa gleichen Teilen auf dem Dauerlaufrollenprüfstand oder dem DEKRA-Testoval. Gegen Ende des Dauerlaufes, welcher mit einer Gesamtlänge von 80.000 km veranschlagt war, wurde der Fahrzyklus für die letzten 10.000 km auf den WLTC C3 V5 mit der Phase Low gewechselt (siehe Bild 112). Die Gründe werden im Anschluss an die folgenden Darlegungen noch ausgiebig erörtert.

Der Dauerlauf wurde vom 15.07.2011 mit einem Kilometerstand von etwa 9.600 km bis zum 12.07.2012 mit einem Kilometerstand von 92.200 km durchgeführt. Auf eine Aktivierung des Start-Stopp-Systems wurde verzichtet, um eventuelle Einflüsse des Kraftstoffes nicht mit Auswirkungen des Systems zu überlagern. Prinzipiell wäre auch eine zügigere Versuchsdurchführung denkbar gewesen, wobei die Versuchsdauer mit einem Jahr bewusst gewählt wurde. Dadurch war es möglich, auch zeitabhängige Einflüsse des B20-Kraftstoffes auf Systemkomponenten herauszuarbeiten.

### Messergebnisse Abgasrollen-Leistungsrollenprüfstand

Bild 98 und Bild 99 zeigen die Motorleistung sowie das Motordrehmoment des Fahrzeuges in den ein-

zelnen betrachteten Stützstellen, welche entsprechend auf der X-Achse des Diagramms kenntlich gemacht wurden. Es wird deutlich, dass sowohl Motorleistung als auch das maximale Drehmoment während des Dauerlaufs relativ konstant blieben. Anzumerken hierbei ist, dass die für die Ermittlung von Motorleistung und maximalem Drehmoment durchgeführte Rollenprüfstandsmessung im Rad aufstandspunkt nicht den gesetzlichen Vorgaben entspricht, aber eine sehr praktikable Methode ist, um signifikante Veränderungen sichtbar zu machen.

Die konstanten Messergebnisse bezüglich Motorleistung und maximalen Drehmoments sind ein erstes Indiz dafür, dass es keine übermäßige Motorschädigung hinsichtlich Verschleiß oder Komponentenausfällen gegeben hat.

Die Partikelanzahl und die Partikelmasse sollen nun in den Bildern 100 und 101 näher betrachtet werden.

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, lagen die Emissionen bezüglich der Partikelanzahl zu Beginn der Untersuchungen stets sehr deutlich unter dem Euro-5-/Euro-6-Grenzwert von  $6 \cdot 10^{11}$  [# / km], was an dem geschlossen Partikelfiltersystem mit aktiver Regenerationsstrategie liegt. Bei der Analyse der Stützstellenergebnisse erkennt man, dass die Emissionen auch mit dem Fortschritt des Dauerlaufs ers-

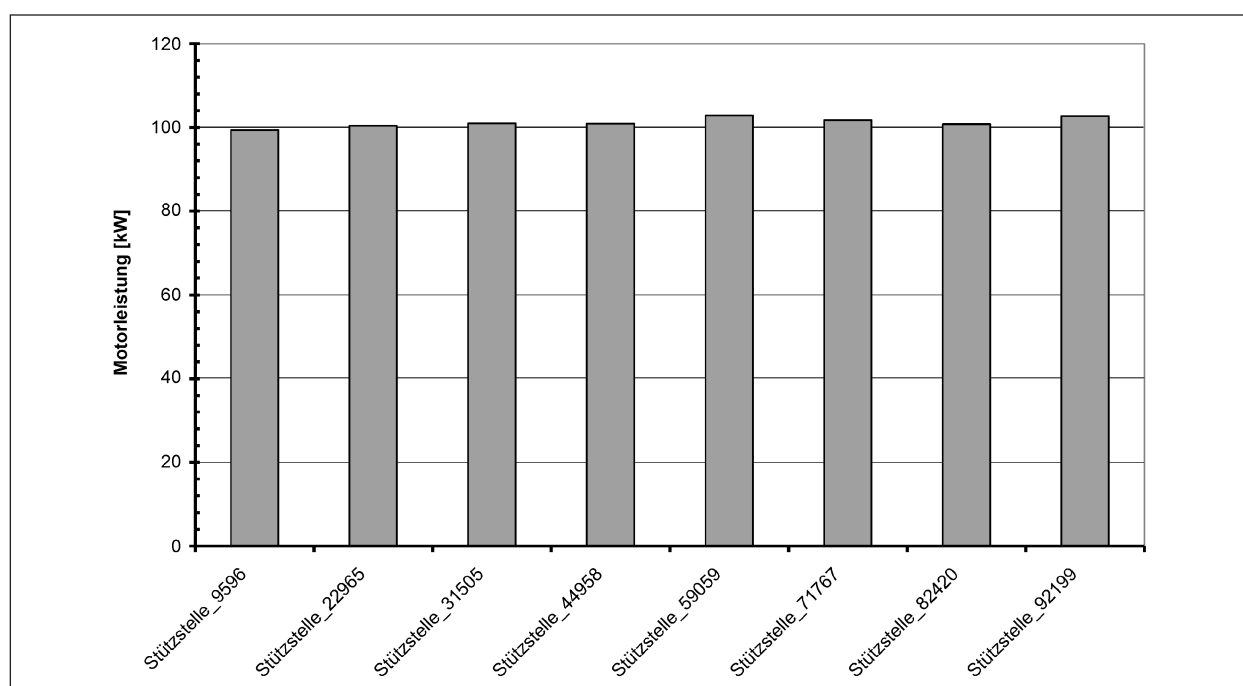


Bild 98: Maximale Motorleistung, VW Touran

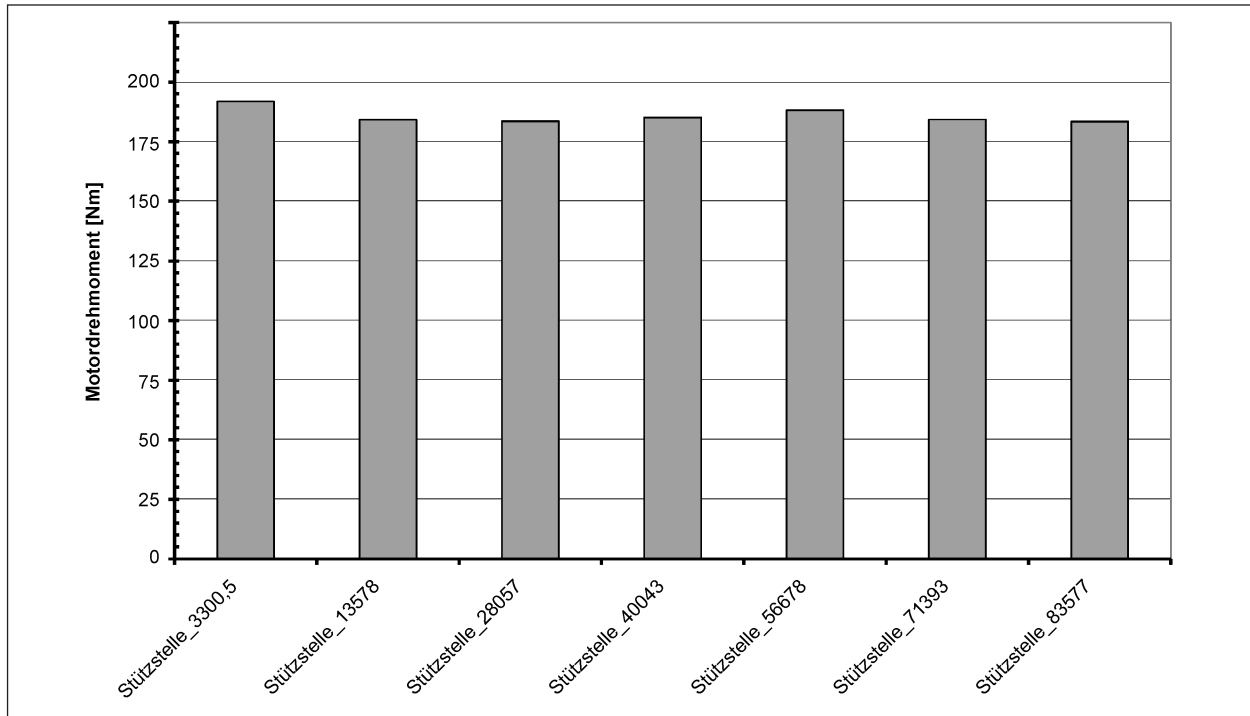


Bild 99: Maximales Motordrehmoment, VW Touran

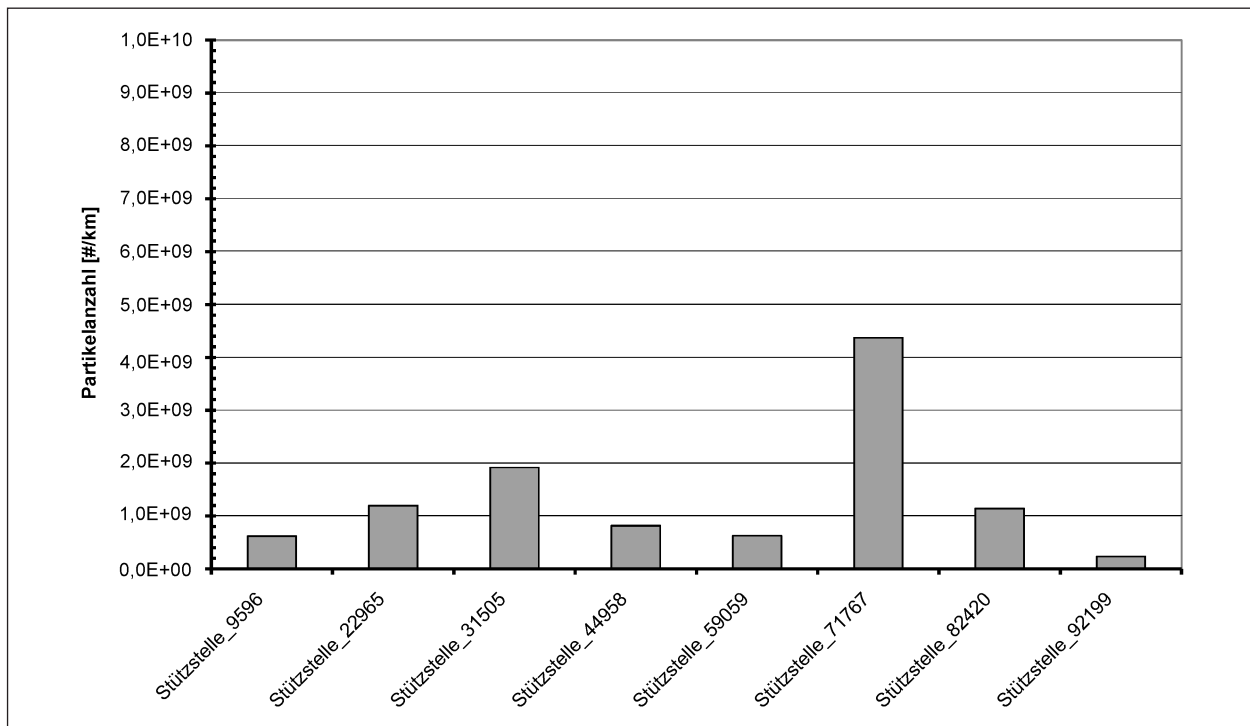


Bild 100: Partikelanzahl, VW Touran

tens stets deutlich den Grenzwert für Euro 5/ Euro 6 unterschreiten und sich zweitens auch nicht signifikant bezüglich des Niveaus verändern. Um in diesem Punkt eine grundlegende Aussage zu treffen, muss als weiterer Parameter noch die Veränderung der Partikelmasse betrachtet werden. Auch hier ist die Grundaussage hinsichtlich des stets ge-

ringen Emissionsniveaus und der nicht signifikanten Veränderung gleich, die Grenzwerte für Euro 5/ Euro 6 wurden deutlich unterschritten. Daraus kann abgeleitet werden, dass es während des Dauerlaufs keine Beschädigung des Dieselpartikelfilters gab. Dies bedeutet, dass es keine Leckmenge an Abgas gab, welche ungehindert oder un-

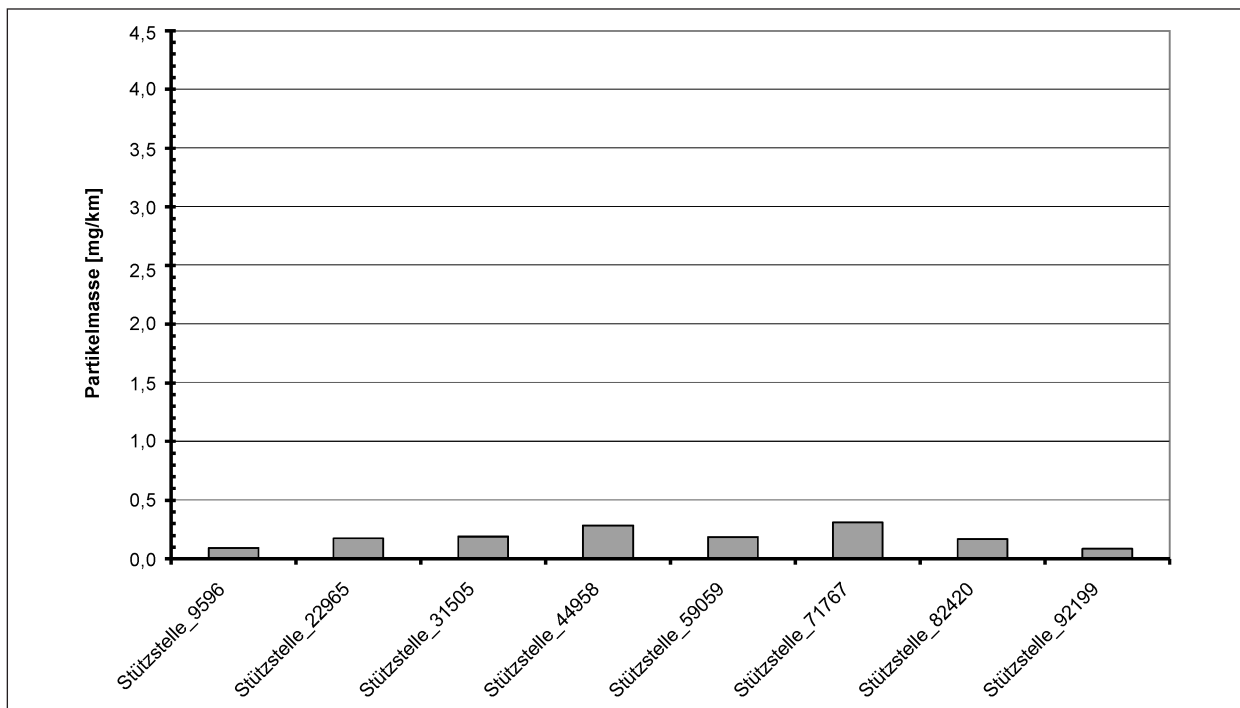


Bild 101: Partikelmasse, VW Touran

gefiltert das Filtermedium hätte durchströmen können.

Aufbauend auf der Erkenntnis eines intakten Partikelfilters bis zum Ende des Dauerlaufs kann auch geschlussfolgert werden, dass das aktive Regenerationssystem des Fahrzeuges bestehend aus der Kraftstoffnacheinspritzung in Verbindung mit einer passiven kontinuierlichen Regeneration des Rußes mit  $\text{NO}_2$  in der Lage war, das Filtersystem entsprechend zu regenerieren. Wäre dies nicht der Fall gewesen, hätte der Partikelfilter ständig weiter Partikel eingelagert, der Abgasgegendruck wäre kontinuierlich gestiegen, der Filter hätte verblockt oder sich unkontrolliert regenerieren können, was in jedem Fall zu einer Zerstörung des Partikelfilters geführt hätte. Diese Aussagen bestätigen die bereits gewonnenen Erkenntnisse aus der Literaturrecherche, in welcher viele Quellen auf ein sehr unproblematisches Regenerationsverhalten hingewiesen haben.

Anhand der Bilder 102 bis 104 sollen weitere Betrachtungen hinsichtlich der Emissionen an CO, HC und NMHC erfolgen.

Die CO-Emissionen zeigen bis zum Ende des Dauerlaufes keine Euro-5-/6-Grenzwertüberschreitungen. Die Stützstelle 9.596 km ist das Resultat der Eingangsuntersuchungen, also noch vor dem Beginn des Dauerlaufs entstanden, und weist die

geringsten Werte hinsichtlich der dargelegten Komponenten auf. Im Anschluss an diese Stützstelle, also mit dem Voranschreiten des Dauerlaufs, ist allenfalls ein sehr leichter Trend bezüglich einer Verschlechterung zu erkennen. Daraus kann abgeleitet werden, dass es während dieser Untersuchungen nicht zu einer wesentlichen Beschädigung des Oxidationskatalysators gekommen sein kann, da genau diese Komponenten unter Zuhilfenahme des Katalysators Platin mit Sauerstoff oxidiert werden.

Bei Fahrzeugen ohne stickoxidselektive Abgasnachbehandlung verändert sich die nächste zu betrachtende Größe  $\text{NO}_x$  nicht. Hier spielt das Abgasrückführungssystem eine entscheidende Rolle (s. Bild 105).

Gegenüber allen bisher besprochenen Abbildungen zeigt der Schadstoff  $\text{NO}_x$  einen Trend zur Verschlechterung, der Euro-5-Grenzwert konnte jedoch während des gesamten Dauerlaufs eingehalten werden. Es konnte schon in den vorherigen Kapiteln der Nachweis geführt werden, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen mit ansteigender biogener Komponente im Kraftstoff ohnehin ein höheres Niveau erreichen. Der steigende Trend während des Dauerlaufs ist jedoch nicht gänzlich auf die biogene Zusatzkomponente zurückzuführen. Durch eine „Versottung,“ also zunehmende Verschmutzung des AGR-Kühlers und des AGR-Ventils, kommt es

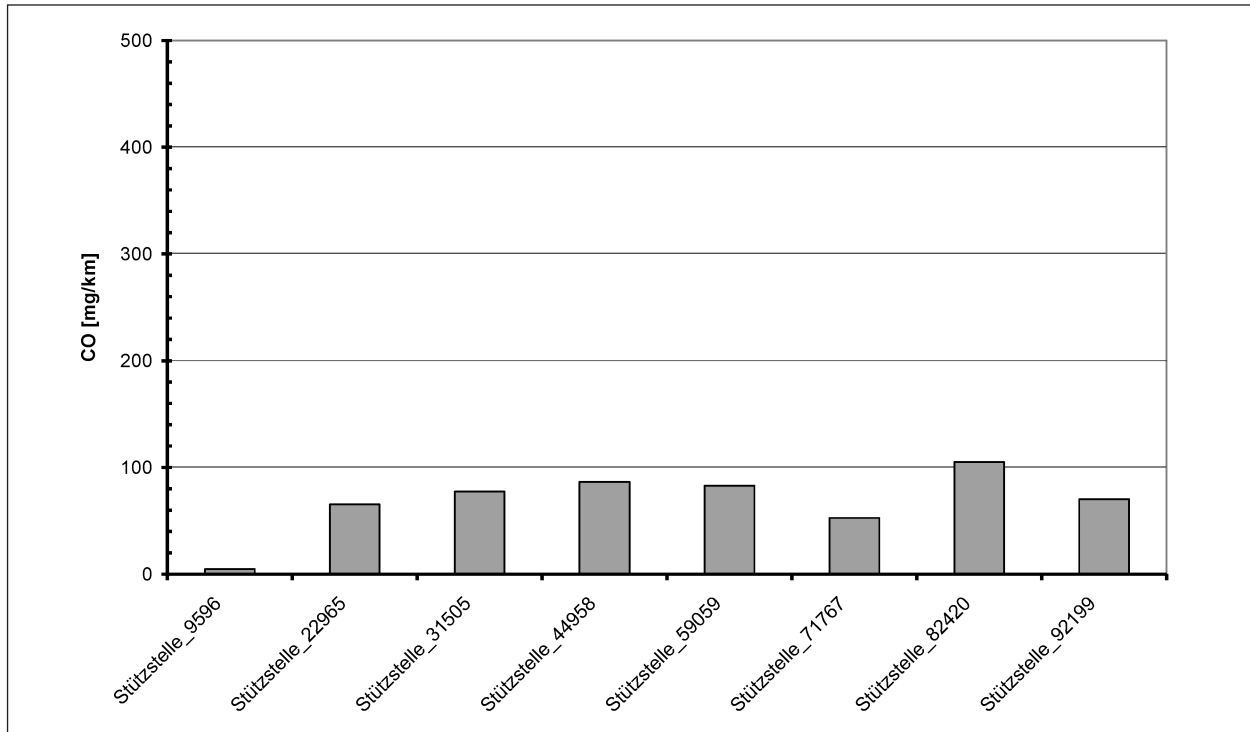


Bild 102: CO-Emissionen, VW Touran

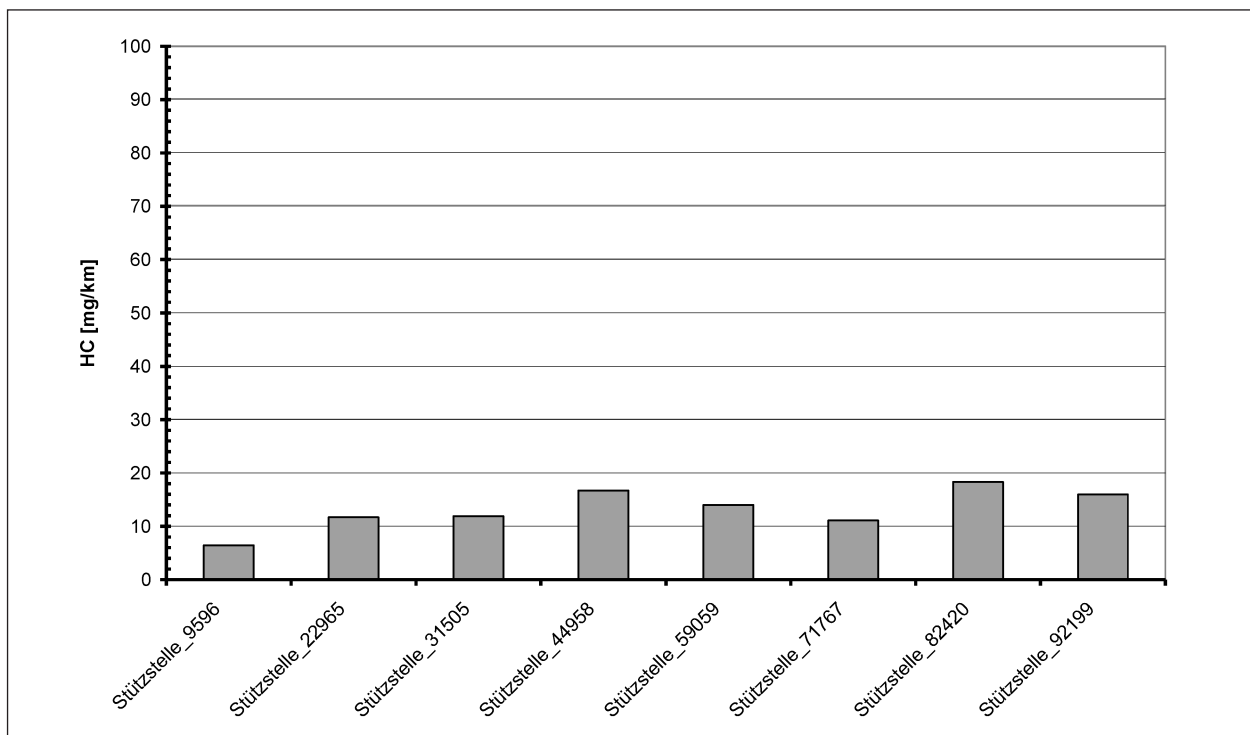


Bild 103: HC-Emissionen, VW Touran

zu sinkenden AGR-Raten und damit zu steigenden  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Diese Tatsache ist auch ohne Beimischung von Biodiesel in Dauerläufen zu beobachten, kann aber RME-verstärkt werden. Bedenkt man, dass das Fahrzeug in der Typprüfung einen Dauerlauf von 160.000 km bestehen muss,

bei dem die Grenzwerte aller limitierten Schadstoffe eingehalten werden müssen, ist dieser beobachtete Trend natürlich nicht unkritisch. Hinzu kommt, dass, wie schon beschrieben, das Niveau von  $\text{NO}_x$  mit B20 höher liegt als mit B5 und gerade in Anbetracht weiterer Grenzwertverschärfun-

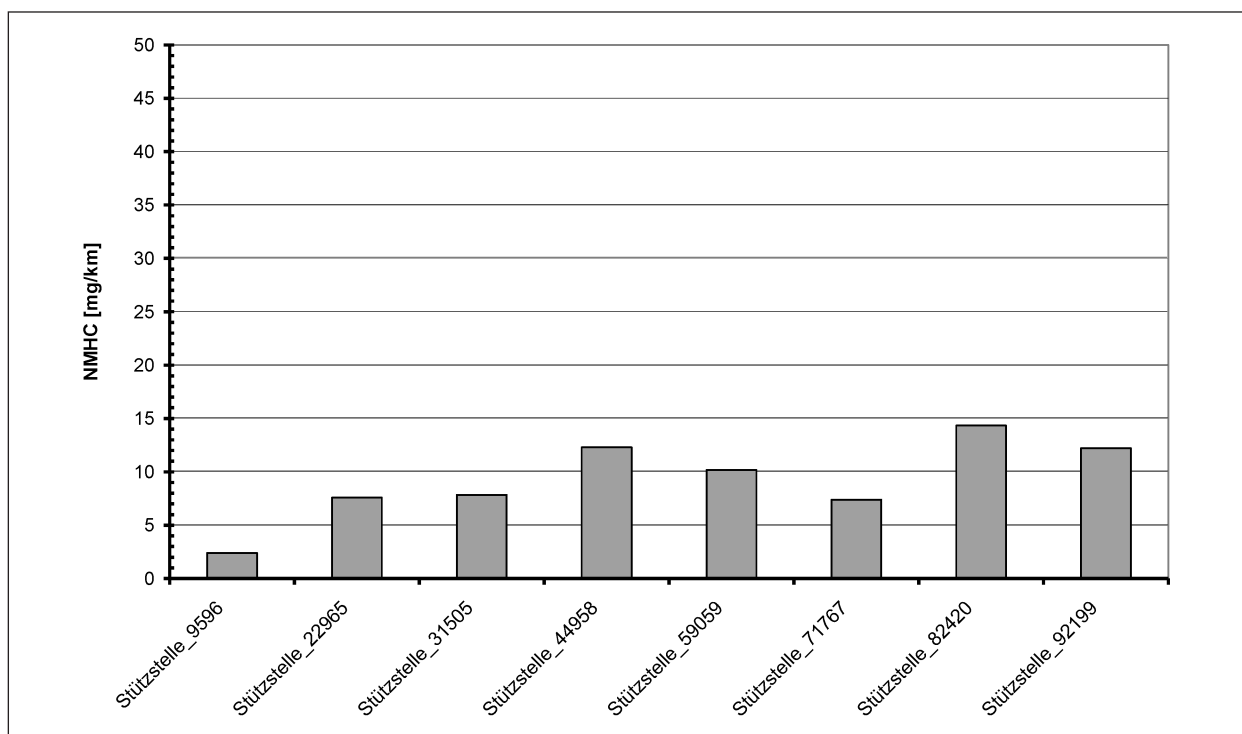
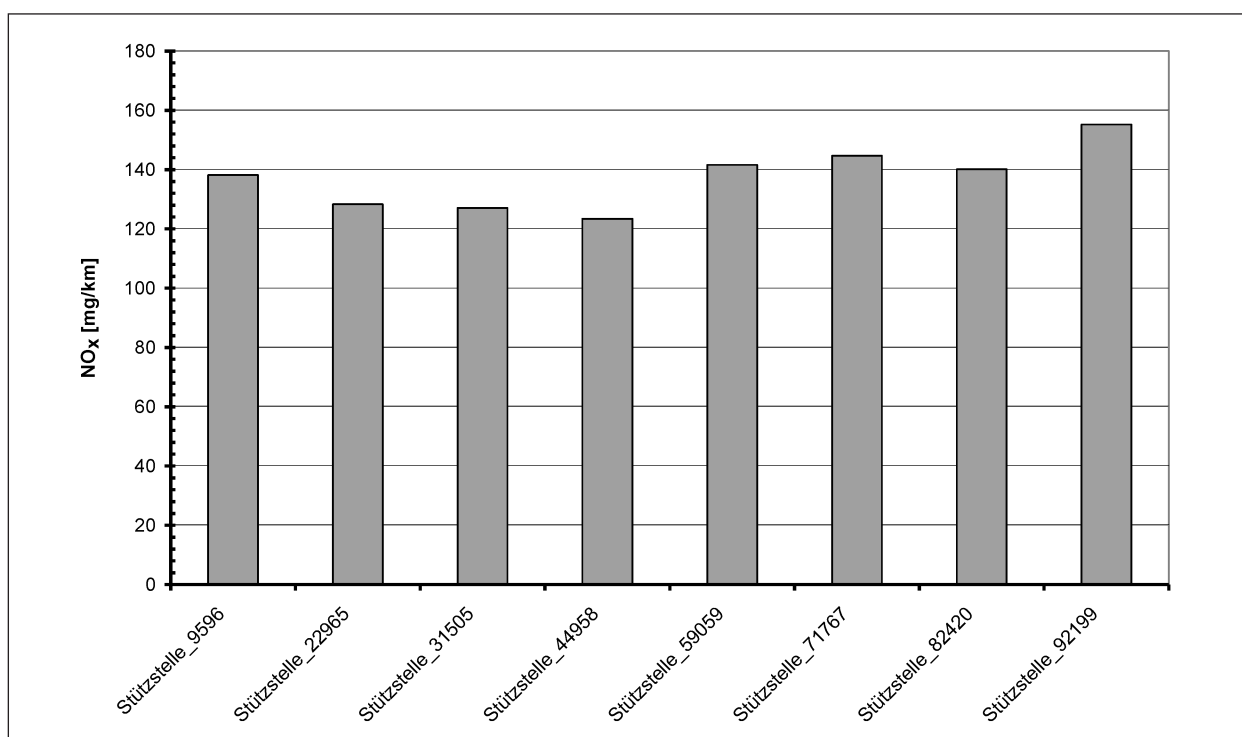


Bild 104: NMHC-Emissionen, VW Touran

Bild 105: NO<sub>x</sub>-Emissionen, VW Touran

gen bei Euro 6 (0,08 g/km!) könnte es hier erhebliche Probleme geben. SCR-Systeme könnten für Euro 6 auch in Verbindung mit biogenen Kraftstoffen die erhoffte Abhilfe schaffen. Das AGR-System, im zerlegten Zustand, wird in einem folgenden Kapitel näher betrachtet.

Bezüglich der NO<sub>2</sub>-Emissionen ist im Gegensatz zu NO<sub>x</sub> kein eindeutiger Trend feststellbar, sodass die Erhöhung der NO<sub>x</sub>-Emissionen hauptsächlich aus NO bestehen muss. Auffällig ist jedoch das relativ hohe Level der NO<sub>2</sub>-Emissionen.



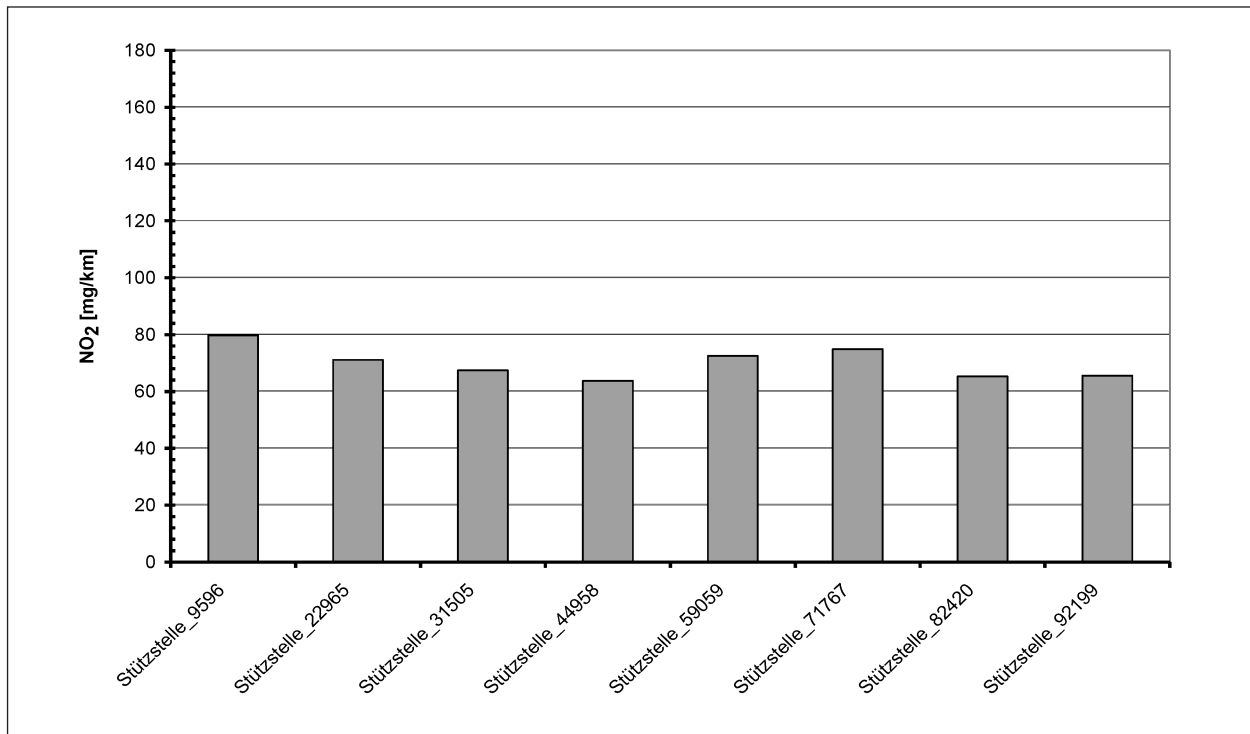


Bild 106: NO<sub>2</sub>-Emissionen, VW Touran

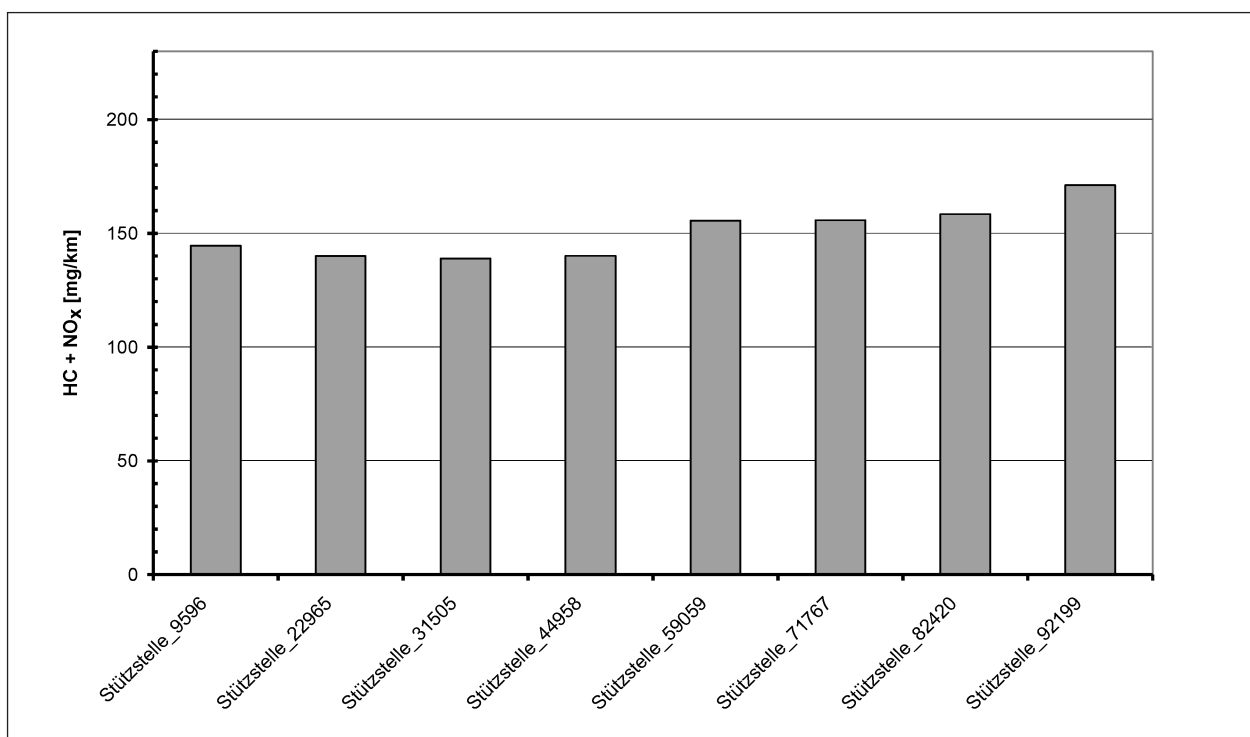


Bild 107: HC- + NO<sub>x</sub>-Emissionen, VW-Touran

Der Euro-5-Summengrenzwert (HC + NO<sub>x</sub>) wurde nicht überschritten (s. Bild 107).

In den Darstellungen zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie zum Kraftstoffverbrauch zeigt sich, dass das Fahrzeug in den ersten Stützstellen einen

etwas günstigeren Kraftstoffverbrauch aufweist (s. Bild 108).

Dies liegt darin begründet, dass das Einfahren des Fahrzeuges bei ca. 15.000 km beendet ist, sich also ein geringerer Verbrauch einstellt und

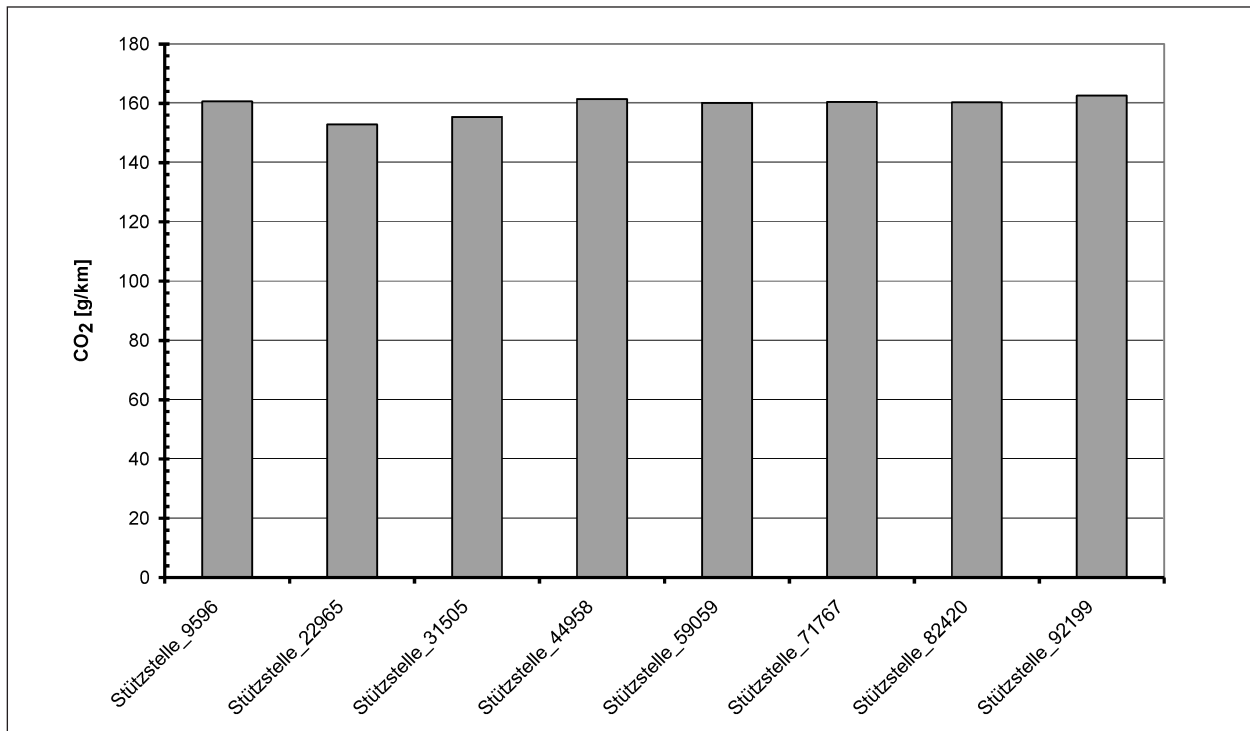


Bild 108: CO<sub>2</sub>-Emissionen, VW Touran

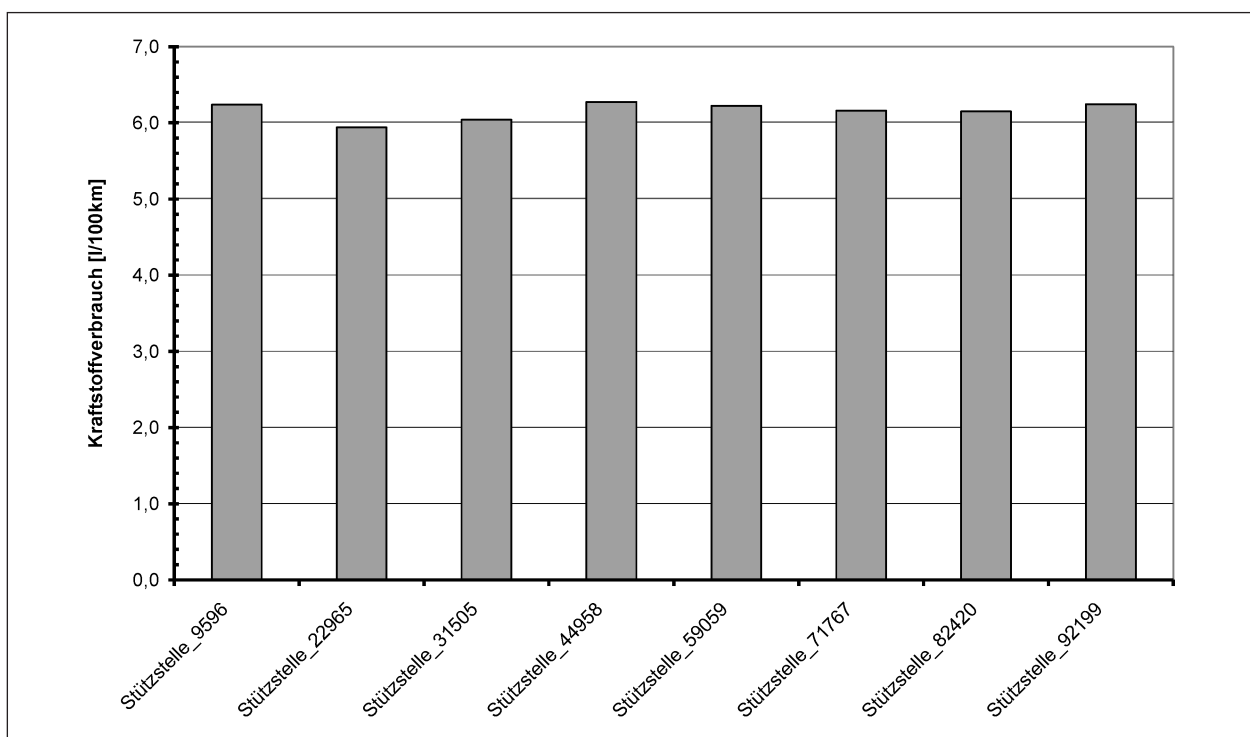


Bild 109: Kraftstoffverbrauch, VW Touran

anschließend ein leichter Trend in Richtung Kraftstoffmehrverbrauch zu verzeichnen ist. Generell kann ausgesagt werden, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Kraftstoffverbrauch nach Abschluss des Motoreinlaufs relativ konstante Werte

aufweisen und somit ein negativer Einfluss durch die biogene Kraftstoffkomponente auf diese Parameter ausgeschlossen werden kann (s. Bild 109).

### Auswertung der Ölanalysen mit dem Schwerpunkt Ölverdünnung

Es folgt nun die Gesamtdarstellung der Ölanalysen bestehend aus den Dauerlaufteilen „Standardstraßenfahrzyklus“ (VO (EG) Nr. 692/2008) und „Ölverdünnungszyklus“ (WLTP C3 V5), wobei die einzelnen Ölwechsel und Öleinsatzzeiten in Tabelle 21 aufgelistet sind.

Die Ölanalysen wurden durch die Firma Oelcheck GmbH durchgeführt, wobei diese durch die Deutsche Akkreditierungsstelle nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 die entsprechende Kompetenz nachweisen konnte.

Hinsichtlich der Verschleißwerte liegen die ersten zwei Stützstellen auch laut der auswertenden Firma innerhalb der zulässigen oder erwarteten Werte, sodass auch nach einer Öllaufzeit von 20.500 km noch kein Ölwechsel durchgeführt werden musste. Bei der nächsten Untersuchung zeichnete sich dagegen ein anderes Bild ab. Wie deutlich erkennbar ist, sind die Verschleißwerte hinsichtlich Eisen, Aluminium, Nickel und Kupfer angestiegen. Dieses Verhalten könnte auf das Einlaufen des Motors zurückzuführen sein. Das Öllaufzeitintervall betrug in diesem Punkt relativ hohe 33.900 km, wobei das Motorenöl inklusive Ölfilter im Anschluss gewechselt wurde. Auch das zur Ölauswertung beauftragte Unternehmen empfahl einen Ölwechsel und merkte an, dass der Anstieg von Eisen und Aluminium höher als erwartet, jedoch nicht ungewöhnlich ist. Ein vergleichbares Intervall liefert die Stützstelle bei

ca. 72.000 km mit einer Öllaufzeit von 28.000 km. Hier zeigt sich, dass die Werte der Verschleißmetalle nur noch leicht ansteigen, was den beschriebenen Rückschluss bezüglich des Motoreinlaufs unterstreichen würde. Gerade die höheren Werte für Eisen, welcher hauptsächlich dem Zylinder zugeordnet werden kann, und Aluminium, als Hauptwerkstoff des Kolbens, unterstreichen diese Erkenntnis (s. Bild 110).

Im weiteren Versuchsverlauf liegen laut [88] alle ermittelten Werte bezüglich der Verschleißmetalle innerhalb von zulässigen Bereichen.

Hinsichtlich der Verunreinigungen des Motorenöls wurde durch [88] stets die Aussage getroffen, dass alle ermittelten Daten innerhalb der zulässigen oder erwarteten Werte liegen. Eine Ausnahme betrifft dabei den Biodieselgehalt im Motorenöl.

Während der Eintrag von Dieselmotorenkraftstoff im Dauerlaufteil „Standardstraßenfahrzyklus“ stets < 0,5 % aufwies, zeigt sich beim Biodiesel eine Konzentration zwischen 0,3 und 1,4 % (s. Bild 111).

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln mehrfach beschrieben, stellt die Ölverdünnung bei einer Verwendung von Biodieselblends in Verbindung mit einer aktiven Partikelfilterregeneration eine große Herausforderung dar. Der Standardstraßenfahrzyklus, welcher 70.000 km als Dauerlaufzyklus verwendet wurde, zeichnet sich durch relativ hohe Lastanforderungen in den Rampen zur jeweiligen Endgeschwindigkeit aus. Das wirkt sich natürlich

<b>Probenbezeichnung</b>	DEKRA 1								
<b>Maschinentyp</b>	2.0 TDI CR 103 KW								
<b>Hersteller</b>	VW								
<b>Probe aus</b>	Dieselmotor								
<b>Ölbezeichnung</b>	Aqip 7008 5W-30								
<b>Ölmenge im System</b>	ca. 3.600 g								
	<b>Standardstraßenfahrzyklus</b>					<b>WLTP C3 V5 „Phase Low“</b>			
Untersuchungsdatum	09.09.2011	11.10.2011	22.12.2011	23.01.2012	23.01.2012	-	11.06.2012	02.07.2012	19.07.2012
Datum Probenentnahme	07.09.2011	07.10.2011	22.11.2011	14.12.2011	19.01.2012	-	07.06.2012	27.06.2012	12.07.2012
Datum letzter Ölwechsel	10.08.2011	10.08.2011	07.11.2011	24.11.2011	14.11.2012	04.05.2012	04.05.2012	04.05.2012	04.05.2012
Nachfüllmenge seit Wechsel [g]	396			673		0	884		
Laufzeit seit Wechsel	13.369	21.930	35.351	14.053	26.747	10.756	3.775	7.619	8.693
Laufzeit gesamt	22.965	31.526	44.947	59.000	71.694	82.450	86.225	90.069	91.143
Öl gewechselt	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein

Tab. 21: Öleinsatzzeiten und Ölwechsel Touran

auf die Abgastemperatur aus, die somit ein deutlich höheres Niveau aufweist als in einem schwächerlastigen Fahrzyklus. Das Resultat ist, dass weniger Kraftstoffnacheinspritzung notwendig ist, um eine vollständige Regeneration des Dieselpartikelfilters zu gewährleisten. Die Bauteile werden durch die hohen Abgastemperaturen und einen höheren Kraftstoffdurchsatz stärker belastet. Eine mögliche Ölverdünnung konnte auf Grundlage der Ölanalysen, welche in jeder Stützstelle durchgeführt wurden, nicht eindeutig nachgewiesen werden. Das Level der Ölverdünnung schien daher relativ niedrig zu sein. Um diesen Aspekt näher zu untersuchen, wurde wie bereits eingangs erwähnt der Dauerlauf bei einem Kilometerstand von 70.000 km

vom Straßenfahrzyklus auf den WLTC C3 V5 mit der Phase Low umgestellt. Dabei kam ausschließlich der Dauerlaufrollenprüfstand zum Einsatz. Der Zyklus wird in Bild 112 vorgestellt. Dieser hat eine Höchstgeschwindigkeit von 56,5 km/h, eine maximale Beschleunigung von  $< 0,5 \text{ m/s}^2$  und eine Durchschnittsgeschwindigkeit inklusive Stillstandszeiten von 18,9 km/h. Er ist damit sehr gut geeignet, um eine Stadtfahrt mit geringem Geschwindigkeitsprofil, geringen Beschleunigungen sowie Stillstandszeiten zu simulieren. Das Resultat sind geringe Motorbelastungen und geringe Abgastemperaturen. Ferner wird der WLTC in der zukünftigen Abgasgesetzgebung verankert werden, wodurch auch der Fokus auf diesen Zyklus gefallen ist.

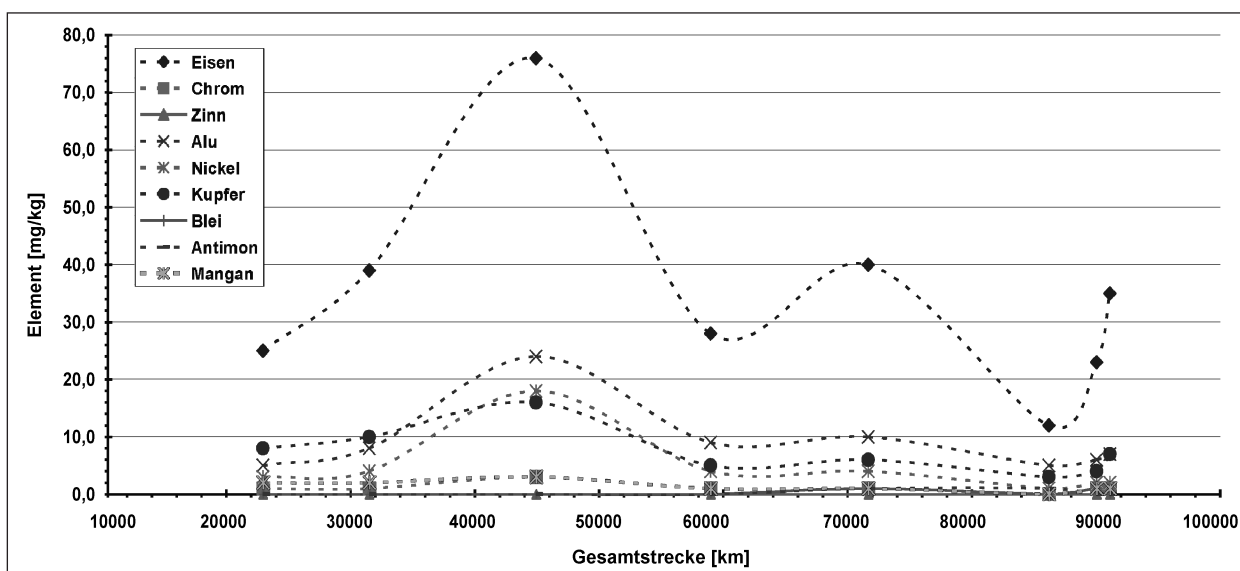


Bild 110: Ölanalyse hinsichtlich Verschleiß, VW Touran

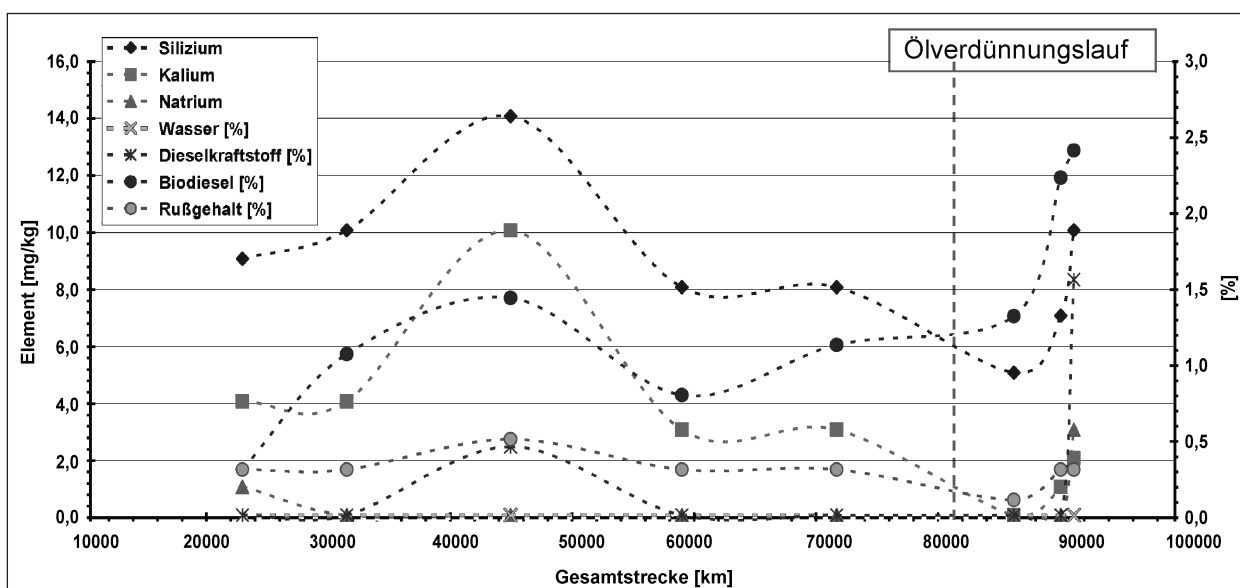


Bild 111: Ölanalyse Verunreinigungen, VW Touran

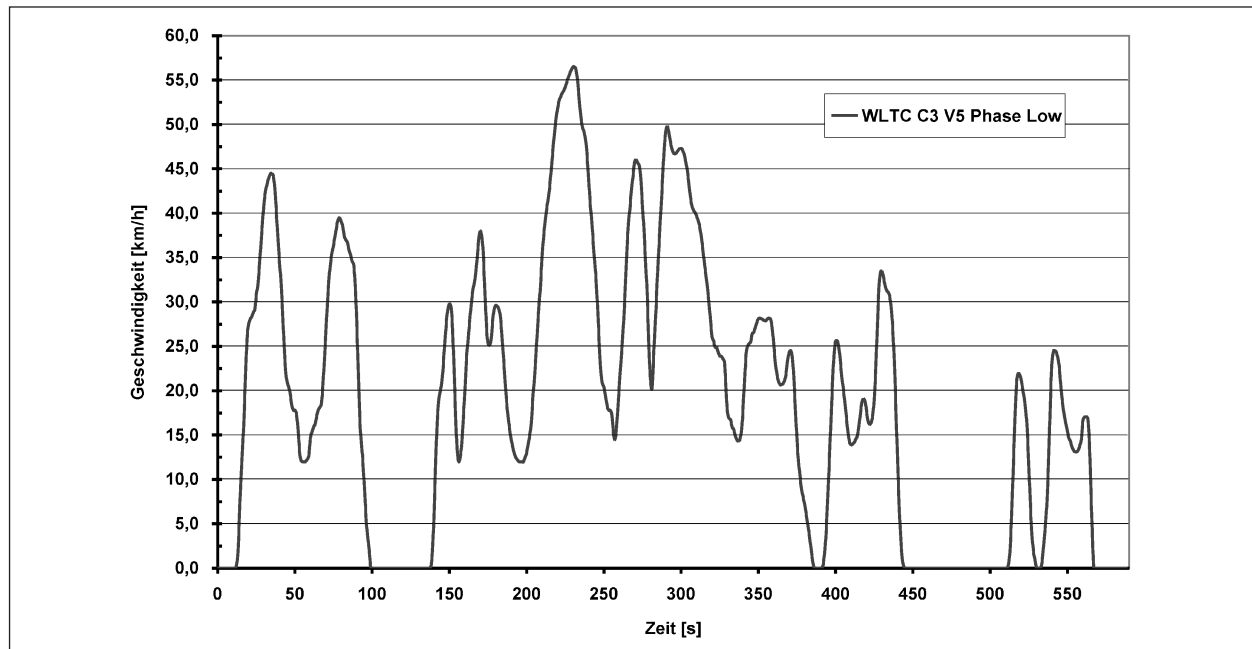


Bild 112: WLTC C3 V5, Phase Low

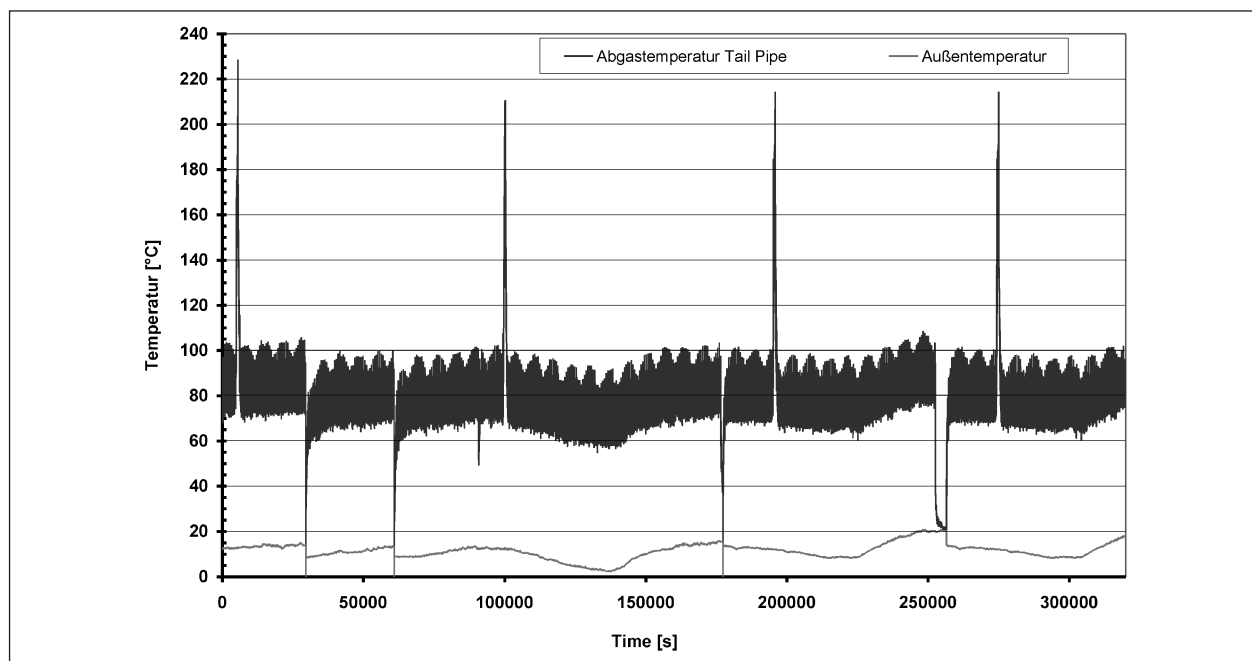


Bild 113: Abgastemperatur am Auspuffende und Umgebungstemperatur, VW Touran

Folgende Fragestellungen sollen in diesem Teildauerlauf erörtert werden: Erstens wäre zu klären ob eine vollständige Partikelfilterregeneration in diesem Zyklus durch die Nacheinspritzung von Kraftstoff unter dem Aspekt des biogenen Kraftstoffes möglich ist. Die andere Fragestellung betrifft das sich einstellende Niveau der Ölverdünnung.

Auf eine Aktivierung des Start-/Stopp-Systems wurde auch in diesem Versuch aus bereits erklärten

Gründen verzichtet. Die detaillierte Versuchsdurchführung ist Tabelle 22 zu entnehmen. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, betrug die Gesamtleistung in diesem relativ langsamen Zyklus 9.683 km und wurde daher in einem Zeitraum von etwa 2 Monaten durchgeführt. Aus dem Feld „Bemerkungen“ kann abgelesen werden, wann eine Ölprobe entnommen wurde.

Auf Grundlage von Bild 113 soll nun die erste Teilfrage beantwortet werden. Dazu wurde die Abgas-

Lauf	Datum	km/Stand von	km/Stand bis	Strecke [km]	Startart	Bemerkung
Lauf 1	22.05.2012	82.481	83.000	519	Kaltstart	
Lauf 2	25.05.2012	83.000	83.896	896	Kaltstart	
Lauf 3	29.05.2012	83.896	84.078	182	Kaltstart	
Lauf 4	30.05.2012	84.078	84.923	845	Kaltstart	
Lauf 5	01.06.2012	84.923	85.076	153	Warmstart	
Lauf 6	04.06.2012	85.076	85.238	162	Kaltstart	
Lauf 7	05.06.2012	85.238	85.836	598	Kaltstart	
Lauf 8	06.06.2012	85.836	86.225	389	Warmstart	
Lauf 9	07.06.2012	86.225	86.627	402	Warmstart	Ölprobe
Lauf10	11.06.2012	86.672	87.105	433	Kaltstart	
Lauf11	14.06.2012	87.105	87.706	601	Kaltstart	
Lauf12	18.06.2012	87.706	88.549	843	Kaltstart	
Lauf13	20.06.2012	88.549	89.566	1.017	Warmstart	
Lauf14	25.06.2012	89.566	89.999	433	Kaltstart	
Lauf15	26.06.2012	89.999	90.069	70	Warmstart	
Lauf16	26.06.2012	90.069	90.318	249	Warmstart	Ölprobe
Lauf17	27.06.2012	90.318	90.804	486	Kaltstart	
Lauf18	28.06.2012	90.804	91.345	541	Kaltstart	
Lauf19	02.07.2012	91.345	91.400	55	Kaltstart	
Lauf20	02.07.2012	91.400	91.436	36	Kaltstart	
Lauf21	03.07.2012	91.436	91.491	55	Kaltstart	
Lauf22	03.07.2012	91.491	91.545	54	Kaltstart	
Lauf23	04.07.2012	91.545	91.600	55	Kaltstart	
Lauf24	04.07.2012	91.600	91.640	40	Kaltstart	
Lauf25	05.07.2012	91.640	91.695	55	Kaltstart	
Lauf26	05.07.2012	91.695	91.750	55	Kaltstart	
Lauf27	06.07.2012	91.750	91.795	45	Kaltstart	
Lauf28	06.07.2012	91.795	91.830	35	Kaltstart	
Lauf29	10.07.2012	91.830	91.972	142	Kaltstart	
Lauf30	11.07.2012	91.972	92.094	122	Kaltstart	
Lauf31	12.07.2012	92.094	92.143	49	Kaltstart	Ölprobe
Lauf32	12.07.2012	92.143	92.164	21	Kaltstart	3 x NEFZ T2
Gesamt				9.683		

Tab. 22: Übersicht Dauerlauf

temperatur am Auspuffende gemessen, wobei dadurch ein Rückschluss auf die Regenerationshäufigkeit gezogen werden konnte.

Im Durchschnitt regeneriert das Fahrzeug alle 500 km in diesem Zyklus. Die Dauer sowie die Häufigkeit der Regenerationen lassen darauf schließen, dass diese auch in einem schwachlastigen Zyklus ordnungsgemäß funktionieren. Damit wurden insgesamt ca. 20 Regenerationen zu ca. 35 min Gesamtregenerationszeit in diesem Dauerlauf durchgeführt.

Bild 114 zeigt den Verlauf der Ölverdünnung mit Biodiesel im „Ölverdünnungszyklus“, wobei zu Beginn bei etwa 82.000 km ein Ölwechsel durchgeführt wurde. Es zeigt sich, dass die Ölverdünnung im Vergleich zum Dauerlaufteil „Standardstraßenfahrzyklus“ stark steigt und bei 9.700 km einen Wert von 2,4 % erreicht. Wie Tabelle 22 zu entnehmen ist, wurden gegen Ende des Ölverdünnungslaufes der Kaltstartanteil und die Stillstandszeit des Fahrzeuges erhöht. Dadurch wurde auch das Aussieden des handelsüblichen Diesels aus dem Motorenöl weiter erschwert.

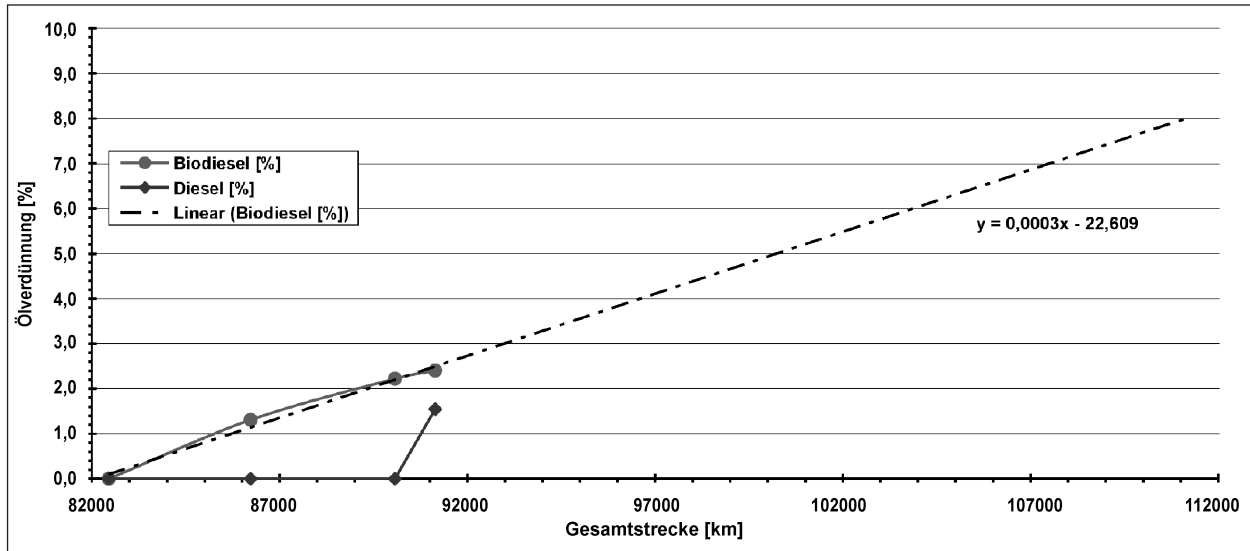


Bild 114: Hochrechnung RME-Eintrag bei 30.000 km Stadtfahrzyklus WLTC C3 V5 Low

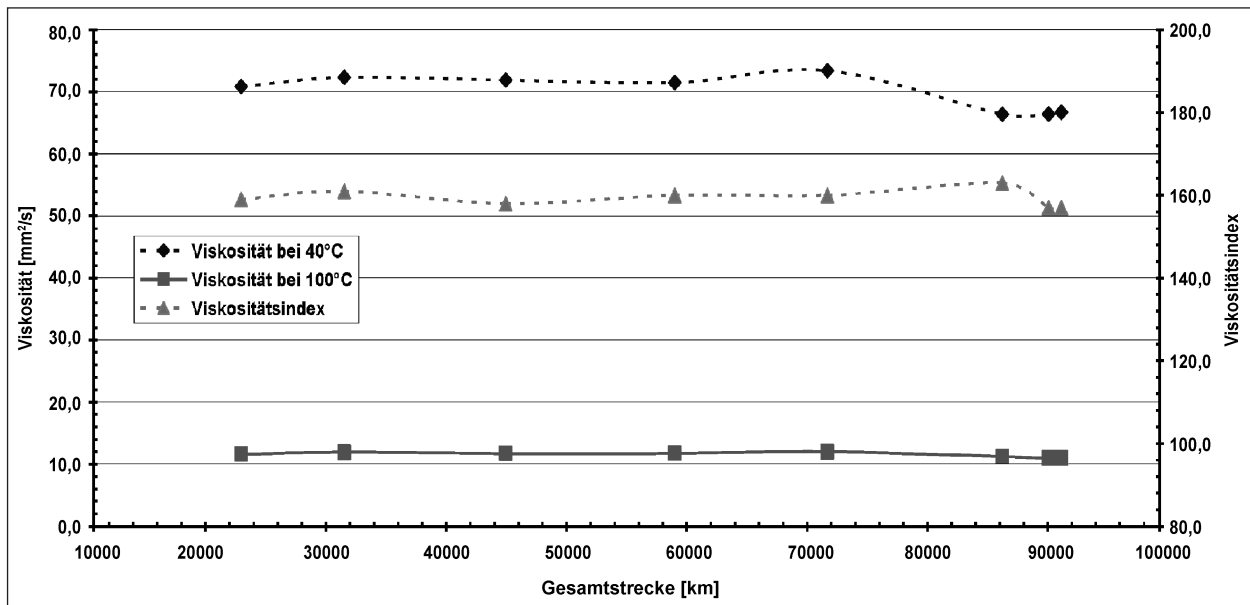


Bild 115: Ölanalyse Ölzustand 1, VW Touran

Durch das relativ lineare Verhältnis aus Ölverdünnung durch Biodiesel zur Laufzeit in diesem Zyklus wurde ein Trend bezogen auf das Ölwechselintervall von etwa 30.000 km berechnet. Als Anmerkung soll erwähnt werden, dass das lineare Verhalten beispielsweise in [55] und [58] bestätigt wird. Das Ergebnis der Hochrechnung ist eine theoretische Verdünnung mit Biodiesel von > 8 %, was bei einer Gesamtölmenge von 4,5 l eine Biodieselmenge von ca. 0,4 l ergibt. Zusätzlich dazu kann wie dargestellt eine weitere Menge an konventionellem Diesel das Motorenöl verdünnen. Eine Aussage, ob die gemessenen Werte oder der Trend kritisch sind, ist relativ schwierig und stark vom Motor und dem verwendeten Motorenöl ab-

hängig. Eine Diskussion soll zumindest an dieser Stelle auf Grundlage der weiteren Ölanalysen begonnen werden.

Die Motorenöle sind nach SAE J 300 in SAE-Viskositätsklassen eingeteilt. Das bedeutet, dass das verwendete Motorenöl der Klasse 5W-30 bei 100 °C einen zulässigen Bereich der kinematischen Viskosität in mm<sup>2</sup>/s von min. 9,3 bis max. < 12,5 besitzt. Die Viskosität stellt ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids dar. Eine Absenkung bedeutet somit eine Verdünnung, also eine Fließverbesserung. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse soll nun Bild 115 Aufschluss über die Veränderungen des Motorenöls geben.

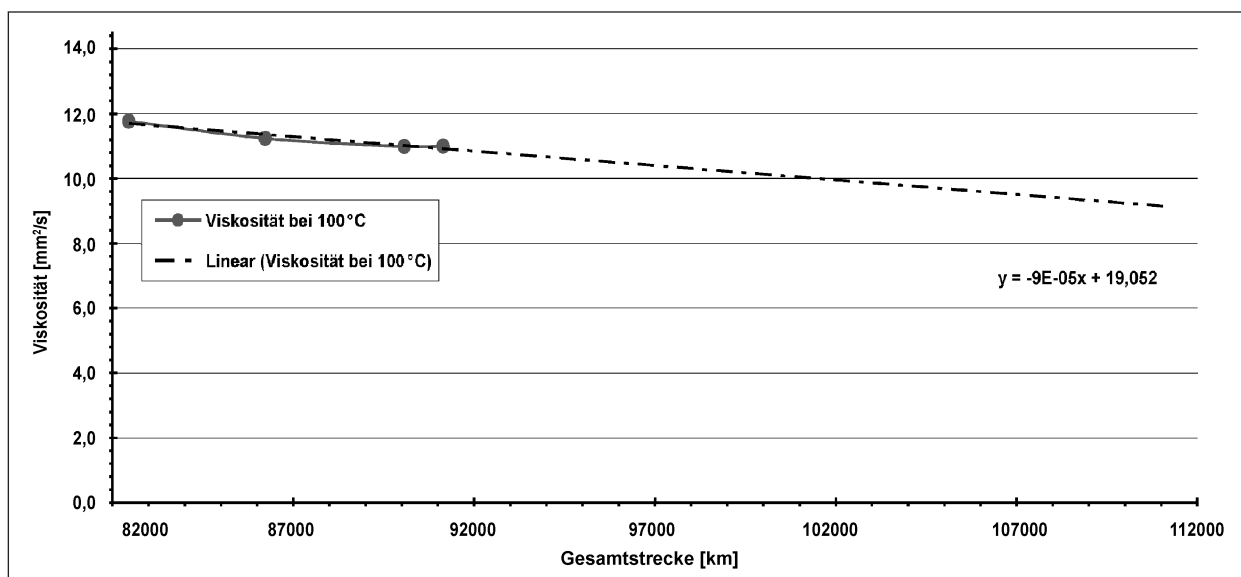


Bild 116: Ölviskosität bei 100 °C im WLTC C3 V5 Low, VW Touran

Bild 115 zeigt deutlich, dass die Viskositätswerte innerhalb des Dauerlaufs „Standardstraßenfahrzyklus“ relativ konstant bleiben, jedoch bei Beginn des „Ölverdünnungszyklus“ stark absinken.

Die Viskosität des Motorenöls bei 100 °C betrug gegen Ende des Laufs 11 mm<sup>2</sup>/s, was bezüglich der zulässigen Grenzen unkritisch ist. Berechnet man auch in diesem Fall einen linearen Trend, wird jedoch deutlich, dass die Viskositätsgrenze von 9,3 mm<sup>2</sup>/s unterschritten werden könnte, also das Öl zu dünnflüssig wird. Es stellt sich in diesem Fall die Frage, ob der Öldruck und die Schmiereigenschaften noch gewährleistet werden können (s. Bild 116).

Zu den beschriebenen Erkenntnissen muss ferner angemerkt werden, dass die Versuchsdurchführung bei weitem noch nicht den „Worst Case“ darstellt. Aus der Tabelle zur Versuchsdurchführung wird klar, dass die zusammenhängenden Intervalle sehr lang gewählt wurden. Dies hatte zur Folge, dass der Verbrennungsmotor meistens betriebswarm war, keine Regeneration durch das Abstellen des Fahrzeuges abgebrochen und bei Wiederanstellen neu gestartet werden musste. Ferner wurde auf einen Einsatz des Start-/Stopp-Systems verzichtet, welches wahrscheinlich den Effekt der Ölverdünnung noch weiter verstärkt hätte.

Zusammenfassend ist damit festzustellen, dass die Ölverdünnung in Verbindung mit einem Kraftstoff B20 unter besonderen Randbedingungen auch weiterhin eine große Herausforderung für die Fahrzeughersteller sein wird.

Bei Betrachtung von Bild 117 zeigt sich, dass die ermittelten Werte für die Oxidation und die Nitration gerade im Ölverdünnungsdauerlauf ansteigen. Laut [88] oxidieren Öle unter Einwirkung von Wärme und Sauerstoff, wobei sich Säuren und unlösliche Bestandteile bilden können, welche oft Ursache von Harzbildung oder schlammartigen Ablagerungen sein können. Die Nitration wird durch Stickstoffverbindungen (NO<sub>x</sub>) aus dem Blow-by-Gas in das Motorenöl eingebracht. Auch hier können Ablagerungen oder Schlammabbildung die Folge sein. Laut [88] bewegen sich die Werte jedoch noch in einem akzeptablen Bereich, wobei zu beachten ist, dass der Ölverdünnungslauf nur über eine Strecke von 9.700 km erfolgte. Schlammabbildung in der Ölwanne konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Additive liegen laut [88] stets innerhalb der zulässigen oder erwarteten Werte. Der Verlauf der Base Number (BN) als Maß für den Gehalt alkalischer Zusätze im Öl kann Bild 119 entnommen werden. Sinkt laut [88] der Wert unter 60 % des Anfangswertes, zeichnet sich eine Erschöpfung des Motorenöls ab und es ist nicht mehr ausreichend in der Lage, die sauren Anteile der Blow-by-Gase aufzunehmen. Die BN betrug in der Referenzauswertung, also bei Frischöl, 5,98 mgKOH/g und am Ende des Dauerlaufs 4,46 mgKOH/g.

### Auswertung der Motor- und Bauteilerlegungen

Im Folgenden sollen ausgewählte Bilder, welche im Rahmen der Bauteilerlegung am Ende des Dauerlaufs aufgenommen wurden, diskutiert werden.



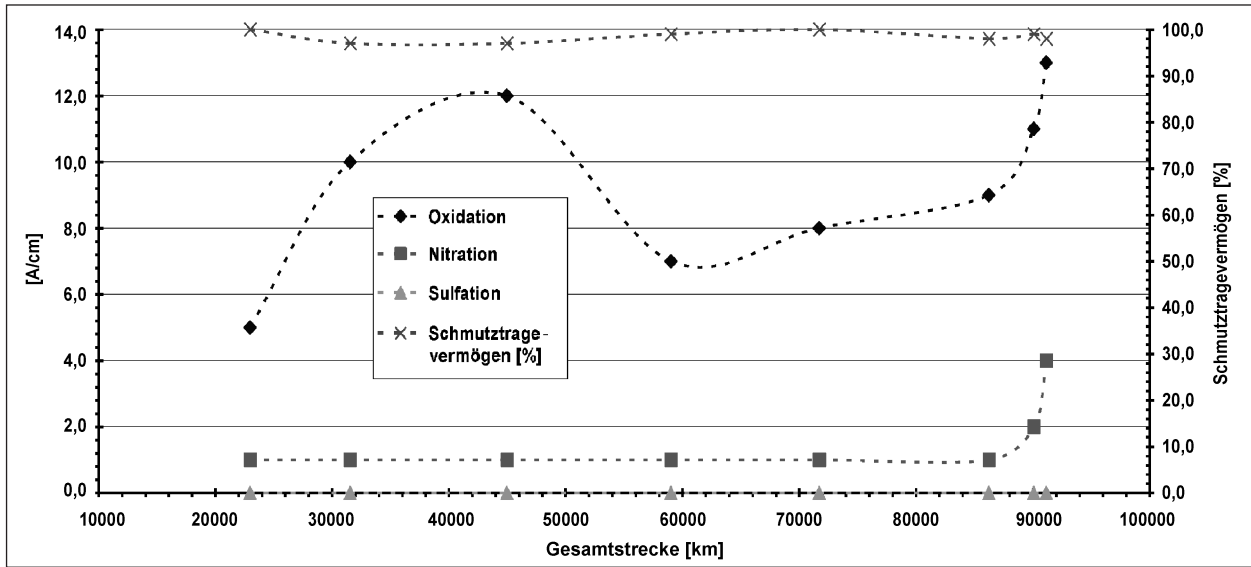


Bild 117: Ölanalyse Ölzustand 2, VW Touran

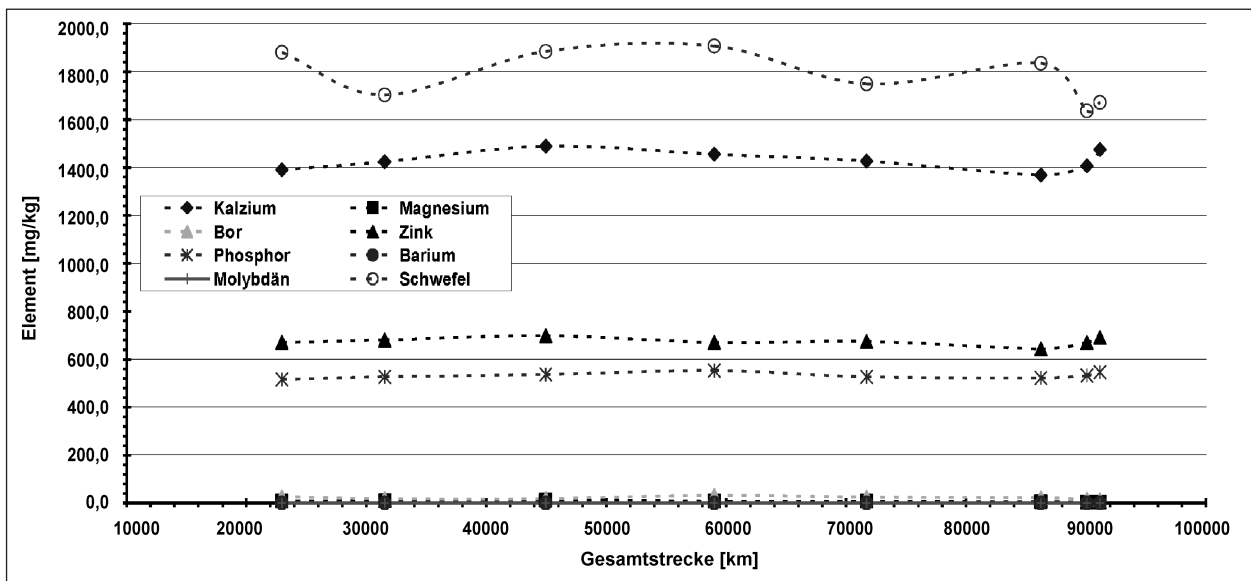


Bild 118: Ölanalyse Additive, VW Touran

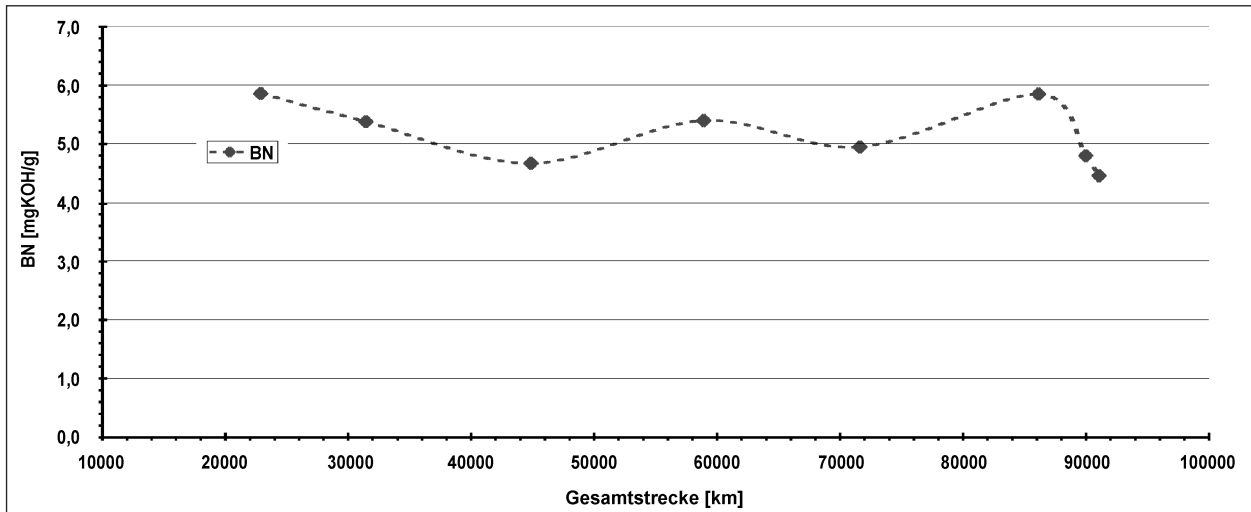
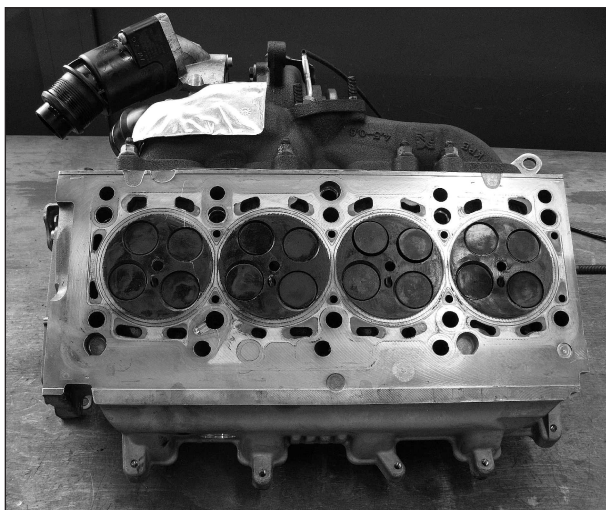


Bild 119: Ölanalyse BN, VW Touran

Zur Analyse des Motors und des Kraftstoffsystems wurde der Zylinderkopf des Motors entfernt, was auch eine Demontage der umliegenden Peripherie mit sich führte. Dieser ist in Bild 120 dargestellt. Am Zylinderkopf selbst konnten, wie erwartet, keine Beschädigungen festgestellt werden. Interessanter war hingegen eine Bewertung der Ventile, der Injektoren, der Glühkerzen und vor allem Verkokungen an der Brennraumwand (Bild 121).

Exemplarisch soll durch Bild 122 gezeigt werden, dass es keine nennenswerten Ablagerungen oder Verkokungen an den Ventilsitzen sowie am Ventil selbst gab.

Die Hochdruckinjektoren weisen leichte Verunreinigungen auf, welche aber aufgrund der Laufleistung von mehr als 90.000 km noch als normale Verschmutzungen einzustufen sind. Auch aus den Ergebnissen der Abgasmessungen in den verschiedenen Stützstellen gibt es keine Hinweise auf ein verändertes oder nicht korrektes Strahlbild der Injektoren (s. Bild 123).



**Bild 120:** Zylinderkopf – Dauerlauffahrzeug Diesel



**Bild 121:** Ventile – Dauerlauffahrzeug Diesel

Auch die Zylinderwände weisen keine untypischen Verunreinigungen oder Spuren von Korrosion auf. Teilweise befinden sich in der Kolbenmulde leichte Ablagerungen, welche aber offensichtlich keine negativen Auswirkungen auf den Motorbetrieb hatten (s. Bild 124 und Bild 125).



**Bild 122:** Glühkerze und Ventile



**Bild 123:** Injektor



**Bild 124:** Kolbenmulde



**Bild 125:** Kolben und Zylinderwand

In Bild 126 ist der Grund der Verschlechterung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Dauerlauf erkennbar. Es ist deutlich sichtbar, dass der AGR-Einsatz versottet ist und somit der Querschnitt verringert wurde. Diese Ablagerungen findet man darüber hinaus auch im AGR-Kühler, den AGR-Rohren sowie im Saugrohr wieder (Bild 127 und Bild 128). Prinzipiell ist dies bei modernen Dieselmotoren ein typisches Bild. Es ist aber durch den Einsatz des biogenen Kraftstoffes noch ausgeprägter vorhanden.

Am Kraftstofffilter sind keine Zersetzungerscheinungen, Sedimentablagerungen oder sonstige Erscheinungen zu beobachten (Bild 128). Der Filter-

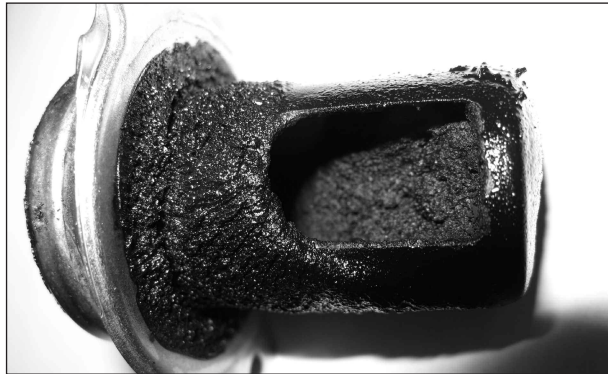


Bild 126: AGR Einsatz

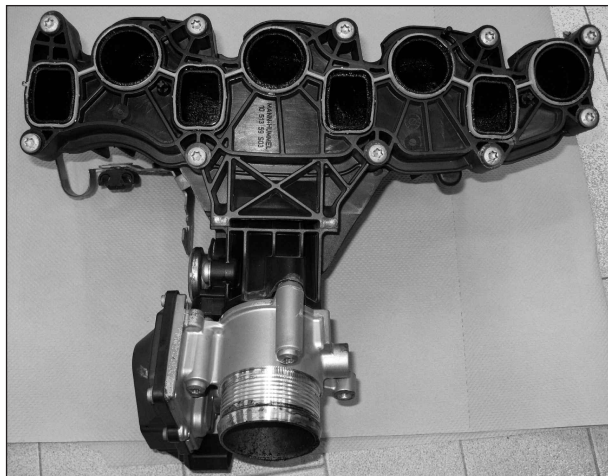


Bild 127: Saugrohr

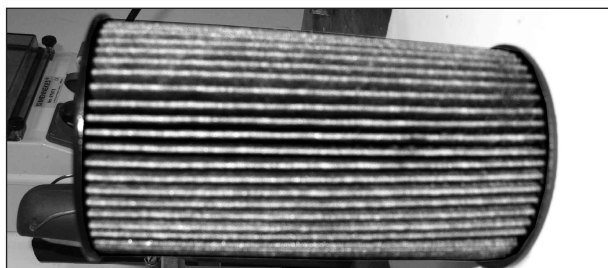


Bild 128: Kraftstofffilter

wechsel wurde ebenso wie der Ölservice nach VW-Angaben durchgeführt. Auch bezüglich des Kraftstoffsystems, hier exemplarisch die Kraftstoffpumpe abgebildet, konnten keine Auffälligkeiten in Form von Undichtigkeiten, Materialauflösungen oder Ablagerungen festgestellt werden (Bild 129).

Die Nockenwelle in Bild 130 zeigt ein der Laufleistung entsprechendes Bild ohne Riefenbildung, welche auf eine schlechte Schmierung hätte hinweisen können.

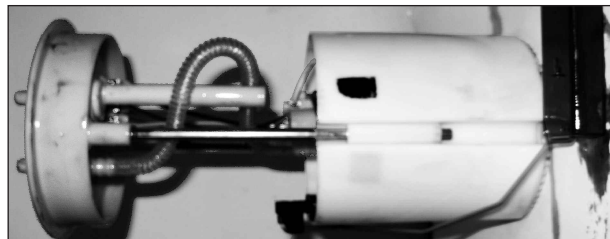


Bild 129: Kraftstoffpumpe

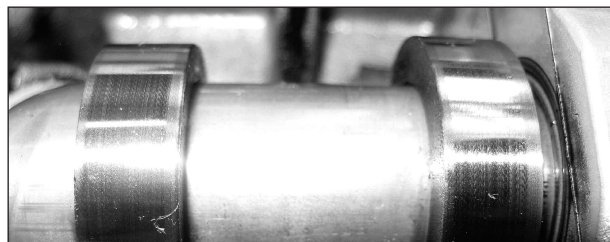


Bild 130: Nockenwelle

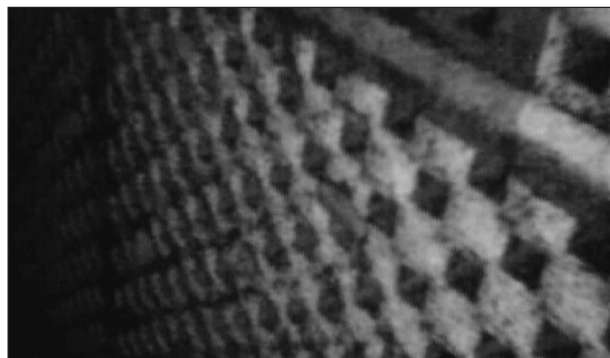


Bild 131: Endoskopaufnahmen des Partikelfilters und des Oxidations-Katalysators

Die Prüfung des Oxidationskatalysators sowie des Partikelfilters bestätigten die bereits durch die Abgasmessungen gewonnenen Ergebnisse. Es konnten keine mechanische Beschädigung und ebenfalls keine äußerlichen Veraschungen oder übermäßige Ablagerungen festgestellt werden (Bild 131).

### 5.2.2 Dauerlaufprüfung Ottofahrzeug mit E25

In den folgenden Darlegungen soll der 80.000-km-Dauerlauf des VW Golf in Verbindung mit dem Kraftstoff E25 beschrieben und ausgewertet werden. Die Versuchsführung gestaltete sich dabei im gleichen Umfang und Ablauf wie die des Dieselfahrzeugs mit den Ausnahmen, dass ausschließlich der Standardstraßenfahrzyklus gefahren wurde und am Ende der Untersuchungen zusätzlich eine  $-7^{\circ}\text{C}$ -Messung im NEFZ sowie eine Shed-Messung angesetzt wurden.

Der Dauerlauf begann am 19.08.2011 mit einem Kilometerstand von 3.500 km und konnte am 24.08.2012 mit einem Kilometerstand von ca. 83.500 km beendet werden. Der lange Zeitraum garantiert auch in diesem Versuch die Darstellung zeitabhängiger Einflüsse des Kraftstoffes auf die Systemkomponenten. Ferner ist auch der Temperaturwechsel zwischen Sommer und Winter in der Versuchsdurchführung enthalten, da alle Dauerlaufversuche ausschließlich im Freien stattgefunden haben.

### Messergebnisse Abgasrollen – Leistungsrollenprüfstand und Shed

Als erste Parameter während des Dauerlaufs sollen nun die maximale Motorleistung und das maximale Motordrehmoment näher betrachtet werden. Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit eines Rollenleistungsprüfstandes kann die Aussage getroffen werden, dass in den einzelnen Dauerlaufstützstellen keine Auffälligkeiten beobachtet werden konnten. Die maximale Motorleistung sowie auch das maximale Motordrehmoment weisen relativ konstante Verläufe auf. Hier kann abgeleitet werden, dass der Motor auch nach Beendigung des Dauerlaufes keine gravierenden Schäden bezüglich der Motormechanik und der Peripherie aufweisen kann (s. Bilder 132 und 133).

In den Eingangsuntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die Partikelanzahl als auch die Partikelmasse durch Verwendung des Kraftstoffes E25 in Bezug auf E5 deutlich gesenkt werden konnte. Die Bilder 134 und 135 zeigen, dass dieser Aspekt auch während und auch gegen Ende des Dauerlaufs weiterhin Bestand hatte.

Die Tatsache des konstant niedrigen Verlaufs der Partikelanzahl sowie ferner auch der Partikelmasse hat zur Folge, dass das Fahrzeug als Euro-5-Applikation auch langfristig den für Otto-Fahrzeuge neu eingeführten Euro-6-Grenzwert für die Partikelan-

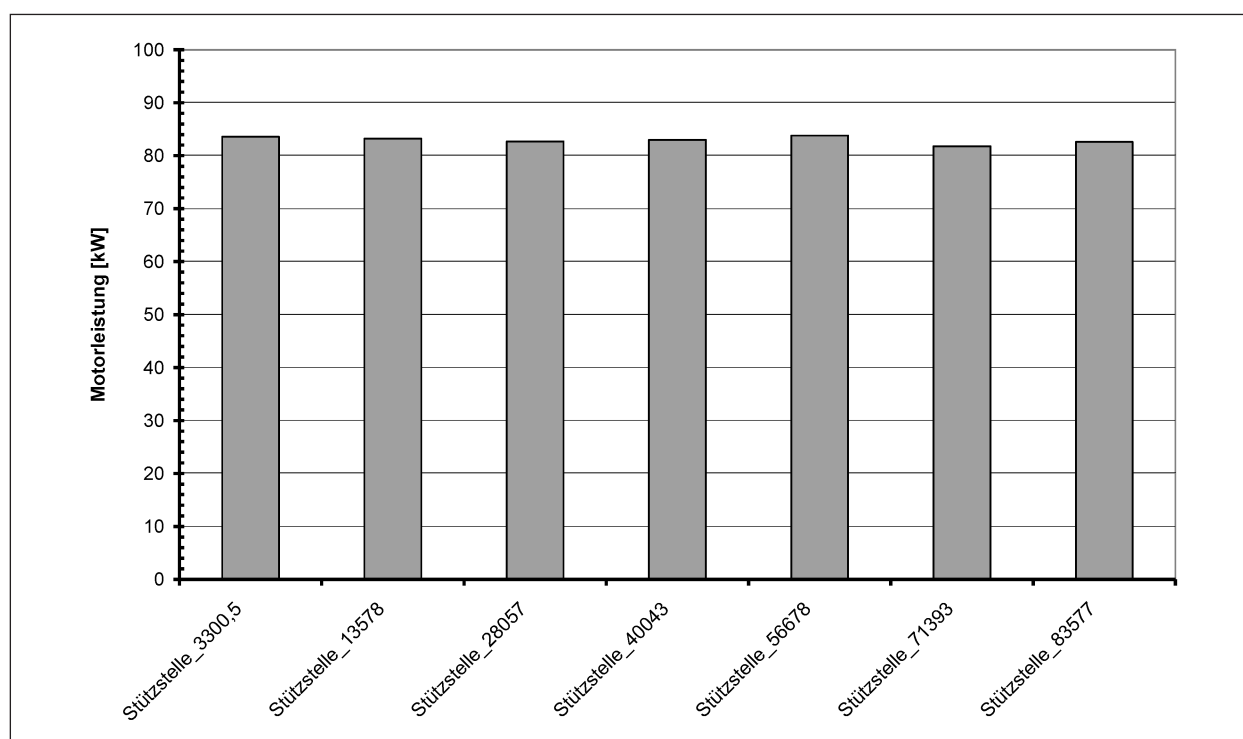


Bild 132: Maximale Motorleistung, VW Golf

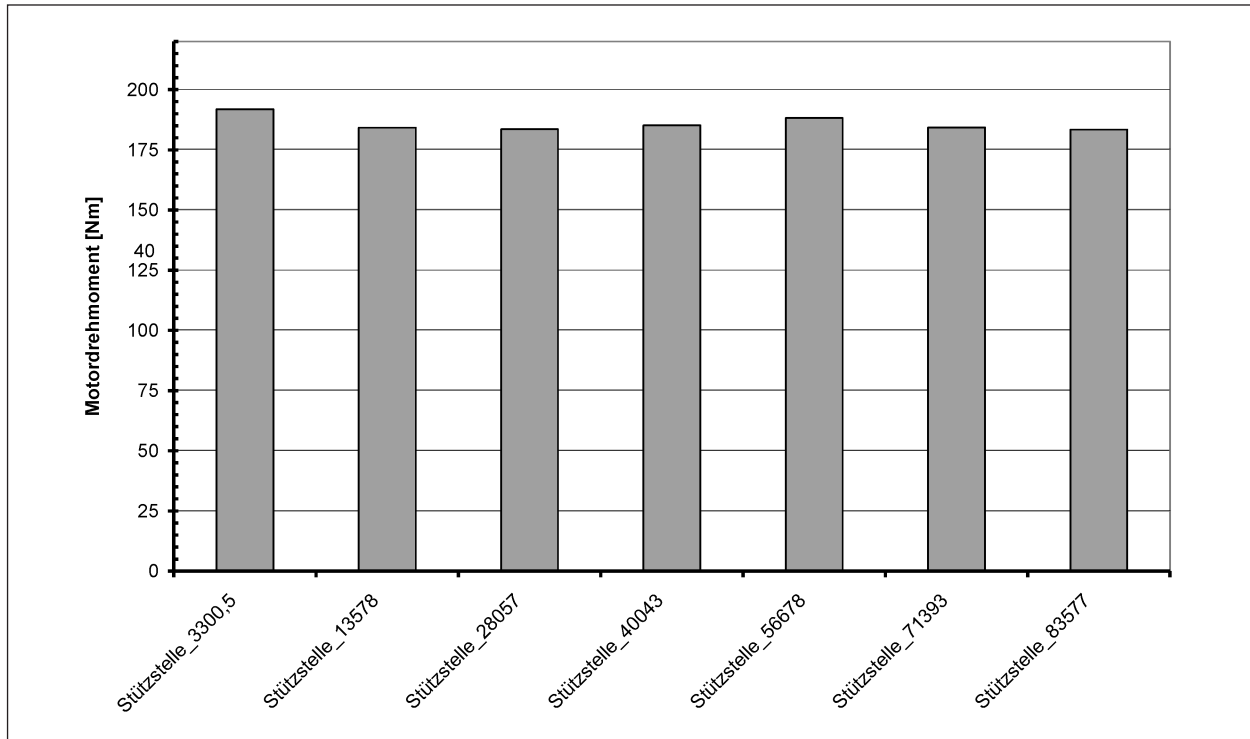


Bild 133: Maximales Motordrehmoment, Golf

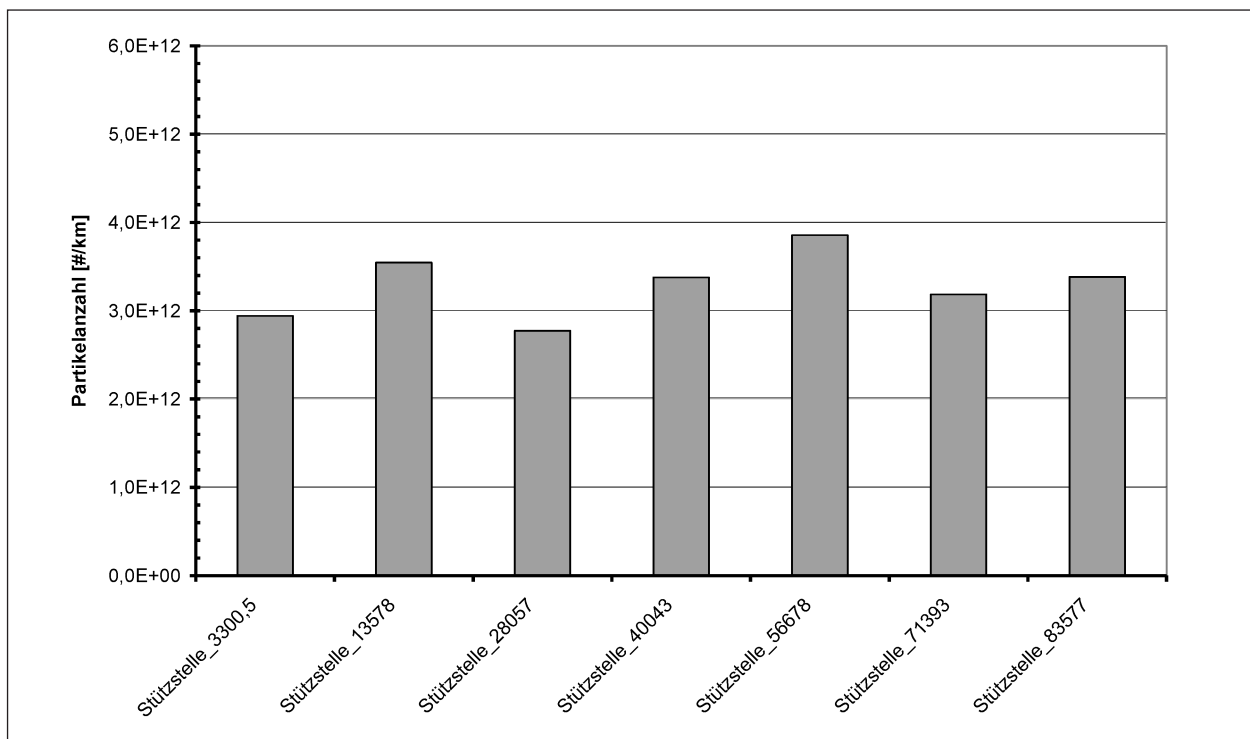


Bild 134: Partikelanzahl, VW Golf

zahl mit  $6 \cdot 10^{12}$  [km<sup>-1</sup>] hinsichtlich der Verordnung (EU) Nr. 459/2012 vom 29.05.2012 einhält. Der Kraftstoff E5 konnte zum Vergleich nur einen Partikelanzahlwert von ca.  $6,5 \cdot 10^{12}$  [km<sup>-1</sup>] darstellen. In Anbetracht der Tatsache, dass der Grenzwert be-

züglich der Partikelanzahl zu einem späteren Zeitpunkt auf  $6 \cdot 10^{11}$  [km<sup>-1</sup>] gesenkt werden soll, könnten Kraftstoffe mit Beimischung von Bioethanol einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Partikelemissionen beisteuern.

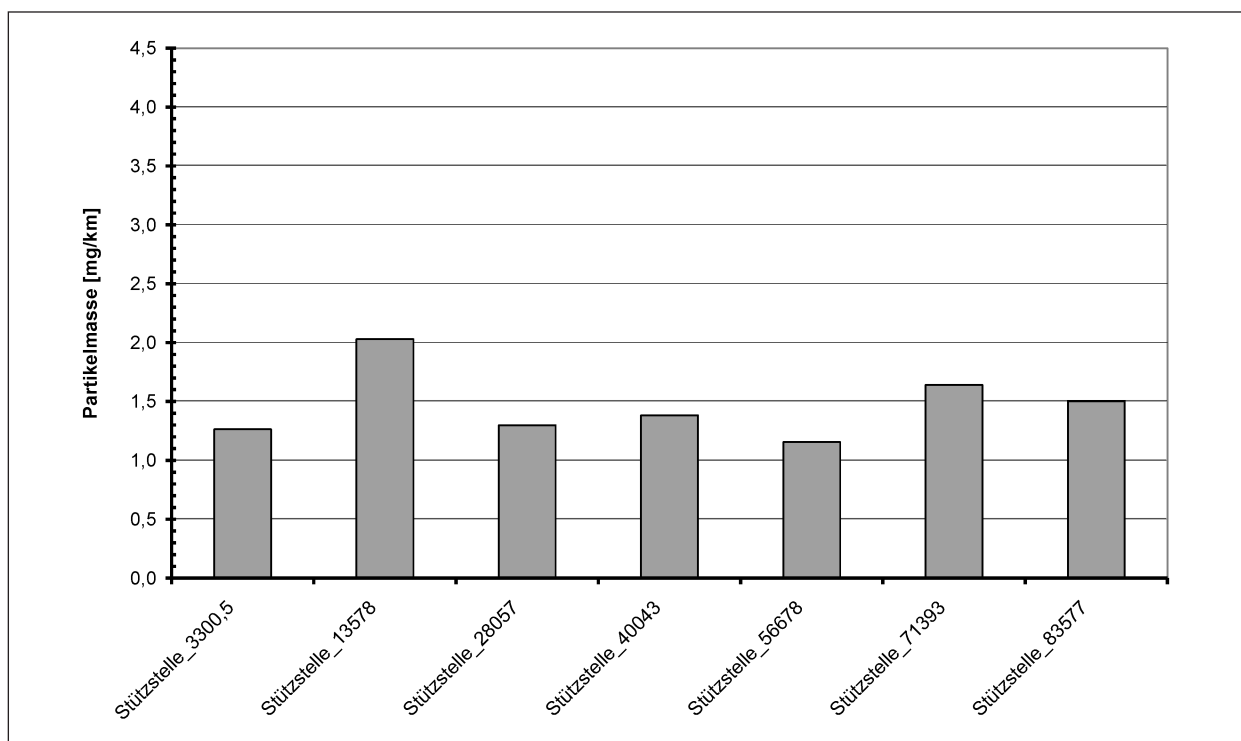


Bild 135: Partikelmasse, VW Golf

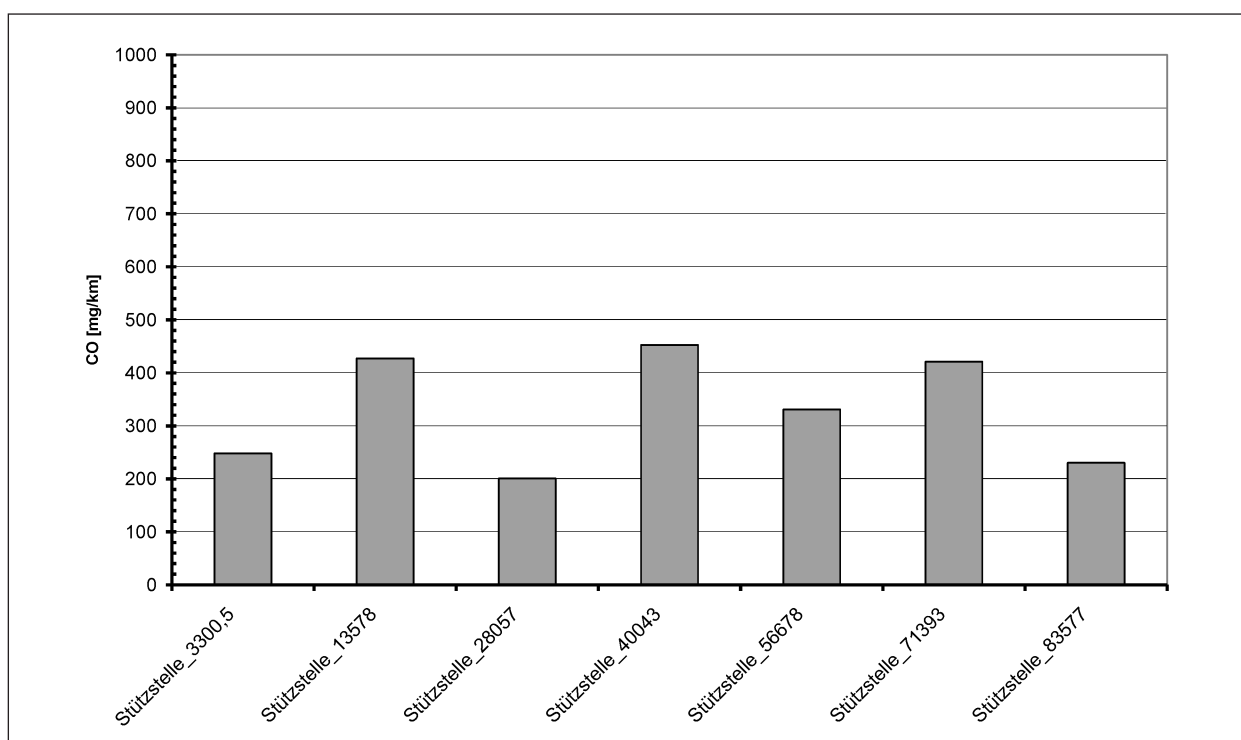


Bild 136: CO-Emissionen, VW Golf

Das Emissionsniveau von CO, HC und NMHC ist während des gesamten Dauerlaufs konstant und weist ausschließlich gängige Messwertstreuungen auf. Die Euro-5-/Euro-6-Grenzwerte wurden zu keinem Zeitpunkt überschritten (s. Bilder 136-138).

Durch diese Betrachtungen kann eine Katalysator-schädigung, mit Wirkung auf HC, NMHC und CO, durch den biogenen Kraftstoff in Form von E25 ausgeschlossen werden. Diese Aussage wird ferner durch den -7°C-Test unterstrichen, wobei das

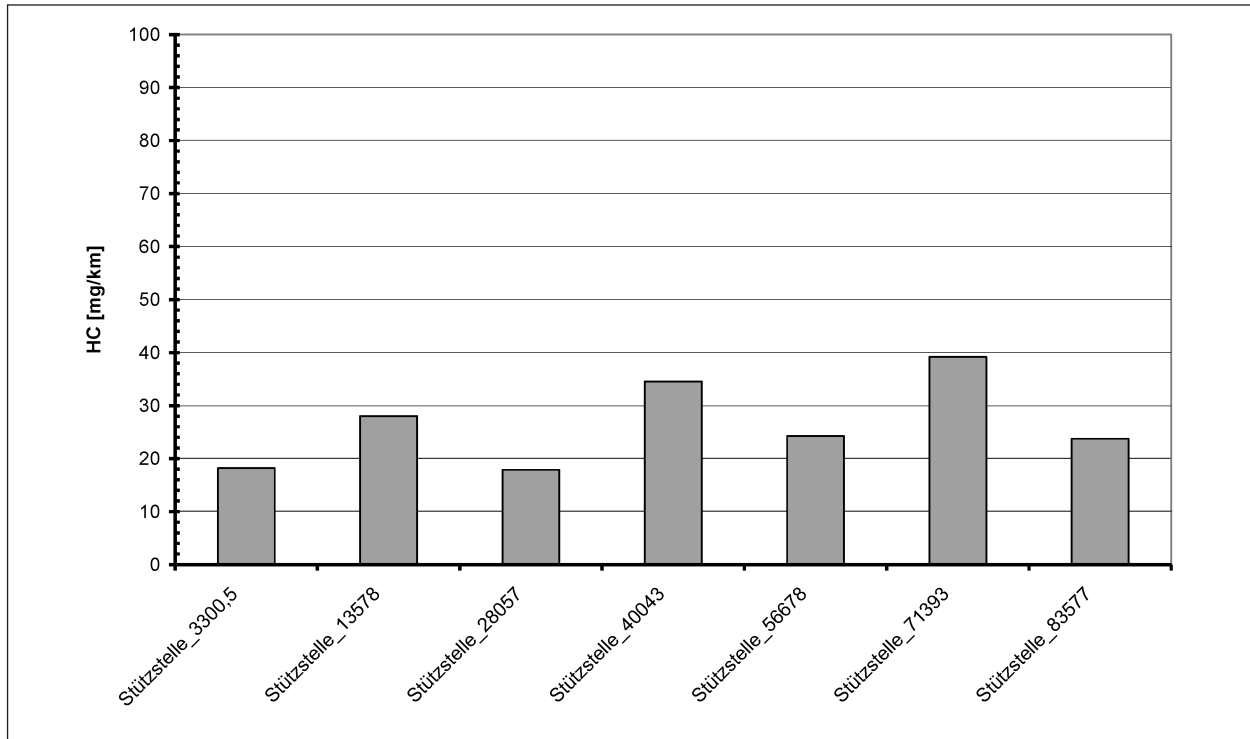


Bild 137: HC-Emissionen, VW Golf

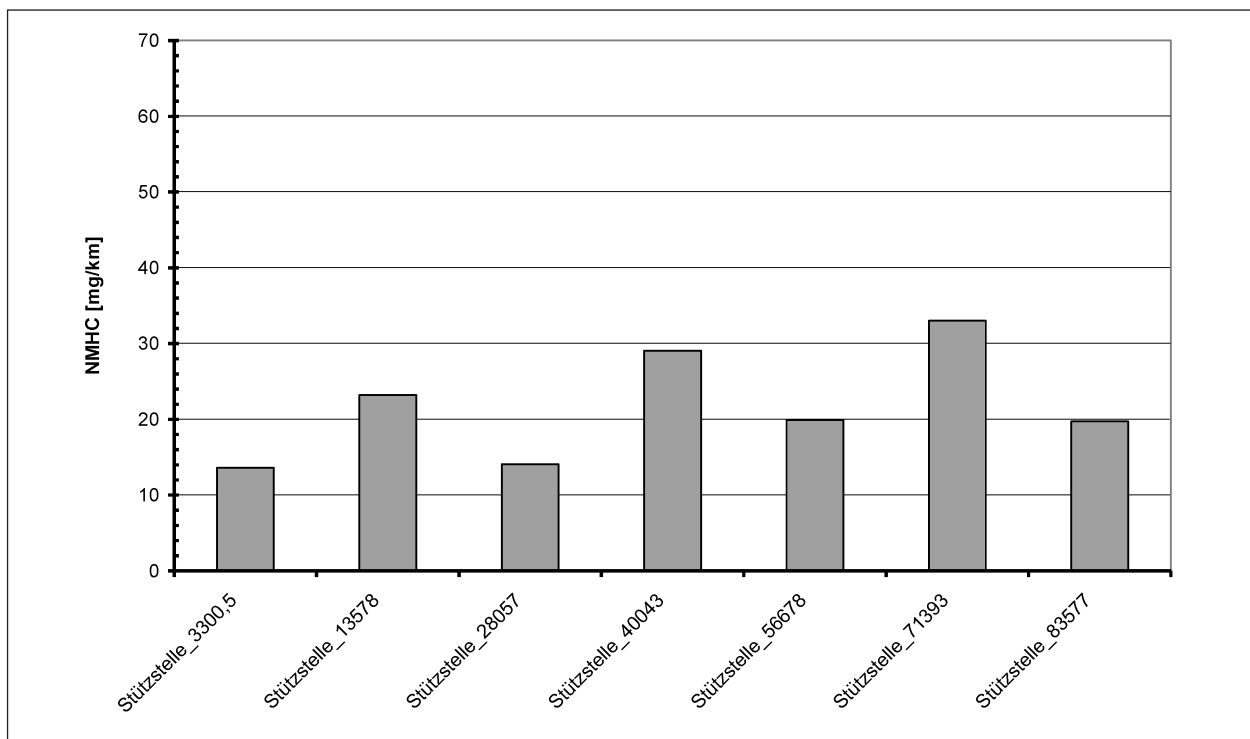


Bild 138: NMHC-Emissionen, VW Golf

Fahrzeug den Grenzwert hinsichtlich HC und CO deutlich unterschreiten konnte.

Auch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen lassen keinen eindeutigen Trend erkennen und befinden sich stets weit

unter dem Euro-5-/Euro-6-Grenzwert. Im Gegensatz zum vorher betrachteten Dieselmotor hat hier der 3-Wege-Katalysator einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass auch in Bezug

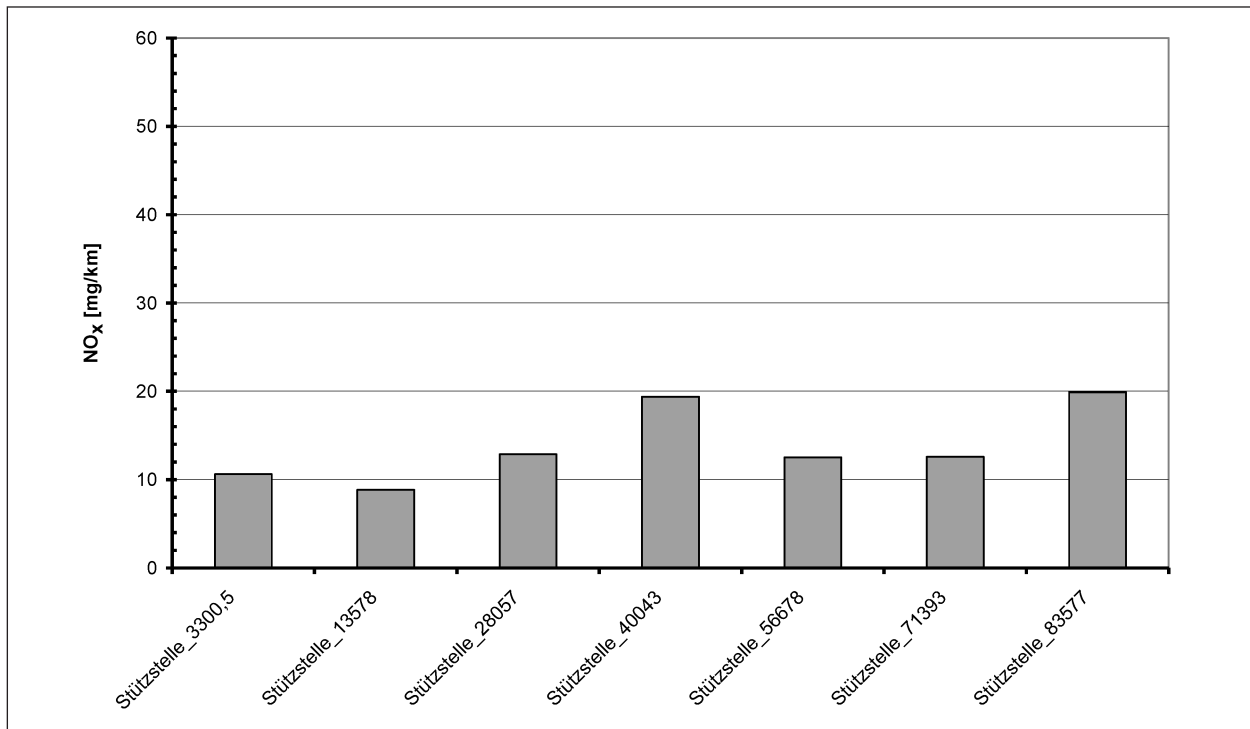


Bild 139: NO<sub>x</sub>-Emissionen, VW Golf

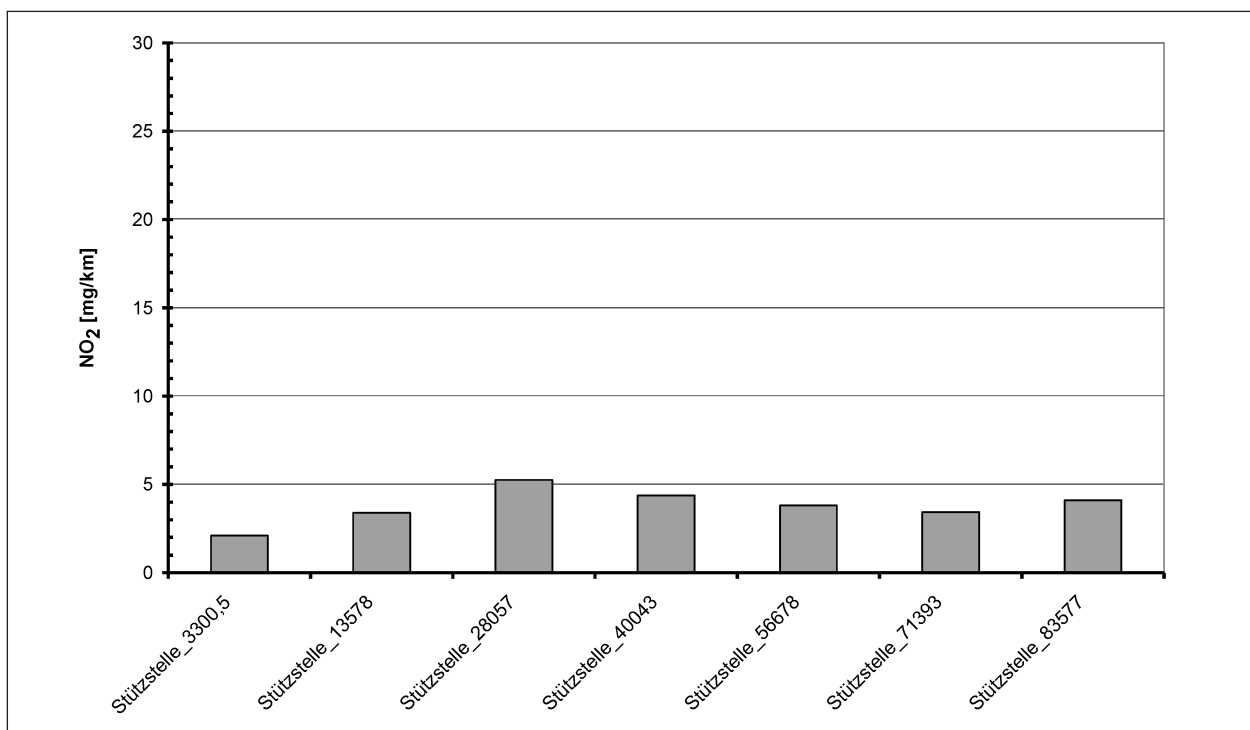


Bild 140: NO<sub>2</sub>-Emissionen, VW Golf

auf NO<sub>x</sub> keine Schädigung der katalytisch wirksamen Schicht erfolgt sein kann. Diese Aussage wird durch die Betrachtung der NO<sub>2</sub>-Ergebnisse zusätzlich bestätigt. Auch diese weisen keinerlei Trendverhalten bei Betrachtung der einzelnen Stützstellen auf (s. Bild 139 und Bild 140).

Bild 141 und Bild 142 sollen sich nun mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen und dem Kraftstoffverbrauch beschäftigen. Gemäß den Darstellungen sind auch in diesem Fall keine Hinweise auf ein gestörtes Betriebsverhalten des Motors gegeben. Vielmehr ist das Einlaufverhalten des Fahrzeuges zu beobachten,



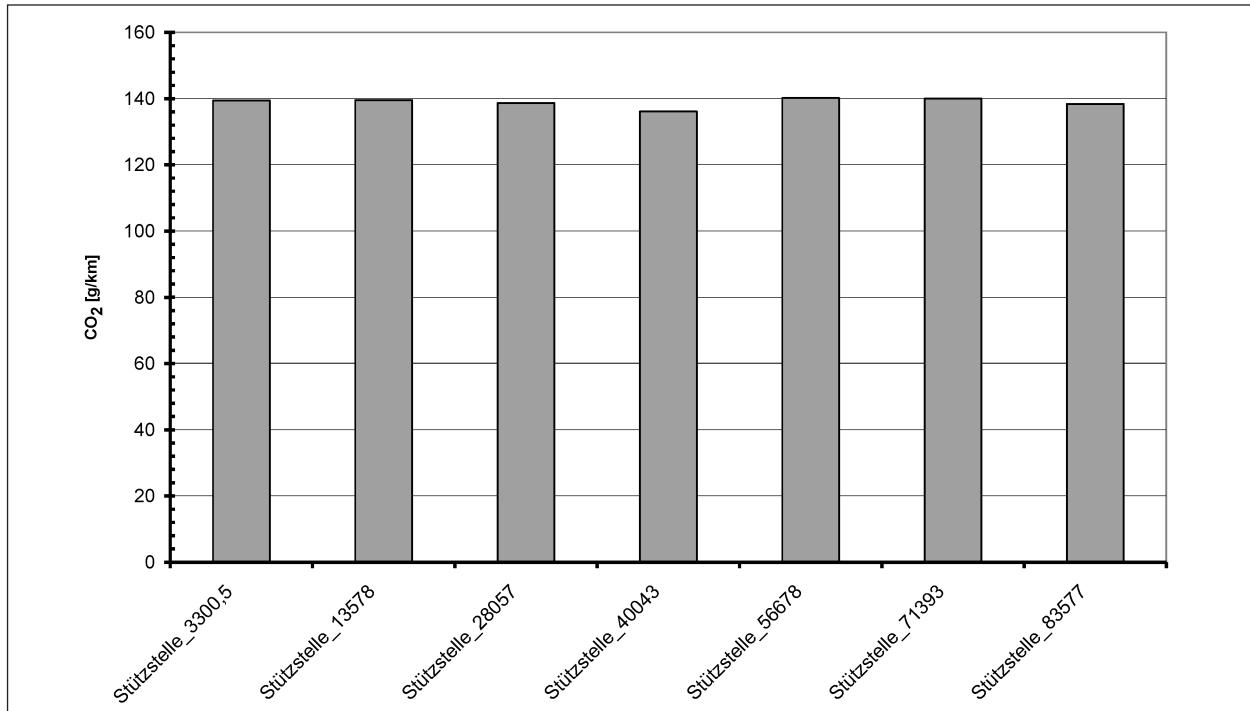
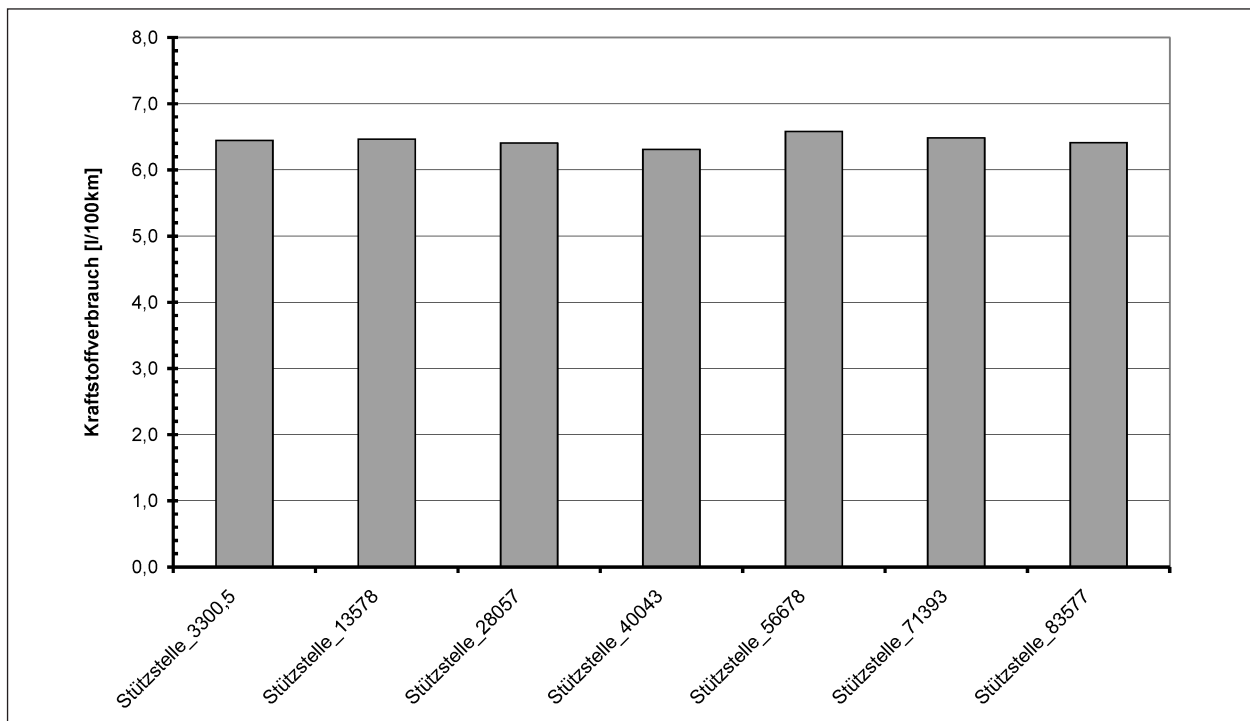
Bild 141: CO<sub>2</sub>-Emissionen, VW Golf

Bild 142: Kraftstoffverbrauch, VW Golf

was sich zu Beginn des Dauerlaufs in einer Senkung des Kraftstoffverbrauchs zeigt, welcher dann anschließend mit einem sehr geringen Anstieg wieder ein höheres Niveau erreicht.

Zusammen mit den bereits betrachteten Parametern bestehend aus Motorleistung, Emissionen und

Kraftstoffverbrauch kann an dieser Stelle schon eine erste Aussage getroffen werden, dass prinzipielle Störungen hinsichtlich des Motorbetriebes ausgeschlossen werden können.

Die Messergebnisse aus den Shed-Tests sind in Bild 143 und Bild 144 dargestellt. Sie sind deswe-

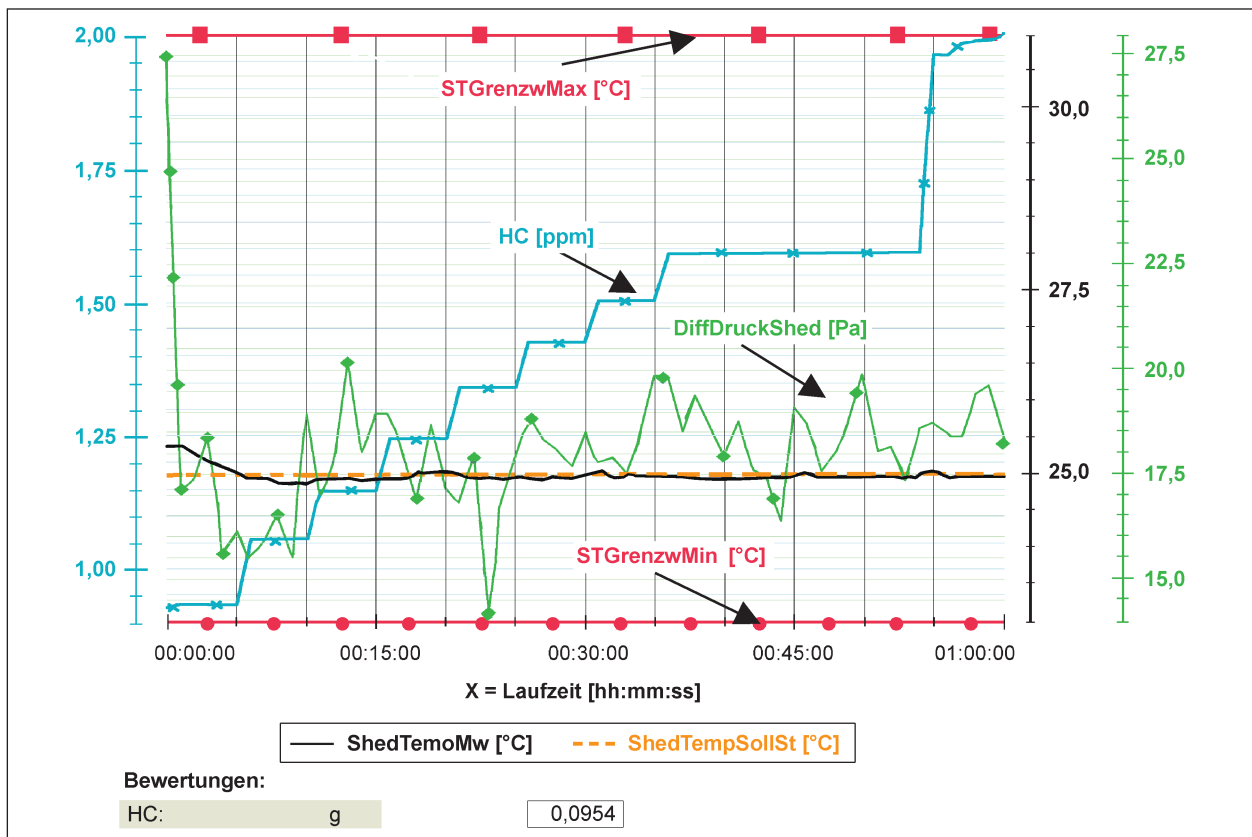


Bild 143: Shed Hot Soak, VW Golf

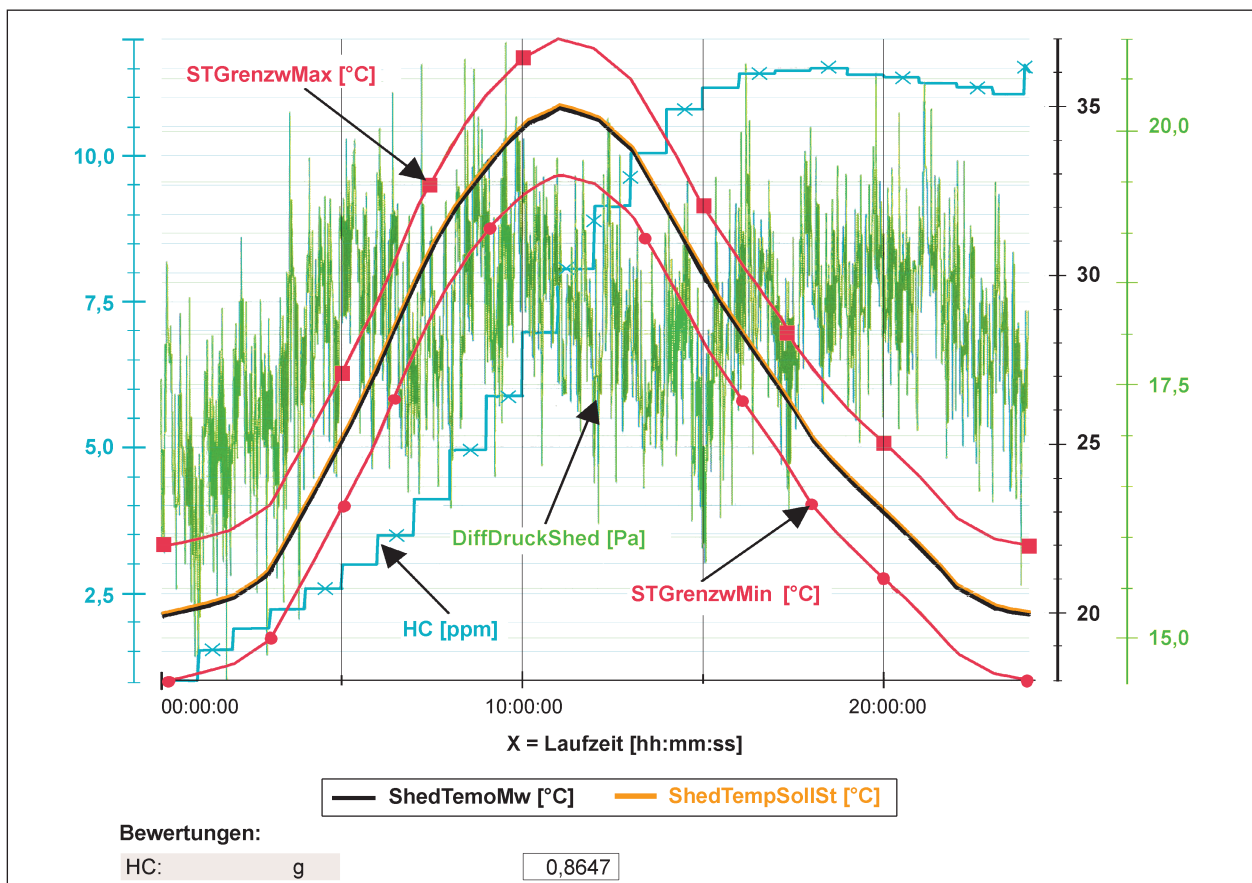


Bild 144: Shed-24h-Dauertest

gen von Interesse, weil sie jegliche Undichtigkeiten im Kraftstoffsystem oder einen Defekt des Aktivkohlefilters aufzeigen würden. In Kapitel 3.2.2 konnte dargelegt werden, dass Ethanol teilweise eine sehr korrosive Wirkung gegenüber bestimmten Materialien aufweist. Dieses Verhalten könnte bei dem betrachteten Versuchsträger zu den beschriebenen Problemen führen.

Um diesen Aspekt zu prüfen, wurde der Aktivkohlefilter des Fahrzeuges ausgebaut und vollständig mit Butan beladen. Im Anschluss erfolgte der Shed-Test gemäß VO (EG) Nr. 692/2008 mit verschiedenen Vorkonditionierphasen sowie den zwei Messphasen in der Shed-Kammer, dem Hot-Soak- und dem 24h-Dauertest (s. Bild 144).

Aus der Summe beider Ergebnisse (Hot-Soak- und 24h-Test) wird deutlich, dass der Grenzwert von 2 g HC deutlich unterschritten wird. Daraus kann abgeleitet werden, dass das Kraftstoffsystem dicht gegenüber der Umwelt ist. Darüber hinaus kann eine Schädigung des Aktivkohlefilters ausgeschlossen werden. Die Aussage kann dahingehend noch gefestigt werden, dass zur Provokation eines möglichen Fehlers die kraftstoffführenden Teile sowie der Aktivkohlefilter über ein Jahr mit dem Kraftstoff in Kontakt standen und eine Strecke von 80.000 km in einem Zyklus mit hohem Kraftstoffdurchsatz absolviert wurde.

### Auswertung der Motor- und Bauteil - zerlegungen

Die Hochdruckinjektoren weisen leichte Verkokungen auf (Bild 147), wobei dies jedoch nicht die Düsenlöcher betrifft (Bild 148). Bild 149 zeigt die einzelnen Abdichtelemente des Injektors, wobei je-

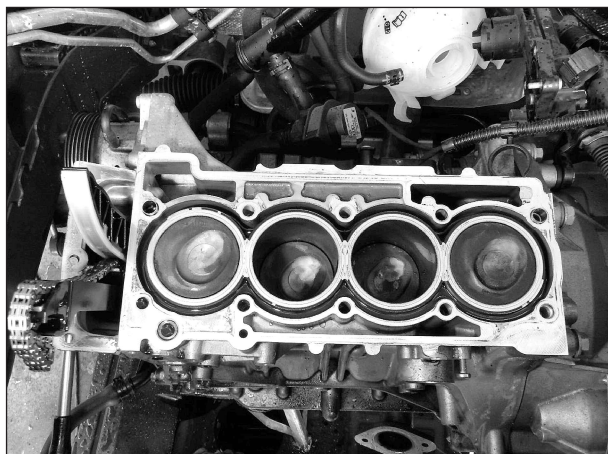


Bild 145: Zerlegter Motor mit abgebauter Peripherie, VW Golf

weils das rechte und das linke Element direkt mit dem Kraftstoff in Form der Railanbindung in Berührung stehen. Das mittlere Element dichtet den Injektor zum Brennraum ab. Keines der Dichtelemente weist Spuren von Materialunverträglichkeit in Form von Quellen oder Zerfallen auf. Der Shed-Test hatte schließlich hier schon eindeutige Indizien geliefert, dass die einzelnen Anbindungspunkte im Kraftstoffsystem dicht sind.



Bild 146: Zerlegter Zylinderkopf, VW Golf



Bild 147: Hochdruckinjektor, VW Golf



Bild 148: Düsenlöcher Hochdruckinjektor, VW Golf

Um eine mögliche Schädigung der Kraftstoffpumpe oder des Kraftstofffilters detektieren zu können, wurde der Kraftstofffilter aufgesägt, wobei jedoch keine Hinweise diesbezüglich festgestellt werden konnten. Das Kraftstoffrail wurde hinsichtlich Späne der Hochdruckpumpe sowie bezüglich aller Dichtungselemente untersucht, wobei sich keine Auffälligkeiten ergaben (s. Bilder 150 und 151).

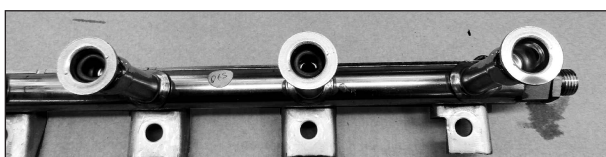
Auch die Nockenwellen zeigen ein normales Tragbild ohne Riefen oder Einlaufspuren (s. Bild 152). Das bisher durchweg positive Fazit der Dauerlaufergebnisse bezüglich des E25-Kraftstoffes muss jedoch bei der Betrachtung der folgenden Bilder relativiert werden. Hinsichtlich des Motorleistungsverhaltens, der Schadstoffemissionen, der Shed-Prü-



**Bild 149:** Dichtungssatz Hochdruckinjektor, Vergleich Neu- und Altteile



**Bild 150:** Kraftstofffilter, VW Golf



**Bild 151:** Kraftstoffrail, VW Golf

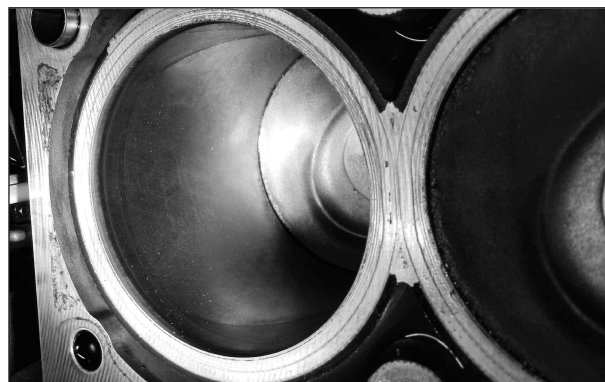


**Bild 152:** Nockenwelle, VW Golf

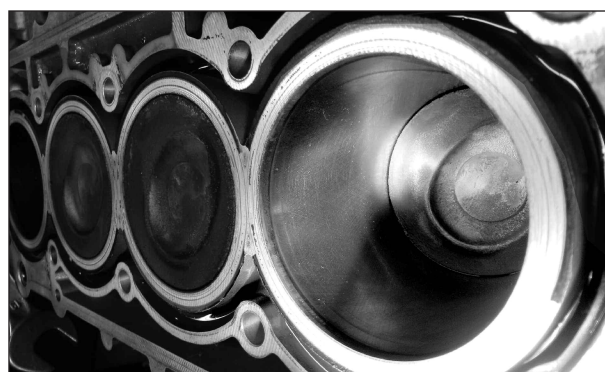
fung sowie des Kraftstoffverbrauchs konnte bisher nachgewiesen werden, dass es keine tiefgreifenden Einflüsse oder Langzeitschäden des E25-Kraftstoffes auf den Motor und das Kraftstoffsystem geben kann.

Die Zerlegung des Motors zeigte jedoch deutlich, dass es Einflüsse gibt. Auffällig waren dazu Verfärbungen an den Zylinderlaufflächen. Dies wird in den Bildern 153 und 154 visualisiert. In den Vertiefungen der gehonten Zylinderlauffläche konnten eindeutig rostige Bereiche detektiert werden. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt, könnte dies aus dem erhöhten Wassergehalt des Ethanol resultieren, welcher durch die frühe punktuelle Einspritzung von Kraftstoff direkt in den Brennraum, zur Homogenisierung, an den brennraumbegrenzenden Bauteilen kondensiert.

Auch an den Ventilen sind deutlich rostige Veränderungen an den Ventilsitzen zu beobachten, was jedoch ausschließlich die Auslassventile betrifft. Da der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingespritzt wird, wäre dies ein weiteres Indiz dafür, dass die rostigen Veränderungen dem Kraftstoff zuzuordnen



**Bild 153:** Zylinderlauffläche Zylinder 1, VW Golf



**Bild 154:** Zylinderlauffläche Zylinder 4, VW Golf



**Bild 155:** Einlass- und Auslassventil, VW Golf



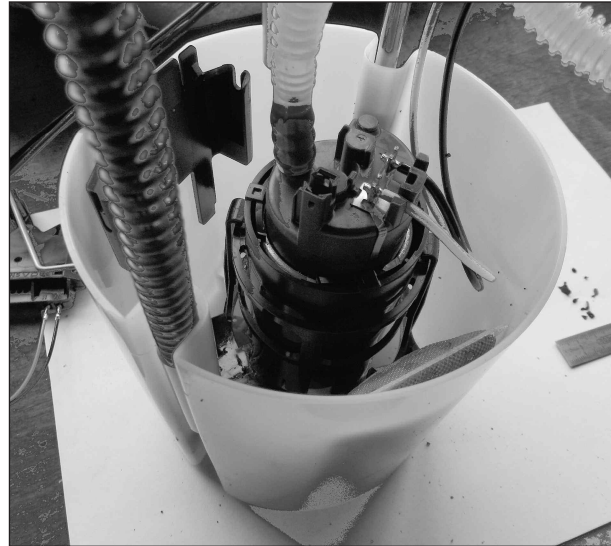
**Bild 156:** Detailansicht Auslassventil, VW Golf

sind. Die Ventilsitze mussten darüber hinaus beim Wiederausbau des Motors neu eingeschliffen werden (s. Bild 155 und Bild 156).

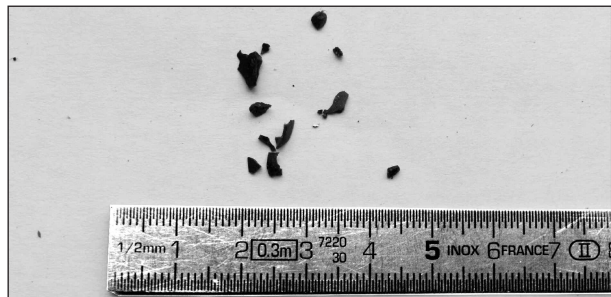
Beim Ausbau und Zerlegen der Tankpumpe waren Gummireste im Fahrzeugtank auffällig, welche nach kurzer Untersuchung der Tankpumpe selbst zugeordnet werden konnten (s. Bild 158).

Dabei handelte es sich um ein Aufhängungselement, welches nicht resistent gegenüber der hohen Ethanolbeimischung war. Da dieses Element keinen entscheidenden Einfluss auf die Funktionalität der Tankpumpe hatte, wurde dies auch während des Dauerlaufs nicht auffällig.

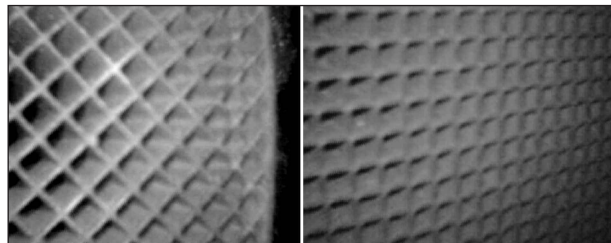
Es zeigt sich somit, dass es auch in diesem Fall negative Einflüsse des Kraftstoffes auf die Bauteile des Motors und des Kraftstoffsystems gibt. Jedoch sollten diese Aspekte nicht überbewertet werden. Es ist jedoch zu beachten, dass das betrachtete Fahrzeug nicht für einen Kraftstoff E25 freigegeben, sondern maximal für Beimischungen bis E10 ausgelegt ist. Das beschädigte Element könnte in einer Revision gegen ein E25-resistentes Teil getauscht werden. Es zeigt sich aber damit auch sehr deutlich, dass der Materialverträglichkeit bei erhöhten Beimischungen mit Bioethanol große Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Auch die korrodierten Ventilsitze hatten offensicht-



**Bild 157:** Intank-Kraftstoffpumpe mit Tankfüllstandsgeber, VW Golf



**Bild 158:** Gummireste aus Fahrzeugtank, VW Golf



**Bild 159:** 3-Wege-Katalysator – Endoskopaufnahme von vorn (links) und von hinten (rechts)

lich keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Parameter. Jedoch könnte sich dies bei längeren Zeiträumen oder Laufleistungen verschärfen und zu Problemen hinsichtlich einer ordnungsgemäßen Abdichtung des Brennraums führen.

Wie bereits auf Grundlage der Abgasmessungen zu erwarten war, konnten beim 3-Wege-Katalysator keinerlei Beschädigungen sowie Ablagerungen festgestellt werden (Bild 159).

### Auswertung der Ölanalysen für den E25-Dauerlauf

Im Folgenden sollen die Ölanalysen in den kenntlich gemachten Stützstellen ausgewertet werden. Zu beachten ist, dass zu Beginn ein Ölwechsel mit Filter und während des Dauerlaufs 3 Ölwechsel mit Filter nach Herstellervorgabe bei den Kilometerständen 28.000, 46.400 und 71.400 km durchgeführt wurden (siehe Tabelle 23).

Die Untersuchungen der Ölproben wurden auch bei dem Ottofahrzeug durch die Firma Oelcheck GmbH, siehe [88], durchgeführt.

Die Verschleißwerte nach Bild 160 liegen bei allen Untersuchungen im erwarteten Bereich und sind größtenteils durchweg geringer als beim betrachteten Dieselfahrzeug. Auffälliger hingegen ist der hohe Siliziumanteil im Motorenöl, wobei es sich laut [88] um nicht abrasiv wirkende silikonhaltige Bestandteile von Montagehilfsmitteln, silikonhaltiges Schmierfett oder elastische Dichtungen handeln könnte. Die Bauteilerlegungen zeigten bereits, dass dieser Kraftstoff auf nicht resistente Bauteile erhebliche Auswirkungen haben kann. Über den Ursprung des hohen Siliziumgehaltes kann jedoch nur spekuliert werden. Womöglich handelt es sich um Auflösungen von Montagehilfsmitteln, welche

<b>Probenbezeichnung</b>	DEKRA 2				
<b>Maschinentyp</b>	Otto Di 1.2 Tsi				
<b>Hersteller</b>	VW				
<b>Probe aus</b>	Benzinmotor				
<b>Ölbezeichnung</b>	Aqip 7006 5W-30				
<b>Ölmenge im System</b>	ca. 2.715 g				
Untersuchungsdatum	29.09.2011	11.11.2011	05.01.2012	16.02.2012	20.03.2012
Datum Probenentnahme	27.09.2011	09.11.2011	02.01.2012	14.02.2012	15.03.2012
Datum letzter Ölwechsel	10.08.2011	10.08.2011	09.11.2011	02.01.2012	02.01.2012
Nachfüllmenge seit Wechsel [g]	-	-	259	-	-
Laufzeit seit Wechsel	10.130	24.619	18.378	10.194	24.957
Laufzeit gesamt	10.130	28.046	46.435	56.639	71.392
Öl gewechselt	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja

Tab. 23: Ölaufzeiten und Ölwechsel Golf

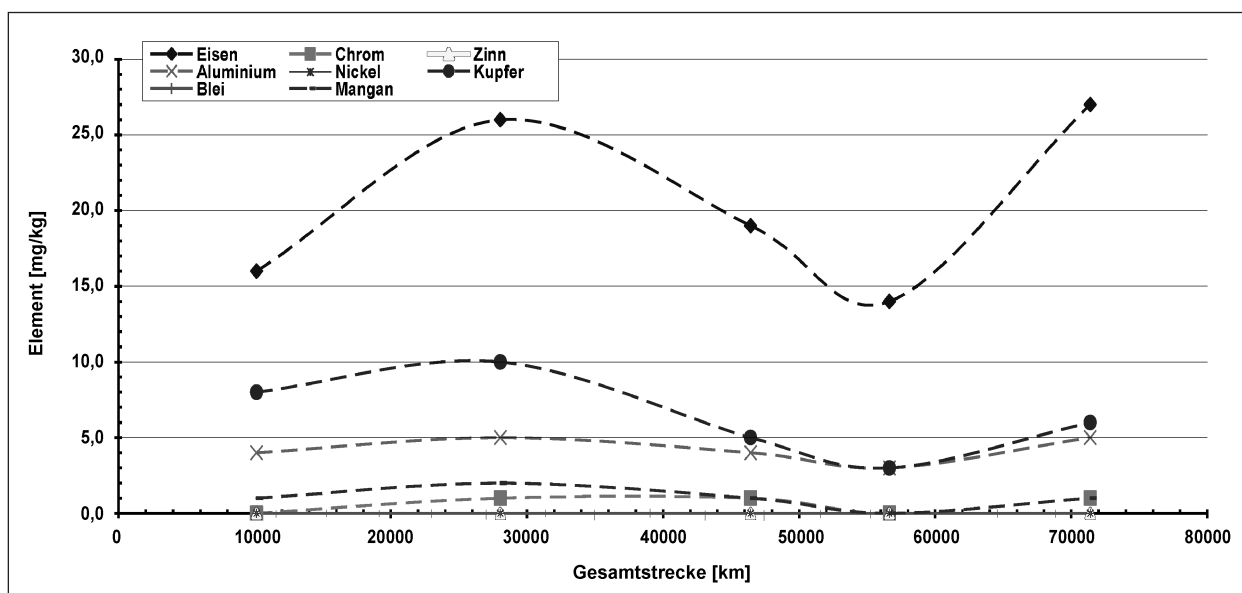


Bild 160: Ölanalyse Verschleiß, VW Golf

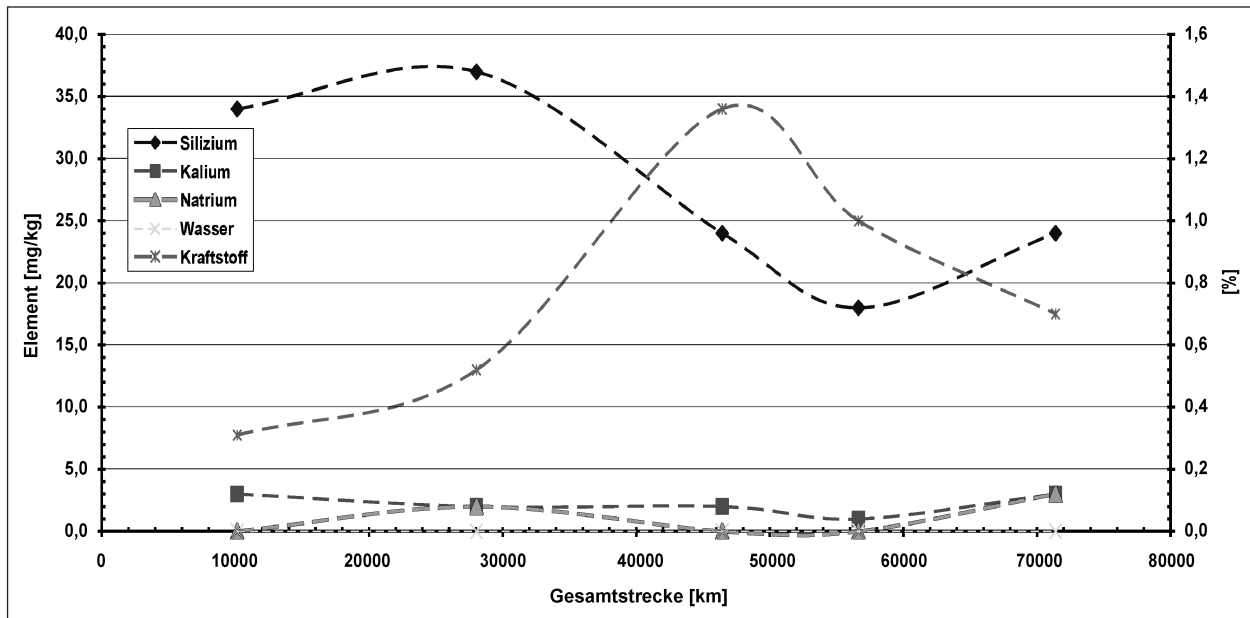


Bild 161: Ölanalyse Verunreinigung, VW Golf

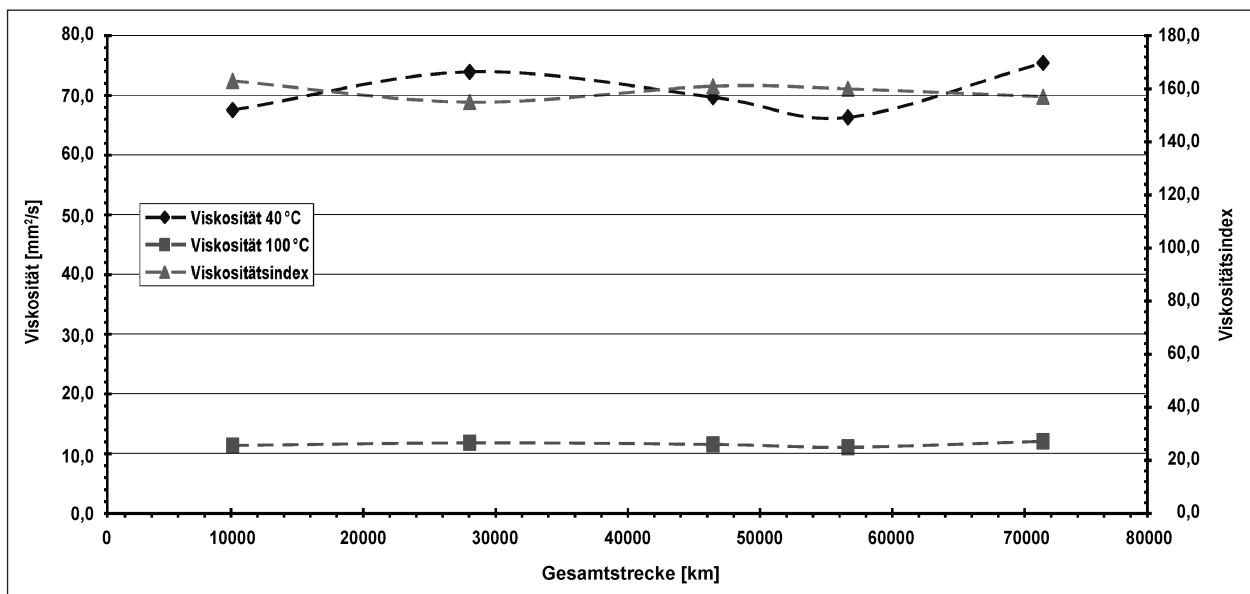


Bild 162: Ölzustand 1, VW Golf

beispielsweise bei der Verklebung des Nockenwellengehäuses oder der Ölwanne verwendet werden (s. Bild 161).

Die maximale Ölverdünnung durch Ottokraftstoff liegt unter 1,4 % und befindet sich damit in noch tolerierbaren Bereichen. Im Gegensatz zum Dieselmotorkraftstoff ist die Gefahr einer zu hohen Ölverdünnung nicht gegeben, da der Ottokraftstoff eine deutlich niedrigere Siedekennlinie aufweist. Dies spiegelt sich auch in Bild 162 zum Ölzustand in der Form wider, dass die Viskosität in einem sehr stabilen Bereich verläuft. Ein Wassereintrag in das Motorenöl konnte ebenfalls nicht nachgewiesen wer-

den, was daran liegt, dass der Motor vor der Ölentnahme betriebswarm gefahren wurde.

Weitere Aussagen zum Ölzustand betreffen die Oxidation und die Nitration, welche sehr hohe Werte erreichen und deutlich höher liegen im Vergleich zum betrachteten Dieselmotor. Laut [88] ist dies die Folge von  $\text{NO}_x$ -haltigen Blow-by-Gasen in Verbindung mit einer schlechten Verbrennung, Ventilproblemen oder Kraftstoffproblemen. Eine signifikante Erhöhung der  $\text{NO}_x$ -Werte bei Verwendung des Kraftstoffes E25 konnte bereits bei den Einganguntersuchungen festgestellt werden und wurde in diesem Kapitel ausführlich erörtert. Somit

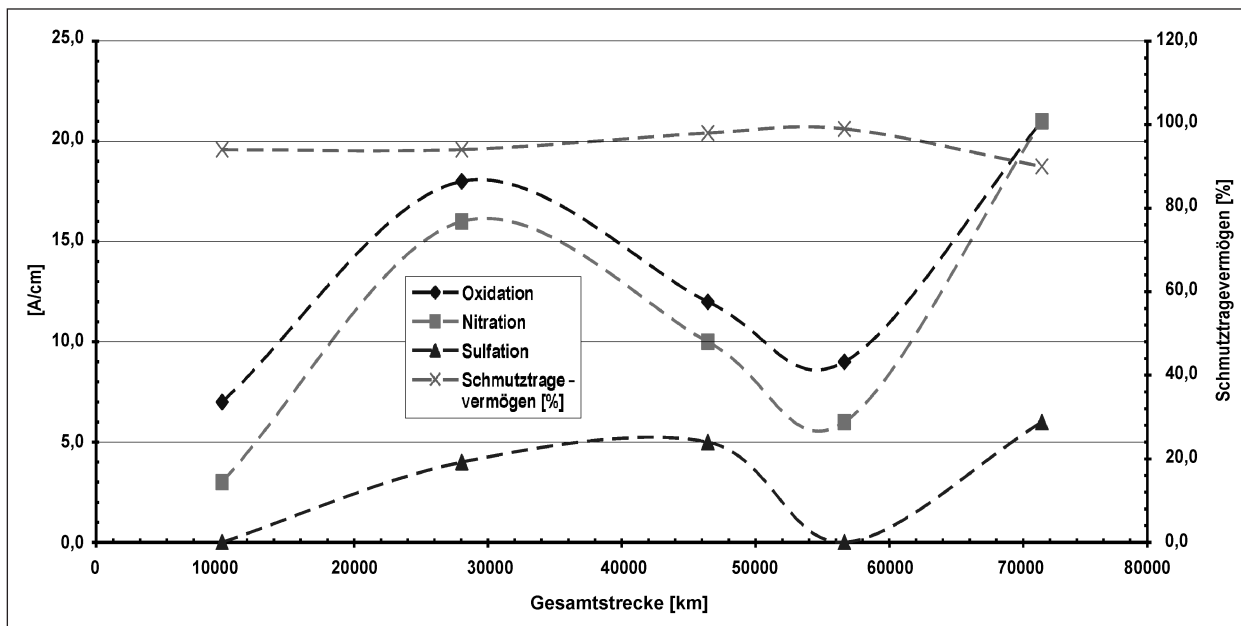


Bild 163: Ölanalyse Ölzustand 2, VW Golf

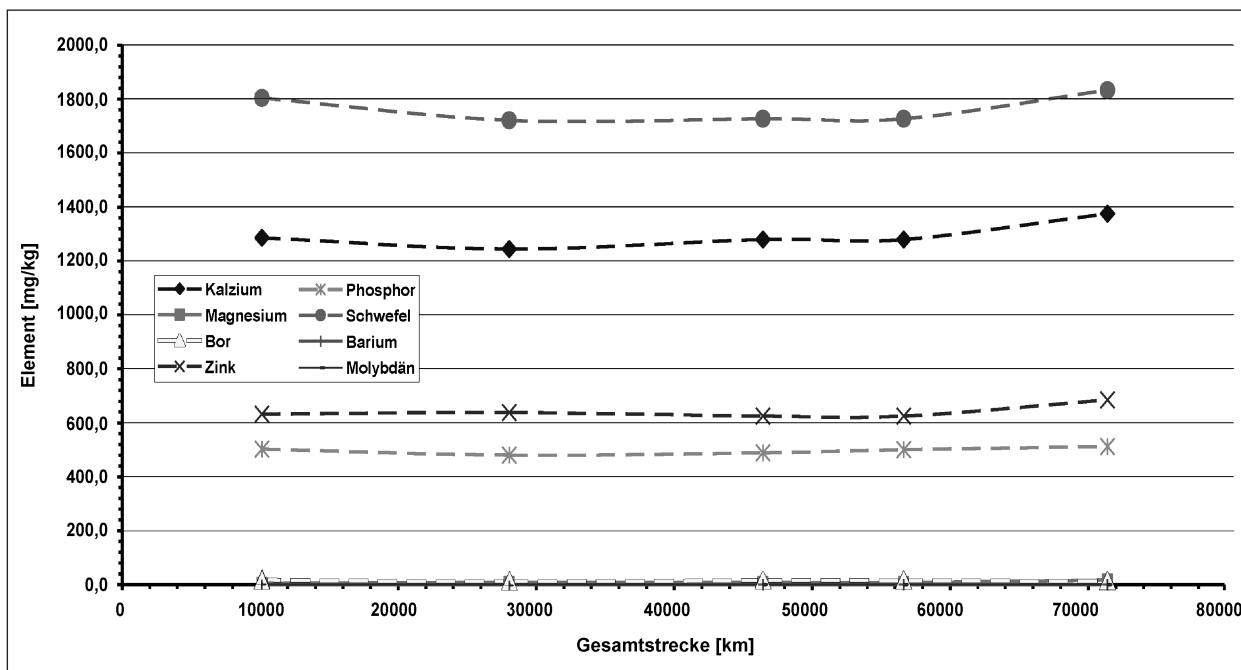


Bild 164: Ölanalyse Additive, VW Golf

ist es auch höchstwahrscheinlich, dass sich ein erhöhter Anteil  $\text{NO}_x$  im Blow-by-Gas befindet und die Nitration des Motorenöls verstärkt. Der Hinweis von [88] auf mögliche Ventilprobleme konnte bei der Bauteilzerlegung dargestellt werden, wobei es mehr als spekulativ wäre, dies als weitere grundlegende Ursache anzuführen (s. Bilder 162, 163).

Bei der Betrachtung von Bild 164 bezüglich der Auswertung der Additivierung des Motorenöls wird deutlich, dass sich diese auf einem sehr konstanten

Niveau bewegen und innerhalb der erwarteten Parameter liegen.

Die Basenzahl BN, welche ein Indikator für die alkalische Reserve des Motorenöls darstellt, sinkt im Vergleich zum Frischöl sehr schnell ab. Die Referenzanalyse lieferte hier 5,98 mgKOH/g. Sinkt laut [88] der Wert unter 60 % des Anfangswertes, zeichnet sich eine Erschöpfung des Motorenöls ab und es ist nicht mehr ausreichend in der Lage, die sauren Anteile der Blow-by-Gase aufzunehmen. Es



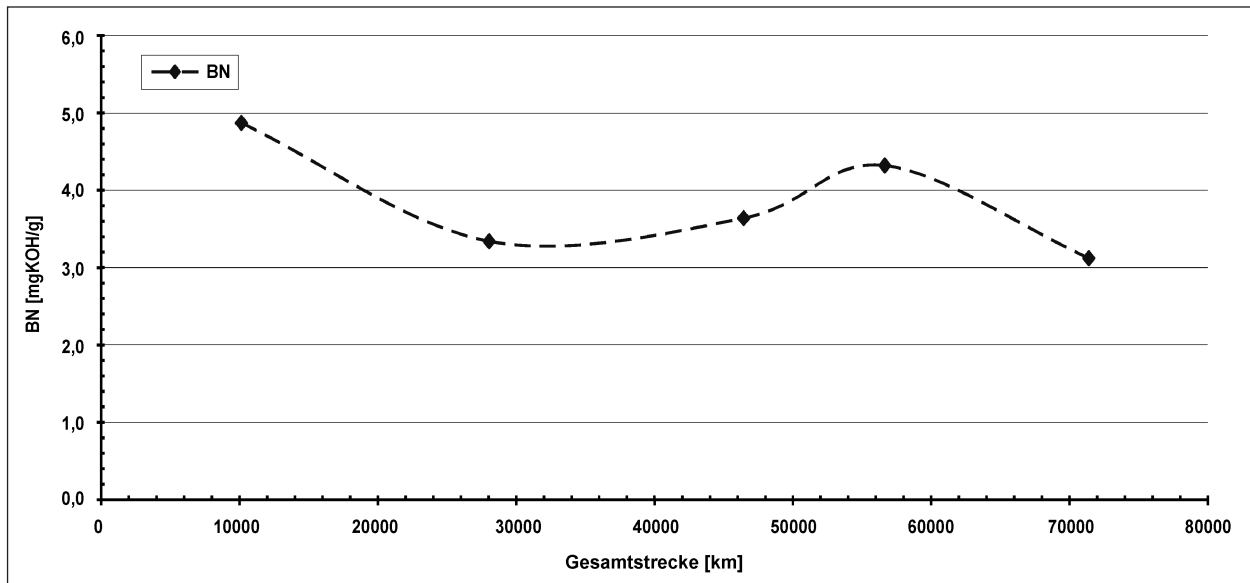


Bild 165: Ölanalyse BN, VW Golf

zeigt sich, dass die alkalische Reserve schon vor dem durchgeführten Ölwechsel erschöpft war, was die Notwendigkeit des Ölwechsels indiziert (Bild 165).

## 6 Zusammenfassung und Fazit

### Aufgabenstellung

Diese Arbeit hatte die Aufgabenstellung,

- sinnvolle Obergrenzen für den biogenen Blend-Anteil im Kraftstoff aus ökonomisch-technischer Sicht aufzuzeigen,
- technische Anforderungen an Pkw aus Altbestand und Neufahrzeugen für den Betrieb mit solchen Kraftstoff-Blends zu untersuchen, insbesondere in Hinblick auf Aspekte der Dauerhaltbarkeit, sowie
- zu untersuchen, ob die Einhaltung der Grenzwertstufen für Pkw bis einschließlich Euro 6 auch bei der Verwendung von größeren Beimengungen an Biokraftstoffen machbar ist.

### Untersuchungsmethode und Vorgehen

Auf Basis einer Literaturrecherche wurden bereits vorhandene Erkenntnisse über den Betrieb von Fahrzeugen mit biogenen Kraftstoffen hinsichtlich der Schadstoffemissionen und der Dauerhaltbarkeit zusammengetragen und diskutiert (vgl. Kapitel 2,

Kapitel 3.2). Die Tabellen 24 und 25 stellen hierbei eine Zusammenfassung dar. Darüber hinaus wurde ein Einblick in die Marktsituation und Relevanz dieser Kraftstoffe oder Kraftstoffgemische gegeben (vgl. Kapitel 3.1).

Darauf aufbauend wurde ein Versuchsprogramm für 2 Diesel- und 3 Ottofahrzeuge entworfen und durchgeführt, das

- Vergleichsmessungen auf einem Abgasrollenprüfstand mit verschiedenen Kraftstoffblends (Diesel: B5, B10, B20 und B50 sowie dem Reinkraftstoff B100, Otto: E5, E10, E20 und E25) sowie
- je 1 Dauerlaufuntersuchung von 80.000 km mit einem Diesel- und einem Otto-Fahrzeug beinhaltete (vgl. Kapitel 4).

Für die Dauerlaufuntersuchung wurden die Fahrzeuge in einem Zeitraum von einem Jahr im Standardstraßenfahrzyklus nach VO (EG) Nr. 692/2008 zu etwa gleichen Teilen auf dem DEKRA-Test-Oval sowie auf dem Außendauerlaufrollenprüfstand mit Fahrerbetrieb betrieben.

Nach jeweils etwa 10.000 km wurden die Fahrzeuge hinsichtlich

- Emissionsverhaltens,
- des Kraftstoffverbrauchs und
- der Motorleistung bewertet,
- eine Motorölprobe entnommen sowie

- eine Endoskopie der relevanten Komponenten und
- eine Fehlerspeicherabfrage durchgeführt.
- Entwicklungsmöglichkeiten bei biogenen Kraftstoff-Blends (Diesel-, Otto-Kraftstoffe)

Am Ende der Dauerlaufuntersuchungen wurden bei beiden Fahrzeugen Motor und Kraftstoffsystem sorgfältig inspiziert und in Hinblick auf das Verschleißbild dokumentiert.

### Untersuchungsergebnisse

In diesem Projekt konnten die folgenden Aussagen oder Erkenntnisse formuliert werden (vgl. Kapitel 5):

In Hinblick auf die ökonomisch-ökologische Bewertung der Herstellungspfade zeichnen sich aus der Literatur und aufgrund eigener Überlegungen für die flächendeckende Versorgung von Blend-Kraftstoffen in Deutschland Beimischungsgrenzen von Ethanol bei 20 % (vol.) E20 und von Biodiesel bei 10 % (vol.) B10 ab.

Zu besseren Übersichtlichkeit der gewonnenen Erkenntnisse zur Literaturrecherche soll an dieser Stelle auf eine tabellarische Übersicht zurückgegriffen werden (siehe Tabelle 24 und 25).

	Pflanzenölkraftstoff	Biodiesel und Beimischungen
CO	↓↓	↓↓
HC	↓↓	↓↓
NO <sub>x</sub>	↑	↑
PM nach Kat.	↓↓	↓↓
Dauerhaltbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkokungen an Einspritzventilen, Einspritzdüsen, Kolben und Brennraum</li> <li>• schnellere Beladung des Partikelfilters durch Aschebildung</li> <li>• durch höhere Viskosität erhöhter Kraftstoffeintrag ins Motoröl, dadurch geringere Schmiereigenschaften</li> <li>• durch erhöhten Kraftstoffeintrag, Gefahr von Polymerisation des Motoröles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bei geringen Beimischungen erhöhte Gefahr von Sedimentbildung – Zusetzen des Kraftstofffilters</li> <li>• wirkt hygroskopisch – dadurch erhöhte Korrosion an kraftstoffführenden Bauteilen</li> <li>• besitzt lösungsmittelähnliche Eigenschaften – Korrosion von Metallen und Beeinflussung von Dichtungsmaterialien</li> <li>• erhöhter Kraftstoffeintrag ins Motoröl, Verringerung der Schmiereigenschaften</li> <li>• Vergiftung des Katalysators durch Phosphor</li> </ul>

**Tab. 24:** Auswirkungen auf die Emissionen und die Dauerhaltbarkeit bei Verwendung von Pflanzenöl- und Biodiesekraftstoffen; Zusammenfassung der Literaturrecherche

	Bioalkohol		BtL	Biogas
	< E25	> E25		
CO	↓↓	↓↓	↓↓	↓
HC	↑	↑	↓↓	↓↓
NO <sub>x</sub>	↑	↑	↓	↓
PM nach Kat.	k. A.	k. A.		k. A.
Dauerhaltbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wirkt hygroskopisch – Korrosion von Metallen</li> <li>• durch erhöhten Sauerstoffanteil Beeinflussung von Dichtungsmaterialien aus Kunststoff (Aufquellen)</li> <li>• besonders bei Ethanolgemischen um 20 %</li> <li>• Ablagerungen an Bauteilen wie Kolben und Zylinderkopf möglich</li> <li>• in Kaltlaufphase erhöhter Kraftstoffeintrag ins Motoröl – Verringerung der Schmiereigenschaften</li> </ul>		-	-

**Tab. 25:** Auswirkungen auf die Emissionen und die Dauerhaltbarkeit bei Verwendung von Bioalkohol, BtL und Biogas; Zusammenfassung der Literaturrecherche

- Eingangsuntersuchungen

Bei den Eingangsuntersuchungen ergaben sich unter Verwendung der beschriebenen Fahrzeuge in Kombination mit den jeweiligen Blends die folgenden Trends bezüglich des Emissionsverhaltens, des Kraftstoffverbrauchs sowie der Motorleistung.

#### Dieselfahrzeuge

Bei den Dieselfahrzeugen konnte für HC, CO sowie NMHC bei steigender Biodieselbeimischung bis 20 % ein leicht steigender Trend festgestellt werden. Höhere Blends sowie der Biodieselreinkraftstoff zeigen deutliche Emissionserhöhungen dieser Komponenten. NO<sub>x</sub> sowie NO<sub>2</sub> weisen stets mit Erhöhung der Beimischung an RME einen steigenden Trend auf, was durch den höheren Sauerstoffgehalt des Kraftstoffes zu erklären ist. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen steigen von B5 zu B20 bei dem Versuchsträger VW Touran um 7 % und für den Renault Megane um etwa 4 %. Die Erhöhung der Stickoxidemissionen von B5 auf B100 beträgt für das zuletzt genannte Fahrzeug ca. 16 %. An dieser Stelle wird deutlich, dass dieser Trend nicht im Sinne der weiteren Grenzwertverschärfung für NO<sub>x</sub> in Euro 6 bezüglich der Dieselmotoren sein kann.

Bezüglich der Partikelmasse sowie der Partikelanzahl kann für die untersuchten Dieselmotoren keine detaillierte Trendaussage getroffen werden, da der geschlossene Partikelfilter mit einem Abscheidegrad > 90 % die „Tail Pipe“-Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau konstant hält. Jedoch ist hier laut der Literaturstudie von einem sinkenden Trend auszugehen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie der Kraftstoffverbrauch erhöhen sich mit steigender Beimischung an Biodiesel. Im Falle des VW Touran beträgt der Kraftstoffverbrauchsanstieg von B5 auf B20 3,5 %, für den Renault Megane 2,5 % und im Vergleich zu B100 9 %. Dieser Mehrverbrauch lässt sich durch den geringeren Heizwert von Biodiesel erklären, wobei die Ergebnisse dazu sehr gut skalieren.

Hinsichtlich der Motorleistung ist ein leicht fallender Trend bei Beimischungen bis etwa 20 % RME festzustellen, die Leistungsminderung bei höheren Beimischungen oder dem Biodieselreinkraftstoff können auch mehr als 10 % betragen. In allen Versuchen wurden stets die für die Fahrzeuge geltenden Grenzwerte (Euro 5 M1) unterschritten.

#### Ottofahrzeuge

Bei den Ottofahrzeugen konnte für HC, CO sowie NMHC bei steigender Bioethanolbeimischung ein leicht steigender Trend festgestellt werden.

Ähnlich wie bei den Vertretern der Dieselfahrzeuge wurde für die Schadstoffkomponenten NO<sub>x</sub> und NO<sub>2</sub> stets eine sehr deutliche Veränderung festgestellt. So betrug beispielsweise der Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen im Falle des Opel Corsa von E5 auf E25 96 % und für den VW Golf etwa 16 %. Der Grenzwert von 0,06 g/km wurde jedoch in allen Fällen sehr sicher unterschritten.

Auffällig war für die Ottodirekteinspritzer eine signifikante Absenkung bei Partikelmasse und -anzahl. So sank beispielsweise die Partikelmasse beim Versuchsträger VW Golf um ca. 43 % bei einer Erhöhung der Ethanolbeimischung auf bis zu 25 %. Die Partikelanzahl konnte unter den gleichen Parametern um ca. 44 % gesenkt werden, wobei das Fahrzeug somit sogar die aktuellen Anforderungen für Euro 6 M1 hinsichtlich des PN-Grenzwertes von  $6 \cdot 10^{12}$  [# / km] einhalten würde. Für den Opel Corsa als Saugrohreinspritzer konnten hingegen bei der Partikelanzahl nur leichte Verbesserungen festgestellt werden, wobei das Grundemissionsniveau in der Ausgangsbasis schon sehr gering war. Bezüglich der Partikelmasse konnte kein Trend festgestellt werden, da in diesem Fall das Emissionsniveau mit < 0,0005 g/km Partikel viel zu gering war und damit die Messgenauigkeit nicht ausreichend ist.

Der Kraftstoffverbrauch steigt mit höheren Ethanolbeimischungen deutlich größer als im Falle der Biodieselbeimischungen bei den Dieselfahrzeugen. Der Grund hierfür ist der noch höhere Heizwertunterschied zwischen handelsüblichem Ottokraftstoff und Bioethanol. Für den Opel Corsa bedeutet dies einen Mehrverbrauch von 10 % und für den VW Golf von 6 %. Hier wäre die Kundenakzeptanz eines solchen Kraftstoffes zu hinterfragen.

Hinsichtlich der Motorleistung konnten für den Direkteinspritzer keine Leistungseinbrüche festgestellt werden. Tendenziell ergaben sich Leistungssteigerungen von etwa 1 % und Drehmomentsteigerungen von ca. 6 %, was jedoch unter Beachtung der Leistungsmessung im Radaufstandspunkt relativiert werden muss. Beim Opel Corsa konnte hingegen keine Leistungssteigerung sowie tendenziell eher ein Verlust an max. Motordrehmoment festgestellt werden.

Die beobachteten Ergebnisse unterscheiden sich sehr stark vom betrachteten Motorenkonzept (Otto Direkt- oder Saugrohreinspritzer).

Die gültigen Abgasgrenzwerte Euro 5 M1 konnten bezüglich aller Emissionsmessungen einschließlich  $-7\text{ °C}$  „cold CO HC“ und Shed eingehalten werden.

Dauerlaufuntersuchungen in Stützstellen und Abschlussuntersuchungen

Dieselfahrzeuge

Die Abgasmessungen des Dieselfahrzeuges, in den Stützstellen von jeweils 10.000 km, ergaben nur hinsichtlich  $\text{NO}_x$  einen ansteigenden Trend. Dies lag vorrangig an einer „Versottung“ des AGR-Einsatzes, welche hier gegebenenfalls durch die Verwendung von B20 verstärkt wurde.

Hinsichtlich der Veränderung von Kraftstoffverbrauch und Motorleistung konnten keine ungewöhnlichen Veränderungen beobachtet werden. Dies deutete schon an dieser Stelle darauf hin, dass keine schwerwiegenden Probleme hinsichtlich der Motormechnik und des Kraftstoffsystems bei der Bauteilerlegung erwartet werden konnten.

Eine Schädigung des Oxidationskatalysators sowie des Dieselpartikelfilters kann somit ausgeschlossen werden.

Das Fahrzeug erfüllte auch nach Beendigung des Dauerlaufes die Anforderungen an den Abgasgrenzwert Euro 5 M1 gemäß VO (EG) Nr. 715/2007 i. V. m. VO (EG) Nr.692/2008.

Die Motorölverdünnung aufgrund der Partikelfilterregeneration durch Kraftstoffnacheinspritzung ist in hochlastigen Zyklen gering und tolerierbar. Im WLTC C3 V5 Phase 1 „low-part“ konnte jedoch der Nachweis erbracht werden, dass sich eine doch erhebliche Menge an Kraftstoff im Motorenöl detektieren lässt. Dabei kam die Verdünnung vorrangig durch Biodiesel zustande, welcher eine deutlich höhere Siedekennlinie aufweist als handelsüblicher Diesel und somit in einem nur sehr geringen Maße aus dem Motorenöl aussieden kann. Hier konnte nachgewiesen werden, dass nach Hochrechnung der Verdünnung des Motoröls auf ein Wechselintervall von 30.000 km der minimale Wert der kinematischen Viskosität bei  $100\text{ °C}$  des verwendeten Motorenöls unterschritten würde. Anzumerken ist, dass der verwendete Zyklus bei weitem noch keinen „Worst Case“ darstellt sowie auf den

Einsatz des „Start-/Stopp“-Systems verzichtet wurde.

Ferner konnte nachgewiesen werden, dass eine vollständige Partikelfilterregeneration auch in dem beschriebenen schwachlastigeren Zyklus bei Verwendung von B20 möglich ist.

Es wurde des Weiteren dargelegt, dass weitestgehend keine Ablagerungen an Injektoren, Glühkerzen, Kolben, Brennraumwänden zu detektieren waren.

Eine Verblockung des Kraftstofffilters durch Sedimentablagerungen oder weitere Schäden am Kraftstoffsystem konnte ausgeschlossen werden.

Es kam zu keinem Zeitpunkt während des 80.000-km-Laufes zu einem Aufleuchten von Fehlerlampen im Kombiinstrument, wobei auch keine Abgas- oder motorrelevanten Fehler im Steuergerät abgelegt wurden.

Es konnten keine Bauteile, Dichtungen oder Dichtringe gefunden werden, welche auf eine Materialunverträglichkeit hingedeutet hätten

Der Ölzustand wurde vom auswertenden Labor zu keinem Zeitpunkt als sehr kritisch bewertet. Bei sehr langen Öllaufzeiten ( $> 30.000\text{ km}$ ) kam es zu Hinweisen bezüglich der Verschleißwerte von Eisen und Aluminium. Im Ölverdünnungslauf konnten darüber hinaus ein Anstieg der Nitrations- und Oxidationswerte sowie der beschriebene Anstieg der Ölverdünnung festgestellt werden, welcher in einer Absenkung der kinematischen Viskosität resultiert.

Das Motorenöl zeigte zu keinem Zeitpunkt Anzeichen von Schaumbildung oder Polymerisation.

Ottofahrzeuge

Hinsichtlich der Emissionen, des Kraftstoffverbrauchs sowie der Motorleistung konnten während des gesamten Dauerlaufs sowie bei den Abschlussuntersuchungen, einschließlich  $-7\text{ °C}$ -CO-, HC-Messung, keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden.

Der Shed-Test konnte mit einem Ergebnis von  $0,0954\text{ g}$  im Hot Soak sowie  $0,8647\text{ g}$  im 24h-Dauertest in Summe deutlich den Grenzwert von  $2\text{ g}$  unterschreiten, womit eine Schädigung des Aktivkohlefilters sowie Undichtheiten am Kraftstoffsystem ausgeschlossen werden konnten.

Das Fahrzeug erfüllt auch nach Beendigung des Dauerlaufes die Anforderungen an den Abgasgrenzwert Euro 5 M1 gemäß VO (EG) Nr. 715/2007 i. V. m. VO (EG) Nr.692/2008.

Es kam zu keinem Zeitpunkt während des 80.000-km-Laufes zu einem Aufleuchten von Fehlerlampen im Kombiinstrument, wobei auch keine Abgas- oder motorrelevanten Fehler im Steuergerät abgelegt wurden.

Eine Schädigung des Abgasnachbehandlungssystems kann ausgeschlossen werden.

Vorrangig an den Auslassventilen konnte eine beginnende Korrosion an den Ventilsitzen nachgewiesen werden, welche mit dem E25 in Verbindung zu bringen ist. Offensichtlich hatte dies noch keine Auswirkungen auf das Emissionsverhalten des Motors. Ferner wurden ebenfalls Spuren von Korrosion an den Zylinderlaufflächen festgestellt und dokumentiert.

Des Weiteren wurden Gummireste im Fahrzeugtank auffällig, welche der Tankpumpe zugeordnet werden konnten. Jedoch handelte es sich an dieser Stelle lediglich um ein Aufhängungselement, was keinen Einfluss auf die Funktion der Pumpe besessen hat. Ferner wurden im Motorenöl teilweise sehr hohe Silizium-Anteile festgestellt, wobei es sich laut [88] um ausgelöste Bestandteile von Montagehilfsmitteln, silikonhaltigem Schmierfett oder elastischen Dichtungen handeln könnte.

Die Ölverdünnung mit Ottokraftstoff war zu keinem Zeitpunkt kritisch. Die Ursache liegt hier natürlich in der niedrigeren Siedelage. Auch konnten keine Einträge von Wasser festgestellt werden, wobei die Ölproben stets bei betriebswarmen Motor entnommen wurden.

Teilweise konnten in den Ölproben sehr hohe Werte bezüglich der Nitration und Oxidation des Öls gefunden werden, wobei die Ursache durch einen erhöhten Anteil von  $\text{NO}_x$  in den Blow-by-Gasen beschrieben wurde. Die Basenzahl BN sankt im Vergleich zum Frischöl während der Versuche sehr schnell ab und erreichte kritische Werte von 60 % des Frischöls. Dieser Indikator für die alkalische Reserve des Motorenöls zeigte an, dass diese bereits vor den Ölwechseln erschöpft war.

## Fazit

Mit der vorliegenden Arbeit konnte durch Sichtung der Literatur sowie in Prüfstands- und Dauerlaufversuchen gezeigt werden, dass bei Verwendung biogener Kraftstoffe viele Gesichtspunkte zu beachten sind. Neben fahrzeugtechnischen Voraussetzungen werden gegenwärtig auch verstärkt Aspekte wie z. B. Kundenakzeptanz (siehe E10) oder die Konkurrenzsituation bei der Erzeugung der Bio-Treibstoffe gegenüber der Nahrungsmittelerzeugung diskutiert. Auch die Gesetzgebung bringt mit der Umstellung der Biokraftstoffquote zur Klimaschutzquote erst ab 2017 neue Impulse. Laut Pressemitteilung der EU-Kommission vom 18.10.2012 soll der aus Nahrungsmittelpflanzen gewonnene Biokraftstoffanteil von 10 % auf 5 % gesenkt werden [89].

Aus fahrzeugtechnischer Sicht begrenzen bei Biodiesel vor allem die Ölverdünnung sowie der Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen den maximal möglichen Beimischungsanteil. Aus ökonomischen, technischen und umweltpolitischen Gründen ist es aus Sicht des DEKRA daher wenig sinnvoll, die RME-Beimischung über 10 % anzuheben. Möglicherweise muss die Situation bei Einsatz von sog. Hydro treated Vegetable Oil (HVO), das nicht Gegenstand der Untersuchungen in dieser Studie war, zukünftig neu bewertet werden.

Andererseits sind höhere Biodieselbeimischungen in hochlastigen Zyklen durchaus möglich, weil hier die Ölverdünnung immer noch in tolerierbaren Grenzen bleibt. Hieraus ließen sich Sonderkraftstoffe für Lkw-Anwendungen mit 20-30 % Biodieselbeimischung ableiten. Die höheren  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind im Nfz-Sektor mit den dort zum Stand der Technik gehörenden SCR-Systemen beherrschbar.

Bei der Frage nach der Durchführbarkeit höherer Bio-Alkoholanteile im Otto-Kraftstoff spielt offenbar die Kundenakzeptanz eine verstärkte Rolle. Aus fahrzeugtechnischer Sicht sind für eine Freigabe die Punkte Materialverträglichkeit und Kraftstoffverbrauch zu diskutieren. Hier konnte beispielhaft und ohne Verallgemeinerungsanspruch dargelegt werden, dass ein Euro-5-Großserienmotor mit E10-Freigabe durchaus auch für höhere Beimischungen geeignet sein kann. Beimischungen um 20 % Bioethanol könnten somit für die Zukunft nicht ausgeschlossen sein, gerade da diese Kraftstoffe ein großes Potenzial bezüglich einer Verringerung der

Partikelemission aufweisen. Jedoch ist erst mit der entsprechenden Herstellerfreigabe gesichert, dass alle technischen Aspekte und Haftungsfragen vollumfänglich geprüft und geklärt sind.

## 7 Literatur

- [1] BURGNER, M., MEYER, I. (2006): Alternative Kraftstoffe und Hybridantriebe. Stand: 2. Auflage 2008
- [2] Homepage der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): <http://www.fnr.de>, Stand: 13. Mai 2011
- [3] SCHOLL, A., HAMETNER, H. (2006): Biosprit: Biogene Treibstoffe
- [4] FESTEL, G. (2006): Biokraftstoffe der 2. Generation
- [5] HUBER, G. W., DALE, B. E. (2009): Grasolin an der Zapfsäule
- [6] GRUDEN, D. (2008): Umweltschutz in der Automobilindustrie
- [7] ISENBURG, Th. (2009): CO<sub>2</sub>-Senke und Rohstofflieferant
- [8] Universität Karlsruhe im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2007): Neuartige Kraftstoffe und zukünftige Abgasemissionen bei Kraftfahrzeugen – eine Übersicht
- [9] WACHTER, W. (2011): Biogene Kraftstoffe und Elektromobilität sowie weitere Umweltaspekte des Verkehrs
- [10] Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Stand: 05. Juni 2009
- [11] Homepage des Bundesverbands der Deutschen Ethanolwirtschaft e. V.: <http://www.bdbe.de>. Stand: 17. Mai 2011
- [12] Homepage: Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V.: <http://www.ufop.de>. Stand: 27. Mai 2011
- [13] Memorandum der Verbände der deutschen Biokraftstoffwirtschaft BDBe, UFOP und VDB: Beimischung von Biokraftstoffen, 2010
- [14] Homepage: REN21 Renewable Energy Policy Network for 21<sup>st</sup> Century: <http://www.ren21.net>. Stand: September 2010
- [15] Homepage: Europäischer Datenservice: <http://www.eds-destatis.de>. Stand: März 2011
- [16] Homepage: Statistisches Bundesamt Deutschland: <http://www.destatis.de>. Stand: 21. Januar 2010
- [17] Homepage: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: <http://www.bafa.de>. Stand: 23. Mai 2011
- [18] Homepage: Mineralölwirtschaftsverband e. V.: <http://www.mwv.de>. Stand: 23. Mai 2011
- [19] Deutscher Bundestag, Drucksache 17/2861 02.09.2010: Bericht zur Steuerbegünstigung für Biokraft- und Bioheizstoffe 2009
- [20] Homepage: Internationales Wirtschaftsforum Regenerativer Energien: <http://www.iwr.de>. Stand: November 2010
- [21] ZEDDIS, J. (2006): Rohstoffverfügbarkeit für die Produktion von Biokraftstoffen in Deutschland und in der EU-25
- [22] EDER, B., EDER, F. (2004): Pflanzenöl als Kraftstoff. Stand: 3. Auflage 2006
- [23] LÜFT, M. (2010): Anpassung moderner Dieselmotoren an Pflanzenölkraftstoffe. Institut für Kolbenmaschinen
- [24] Homepage: Umweltbundesamt: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de>. Stand: Juli 2011
- [25] THUNEKE, K., GASSNER, Th., EMBERGER, P., REMMELE, E. (2009): Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
- [26] TSCHÖKE, H., SCHULZE, L., BRAUNGARTEN, G. (2002): Motoruntersuchungen mit Abgasnachbehandlungssystemen. Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen
- [27] MUNACK, A. (2003): Untersuchung von Biodiesel und seinen Gemischen mit fossilem Dieselmotorkraftstoff auf limitierte Emissionen. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft

- [28] STEIN, H. (2008): Dieselmotoremissionen aus der Verbrennung von Biodiesel und verschiedenen fossilen Dieselmotorkraftstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Partikelemissionen. Genehmigte Dissertation. Fakultät für Lebenswissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
- [29] ADT, H.-U. (2000), genehmigte Dissertation: Untersuchung zum Abgasverhalten im Zuge der Optimierung eines direkteinspritzenden Dieselmotors für die Verwendung von Rapsölmethylester als Kraftstoff
- [30] MUNACK, A. (2005): Bestimmung der Emissionen und der Partikelgrößenverteilung (Feinstaub) im Abgas eines modernen Euro-4-Nutzfahrzeugmotors mit SCR-Abgasreinigung im Betrieb mit Biodiesel. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
- [31] WILLIAMS, A., McCORMICK, R. L., HAYES, R., IRELAND, J. (2006): Effect of Biodiesel Blends on Diesel Particulate Filter Performance
- [32] Summary Results from NBB/USEPA TIER I Health and environmental effects testing for biodiesel under the requirements for USEPA registration of fuels and fuel additives, 1998
- [33] WINKLER, A., FERRI, D., EGGENSCHWILDER, D., AGUIRRE, M.: Analyseverfahren zur Alterung von Dieseloxydations-Katalysatoren. Artikel MTZ 06.2010
- [34] HJS, Abgassysteme und Katalysatoren (2006): Funktionsverhalten HJS City-Filter® bei Verwendung von RME, Abschlussbericht
- [35] Twin-Tec GmbH, UFOP, VDB: Rußfilterkat – Versuchsbericht Betrieb mit Biodiesel
- [36] PEARCE A.: Filtertechnik für Biokraftstoffe. MTZ-Artikel 12.2006
- [37] MUNACK, A. (2007): Messung ultrafeiner Partikel im Abgas von Dieselmotoren beim Betrieb mit Biodiesel. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
- [38] MUNACK, A., KRAHL, J. (2004): Biodiesel für moderne Dieselmotoren – und auch für kommende Motorgenerationen. Institut für Technologie und Biosystemtechnik
- [39] DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH (2010): E10-Verträglichkeit von Kraftfahrzeugen
- [40] YASAR, A. (2010): Effects of Alcohol-Gasoline blends on exhaust and noise emissions in small scaled generators
- [41] AL-HASAN, M. (2002): Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission
- [42] DURBIN, Th. D., MILLER, J.-W., YOUNGLOVE, Th., HUAI, T., COCKER, K. (2006): Effects of Fuel Ethanol Content and Volatility on Regulated and Unregulated Exhaust Emissions for the Latest Technology Gasoline Vehicles. College of Engineering – Center for Environmental Research and Technology University of California
- [43] KOCA, M., SEKMEN, Y., TOPGÜL, T., SERDAR YÜCESU, H. (2007): The effects of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine
- [44] BENNINGER, K., HEIMGÄRTNER, C., KUFFERATH, A., UHL, St., WIEMERS, O.: Artikel MTZ, 08.2007: FlexFuel-Systeme für Ottomotoren mit Direkteinspritzung
- [45] JIA, L.-W., SHEN, M.-Q., WANG, J., LIN, M.-Q. (2004): Influence of ethanol-gasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine
- [46] YAO, Y.-C., TSAI, J.-H., CHIANG, H.-L. (2009): Effects of ethanol-blended gasoline on air pollutant emissions from motorcycle
- [47] PABST, K., LÜFT, M., SCHAUB, G., VELJI, A. (2007): Neuartige Kraftstoffe und zukünftige Abgasemissionen bei Kraftfahrzeugen – eine Übersicht
- [48] STEIGER, W.: TAE – Technische Akademie Esslingen, 10. Symposium Dieselmotortechnik, Tagungshandbuch 2006, (Hrsg.): BARGENDE, M.: Synthetische Kraftstoffe – Wegbereiter nachhaltiger Mobilität
- [49] HARNDORF, H., SCHÜMANN, U., RICHTER, B. (2010): Langzeitstudie über den Einsatz von Antioxidantien an Rapsölkraftstoff in der Praxis – Motorbefundung. Universität Rostock

- [50] KRAHL, J., MUNACK, A., BÜNGER, J., GROPE, N., RUSCHEL, Y., SCHWARZ, S., SCHRÖDER, O., WINTER, T. (2006): Untersuchung der Emission von Biodiesel. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
- [51] THUNEKE, K., GASSNER, Th., EMBERGER, P., REMMELE, E. (2009): Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren. Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell. Technologie und Förderzentrum
- [52] KRAHL, J., MUNACK, A., SCHMIDT, L., URBAN, B., PETCHATNIKOV, M., SCHRÖDER, O.: Wechselwirkungen zwischen Biodiesel und modernen Dieselmotoren
- [53] Homepage: MAHLE: <http://www.mahle.com>. Stand: Juli 2011
- [54] FAZAL, M. A., HASEEB, A. S. M. A., MASJUKI, H. H. (2009): Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials
- [55] TSCHÖKE, H., BRAUNGARTEN, G., PATZE, U. (2008): Ölverdünnung bei Betrieb eines Pkw-Dieselmotors mit Mischkraftstoff B10
- [56] LUTHER, R. (2008): Alternative Kraftstoffe aus Sicht der Motorenschmierung. Artikel MTZ 03/2008
- [57] o. V. (ohne Jahr): Materialverträglichkeit mit E85/Benzin. Quellen: [www.gates.com](http://www.gates.com); [www.e85fuel](http://www.e85fuel)
- [58] BACKOFEN, D., BRAUNGARTEN, G., TSCHÖKE, H. (2007): Auswirkungen alternativer Kraftstoffe auf zukünftige Motorenkonzepte
- [59] SCHWARZE, H., BROUWER, L., KNOLL, G., LONGO, C., KOPNARSKI, M., EMRICH, S.: Auswirkung von Ethanol E85 auf Schmierstoffalterung und Verschleiß im Ottomotor. Artikel MTZ
- [60] Delphi Deutschland GmbH (2008): Kompetenz in Biokraftstoffen. Pressemitteilung BoxID 155734
- [61] SCHOLZ, M., ELLERMEIER, J. (2006): Korrosionsverhalten unterschiedlicher Aluminiumlegierungen in ethanolhaltigem Ottokraftstoff unter erhöhten Temperaturen
- [62] RINNBAUER, M., OSEN, E., VIOL, M., PETERSEIM, V. (2008): FKM-Dichtungen für alternative Kraftstoffmischungen. Artikel MTZ 04/2008
- [63] KRAMMER, K. (ohne Jahr): Pflanzenöl in Dieselmotoren – Umrüstsysteme im Überblick
- [64] ADAC-Fahrzeugtechnik (2010): Pflanzenöl als alternativer Kraftstoff für Dieselmotoren
- [65] PULS, T.: Alternative Antriebe und Kraftstoffe
- [66] Environmental Protection Agency (2002): A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust
- [67] MORRIS (2003): Impact of Biodiesel Fuels on Air Quality and Human Health
- [68] KOO-OSHIMA: Comprehensive health and environmental effects of biodiesel as an alternative fuel
- [69] WEDEL (2006): Biodiesel 101: Emission Reductions and Experience in San Francisco
- [70] MUNACK, A. (2005): Vergleich von Shell-Mittel-Destillat, Premium-Dieselmotorenkraftstoff und fossilem Dieselmotorenkraftstoff mit Rapsmethylester
- [71] Homepage: bürkert Fluid Control systems: <http://www.buerkert.de> – Stand: 2011
- [72] BRISTLE, J. (2008): Die Verwendung von Ethanol als Kraftstoff, insbesondere in Dieselmotoren
- [73] Homepage: Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk e. V.: <http://www.carmen-ev.de>. Stand: 2011
- [74] ROKOSCH, U.: On-Board-Diagnose und moderne Abgasnachbehandlung
- [75] MERKER, G., SCHWARZ, C., STIESCH, G., OTTO, F. (2006): Verbrennungsmotoren – Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung
- [76] ZIKORIDSE, G.: Vorlesungsmaterial Abgasnachbehandlung WS 2010/2011
- [77] Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen vom 15. Juli 2009, veröffentlicht im Bundesgesetzblatt Teil 1, Nr. 41, ausgegeben zu Bonn am 20. Juli 2009



- [78] BREINESBERGER, J. (2007): Biotreibstoffe – Vision oder Gegenwart
- [79] von HOHENTHAL, M. Y.: Biokraftstoffe – Die Alternative? Artikel MTZ 2010
- [80] KRÜGER, M., KUMMER, C., WIARTALLA et al.: Regenerationsbetrieb und motorische Langzeiteffekte. In: Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, Aachen, 2004
- [81] RÜDIGER, V.: Kraftstoffseitige Einflüsse auf Kolbenablagerungen und Schmierölveränderungen in Verbrennungsmotoren. Artikel MTZ 1975, S. 63-68
- [82] PISCHINGER, R., KRAßNIG, G., SAMS, Th. et al.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, neue Folge, Band 5. Springer Wien/New York, 1989
- [83] HANSEN, U., SCHRÖDER, P.: Demonstrationsprojekt zum Rapsölmethylester-(RME-) Einsatz in umweltsensiblen aquatischen Bereichen. Rostock: Forschungsbericht der Universität Rostock, 1997
- [84] MUNACK, A.: Untersuchung von nicht limitierten Emissionen eines Nutzfahrzeugmotors mit verschiedenen Biodieselblends. Steinbeis-Transferzentrum Biokraftstoffe und Umweltmesstechnik, Coburg, März 2011
- [85] WIARTALLA, A., SEVERIN, Ch.: Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln. FEV GmbH, Aachen, 2011
- [86] AATOLA, H., LARMI, M., SARJOVAARA, T.: Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. Helsinki, University of Technology, 2008
- [87] KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg 2009
- [88] OELCHECK GmbH, Kerschelweg 28, 83098 Brannenburg
- [89] [www.IWR.de](http://www.IWR.de)
- [90] ZIKORIDSE, G.: Abgasnachbehandlung für Otto- und Dieselmotoren; CD-Rom zur Vorlesung

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

## 2001

F 33: Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen  
Gaupp, Wobben, Horn, Seemann € 17,00

F 34: Ermittlung von Emissionen im Stationärbetrieb mit dem  
Emissions-Mess-Fahrzeug  
Sander, Bugsel, Sievert, Albus € 11,00

F 35: Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren  
Wallentowitz, Ehmanns, Neunzig, Weilkes, Steinauer, Bölling,  
Richter, Gaupp € 19,00

F 36: Anforderungen an Rückspiegel von Krafträdern  
van de Sand, Wallentowitz, Schrüllkamp € 14,00

F 37: Abgasuntersuchung – Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat  
Afflerbach, Hassel, Schmidt, Sonnborn, Weber € 11,50

F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgänger-  
schutzes  
Friesen, Wallentowitz, Philipps € 12,50

## 2002

F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung  
von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung  
Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, Sievert € 19,50

F 40: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Spritzschutzsysteme  
an Kraftfahrzeugen  
Domsch, Sandkühler, Wallentowitz € 16,50

## 2003

F 41: Abgasuntersuchung: Dieselfahrzeuge  
Afflerbach, Hassel, Mäurer, Schmidt, Weber € 14,00

F 42: Schwachstellenanalyse zur Optimierung des Notausstieg-  
systems bei Reisebussen  
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00

F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kin-  
derschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall  
Nett € 16,50

F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge  
Gail, Pastor, Spiering, Sander, Lorig € 12,00

## 2004

F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im  
Rahmen der WMTC-Aktivitäten  
Steven € 12,50

F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur  
Steigerung der Fahrsicherheit  
Funke, Winner € 12,00

F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformations-sys-  
temen  
Jahn, Oehme, Rösler, Krems € 13,50

F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und  
bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO  
Pullwitt, Redmann € 13,50

F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder  
Berg, Rücker, Bürkle, Mattern, Kallieris € 18,00

F 50: Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme  
Gehre, Kramer, Schindler € 14,50

F 51: Brandverhalten der Innenausstattung von Reisebussen  
Egelhaaf, Berg, Staubach, Lange € 16,50

F 52: Intelligente Rückhaltesysteme  
Schindler, Kühn, Siegler € 16,00

F 53: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag  
Klanner, Ambos, Paulus, Hummel, Langwieder, Köster € 15,00

F 54: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen  
durch rechts abbiegende Lkw  
Niewöhner, Berg € 16,50

## 2005

F 55: 1st International Conference on ESAR „Expert Symposium  
on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on  
3rd/4th September 2004 at Hannover Medical School € 29,00

## 2006

F 56: Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die  
Verwendung asphärischer Außenspiegel  
Bach, Rüter, Carstengerdes, Wender, Otte € 17,00

F 57: Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften  
Gail, Pullwitt, Sander, Lorig, Bartels € 15,00

F 58: Bestimmung von Nutzfahrzeugemissionsfaktoren  
Steven, Kleinebrahm € 15,50

F 59: Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort  
Hautzinger, Pfeiffer, Schmidt € 15,50

F 60: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme  
aus Sicht der Verkehrssicherheit  
Vollrath, Briest, Schießl, Drewes, Becker € 16,50

## 2007

F 61: 2nd International Conference on ESAR „Expert Symposium  
on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on  
1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School € 30,00

F 62: Einfluss des Versicherungs-Einstufungstests auf die Belan-  
ge der passiven Sicherheit  
Rüter, Zoppke, Bach, Carstengerdes € 16,50

F 63: Nutzerseitiger Fehlgebrauch von Fahrerassistenzsystemen  
Marberger € 14,50

F 64: Anforderungen an Helme für Motorradfahrer zur Motorrad-  
sicherheit  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflich-  
tig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Schüler, Adolph, Steinmann, Ionescu € 22,00

F 65: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbel-  
euchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit  
Manz, Kooß, Klinger, Schellinger € 17,50

## 2008

F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und  
Nutzfahrzeugen  
Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50

F 67: Optimierung von Kinderschutzsystemen im Pkw  
Weber € 20,00

F 68: Cost-benefit analysis for ABS of motorcycles  
Baum, Westerkamp, Geißler € 20,00

F 69: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland  
Auerbach, Issing, Karrer, Steffens € 18,00

F 70: Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen  
Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner, Ellmers € 13,50

## 2009

F 71: Erkennbarkeit von Motorrädern am Tag – Untersuchungen zum vorderen Signalbild  
Bartels, Sander € 13,50

F 72: 3rd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 5th / 6th September 2008 at Hannover Medical School € 29,50

F 73: Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern  
Seiniger, Winner € 16,50

## 2010

F 74: Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrerverhalten  
Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50

F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen  
Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

## 2011

F 76: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Bovenkerk, Gies, Urban € 19,50

F 77: 4th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 29,50

F 78: Elektronische Manipulation von Fahrzeug- und Infrastruktursystemen  
Dittmann, Hoppe, Kiltz, Tuchscheerer € 17,50

F 79: Internationale und nationale Telematik-Leitbilder und IST-Architekturen im Straßenverkehr  
Boltze, Krüger, Reusswig, Hillebrand € 22,00

F 80: Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustands  
Eichinger € 15,00

F 81: Potential aktiver Fahrwerke für die Fahrsicherheit von Motorrädern  
Wunram, Eckstein, Rettweiler € 15,50

F 82: Qualität von on-trip Verkehrsinformationen im Straßenverkehr – Quality of on-trip road traffic information – BAST-Kolloquium 23. & 24.03.2011  
Lotz, Luks € 17,50  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.

## 2012

F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe  
Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen  
Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis  
Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

## 2013

F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer  
Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes  
Gehring, Zander € 14,00

F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit  
Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit  
Nuß, Eckstein, Berger € 17,90

F 91: Standardisierungsprozess für offene Systeme der Straßenverkehrstelematik  
Kroen € 17,00

F 92: Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung  
Beyer, Blumenschein, Bönninger, Grohmann, Lehmann, Meißner, Paulan, Richter, Stiller, Calker € 17,00

## 2014

F 93: Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren  
Buld, Will, Kauschner, Krüger € 17,50

F 94: Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen  
Pellmann, Schmidt, Eckhardt, Wagner € 19,50

---

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7  
28195 Bremen  
Tel. (0421) 3 69 03-53  
Fax (0421) 3 69 03-48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.