

Einfluss Biokraftstoffblends

Vorhaben Nr. 6010280

Einfluss von Biokraftstoffblends auf moderne Dieselmotoren und deren Abgasnachbehandlungssysteme

Abschlussbericht

Kurzfassung

Derzeit ist eine maximale Beimischung von 7 % Biodiesel zum fossilen Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 festgelegt. Nach Überlegungen der Gesetzgeber sollen dieser Wert auf europäischer Ebene in absehbarer Zeit auf 10 % anwachsen und weitere Stoffe als Beimischkomponenten zugelassen werden. Zukünftig sehen Vorgaben der Europäischen Union bis zum Jahr 2020 einen Anstieg des Biokraftstoffanteils auf 20 % des gesamten Benzin- und Dieselverbrauch vor. Mit dieser Festlegung soll eine Treibhausgaseinsparung von 10 % realisiert werden. Die Erhöhung des Blendanteils mit biogenen Komponenten hat eine vermehrte Schwankung der Kraftstoffeigenschaften zur Folge. Die Auswirkungen dieser Schwankungen auf differenzierte Motorentechnik im Praxiseinsatz galt es zu untersuchen.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, die Lagerfähigkeit der zukünftigen Mischkraftstoffe (Blends) und deren Einfluss auf das Brennverhalten, sowie der dazu gehörigen Emissionsbildung zu untersuchen. In einer Langzeitstudie sollte im Motorbetrieb die Materialbeständigkeit der kraftstoffführenden Bauteile und der Einfluss auf das Abgasnachbehandlungssystem analysiert werden.

Es konnte gezeigt werden, dass die Lagerstabilität der Kraftstoffblends für den Untersuchungszeitraum von 17 Monaten gegeben ist. Hier wurden keine signifikanten Einflüsse auf die Parameter Viskosität und Neutralisationszahl festgestellt. Lediglich die Parameter Oxidationsstabilität und Peroxidzahl zeigten im zulässigen Bereich geringfügige Änderungen. Bei den Motorversuchen im Kurzzeittest wurde gezeigt, dass sich der Einfluss der unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften auf Grund der modernen und fortgeschrittenen Motorsteuerung im Brennverhalten kaum detektieren lässt. Lediglich im hohen Lastbereich, bei dem das Stellpotential des Motorsteuergerätes (ohne AGR) nicht gegeben war, konnten die Kraftstoffe mit HVO-Anteil einen verringerten Zündverzögerung aufweisen. Des Weiteren konnte bestätigt werden, dass der FAME-Anteil im Kraftstoff eine Minderung der Partikelemission bewirkt. Ein Einfluss der Kraftstoffblends auf das Abgasnachbehandlungssystem konnte in den Kurzzeitversuchen nicht nachgewiesen werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	81 S., 65 Abb., 25 Tab., 6 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.01.2010
Ende der Arbeiten:	28.02.2012
Zuschussgeber:	FVV-Eigenmittel
Forschungsstelle:	Universität Rostock Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren Leiter: Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf
Bearbeiter und Verfasser:	Dr.-Ing. Beate Richter, Dipl.-Ing. Thomas Sadlowski Dr. rer. nat. Ulrike Schümann, Dr.-Ing. Volker Wichmann
Obmann des Arbeitskreises:	Dipl.-Ing. Thomas Cartus
Vorsitzender des Beirates:	Dr.-Ing. C. Teetz, MTU Friedrichshafen
Weitere Berichte zum Forschungsvorhaben:	keine

Inhaltsverzeichnis

1	Management Report	1
2	Einleitung und Zielsetzung	3
3	Lösungsweg	4
4	Stand des Wissens	7
4.1	Kraftstoffe	7
4.1.1	Diesekraftstoff	7
4.1.2	Biokraftstoffe	9
4.2	Dieselmotorische Verbrennung	9
4.2.1	Common Rail-Verfahren	10
4.2.2	Diesekraftstoffemissionen	10
5	Eingesetzte Kraftstoffe und Versuchsaufbau	12
5.1	Verwendete Kraftstoffe	12
5.2	Aufbau und Durchführung der Lagerversuche	16
5.3	Aufbau und Messtechnik der Motorversuche	17
5.3.1	Durchführung der Kurzzeitversuche	20
5.3.2	Durchführung des Dauerlaufes	22
6	Ergebnisse der Lagerstudie	24
6.1	Kraftstoffanalytik der Ausgangsstoffe	24
6.1.1	Oberflächenspannung	24
6.1.2	Destillationscharakteristik	26
6.2	Lagerstabilität der Biokraftstoffblends	27
6.2.1	Oxidationsstabilität	28
6.2.2	Neutralisationszahl	32
6.2.3	Viskosität	34
6.2.4	Peroxidzahl	35
6.2.5	Polymergehalt	36
7	Ergebnisse der Motorkurzzeitversuche	39
7.1	Einfluss der Kraftstoffblends auf das Motorsteuergerät	39
7.2	Einfluss der Kraftstoffblends auf das Brennverhalten	41
7.3	Einfluss der Kraftstoffblends auf das Emissionsverhalten	44
7.4	Einfluss der Kraftstoffblends auf das Motorschmieröl	51
8	Ergebnisse der Langzeituntersuchungen	52
8.1	Steuergeräte-Daten bei den Dauerläufen	52
8.2	Emissionsverhalten über der Laufzeit	53
8.3	Optische Befundung des Motors nach den Dauerläufen	55
8.3.1	Brennraum	55
8.3.2	AGR-Kühler	56
8.3.3	Abgasturbolader	57

8.4	Wirkung auf das Motorschmieröl.....	58
9	Zusammenfassung	64
10	Anhang.....	66
10.1	Literaturverzeichnis	66
10.2	Abkürzungsverzeichnis	66
10.3	Abbildungsverzeichnis.....	68
10.4	Tabellenverzeichnis.....	71
10.5	Verschleißmetalle und Verschmutzung im Motorschmieröl.....	72
10.6	Post-Mortem-Analyse der Abgasnachbehandlungssysteme	74

1 Management Report

The subject of this study was the investigation of five biofuel blends with regard to the storage stability, combustion behavior as well as formation of emissions. For this purpose test runs were carried out at an EURO VI passenger car diesel engine (four cylinders). The focus of these test runs were six short-term tests and three endurance runs with selected biofuel blends to study their influence on the internal combustion behavior, on the emission formation and the functionality of the exhaust gas after-treatment system. The following fuels were tested:

- I. Diesel fuel B0 (Reference)
- II. Diesel fuel with 20 % FAME
- III. Diesel fuel with 30 % FAME
- IV. Diesel fuel with 30 % HVO
- V. Diesel fuel with 7 % FAME and 3 % HVO
- VI. Diesel fuel with 7 % FAME and 13 % HVO

Storage study

The FAME components of the fuels noted above were stabilized with the help of antioxidant agents. The biofuel blends were stored for 17 month at two different temperatures (10 °C, Ø 25 °C), sampled and analyzed at defined intervals.

No significant changes of the fuel related properties viscosity and neutralization number were observed over the storage period. The parameters of oxidation stability and peroxide value showed minimal deviations from the initial state. The limits of DIN EN 590 were safely maintained throughout the period. It can be stated that also the investigated blends with high biodiesel content of 30 % can be stabilized over a storage period of 17 months by specific addition with antioxidants. For the investigation period of 517 days, the storage stability of the blends could be proven.

Engine short-term test

In the short-term engine tests five diesel fuel blends were compared in selected engine operating points. Successful operation with blend fuels could be demonstrated in an EURO VI engine. A shift of operating points under stationary load was observed due to different fuel properties (boiling characteristics, surface tension, calorific value).

The differences in the combustion behavior and in the engine control values are quantified on the test bench. Higher fuel volumes were injected for identical load points when operating on the oxygen-rich fuels with biodiesel content (at same air mass and engine speed).

The variations of the individual parameters were within 5 % of the specified values for the six fuels investigated. These differences could be compensated in future engine control units, if information on the applied fuel is stored in the ECU.

In the high load range a direct influence of the fuels on the burning behavior could be observed. The HVO fuels showed a reduced ignition delay. In contrast, the fuel with FAME has experienced a longer ignition delay.

The determination of the FSN and the number of particles confirmed that the FAME content in the fuel causes a reduction of particulate emissions. The reason for this is the oxygen which is bound in FAME molecules. On the other hand fuel blends containing HVO led to a higher number of particles (100 %) whereas FSN remained the same as for diesel fuel. The reason for this lies in the finer atomization of the HVO. Consequently, engine operation with an HVO blend leads to the emission of smaller particles.

The influence of fuel blends on the exhaust gas after-treatment system could not be proven in the short term tests. The particle reduction of the diesel particulate filter was about 99 %. In the engine operation range which is relevant for emission certification the SCR reduces

the nitrogen oxides by 90 %. Over the whole engine map, a nitrogen oxide reduction by over 40 % was measured.

Engine endurance runs

In the engine endurance runs the fuels 'DF + 7 % FAME', 'DF + 30 % FAME' and 'DF + 30 % HVO' were tested in the engine for 500 h each. The findings of the short-term tests could be confirmed, i. e. the shift of operating points as well as the emission behavior.

Furthermore the engine components injector, turbocharger, cylinder head and throttle showed no different signs of wear compared to engine operation on standard fuel over the same period.

When operating on FAME blends less soot deposits on the EGR coolers were found, which correlates with the particulate emissions.

In all three endurance tests the engine lubricating oil showed the same behavior as typically found for engine operation on standard diesel fuel. There were no differences between the oils in the parameters of viscosity, TBN and wear metal content for all three test fuels. A sharp increase in neutralization number even exceeding the limit has been detected in the endurance tests two and three. This was probably caused by the increase of the FAME content in the lubricating oil to 4.5% in endurance test two.

The soot ingress into the engine lubricating oil was much lower when the engine is operated on FAME blends. This fact correlates with the results of the soot emission measurements, where DK + 30 % FAME caused the lowest soot emissions.

Outlook

It should be noted that fuel-related differences, as known from earlier engine applications, could not be detected for the examined EURO VI engine. This is especially true for the typical increase in nitrogen oxide emissions caused by FAME-containing fuels. Fuel-related limitations of engine operation could not be found in both the short-term tests and the endurance runs.

It would be desirable to adjust the engine control unit to implement based specific fuel type detection. Thus, for example, the improved EGR potential of fuels with high FAME content could be utilized. Furthermore, the AdBlue dosing could be adjusted to the actual emissions of nitrogen oxides in order to avoid incorrect dosing.

2 Einleitung und Zielsetzung

Mineralische flüssige Kraftstoffe aus Rohöl werden im Verkehrssektor voraussichtlich noch für die nächsten 20 Jahre eine dominierende Rolle spielen. Ergänzend werden alternative Kraftstoffe, wie z.B. Biodiesel, Bioethanol und synthetische Dieselmotorkraftstoffe, an Bedeutung gewinnen. Gründe hierfür sind die Verknappung fossiler Energieträger, Umweltschutzbelaenge einschließlich Forderungen zur Senkung kritischer Treibhausgasemissionen, der globale Trend steigender Mobilität und nicht zuletzt die Umsetzung der EU-Richtlinie 2009/28/EG, in der der Marktanteil biogener Kraftstoffe in verschiedenen Stufen bis zum Jahr 2020 auf ca. 10 % erhöht werden soll. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Zielvorgaben der Europäischen Union wird der Einsatz von Kraftstoffblends (Mischkraftstoffen) immer mehr an Bedeutung gewinnen. Bis jetzt ist ein Anteil von 7% (V/V) Biodiesel nach DIN EN 14214 zum mineralölbasierten Grundkraftstoff durch die Dieselmotorkraftstoffnorm DIN EN 590 abgedeckt.

Die derzeitige Gesetzgebung auf europäischer Ebene fordert einen Anteil von 10 % an Erneuerbaren Energien im Verkehrssektor (Richtlinie 2009/28/EG). Die Folge hiervon ist, dass erstens die Zumischkomponente die Kraftstoffeigenschaften mitbestimmt und zweitens die Schwankungsbreite der Kraftstoffeigenschaften deutlich zunimmt. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass die Beimischung zwar erlaubt, aber nicht verbindlich für jede Charge ist. Dadurch können einige Kraftstoffeigenschaften (wie z. B. Dichte, Viskosität, Oxidationsstabilität, Verkokungsneigung, Kälteverhalten) eine relativ große Bandbreite aufweisen.

Ziel des Projekts war die systematische Analyse und Bewertung der Auswirkungen von Biokraftstoffblends auf den Betrieb eines Common-Rail PKW-Dieselmotors, der in seiner Ausführung den aktuellsten Abgasemissionsnormen entspricht (EURO VI). Neben den Einflüssen der Biokraftstoffblends auf die Verbrennungsführung und die damit verbundenen Rohemissionen sollten vor allem die Effekte in den komplexen Abgasnachbehandlungssystemen erstmalig detailliert bewertet werden.

Ein Versuchsmotor der o. g. Kategorie wurde dazu auf einem Motorprüfstand mit verschiedenen Biokraftstoffblends (siehe Beschreibung der Arbeitspakete) betrieben. Anhand von Kurzzeitmessungen an ausgewählten Betriebspunkten im Motorkennfeld wurden die Auswirkungen der veränderten Kraftstoffeigenschaften auf die Verbrennungsführung und das Emissionsverhalten bestimmt. Daran anschließend wurden drei 500 h-Langzeittests absolviert, um die Effizienz und Zuverlässigkeit der Abgasnachbehandlungssysteme (bestehend aus DOC – DPF – SCR) für den Betrieb mit normgerechten Referenzkraftstoffen und Biokraftstoffblends zu vergleichen.

Parallel zu diesen Motortests erfolgten systematische Schmierölanalysen zur Bestimmung des Einflusses der Biokraftstoffblends auf die Ölalterung. Weiterhin wurde die Stabilität der kraftstoffführenden Elemente gegenüber den eingesetzten Biokraftstoffblends überwacht.

3 Lösungsweg

Für die Darstellung des Lösungsweges werden in diesem Kapitel die Arbeitspakete vorgestellt und beschrieben.

Arbeitspaket 1: Beschaffung und Analytik der Zumischkomponenten

Im ersten Arbeitspaket wurden mögliche Bezugsquellen der Zumischkomponenten ermittelt, die entsprechenden Kraftstoffkomponenten beschafft und analysiert. Bei den benötigten Zumischkomponenten handelte es sich um RME (Rapsölmethylester) und SME (Sojaölmethylester) nach DIN EN 14214 sowie HVO (hydrierte Pflanzenöle).

Sowohl die angelieferten Kraftstoffkomponenten als auch die aus ihnen erstellten Blends wurden zu Beginn der Versuchsreihen einer Standard-Kraftstoffanalytik unterzogen (Heizwert, Dichte, Siedeverhalten, Kälteverhalten, Verkokungsneigung, Schmierfähigkeit). Die Ergebnisse wurden aufbereitet und hinsichtlich Normkonformität bzw. –abweichungen ausgewertet.

Im Rahmen dieses Projektes wurden die nachfolgenden Kraftstoffblends hergestellt und in den Lager- sowie Motorversuchen eingesetzt:

- I. Dieselkraftstoff B0 (Referenz)
- II. Dieselkraftstoff mit 20 % FAME
- III. Dieselkraftstoff mit 30 % FAME
- IV. Dieselkraftstoff mit 30 % HVO
- V. Dieselkraftstoff mit 7 % FAME und 3 % HVO
- VI. Dieselkraftstoff mit 7 % FAME und 13 % HVO

Im Ergebnis erfolgte eine Auswahl/Zulassung der Kraftstoffblends für die Motorversuche. Auf Basis dieser Analysedaten konnten erste Hinweise auf zu erwartende Abweichungen im Motorbetriebsverhalten indiziert werden.

Arbeitspaket 2: Beschaffung Referenz-DK und Aufbau Kraftstoffversorgung

Im Arbeitspaket 2 wurde Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 ohne FAME-Anteil als Referenzkraftstoff (B0-Dieseldieselkraftstoff) beschafft und analysiert. Weiterhin wurde am Motorprüfstand ein zusätzliches Kraftstoffversorgungssystem (Servicetank mit Vorförderpumpe und entsprechenden Absperrventilen) installiert, um einen zügigen Wechsel der am Motor eingesetzten Kraftstoffvariante bei minimiertem Spülaufwand zu ermöglichen.

Arbeitspaket 3: Langzeituntersuchung zur Lagerstabilität der Blends

Von den o. g. Kraftstoffblends wurden je zwei Proben zur Verfolgung der Lagerstabilität hergestellt. Hierbei erfolgte die Lagerung zum Einen bei 10 °C sowie zum Anderen bei einer erhöhten Temperatur (durchschnittlich 25 °C), um konkrete Aussagen über den Einfluss der Lagertemperatur treffen zu können.

Von den entsprechenden Biokraftstoffblends erfolgte schließlich in definierten Intervallen die Analyse ausgewählter Parameter.

Arbeitspaket 4: Prüfstandsuntersuchungen Kurzzeitversuche Blends

Untersuchungsbasis für die durchzuführenden Kurzzeitversuche an einem Motorprüfstand war ein teiloffenes Steuergerät mit Serienapplikation für normkonformen Dieseldieselkraftstoff. Es erfolgten keine Veränderungen oder Anpassungen der auf B0 abgestimmten Serienapplikation an die Biokraftstoffblends. Für jeden der eingesetzten Blends wurden 30 Stützpunkte im

Motorkennfeld angefahren und vermessen. Diese Stützpunkte ergeben sich aus Drehzahl-schnitten bei 1.500, 2.000, 2.500, 3.000 und 3.500 min^{-1} und Momentenstufen von jeweils 50 Nm (siehe Abbildung 10).

Arbeitspaket 5: Auswertung der in AP 4 ermittelten Messdaten

Die in Arbeitspaket 4 erfassten Messwerte wurden systematisch ausgewertet. Schwerpunkt der Untersuchungen war hierbei die Analyse des Einflusses der Kraftstoffblends auf die Verbrennungsführung. Dazu erfolgte die Bestimmung von Brenngeschwindigkeit, der Schwerpunktlage der Wärmefreisetzung und Brennfunktion der Hauptverbrennung anhand der aufgenommenen Indizierdaten.

Die Resultate der Abgasemissionen wurden in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff dargestellt und auf die festgestellten Änderungen in der Verbrennungsführung zurückgeführt. Der Schwerpunkt der Schadstoffanalyse lag dabei auf den Stickoxid- und Partikelemissionen.

Die Funktion und Effizienz der Abgasnachbehandlungssysteme (DOC, DPF, SCR) beim Betrieb des Motors mit den verschiedenen Biokraftstoffblends wurde ausgehend von den Rohemissionen dargestellt. Ziel war dabei, eine Zuordnung der festgestellten Abweichungen auf das veränderte Rohemissionsgeschehen und auf die ggf. veränderten Betriebsbedingungen der Abgasnachbehandlungssysteme zu vollziehen.

AP 6: Zustandsbewertung der Abgasnachbehandlungskomponenten

Nach Abschluss der Kurzzeitmessungen mit den unterschiedlichen Biokraftstoffblends erfolgte eine Bewertung des Einflusses der Blends auf den Zustand der Abgasnachbehandlungskomponenten.

Im ersten Schritt wurden die Abgasnachbehandlungssysteme (DOC, DPF, SCR) anhand der Emissions- und Betriebsmessdaten aus AP4 (Emissionsdaten vor und nach AGN, Δt über DOC, Druckverluste DPF, NH_3 -Schlupf nach SCR) hinsichtlich eventuell eingetretener vorzeitiger Alterung, Vergiftung oder sonstiger Veränderungen bewertet.

Arbeitspaket 7: Prüfstandsuntersuchungen Langzeitversuche

Inhalt dieses Arbeitspakets waren drei Langzeitversuche mit jeweils 500 Betriebsstunden auf einem automatisierten Prüfstand. Dazu wurde ein vereinfachter Stufenzyklus in Anlehnung an den AMA-Zyklus programmiert und nachgefahren. Folgende Kraftstoffe wurden im Dauerlaufbetrieb eingesetzt:

1. Dauerlauf: DK + 7 % FAME
2. Dauerlauf: DK + 30 % FAME
3. Dauerlauf: DK + 30 % HVO

Hierbei erfolgte während des Dauerlaufs nach jeweils 100 Betriebsstunden die Erfassung folgender Messwerte an 10 Stützpunkten aus dem Motorkennfeld:

- Stoffströme (Luft, Kraftstoff, Abgas) inkl. Drücke und Temperaturen
- Gasförmige Abgaskomponenten (CO_2 , CO, O_2 , NO, NO_x , THC) im Rohabgas und nach AGN
- FSN im Rohabgas und nach AGN

Des Weiteren wurden zu Beginn und Ende die Brennraumdrücke an den definierten Stützpunkten gemessen.

Arbeitspaket 8: Beständigkeit von Bauteilen

Relevante Bauteile (Injektoren, AGR-Ventil, AGR-Kühler, ATL, Ansaugbrücke, Brennraum, etc.) wurden nach Abschluss der jeweiligen Dauerläufe hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber dem Biokraftstoffblend befundet. Die Ergebnisse der optischen Begutachtung wurden dokumentiert.

Arbeitspaket 9: Beständigkeit von Abgasnachbehandlungskomponenten, Bereitstellung von Motorkomponenten zur vertieften Analyse

Nach Abschluss der Langzeittests erfolgte eine vertiefte Befundung der Abgasnachbehandlungskomponenten.

Im ersten Schritt wurden die Abgasnachbehandlungssysteme (DOC, DPF, SCR) anhand der Emissions- und Betriebsmessdaten aus dem Langzeittest (Emissionsdaten vor und nach AGN) hinsichtlich eventuell eingetretener vorzeitiger Alterung, Vergiftung oder sonstiger Veränderungen bewertet.

In Abstimmung mit den Systemlieferanten und in Abhängigkeit der Ergebnisse aus den Motorversuchen werden vertiefte Untersuchungen veranlasst. Die DPF-Systeme wurden von der Firma Johnson Matthey in England analysiert.

Arbeitspaket 10: Schmierölbeeinflussung durch Blends

Zur Überwachung der Schmierölqualität erfolgte eine regelmäßige Analyse und vergleichende Bewertung des Schmieröls während der Kurzzeitversuche sowie der Dauerläufe.

Hierbei wurden folgende Proben genommen:

- Kurzzeitversuche: je eine Probe nach Abschluss jeder Blendvariante in AP 4
- Langzeitversuche: je eine Probe zu Beginn und nach 100, 200, 250, 300, 350, 400, 450 und 500 Betriebsstunden

Ziel war die Ermittlung der Stabilität des Schmieröles in Gegenwart der Zumischkomponenten, insbesondere im Hinblick auf Polymerisation bzw. unzulässige Verdünnung. Dazu wurden folgende Schmieröleigenschaften analysiert: Viskosität, Oligomerbildung, Verschleißmetalle TBN-Zahl, Neutralisationszahl, Kraftstoffgehalt und Rußgehalt.

4 Stand des Wissens

4.1 Kraftstoffe

Kraftstoffe dienen als Energieträger, deren chemische Energie durch Verbrennung in thermische und mechanische Energie umgewandelt wird. Mit einem Anteil von mehr als 20 % ist Deutschland der größte Kraftstoffverbraucher in der Europäischen Union. Lediglich zwei Prozent des Kraftstoffbedarfs kann die Europäische Union mit eigenen Rohstoffen decken. Hier zeigt sich eine starke Abhängigkeit von den Rohöl exportierenden Ländern. Bedingt durch die Verknappung von Ressourcen und der damit einhergehenden Preissteigerung von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen sowie durch ein steigendes Umweltbewusstsein ist in der Automobilindustrie ein neuer Trend zu beobachten. Biokraftstoffe gewinnen immer mehr an Bedeutung. Dazu gibt es eine Vielzahl von biogenen Kraftstoffen, die sich als alternative Energieträger anbieten. Eine besondere Umweltverträglichkeit ist damit nicht zwingend gegeben. In Deutschland wird durch das am 1. Januar 2007 in Kraft getretene Biokraftstoffquotengesetz ein Mindestanteil an zum Transport bestimmter Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffquellen verlangt. Abbildung 1 zeigt die vorgeschriebenen Anteile seit der Einführung 2007. Die Umsetzung der Quoten kann durch Zumischung von biogenen Kraftstoffen zu herkömmlichen Otto- und Dieselmotorkraftstoff oder durch Inverkehrbringen von reinem Biokraftstoff erfüllt werden.

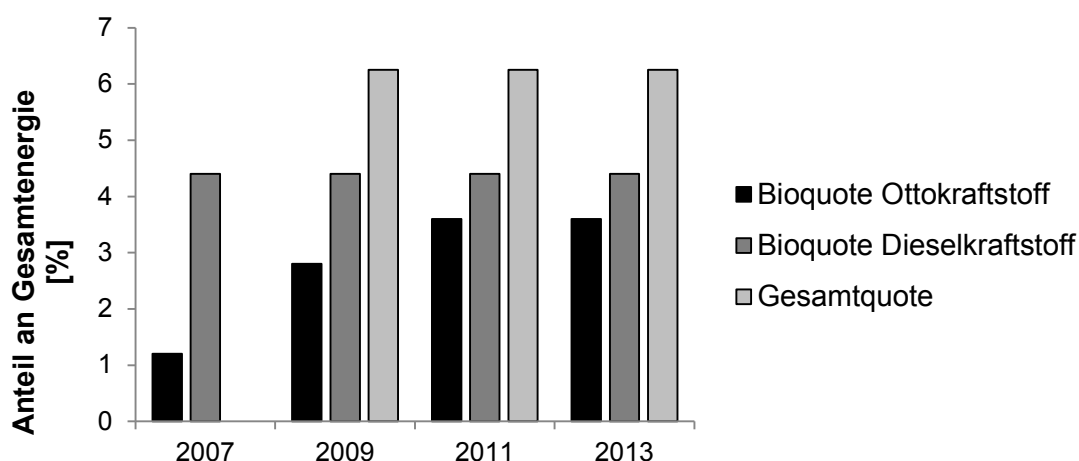


Abbildung 1: Gesetzlich vorgeschriebene Biokraftstoffanteile in Kraftstoffen laut BioKraftQuG.

Durch die Wahl des Kraftstoffes und seiner Additive kann das Emissionsverhalten des Motors wesentlich beeinflusst werden.

4.1.1 Dieselmotorkraftstoff

Dieselmotorkraftstoff wird nahezu ausschließlich aus Erdöl gewonnen. Er ist ein Gemisch aus verschiedenen leichten Mitteldestillaten, welche bei der Refinerie von Rohöl im mittleren Siedebereich von 150 °C bis 390 °C gewonnen werden. Der Anteil der jeweiligen Komponenten hat wesentlichen Einfluss auf das Motorenverhalten. Zusätzlich werden dem Dieselmotorkraftstoff verschiedene Additive beigemischt die der Eigenschaftverbesserung und / oder einer besseren Umweltverträglichkeit dienen. Im Gegensatz zum Ottomotor, der bei Verwendung von Kraftstoffen mit unzureichender Klopfestigkeit einen Motorschaden erleiden kann, läuft der Dieselmotor, wenn auch eingeschränkt, ebenso mit minderwertigeren Kraftstoffen. Zur Sicherstellung eines reibungslosen Fahrbetriebs sowie zur Begrenzung der Schadstoffemissionen sind in der DIN EN 590 die Qualitätskriterien für in Europa erhältlichen mineralischen

Dieselmotoren sind auf Dieselkraftstoff festgelegt. Im Folgenden wird auf einige relevante Eigenschaften von Dieselmotoren eingegangen.

Die Zündwilligkeit des Kraftstoffes wird durch die Cetanzahl gekennzeichnet. Je höher die Cetanzahl (CZ), desto leichter entzündlich ist der Kraftstoff, und umso geringer ist der Zündverzug. Ein langer Zündverzug zieht eine hohe Bildung von thermischem NO_x nach sich, wirkt allerdings der Entstehung von Rußpartikeln entgegen.

Da Kraftstoff ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen ist, weist er, anders als reiner Kohlenwasserstoff, keinen Siedepunkt sondern einen Siedebereich auf. Dieser liegt bei Dieselmotoren zwischen 180 °C und 380 °C . Vor allem die Lage des oberen Siedepunktes ist von Bedeutung. Ein zu hoher Siedepunkt des Kraftstoffes führt zu unverbrannten Kohlenwasserstoffen und damit zu einer erhöhten Rußbildung. Zusätzlich kommt es zu Verkokungen von Einspritzdüsen und Ventilen. Diese wird zusätzlich durch die Verkokungsneigung beschrieben.

Mit steigender Kraftstoffdichte und durch den damit verbundenen Energiegehalt nehmen sowohl die Leistung als auch die Rußemission des Motors zu. Da die Einspritzmenge an Kraftstoff volumetrisch zugemessen wird, ist es notwendig, zur Einhaltung von Abgasgrenzwerten und der Leistungsvorgaben des Motors, Kraftstoffe mit einer geringen Dichtestreuung einzusetzen.

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit. Eine zu niedrige Viskosität verringert die notwendige Schmierung bewegter Teile des Einspritzsystems. Eine zu hohe Viskosität verursacht bei gegebenem Einspritzdruck ein Ansteigen der Tröpfchengröße des Kraftstoffsprays und als Folge eine schlechtere Verbrennung durch eine unzureichende Gemischbildung sowie einen Anstieg des Rußausstoßes. Diese Aspekte machen ein enges Viskositätsfenster erforderlich.

Die Oxidationsstabilität, auch als Alterungsbeständigkeit bezeichnet, ist prinzipiell ein Maß für die Haltbarkeit von Kraftstoffen. Bei längerer Lagerung können Kraftstoffe mit Sauerstoff reagieren und polymerisieren. Die dabei gebildeten Oxidationsprodukte führen zu Filterverstopfungen bzw. Ablagerungen im Kraftstoffsystem. Demzufolge sind in der Dieselmotornorm (DN EN 590) die Mindestanforderungen an die Oxidationsstabilität festgelegt. Ein mögliches Verfahren zur Bestimmung der Oxidationsstabilität ist die sogenannte Rancimat-Methode nach DIN EN 15751. Dieses Verfahren kann jedoch nur für Kraftstoffe mit einem Mindestanteil von 2 Vol.-% FAME sicher angewandt werden. Anderenfalls ist das Verfahren gemäß DIN EN ISO 12205 einzusetzen.

Dieselmotoren werden durch Hydrierung bereits während der Raffination entschwefelt, um den Ausstoß von giftigem Schwefeldioxid zu verhindern. Bei diesem Prozess kommt es aber auch zum Entzug polarer Kraftstoffkomponenten, die gute Schmiereigenschaften besitzen. Um dieses auszugleichen, ist der Einsatz entsprechender Zusätze (z.B. Lubricity Additive) zur Verbesserung der Schmierfähigkeit erforderlich, um einen übermäßigen Verschleiß an Pumpen und Injektoren zu verhindern. FAME-haltige Kraftstoffe weisen aufgrund der enthaltenen Sauerstoffatome im Molekül eine verbesserte Schmierfähigkeit als Dieselmotoren ohne FAME-Anteile auf, wodurch auf den Einsatz entsprechender Additive verzichtet werden kann.

Neben Wasser können auch Feststoffe im Kraftstoff vorhanden sein. Diese werden durch die Gesamtverschmutzung mengenmäßig begrenzt. Dazu gehören Sand, Rost und ungelöste, organische Bestandteile. Ungelöste Fremdstoffe begünstigen den Erosiv- und Abbrasivverschleiß der Einspritzsysteme, wodurch Undichtheiten oder ein Anstieg der Partikelemission verursacht werden können (Reif 2010), (Mollenhauer und Tschöke 2007).

4.1.2 Biokraftstoffe

Der Einsatz von biogenen Kraftstoffen aus schnell nachwachsenden Rohstoffen gewinnt hinsichtlich der bereits angesprochenen Wirtschafts- und Umweltaspekte zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit werden diese in der Regel aber nicht in reiner Form, sondern nur als Zumischungskomponenten zu herkömmlichen Dieselmotorkraftstoff angeboten. Ihre Beimischung können wesentliche Eigenschaftsverbesserungen mit sich bringen. Für Biokraftstoffe gelten separate Qualitätsrichtlinien. Bei der Zumischung zu Dieselmotorkraftstoff müssen aber ebenfalls die Qualitätskriterien der DIN EN 590 erfüllt werden.

Fettsäuremethylester (FAME)

Fettsäuremethylester nach DIN EN 14214 kann auch laut 10. BImSchV als Biodiesel bezeichnet werden, welches weitläufiger bekannt ist. In Deutschland bildet vor allem Rapsöl die Rohstoffbasis, so dass vielfach auch von Rapsölmethylester (RME) die Rede ist. Ausgangsbasis können aber auch andere Pflanzenöle oder tierische Fette sein.

Die Qualitätsanforderungen an FAME sind in der DIN EN 14214 festgehalten. FAME kann sowohl in reiner Form als B100 oder in Mischung mit mineralischem Dieselmotorkraftstoff eingesetzt werden. Der derzeit in Deutschland auf dem Markt erhältliche Standard-Dieselmotorkraftstoff B7 enthält einen Anteil von bis zu 7 % FAME, entsprechend der Kraftstoffnorm DIN EN 590. Der Einsatz einer höheren Menge an Biodiesel bedarf einer Freigabe der Motorenhersteller. Biodiesel ist für den Motor selbst ungefährlich, hat aber höhere Lösemitteleigenschaften als herkömmlicher Dieselmotorkraftstoff. Demzufolge müssen Gummi- und Kunststoffteile dagegen resistent sein. Im normalen Motorbetrieb kommt es permanent zu einem Eintrag von Kraftstoff ins Motoröl. Im Gegensatz zu mineralischem Dieselmotorkraftstoff entweicht Biodiesel nicht aus dem Motorschmieröl. Die Folge ist eine Abnahme der Viskosität und damit verminderte Schmierwirkung des Motoröls. Um einen übermäßigen Verschleiß zu verhindern, müssen die vom Hersteller vorgegebenen Ölwechselintervalle eingehalten werden. Aufgrund des geringeren Heizwertes ersetzt ein Liter Biodiesel 0,92 Liter herkömmlichen Dieselmotorkraftstoff (Machhammer 2007), (Mollenhauer und Tschöke 2007).

Hydrierte Pflanzenöle (HVO)

Ausgangsbasis hydrierter Pflanzenöle sind von Feststoffen gereinigte und entwässerte Öle. Durch eine katalytische Reaktion mit Wasserstoff durch Hydrierung und Decarboxylierung, werden aus den Pflanzenölen reine Kohlenwasserstoffe gebildet. Für die Produktion von HVO gibt es zwei unterschiedliche Verfahren. Zum einen können sie zusammen mit mineralischem Rohöl im konventionellen Raffinerie-Hydrierungs-Prozess hydriert werden oder aber sie werden in speziellen Pflanzenölanlagen „stand alone“ verarbeitet.

Die Eigenschaften des Produkts hängen von den eingesetzten Ölen ab. HVO ist schwefel- und aromatenfrei, enthält keinen Sauerstoff und ist kaum wasserlöslich. Im Vergleich zu herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff ist die Dichte etwas geringer, die Cetanzahl hingegen aber deutlich höher. Durch die Änderung der Atomfolge eines Moleküls, der Isomerisierung, kann die Kältestabilität von HVO eingestellt werden. Die entstehenden Kohlenwasserstoffe ähneln in ihren Eigenschaften denen von mineralischem Dieselmotorkraftstoff. Hydrierte Pflanzenöle können somit in Kombination mit Dieselmotorkraftstoff oder reiner Form in herkömmlichen Dieselmotoren verwendet werden. Durch die Zugabe von HVO zu Dieselmotorkraftstoff kann aufgrund der höheren Cetanzahl eine Eigenschaftsverbesserung erzielt werden. Technisch umsetzbar sind Mischungsverhältnisse von deutlich mehr als 10 %. Begrenzt werden diese nur durch die geringere Dichte der hydrierten Pflanzenöle, so dass, je nach Dichte des eingesetzten Dieselmotorkraftstoffs, ab einer bestimmter Größenordnung die DIN EN 590 nicht mehr erfüllt werden kann (Burgmer und Meyer 2008).

4.2 Dieselmotorische Verbrennung

Die dieselmotorische Verbrennung ist durch innere Gemischbildung und Selbstzündung charakterisiert. Um eine Zündeinleitung zu garantieren, müssen zündwillige Kraftstoffe sowie erhebliche Drücke und Temperaturen vorherrschen. Eine hohe Verdichtung (Verdichtungsverhältnis $12 < \epsilon < 21$) und die eventuelle Lufterwärmung mittels Glühkerze stellen die Energiefreisetzung durch den Verbrennungsprozess sicher. In der Regel wird der Brennstoff

durch hohen Druck kurz vor dem oberen Totpunkt direkt oder indirekt (Vorkammerverfahren) in den Hauptbrennraum eingebracht. Aufgrund der Selbstzündung des Kraftstoffes an der heißen verdichteten Luft ist eine schnelle Zuführung und eine gute Zerstäubung bzw. Oberflächenvergrößerung für eine intensive, schnelle Gemischbildung wichtig; sie ermöglicht eine vollständige und gehaltvolle Verbrennung. Die Regelung verschiedener Lastzustände wird beim Dieserverfahren durch eine variierende Kraftstoffmenge erzielt. Im Vergleich zum Otto-Motor im $\lambda = 1$ Betrieb kann hier von einer höheren Effizienz durch die Qualitätsregelung gesprochen werden (Mollenhauer und Tschöke 2007), (Merker und Stiesch 1999).

Zahlreiche Einflussgrößen entscheiden über die Qualität der Verbrennung und der daraus resultierenden Abgaszusammensetzung. Konstruktive Maßnahmen, wie die Anordnung der Einspritzdüsen (Injektoren) oder die Gestaltung des Brennraumes, sind in Verbindung mit den Kraftstoffkennwerten für die Gemischzusammensetzung verantwortlich.

4.2.1 Common Rail-Verfahren

Die Common Rail-Technik hat sich im Dieserverfahren aufgrund ihrer Effizienz im Verbrauch, des niedrigen Schadstoffausstoßes und der verringerten Geräuschemissionen gegenüber anderen direkteinspritzenden Verfahren durchgesetzt. Mittlerweile ist diese Einspritztechnik aufgrund ihrer Vorteile mit hohen Stückzahlen bei allen Arten von modernen Dieselmotoren im Serieneinsatz (Mollenhauer und Tschöke 2007).

Das lange als Konkurrenz geltende Pumpe-Düse-System konnte ebenfalls mit hohen Einspritzdrücken aufwarten, ist aber durch den druckgesteuerten Kraftstoffeintrag der hub/zeitgesteuerten Direkteinspritzung nicht unterlegen. Der entsprechende Vorteil des Verfahrens ist durch die Entkopplung von Hochdruckerzeugung und Einspritzung des Kraftstoffes unabhängig von Last und Drehzahl über das gesamte Motorkennfeld definiert. Eine zentrale Hochdruckpumpe bewirkt den permanent anliegenden Speicherdruck, der die Kraftstoffentnahme durch das Motorsteuergerät bei jedem Arbeitsspiel des Motors in Anzahl, Lage und Größe flexibel sicherstellt. Die Einspritzmenge ist abhängig von der Höhe des Raildrucks und der Ansteuerdauer der Kraftstoffinjektoren. Der Injektorkörper beinhaltet dazu eine Düse und ein Steuerventil. Der Steller des Steuerventils ist ein Magnet oder Piezoaktor und garantiert die Eventualität von Mehrfacheinspritzungen mit hoher Schaltkraft. Eine beabsichtigte Voreinspritzung (Pilotinjektion) verringert den Zündverzug für die Haupteinspritzung und den einhergehenden Druckgradienten im Brennraum. Ein kurzer Zündverzug gewährleistet eine Minderung von Geräusch- und Stickoxidemissionen sowie eine verringerte Bauteilbelastungen. Eine an die Haupteinspritzung angelagerte Nacheinspritzung hingegen kann reduzierend auf die Rußbildung und die Entstehung unverbrannter Kohlenwasserstoffe wirken (Mollenhauer und Tschöke 2007).

Eine genaue Abstimmung im Zusammenwirken dieser Merkmale auf die Einsatzbereiche und Nutzungsformen ermöglicht ein hohes Potential an Weiterentwicklung und ist in Kombination mit passenden Abgasnachbehandlungssystemen ein Garant für die Einhaltung von bisherigen und angehenden Abgasnormen. Steigende Speicherdrücke und eine Verbesserung der am Kraftstoff- und Abgassystem beteiligten Motorkomponenten sorgen auch zukünftig für Reserven bei Neuerungen des Common Rail Einspritzsystems.

4.2.2 Dieseldieselkraftstoffemissionen

Bei der unvollständigen Verbrennung von Dieseldieselkraftstoff bilden sich Rückstände unterschiedlichster Art. Als direkt wahrnehmbare Abgaskomponenten sind bei kaltem Motor nicht oder nur teilweise oxidierte Kohlenwasserstoffe in Tröpfchenform als Weiß- oder Blaurauch und geruchsintensive Aldehyde festzustellen. Bei Dieselmotoren werden neben den gasförmigen Schadstoffen auch staubförmige Feststoffe mit dem Abgas ausgestoßen, welche unter dem Oberbegriff „Partikel“ in der Öffentlichkeit stark diskutiert worden sind. Hinsichtlich der schädlichen Wirkung auf Umwelt und Gesundheit enthält das Abgas des Dieselmotors

mehrere, unterschiedlich zu bewertende Bestandteile, wie aus der folgenden Abbildung 2 hervorgeht.

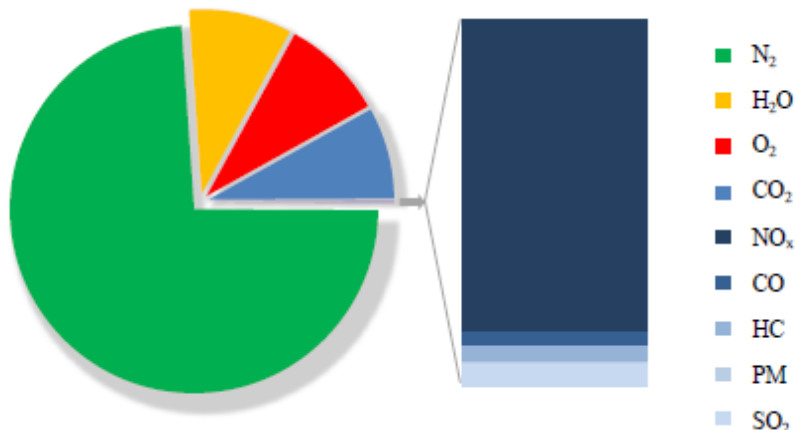


Abbildung 2: Abgaszusammensetzung bei der dieselmotorischen Verbrennung (Mollenhauer und Tschöke 2007).

Die Hauptbestandteile der Emissionen sind die unschädlichen Verbindungen Stickstoff, Sauerstoff und Wasser. Kohlendioxid gilt mit steigender Konzentration als einer der Verursacher des Treibhausgasereffektes. Weitere Abgasschadstoffe sind Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid, Stickoxide und Rußpartikel.

Als Partikel gelten alle festen oder flüssigen Teilchen, die durch Abrieb, Zerkleinerung, Erosion, Kondensation sowie durch unvollständige Verbrennung entstehen. Diese Prozesse bilden Partikel mit unterschiedlichen Formen, Größen und Strukturen. Da diese meist so klein sind, dass sie in Gasen schweben, sind sie vom Charakter her Luftschadstoffe, die einem lebenden Organismus potentiell schaden können.

Beim Verbrennungsprozess eines Dieselmotors entstehen ferner Rußpartikel; mikroskopisch kleine Agglomerate mit einem Durchmesser von bis zu 0,05 µm. Sie bestehen im Kern aus reinem Kohlenstoff, an den sich verschiedene Kohlenwasserstoffverbindungen, Metalloxide und Schwefel anlagern, wobei einige Kohlenwasserstoffverbindungen als toxisch, cancerogen und damit gesundheitlich bedenklich eingestuft werden. Die genaue Zusammensetzung der Rußpartikel hängt von der Motortechnologie, den Einsatzbedingungen und dem Kraftstoff ab. Die Rußpartikelbildung ist von den einzelnen Vorgängen der dieselmotorischen Verbrennung, wie Luftzufuhr, Einspritzung und Flammenausbreitung sowie zusätzlich von der Kraftstoffqualität abhängig. Es besteht ein Zusammenhang zwischen Verbrennungsgüte und der Qualität der Gemischbildung aus Luft und Kraftstoff. Das Gemisch kann in einigen Bereichen des Brennraums zu fett sein, weil nicht genügend Sauerstoff vorhanden ist, wodurch die Verbrennung unvollständig bleibt und es zur Bildung von Rußpartikeln kommt. Die Masse und die Anzahl der Rußpartikel hängen grundsätzlich von der Qualität der motorischen Verbrennung ab.

Die Schadstoffminimierung kann zum einen durch innermotorische Maßnahmen, wie zum Beispiel durch Abgasrückführung (AGR) oder durch gezielte Variation der Einspritztimings und damit der Verbrennungslage realisiert werden. AGR ist ein Verfahren zur Reduzierung der NO_x-Emissionen. Der Hauptteil der NO_x-Emissionen wird durch das thermische NO_x gebildet. Mittels der AGR wird generell die Wärmekapazität des Arbeitsgases erhöht sowie der O₂-Anteil im Brennraum reduziert. Dies hat eine Verlangsamung der Flammenausbreitung, eine Erhöhung der Brenndauer und damit geringere Spitzendrücke und -temperaturen zur Folge. Ein weiterer Aspekt ist der Inertgas- oder Verdünnungseffekt. Da die AGR zum Einhalten der EURO-VI-Norm nicht mehr genügt, müssen zusätzlich Abgasnachbehandlungssysteme, wie Dieseloxydationskatalysator mit Dieselpartikelfilter und einer DeNO_x-Einheit (z.B. NO_x-Speicher-katalysator oder SCR) verwendet werden (Mollenhauer und Tschöke 2007)

5 Eingesetzte Kraftstoffe und Versuchsaufbau

5.1 Verwendete Kraftstoffe

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die drei folgenden Ausgangskraftstoffe für die Herstellung der entsprechenden Versuchskraftstoffe verwendet:

- Referenz-Dieselmkraftstoff (B0)
- Fettsäuremethylester: 70 % (V/V) Rapsölmethylester (RME) sowie 30 % (V/V) Sojaölmethylester (SME)
- Hydriertes Pflanzenöl (HVO)

Zur Gewährleistung der Lagerstabilität der FAME-Komponenten wurde die Oxidationsstabilität bei 110 °C auf mindestens 10 Stunden durch den Zusatz von Antioxidantien erhöht. Hierbei wurde BHT (vgl. Abbildung 3, 2,6-Di-*tert.*-butyl-p-hydroxytoluol) für die Stabilisierung des RME sowie Bisphenol (vgl. Abbildung 4, 6,6'-Di-*tert.*-butyl-2,2'-methylene-bis-p-hydroxytoluol) für den SME eingesetzt.

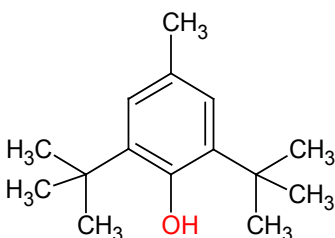


Abbildung 3: Chemische Struktur von BHT.

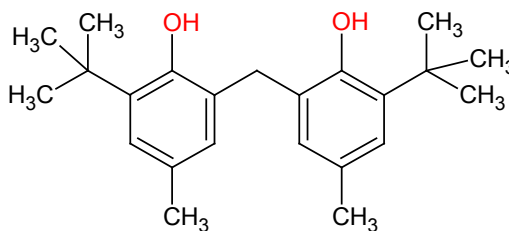


Abbildung 4: Chemische Struktur von Bisphenol.

In Vorversuchen wurden die notwendigen Konzentrationen ermittelt. Die entsprechenden Oxidationsstabilitäten der einzelnen FAME-Komponenten vor und nach der Stabilisierung sind in Tabelle 1 sowie Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 1: Oxidationsstabilitäten des Rapsölmethylesters vor und nach der Additivierung.

Zusatz BHT [mg/kg]	Oxidationsstabilität von RME [h]
0	7,5
1.000	11,9
2.000	14,0

Tabelle 2: Oxidationsstabilitäten des Sojaölmethylesters vor und nach der Additivierung.

Zusatz Bisphenol [mg/kg]	Oxidationsstabilität von SME [h]
0	3,4
1.000	7,4
2.000	10,5

Auf der Grundlage dieser Resultate wurde schließlich der Gesamtvorrat des RME mit 1.000 mg/kg BHT sowie das SME mit 2.000 mg/kg Bisphenol stabilisiert.

Zur Vermeidung von „Nozzle-Fouling“ wurde der Zusatz eines Detergens‘ festgelegt. Dementsprechend wurde FAME mit 100 mg/kg Additiv der Polyisobutylsuccinimid-Klasse (PIBSI, vgl. Abbildung 5) versetzt. So konnten praxisnahe Bedingungen nach gestellt werden, da im EU-Raum unadditivierte Blend-Kraftstoffe laut Mineralölindustrie nicht angeboten werden.

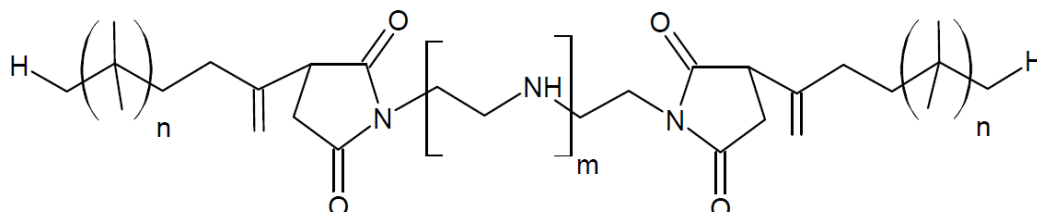


Abbildung 5: Strukturformel des Detergens PIBSI.

In Tabelle 3 sind die chemisch-physikalischen Kenndaten der FAME-Komponenten aufgelistet:

Tabelle 3: Chemisch-physikalische Kenngrößen der FAME-Komponenten (Grenzwert gem. DIN EN 14214).

Parameter	Einheit	RME ¹⁾	SME ¹⁾	FAME ²⁾	Grenzwert
Estergehalt	%	98,5	98,2	n.b.	min. 96,5
Dichte bei 15 °C	kg/m ³	884	886	884	875 - 900
Kinematische Viskosität bei 40 °C	mm ² /s	4,4	4,2	4,41	3,50 – 5,00
Flammpunkt	°C	>120	>120	166	min. 120
CFPP	°C	-16	-7	-10	max. -10
Schwefelgehalt	mg/kg	< 10	< 10	n.b.	max. 10,0
CCR	%	< 0,3	< 0,3	0,30	max. 0,30
Cetanzahl	-	> 51	> 51	52	min. 51
Aschegehalt	%	< 0,02	< 0,02	< 0,01	max. 0,02
Wassergehalt	mg/kg	216	174	240	max. 500
Gesamtverschmutzung	mg/kg	5	5	3	max. 24
Kupferstreifen-Korrosion	-	1	1	n.b.	max. 1
Oxidationsstabilität (DIN EN 14112)	h	8,3	6,3	14	min. 6
Säurezahl	mg KOH/g	0,14	0,33	0,28	max. 0,50

5 Eingesetzte Kraftstoffe und Versuchsaufbau

Jodzahl	g J ₂ /100g	115	133	121	max. 120
Gehalt an Linolensäuremethylester	%	11	10	n.b.	max. 12
Gehalt an Fettsäuremethylester ≥ 4 Doppelbindungen	%	< 1	<1	n.b.	max. 1
Methanol	%	0,03	0,01	n.b.	max. 0,20
Monoglyceride	%	0,63	0,71	n.b.	max. 0,80
Diglyceride	%	0,12	0,12	n.b.	max. 0,20
Triglyceride	%	0,02	0,02	n.b.	max. 0,20
Freies Glycerin	%	< 0,01	0,01	n.b.	max. 0,02
Gesamtglycerin	%	0,18	0,21	n.b.	max. 0,25
Alkaligehalt (Na + K)	mg/kg	0,76	0,44	< 1,0	max. 5,0
Erdalkaligehalt (Ca + Mg)	mg/kg	0,02	0,01	< 1,0	max. 5,0
Phosphorgehalt	mg/kg	0,4	0,5	< 4,0	max. 10,0

¹⁾ Entsprechend Zertifikat von ADM Hamburg, ²⁾ Analyse nach erfolgter vollständiger Additivierung CFPP- Cold Filter Plugging Point; CCR-Koksrückstand (aus 10 % Destillationsrückstand), n.b – nicht bestimmt

Für die Lager- sowie Motorversuche wurden der Referenz-Diesekraftstoff sowie fünf Biokraftstoffblends eingesetzt:

- I. Diesekraftstoff B0 (Referenz)
- II. Diesekraftstoff mit 20 % FAME
- III. Diesekraftstoff mit 30 % FAME
- IV. Diesekraftstoff mit 30 % HVO
- V. Diesekraftstoff mit 7 % FAME und 3 % HVO
- VI. Diesekraftstoff mit 7 % FAME und 13 % HVO

In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die chemisch-physikalischen Kennwerte der Ausgangsmischungen zusammengefasst.

Tabelle 4: Kraftstoffkenndaten der Blends, Teil 1.

	Dichte bei 15 °C	Viskosität bei 40 °C	Heizwert	C	H	CFPP
Einheit	kg/m ³	mm ² /s	kJ/kg	%	%	°C
Grenzwert¹⁾	820,0-845,0	2,00-4,50	-	-	-	-
DK	831,3	2,44	42676	84,42	13,74	-4
DK+ 20% FAME	847,2	2,81	41464	84,41	12,36	-7
DK+	851,7	2,96	40862	83,75	12,48	-8

30% FAME

DK+ 30% HVO	820,6	2,57	42944	82,15	12,75	-12
DK+ 7% FAME+3% HVO	839,9	2,63	42174	85,70	12,43	-7
DK+ 7% FAME + 13% HVO	833,7	2,61	42344	85,78	12,50	-7

¹⁾ gemäß DIN EN 590**Tabelle 5: Kraftstoffkenndaten der Biokraftstoffblends, Teil 2.**

	HFRR	NZ	POZ	OS bei 110 °C	OS bei 140 °C	CCR	CZ
Einheit	µm	mg KOH / g	meq/kg	h	min	% (m/m)	-
Grenzwert	<460	2,0	-	≥20	-	<0,30	≥51
DK	346	0,06	2,4	-	52	0,00	52
DK+ 20% FAME	163	0,09	2,8	30,9	87	0,15	51
DK+ 30% FAME	162	0,11	3,1	26,7	79	0,19	51
DK+ 30% HVO	398	0,06	1,7	25,2	68	0,03	59
DK+ 7% FAME+3% HVO	168	0,09	2,6	38,0	94	0,08	51
DK+ 7% FAME +13% HVO	172	0,08	3,7	41,0	98	0,09	52

HFRR- High-frequency reciprocating rig, Schmierfähigkeit, korrigierter „wear scar diameter“ (wsd 1,4) bei 60 °C ; NZ-Neutralisationszahl; POZ-Peroxidzahl; OS-Oxidationsstabilität, CCR-Koksrückstand (aus 10 % Destillationsrückstand); CZ-Cetanzahl

Die o. a. Kenndaten belegen, dass die Biokraftstoffblends mit zwei Ausnahmen die Anforderungen an die DIN EN 590 erfüllen. Lediglich bei den Proben DK + 30 % FAME und DK + 20 % FAME wurde der Grenzwert der Dichte bei 15 °C überschritten. Die Kraftstoffe mit einem FAME-Anteil wiesen erwartungsgemäß niedrigeren Heizwert (vgl. Tabelle 4) sowie eine bessere Schmierfähigkeit (vgl. HFRR, Tabelle 5) als die FAME-freien Kraftstoffe auf. Besonders hervorzuheben ist die erhöhte Cetanzahl (vgl. Tabelle 5) des HVO-haltigen Kraftstoffes. Die Zugabe von 30 % HVO zu Dieselkraftstoff resultierte in einer verbesserten Zündwilligkeit des Kraftstoffes.

5.2 Aufbau und Durchführung der Lagerversuche

Die Untersuchung der Langzeitstabilität der Biokraftstoffblends erfolgte über einen Zeitraum von insgesamt 17 Monaten. Hierbei wurden die Proben sowohl kühl (10 °C) als auch bei einer erhöhten Temperatur (forcierte Alterung, durchschnittlich 25 °C) gelagert. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die entsprechenden Lagerbedingungen.

Tabelle 6: Lagerbedingungen der Lagerstudie.

Temperatur	10 °C	35 °C, 8 h täglich, durchschnittlich 25 °C
Lagerbehälter	Glasflaschen	Glasflaschen
Lagermenge	2 Liter	2 Liter
Bedingungen	dunkel, abgedeckt, nicht luftdicht verschlossen	dunkel im Wärmeschrank, 35 °C, 8 h täglich, abgedeckt, nicht luftdicht verschlossen
Lagerdauer	17 Monate, Probenahme nach 0, 2, 4, 6, 9, 12, 17 Monaten	
Lagerbeginn	08. Juli 2010	
Lagerende	06. Dezember 2011	
Analysenparameter	Visuelle Beurteilung, Viskosität, Oxidationsstabilität (Rancimat / PetroOxy), Säurezahl, Peroxidzahl, Polymere	

Abbildung 6 zeigt die Kraftstoffproben, die im Wärmeschrank gelagert wurden.



Abbildung 6: Versuchsaufbau der Lagerung im Wärmeschrank.

Die jeweiligen Proben wurden mit den in Tabelle 7 aufgelisteten Prüfverfahren analysiert.

Tabelle 7: Parameter der Kraftstoffanalytik.

Parameter	Prüfverfahren
Dichte bei 15 °C	DIN EN ISO 12185
Kinematische Viskosität bei 40 °C	ASTM D 7042
Heizwert	DIN 51900-3
Cold filter plugging point	DIN EN 116
Schmierfähigkeit (wsd 1,4) bei 60 °C	DIN EN ISO 12156-1
Oxidationsstabilität bei 110 °C (Rancimat-Methode)	DIN EN 15759
Oxidationsstabilität bei 140 °C (PetroOXY-Methode)	ASTM D 7545 - EN 16091
Koksrückstand (aus 10 % Destillationsrückstand)	DIN EN ISO 10370
Cetanzahl	DIN EN ISO 5165
Neutralisationszahl	DIN 51558-Teil 1
Peroxidzahl	DIN EN ISO 3960
Polymergehalt	E DIN EN ISO 16931

5.3 Aufbau und Messtechnik der Motorversuche

Für die Motorversuche wurde ein Serienmotor der Firma VW (CR-PKW-Diesel EURO VI) auf einem Motorprüfstand mit den verschiedenen Biokraftstoffblends betrieben. Die technischen Daten des Prüflings sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Technische Daten des Versuchsmotors.

Hub	95,5 mm
Bohrung	81,0 mm
Abgasnachbehandlung	DOC – DPF – SCR
Motorbauart	4 – Zylinder – 16 Ventile
AGR	gekühlte Hochdruck AGR
ATL	mit VTG
Hubraum	2,0 Liter / 1.968 cm ³
Nennleistung	103 kW bei 4.200 min ⁻¹
Max. Drehmoment	320 Nm bei 1.750 – 2.500 min ⁻¹

In Abbildung 7 ist der spezifische Kraftstoffverbrauch im Motorkennfeld für Dieselkraftstoffbetrieb dargestellt. Dieser entspricht den Erwartungen an einen optimierten EURO-VI-Motor.

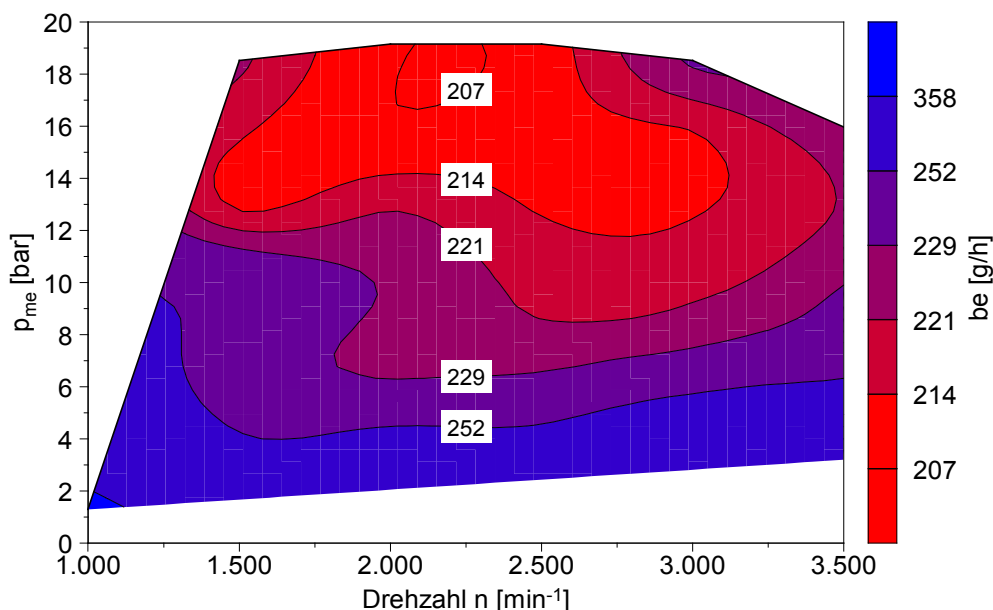


Abbildung 7: Verbrauchskennfeld für Dieselkraftstoff des Versuchsmotors.

Für die Überwachung und die Steuerung des Prüfstandes sowie für die Messungen waren insgesamt drei Rechner erforderlich, (Darstellung in Abbildung 8). Die Prüfstandsteuerung wurde mit dem Programm MORPHEE II von der Firma D2T mit PC 1 durchgeführt. Zusätzlich wurden die zusätzlich angebrachten Thermoelemente und Druckaufnehmer (siehe Abbildung 9) in das System der Steuerung integriert und zu Messzwecken aufgezeichnet.

Auf dem 2. PC war die Indiziersoftware INDI-Set der Firma AVL installiert. Hier wurden das Kurbelwinkelsignal und das Brennraumdrucksignal vom Indizierquarz über einen Ladungsverstärker synchronisiert und gespeichert. Für Auswertungszwecke wurde der Brennraumdruck über 100 Arbeitsspiele gemittelt. Der Brennverlauf wurde mittels eines Ein-Zonen-Modell aus dem gemittelten Brennraumdruck berechnet.

Das für den Versuch eingesetzte Steuergerät war teiloffen, das bedeutet, dass nur vom Hersteller freigegebene Label (Daten) ausgelesen werden durften. Der Schreibzugriff auf das Motorsteuergerät (z.B. zum Verändern von Labels oder Werten bezüglich der Verbrennung) oder das Auslesen weiterer Labels war untersagt. Die erforderliche Zwangsregeneration des DPF konnte manuell durch die Forschungsstelle per Regenerationsschalter durchgeführt werden. Das Auslesen der freigegebenen Label erfolgte mit dem Schnittstellenmodul „ETAS ES 591.1“ (Serien-Nummer: 2223295). Dieses wurde zur Datenübertragung an die CAN-Busschnittstelle des Motorsteuergerätes und zur Auswertung mittels der Softwarekomponente „INCA“ am 3. Prüfstand-PC angeschlossen (siehe Abbildung 8).

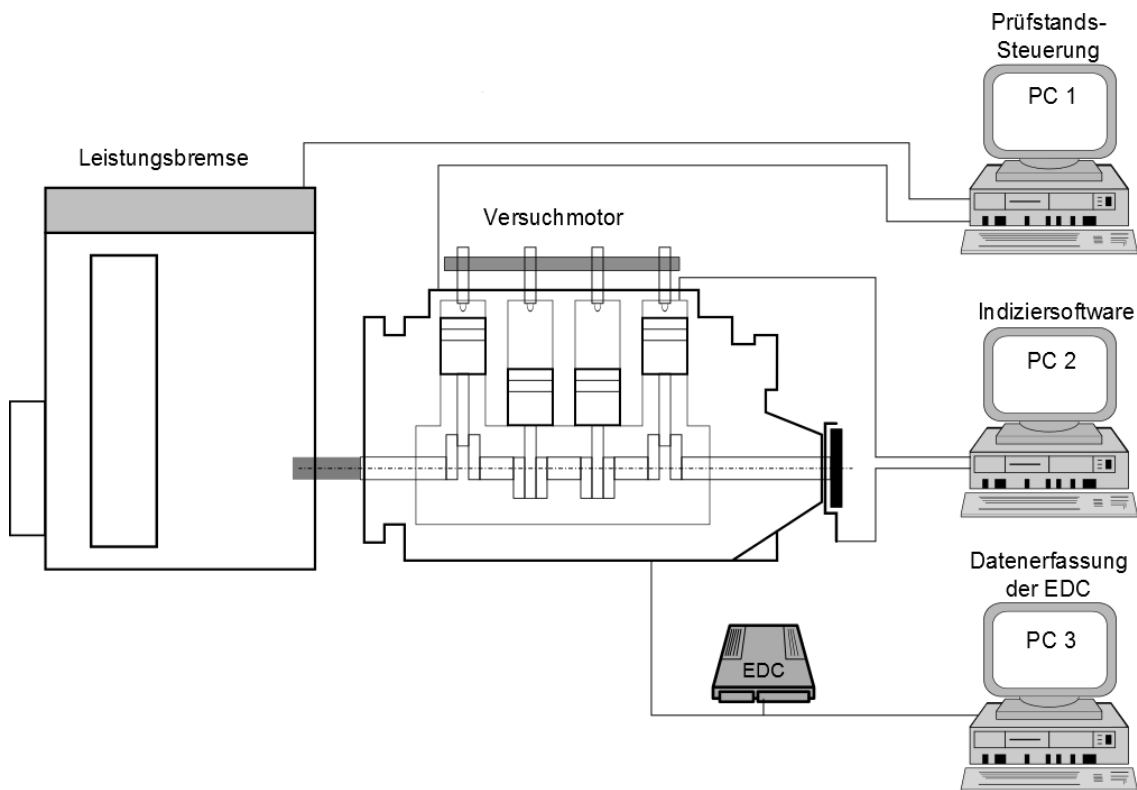


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Prüfstandsbaus mit Mess- und Steuerungstechnik.

In der folgenden Abbildung 9 ist der Aufbau des Motors mit den entsprechenden Druck- und Temperatursensoren sowie den Abgasentnahmestellen schematisch dargestellt. Es ist erkennbar, dass jeweils vor dem Dieselpartikelfilter (DPF), nach dem DPF sowie nach dem selektiven katalytischen Reduktionskatalysator (SCR) Abgasproben entnommen wurden.

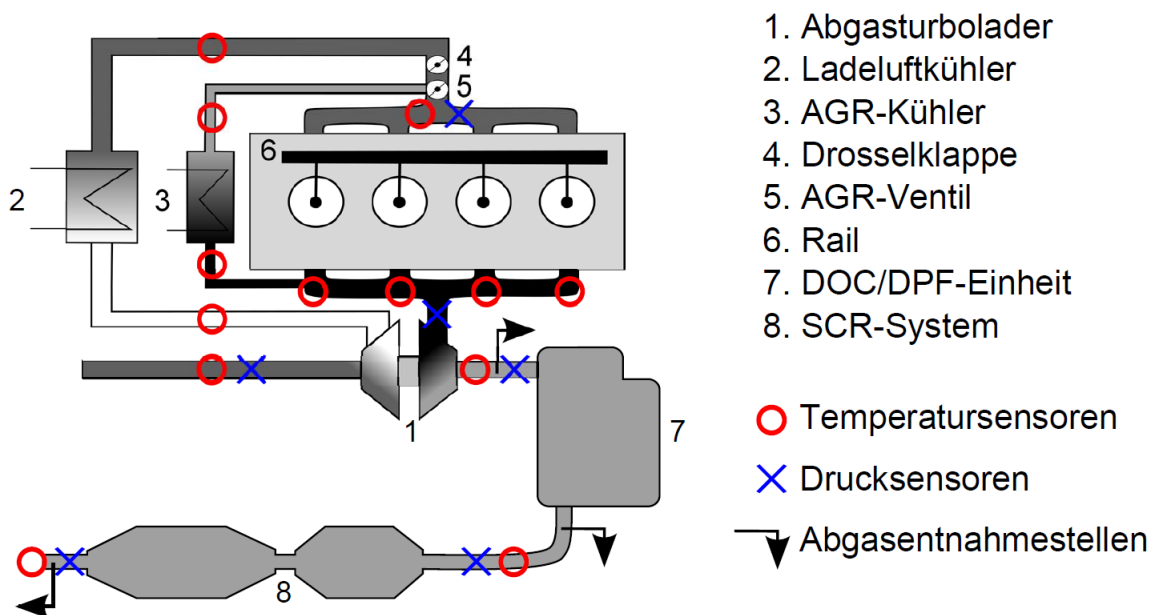


Abbildung 9: Motorschema mit Messstellen für Druck, Temperatur und Abgasentnahmestellen.

Die Ermittlung der gasförmigen Abgaskomponenten erfolgte mit dem Abgasanalysator Typ AO2020 der Firma ABB. Dieses Gerät beinhaltet mehrere Messverfahren, welche zu einem sogenannten Funktionsblock zusammengefasst wurden (vgl. Tabelle 9).

Zusätzlich erfolgten die Bestimmung des Rußgehaltes und der Partikelanzahl im Abgas. Für diese Untersuchungen wurde der Partikelzähler Particle Counter 489 und das Smoke Meter von der Firma AVL genutzt.

Tabelle 9: Abgaskomponenten und entsprechende Analysatoren.

Messgröße	Analysator (Modul)	Messprinzip
O ₂	ABB AO2020 (Magnos 106)	Magnetomechanischer Sauerstoff-Analysator
CO/CO ₂	ABB AO2020 (Uras 14)	Nichtdispersive Infrarotadsorption
HC	ABB AO2020 (FID)	Konzentrationsmessung
NO/NO ₂	ABB AO2020 (CLD)	Photoemission
NO	ABB AO2020 (Limas 11)	Wellenlängenvergleich
Partikelanzahl	AVL Particle Counter 489	Schlieren-Streulicht-Methode
Schwärzungszahl	AVL Smoke Meter	Optische Schwärzungsmessung auf Filterpapier

5.3.1 Durchführung der Kurzzeitversuche

Anhand von Kurzzeitmessungen an ausgewählten Betriebspunkten im Motorkennfeld (siehe Abbildung 10) wurden die Auswirkungen der veränderten Kraftstoffeigenschaften auf die Verbrennungsführung und das Emissionsverhalten bestimmt. Zusätzlich wurden Daten aus dem Motorsteuergerät erfasst und ausgewertet. Ein ausgewählter Betriebspunkt wurde hierzu angefahren und 10 Minuten gehalten, um ein stationäres Motorverhalten zu gewährleisten. Anschließend wurden die entsprechenden Messgrößen aufgezeichnet.

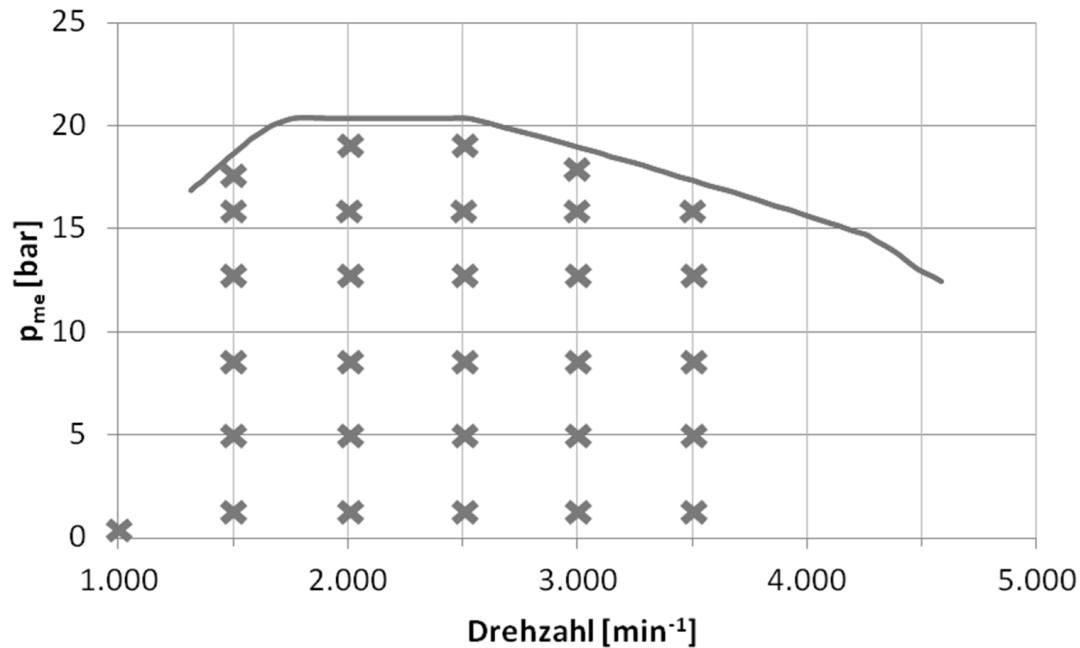


Abbildung 10: Ausgewählte Messpunkte im Motorkennfeld.

Die Kurzzeitversuche beinhalteten die Messung der Partikelanzahl im Abgas. Als Randbedingungen wurden vier stationäre Betriebspunkte und ein Lastsprung definiert (siehe Tabelle 10 und Abbildung 11). Die Entnahmestellen sind in Abbildung 9 markiert (Abgasentnahmestellen). Für die Sprunguntersuchung wurden 10 Lastwechsel aufgezeichnet und gemittelt.

Tabelle 10: Messpunkte für die Partikelzählung.

Messpunkt	n / min^{-1}	$p_{\text{me}} / \text{bar}$
1	1.875	1,27
2	1.500	3,3
3	2.000	3,3
4	2.000	6,6

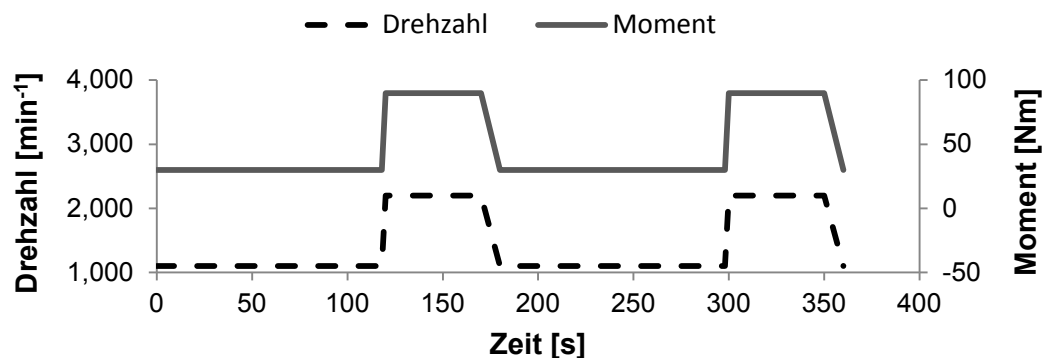


Abbildung 11: Drehmoment und Drehzahlverlauf bei der Sprungmessung.

Bei dem eingesetzten Motorenöl handelte es sich um ein synthetisches Schmieröl, Formula V LongLife 5W-30. Zur Überwachung der Schmierölqualität wurde nach jedem Kurzzeittest eine Schmierölprobe entnommen und die in Tabelle 11 aufgelisteten Kennwerten analysiert.

Tabelle 11: Ausgewählte Kenngrößen für die Schmierölanalytik.

Kenngröße	Einheit	Prüfverfahren
Kinematische Viskosität bei 40 °C	mm ² /s	ASTM D 7042
TBN	mg KOH/g	DIN ISO 3771
NZ	mg KOH/g	DIN 51558 T1
Rußgehalt	%	DIN 51452
Kraftstoffgehalt	%	IR-Methode

Der Zustand der Schmierölproben wurde zusätzlich durch Analyse der Verschleißmetalle charakterisiert, um wichtige Informationen über den korrosiven bzw. abrasiven Verschleiß zu erhalten. Die Verschleißmetalle sowie Additivelemente der Schmierölproben wurden direkt durch Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) nach DIN EN 51399-1 bestimmt.

Ferner erfolgte die Bestimmung des Gehaltes an Dimeren und Polymeren im Schmieröl mittels HPSEC gemäß E DIN EN ISO 16931.

Nach Beendigung des entsprechenden Kurzzeittests wurde das Motorschmieröl nicht gewechselt. Nach jedem Kraftstoffwechsel wurden der Kraftstofffilter sowie der Schmierölfilter durch neue Filter ausgetauscht.

5.3.2 Durchführung des Dauerlaufes

Um die Effizienz und Zuverlässigkeit der Abgasnachbehandlungssysteme (bestehend aus DOC – DPF – SCR) für den Betrieb mit normgerechten Referenzkraftstoff und Biokraftstoffblends zu vergleichen, wurden drei Langzeittests über je 500 Stunden absolviert. Parallel zu diesen Motortests erfolgten systematische Schmierölanalysen (vgl. Tabelle 11) zur Bestimmung des Einflusses der Biokraftstoffblends auf die Ölalterung während des Motorbetriebs.

Für die Dauerlauffests wurde der Motor von Sonntag 16:00 Uhr bis Freitag 24:00 Uhr täglich 24 Stunden betrieben. Für die Schmierölprobenahme wurde der Dauerlauf kurzzeitig gestoppt. Der Fahrzyklus, welcher zum Einsatz kam, ist in Abbildung 12 dargestellt.

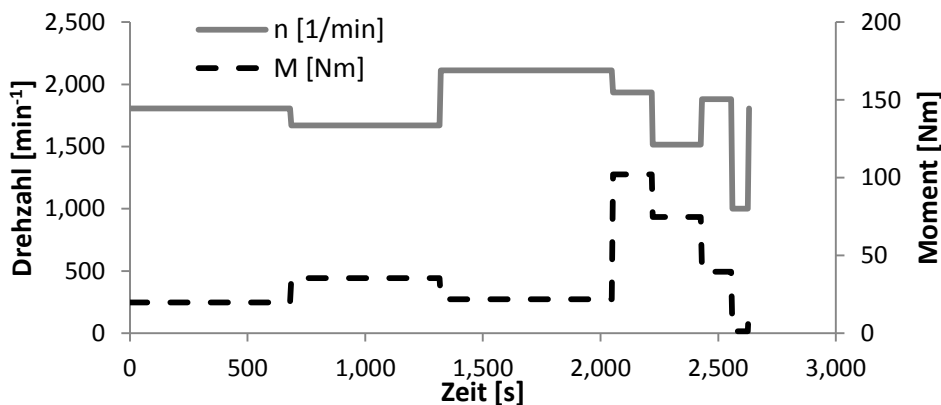


Abbildung 12: Drehzahl und Drehmoment des Dauerlauffahrzyklus.

Der Dauerlaufzyklus wurde in Anlehnung an den AMA-Zyklus erstellt. Die eingesetzten Kraftstoffblends sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Zusammensetzung der Kraftstoffe für die Dauerläufe

Dauerlauf	Kraftstoff
1	DK + 7 % FAME
2	DK + 30 % FAME
3	DK + 30 % HVO

Nach jedem Dauerlauf wurde ein Schmierölwechsel vorgenommen. Bei den Langzeituntersuchungen erfolgte die Partikelfilterregeneration automatisch nach dem im Motorsteuergerät hinterlegten Algorithmus. Es fand keine Zwangsregeneration durch den Prüfstandsingenieur statt.

6 Ergebnisse der Lagerstudie

6.1 Kraftstoffanalytik der Ausgangsstoffe

Um einen sicheren Motorbetrieb gewährleisten zu können, wurden im Vorfeld die Kraftstoffeigenschaften der entsprechenden Biokraftstoffblends ermittelt (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 5). Demnach erfüllen vier der sechs analysierten Proben vollständig die Anforderungen an die Norm DIN EN 590. Die Kraftstoffproben mit einem FAME-Anteil von 20 bzw. 30 % überschritten geringfügig den entsprechenden Grenzwert der Dichte bei 15 °C. Diese Abweichungen waren jedoch zu vernachlässigen, so dass ein bedenkenloser Einsatz der ausgewählten Biokraftstoffblends für die geplanten Motorversuche zu erwarten war.

6.1.1 Oberflächenspannung

Durch Kenntnis der Oberflächenspannung können wichtige Aussagen über das Einspritzverhalten eines Kraftstoffes getroffen werden. Eine kleine Oberflächenspannung führt zu einer besseren Zerstäubung des Kraftstoffes und somit zu einer optimalen Verbrennung. Um Informationen über das Verdampfungsverhalten der Kraftstoffproben in Abhängigkeit vom jeweiligen FAME- bzw. HVO-Anteil zu erhalten, erfolgte im Rahmen dieser Untersuchungen die Bestimmung der Oberflächenspannung von ausgewählten Proben mit dem Tensiometer TD1 (Firma Lauda) nach der Ring-Methode gemäß DIN EN 14210.

In der folgenden Abbildung 13 ist die Oberflächenspannung der DK-FAME-Blends in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Die Wiederholbarkeit der Methode betrug $0,2 \text{ mN m}^{-1}$.

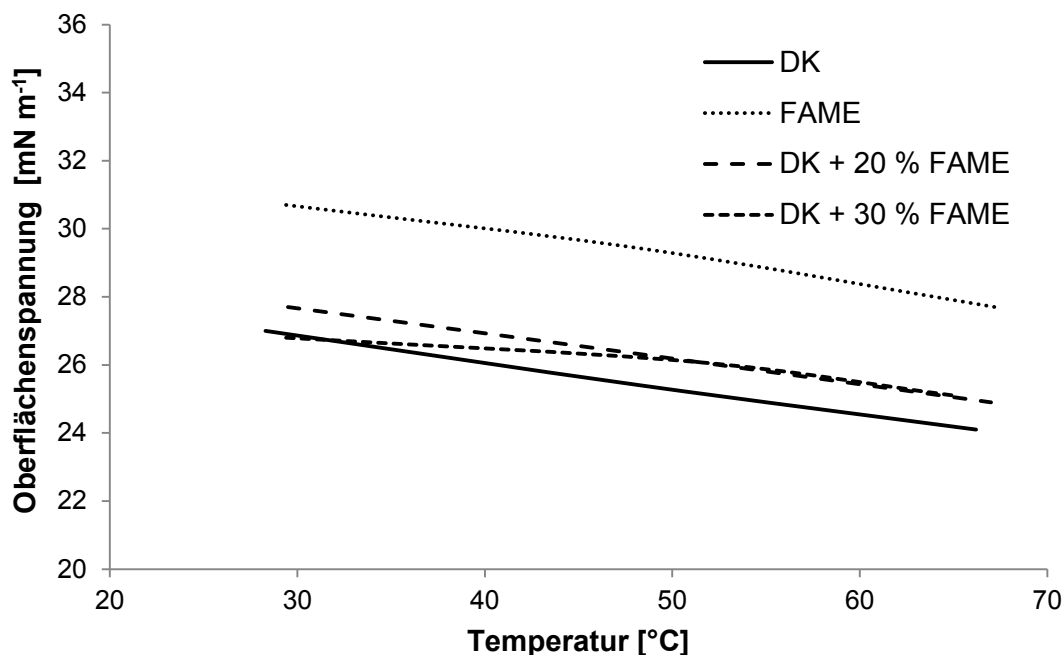


Abbildung 13: Oberflächenspannung der DK-FAME-Blends in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die Resultate bestätigen die Erwartungen, dass die Oberflächenspannung der Proben mit zunehmender Temperatur abnimmt. Weiterhin ist erkennbar, dass mit zunehmender Polarität eine Zunahme der Oberflächenspannung auftritt.

Demnach liegen die Messergebnisse des FAME aufgrund der Polarität im Molekül deutlich oberhalb der des reinen Dieseldiesels. Mit zunehmendem FAME-Gehalt im Dieseldiesels ist erwartungsgemäß ein Anstieg der Oberflächenspannung festzustellen. Im übertragenen Sinn auf das Verdampfungsverhalten bedeutet dies, dass die FAME-haltigen Kraftstoffe

vergleichsweise schlechter verdampfen als Dieseldieselkraftstoff. Die höhere Oberflächenspannung führt zu größeren Kraftstofftropfen im Brennraum, die aufgrund des kleinen Oberflächenverhältnisses von Luft und Kraftstoff schlechter verdampfen und damit unvollständiger verbrennen als kleinere Tröpfchen. Somit sind bei dem Einsatz von FAME-haltigen Blends im Vergleich zum Referenzdieseldieselkraftstoff Differenzen im Brennverhalten sowie höhere Abgasemissionen zu erwarten.

Die Resultate der Oberflächenspannung der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der HVO-Konzentration sind in der folgenden Abbildung 14 dargestellt.

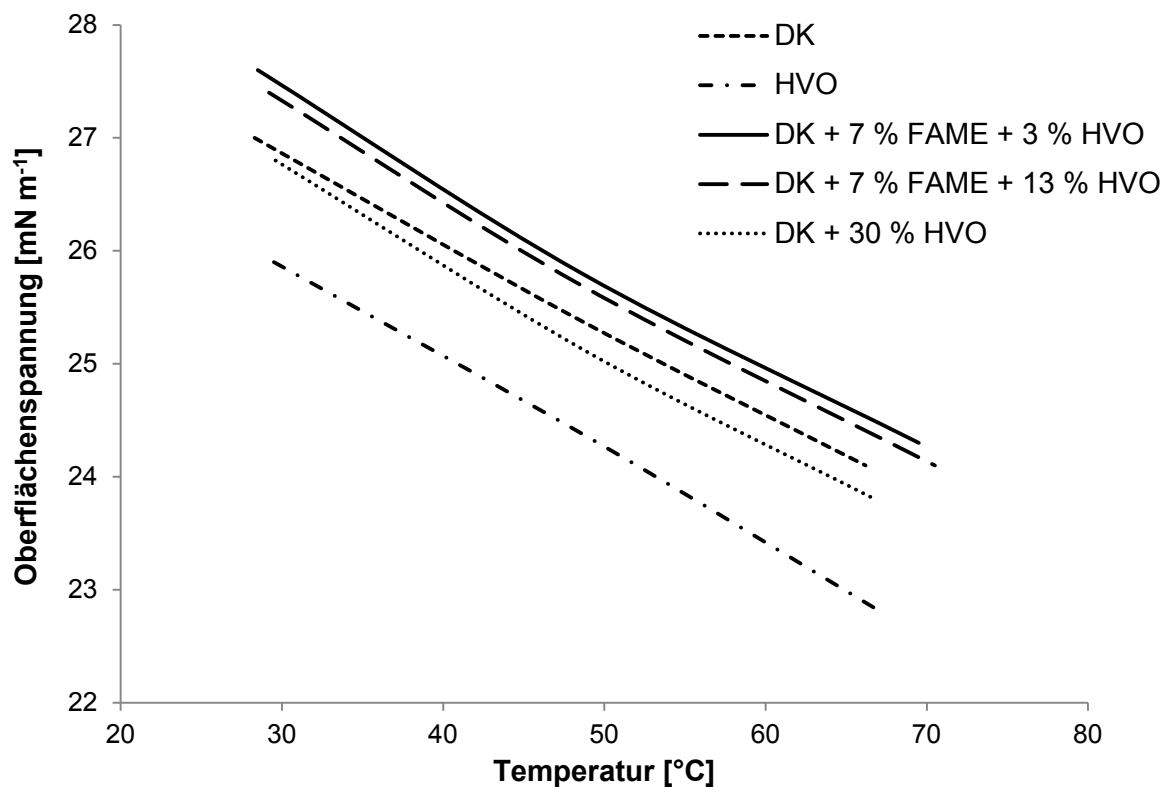


Abbildung 14: Oberflächenspannung der DK-HVO-Blends in Abhängigkeit von der Temperatur.

Aus den Kurvenverläufen wird ersichtlich, dass das reine HVO eine signifikant geringere Oberflächenspannung als Dieseldieselkraftstoff aufweist. Die Messergebnisse für die Kraftstoffprobe mit einem Anteil von 30 % HVO liegen in der gleichen Größenordnung wie die des Referenz-DK. Die Resultate der entsprechenden Biokraftstoffblends mit FAME sowie HVO liegen geringfügig über den Messwerten des Dieseldieselkraftstoffes, was auf die größere Oberflächenspannung des enthaltenen FAME zurückzuführen ist.

Schlussfolgernd ist festzustellen, dass reines HVO sowie die Probe mit einem HVO-Anteil von 30 % über ein besseres Verdampfungsverhalten im Brennraum verfügen. Die geringere Oberflächenspannung im Kraftstoff führt zu kleineren Tropfengrößen, wodurch ein großes Verhältnis zwischen der Kraftstoffoberfläche und -masse entsteht. Dies bewirkt eine bessere Verdampfung und Verbrennung, was schließlich geringere Abgasemissionen zur Folge hat.

6.1.2 Destillationscharakteristik

Zusätzliche Informationen über das Verdampfungs- sowie Kaltstartverhalten eines Kraftstoffes werden mithilfe des Destillationsverlaufs erhalten. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde die Siedecharakteristik der Kraftstoffe mit dem Destillationsautomat (ADU 4) der Fa. Petrotest gemäß DIN EN ISO 3405 erfasst. Hierbei erfolgt die Aufnahme der Siedekurve, d. h. die Ermittlung der Abhängigkeit des übergegangenen Volumens [%] von der entsprechenden Siedetemperatur [°C]. Für Kohlenwasserstoffe gilt im Allgemeinen, dass mit steigender Kettenlänge die Siedetemperatur zunimmt.

Die folgende Abbildung 15 enthält die Destillationsverläufe von Dieselkraftstoff, FAME sowie den entsprechenden DK-FAME-Blends.

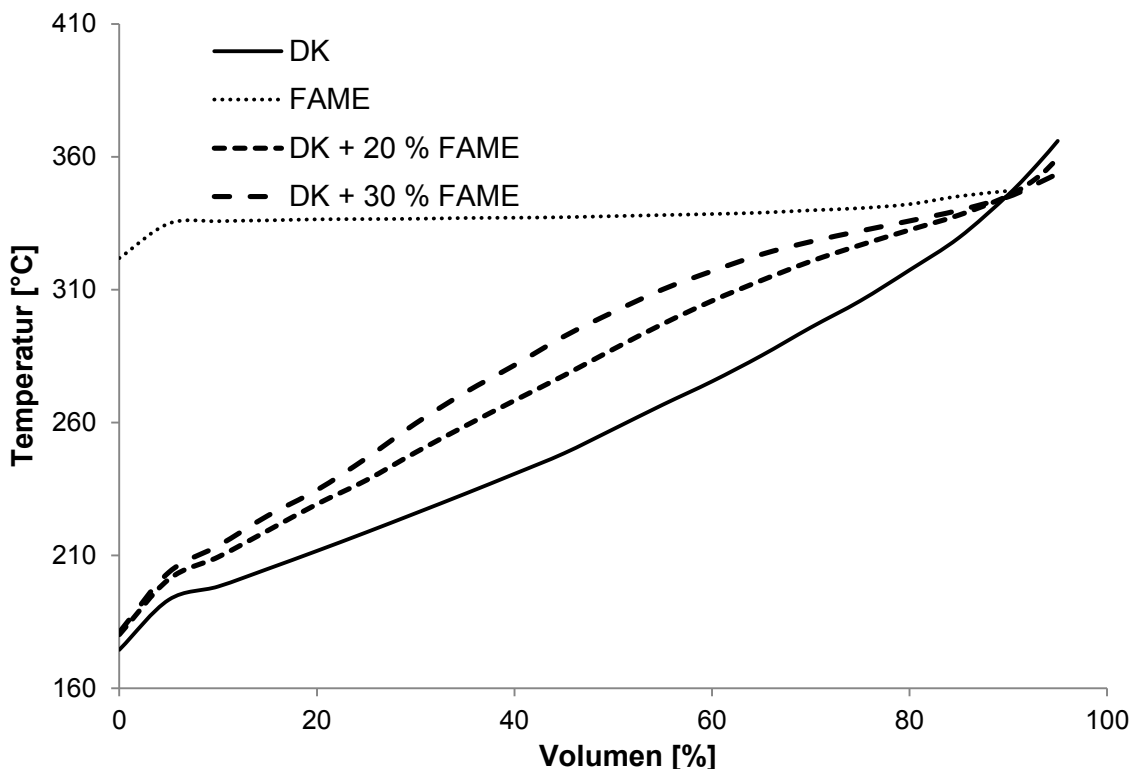


Abbildung 15: Destillationscharakteristik der DK-FAME-Blends.

Die dargestellten Resultate verdeutlichen den wesentlichen Unterschied zwischen FAME und mineralischem Dieselkraftstoff hinsichtlich ihrer Siedelage. Da es sich bei Dieselkraftstoff um ein Gemisch aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffen mit unterschiedlicher Kohlenstoffkettenlänge handelt, ist ein stetiger Anstieg in der Siedekurve zu verzeichnen. Hierbei erfolgt die Verdampfung der einzelnen Bestandteile entsprechend ihrer Kettenlänge bei der jeweiligen Siedetemperatur. Die Verdampfung des Dieselkraftstoffes beginnt bei ca. 170 °C.

Im Unterschied dazu hat der FAME-Kraftstoff einen anderen Siedeverlauf. So ist festzustellen, dass dessen homogene Zusammensetzung in einem sehr schmalen Siedebereich resultiert. Auffällig ist weiterhin der nach deutlich höheren Temperaturen (>310 °C) verschobene Siedebeginn. FAME weist somit ein schlechteres Verdampfungs- sowie Kaltstartverhalten im Vergleich zu Dieselkraftstoff auf.

Die Siedekurven der Biokraftstoffblends mit einem FAME-Anteil von 20 bzw. 30 % ähneln dem dieselkraftstoff-typischen Verlauf.

In der folgenden Abbildung 16 ist die Destillationscharakteristik von Dieselkraftstoff, HVO sowie der DK-HVO-Blends vergleichend dargestellt.

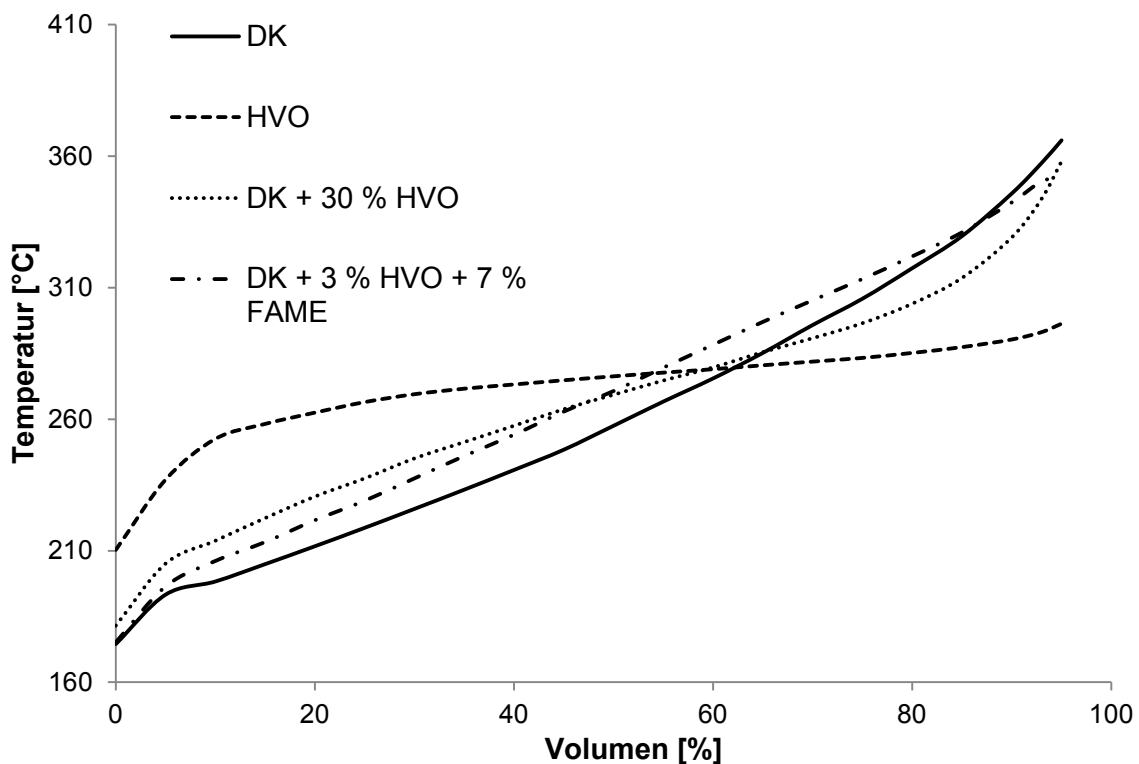


Abbildung 16: Destillationscharakteristik der DK-HVO-Blends.

Anhand der Kurvenverläufe ist erkennbar, dass HVO im Vergleich zu Dieselkraftstoff einen relativ schmalen Siedebereich (210 – 300 °C) aufweist. Der Siedebeginn des HVO liegt höher wohingegen das Siedeende niedriger liegt als beim Dieselkraftstoff. Das niedrigere Siedeende wirkt sich positiv auf das Verbrennungsverhalten auf. So ist die Gefahr der Schmierölverdünnung durch Kraftstoffanreicherung bei dem Einsatz von HVO geringer im Vergleich zu Dieselkraftstoff.

6.2 Lagerstabilität der Biokraftstoffblends

Zur Untersuchung der Langzeitstabilität wurden die Biokraftstoffblends insgesamt 517 Tage unter den in Vorfeld beschriebenen Bedingungen (vgl. Tabelle 6) gelagert und in definierten Abständen beprobt. Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der visuellen Beurteilung der bei 10 °C gelagerten Proben am Beginn ($t = 0$ d) sowie am Ende ($t = 517$ d) der Lagerstudie. Die Kennzeichnung „geringe Sedimente“ entspricht jeweils einer Gesamtverschmutzung von ≤ 8 mg/kg (Analysergebnis des Referenz-Dieselmotors).

Tabelle 13: Visuelle Beurteilung der bei 10 °C gelagerten Proben.

Kraftstoff	Ausgangsprobe (t=0 d)			Endprobe (t=517 d)
	Aussehen	Farbe	Sedimente	Bemerkung
DK	klar	gelb, leicht grün	gering	Weißer Schleier am Boden, sonst unverändert
DK + 20 % FAME	klar	gelb, hell bernsteinfarben	gering	Weißer Schleier am Boden, sonst unverändert
DK + 30 % FAME	klar	gelb, hell bernsteinfarben	gering	Schleier am Boden, sonst unverändert
DK + 30 % HVO	klar	gelb-grün	gering	Schleier am Boden, sonst unverändert
DK + 7 % FAME+ 3 % HVO	klar	gelb, leicht grünstichig	gering	Schleier am Boden, sonst unverändert
DK + 7 % FAME + 13 % HVO	klar	gelb, leicht grünstichig	gering	Schleier am Boden, sonst unverändert

Mithilfe der visuellen Beurteilung konnten keine wesentlichen Unterschiede nach einer 18-monatigen Lagerung bei 10 °C festgestellt werden. Ebenso traten bei den Proben, die bei durchschnittlich 25 °C gelagert wurden, keine signifikanten Änderungen im Aussehen auf.

Nachfolgend werden die Resultate der Analysenmethoden in Abhängigkeit von der Lager-temperatur und -dauer präsentiert.

6.2.1 Oxidationsstabilität

Die Oxidationsstabilität der Biokraftstoffblends wurde im Rahmen dieser Untersuchungen mit zwei verschiedenen Verfahren analysiert, die auf verschiedenen Messprinzipien beruhen.

Bei der modifizierten Rancimat-Methode nach DIN EN 15751 erfolgen die thermische Alterung der Proben bei 110 °C unter Luftzufuhr (10 l/h) und schließlich die Detektion der sekundären Oxidationsprodukte mithilfe einer kontinuierlichen Leitfähigkeitsmessung. Somit ist die Bildung leichtflüchtiger, elektrisch leitfähiger Komponenten zwingende Voraussetzung für diese Methode, die laut Norm lediglich für FAME und FAME-Mischungen mit Dieselkraftstoff geeignet ist. Demzufolge wurde für die Analyse des Referenz-Dieselmkraftstoffes sowie zusätzliche Untersuchungen der Biokraftstoffblends die sogenannte PetroOXY-Methode (ASTM D 7545 - EN 16091) eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird die Probe in einer Sauerstoffatmosphäre (7 bar) auf 140 °C erhitzt. Eintretende Oxidationsreaktionen führen zu einem Abfall des Druckes im System, der in einem direkten Zusammenhang mit der Oxidationsstabilität steht. Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Resultate der Methoden vorgestellt.

6.2.1.1 Rancimat-Methode

Als Kontrollprobe wurde in die Lagerstudie zusätzlich der reine FAME-Kraftstoff mit einbezogen. Es war davon auszugehen, dass bei dieser Probe am ehesten signifikante oxidative Veränderungen auftreten. Generell wurde festgestellt, dass der reine FAME die niedrigste und die Proben mit FAME- und HVO-Anteilen (DK+7 % FAME+3 % HVO, DK+7 % FAME + 13 % HVO) die größten Oxidationsstabilitäten aufwiesen.

Bei den Proben die bei durchschnittlich 25 °C gelagert wurden, waren bei der Vergleichsprobe 100 % FAME sowie den beiden Blends mit 20 % bzw. 30 % FAME signifikante Änderungen über der Lagerdauer festzustellen, wie aus der folgenden Abbildung 17 hervorgeht.

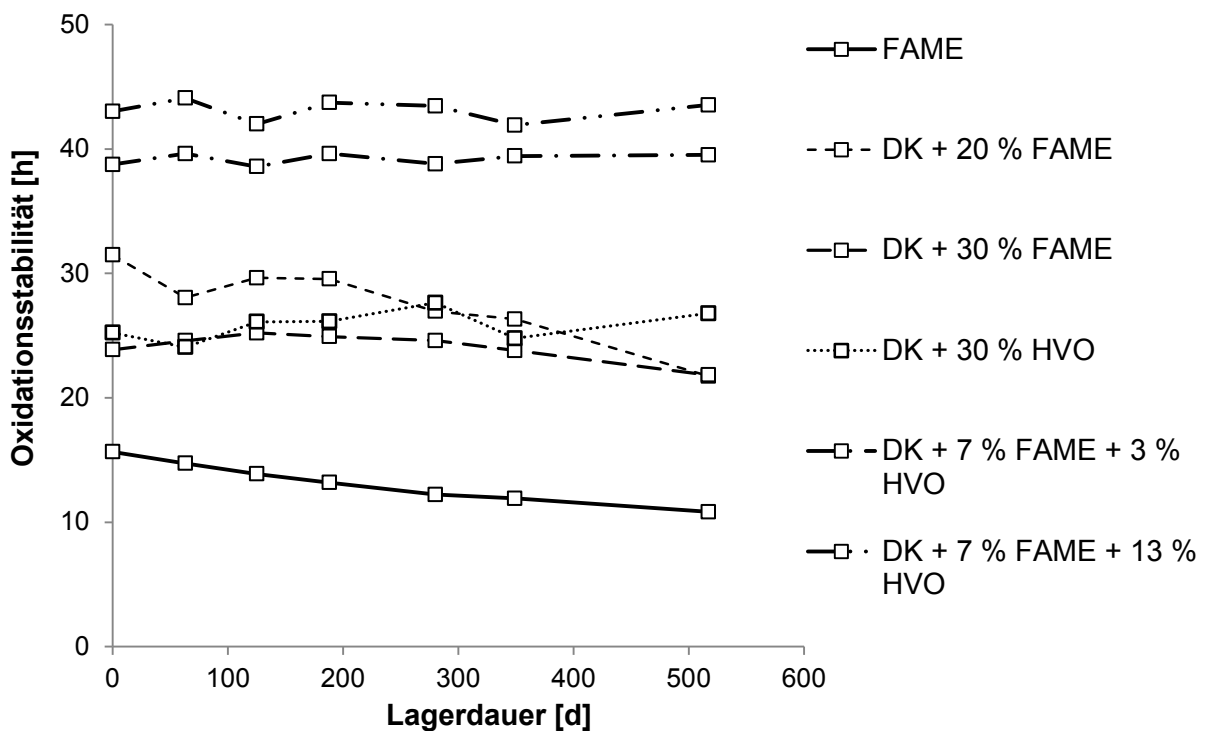


Abbildung 17: Oxidationsstabilität bei 110 °C (Rancimat) der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.

Die Oxidationsstabilität der Vergleichsprobe FAME sank von 15,7 h zu Beginn der Lagerstudie auf 10,8 h nach insgesamt 517 Tagen. Diese Resultate verdeutlichen, dass die modifizierte Rancimat-Methode generell für die Verfolgung der Oxidationsstabilität geeignet ist, die Änderungen bei den übrigen Biokraftstoffblends jedoch nicht signifikant waren.

In der folgenden Abbildung 18 sind die Oxidationsstabilitäten bei 110 °C der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C gezeigt.

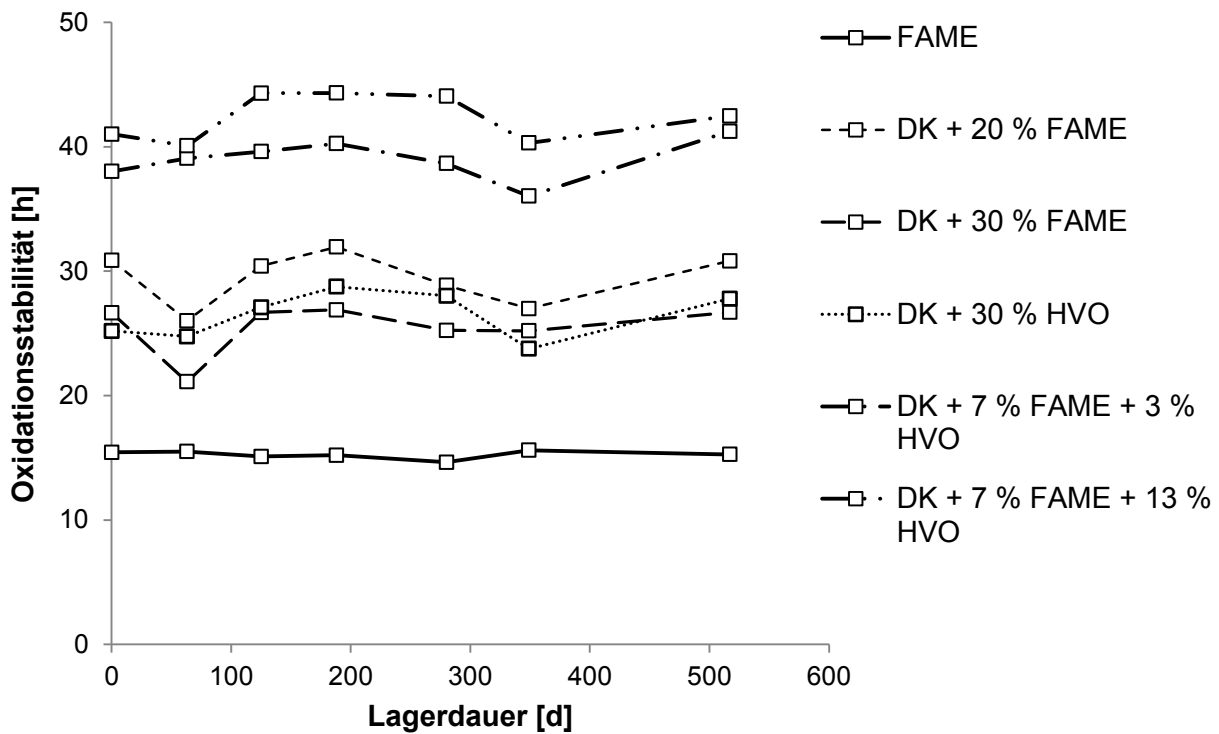


Abbildung 18: Oxidationsstabilität bei 110 °C (Rancimat) der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.

Bei Betrachtung der Kurvenverläufe wird ersichtlich, dass zwischen den Ausgangs- und Endoxidationsstabilitäten der untersuchten Biokraftstoffblends keine signifikanten Änderungen festzustellen waren. Die auftretenden Schwankungen lagen im Rahmen der Wiederholbarkeit $r = 0,22027 + 0,04344 \times$ des Verfahrens. Es wurde folglich keine Abhängigkeit der Oxidationsstabilität von der Lagerdauer bei 10 °C festgestellt.

6.2.1.2 PetroOXY

In der folgenden Abbildung 19 sind die Oxidationsstabilitäten bei 140 °C in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C dargestellt.

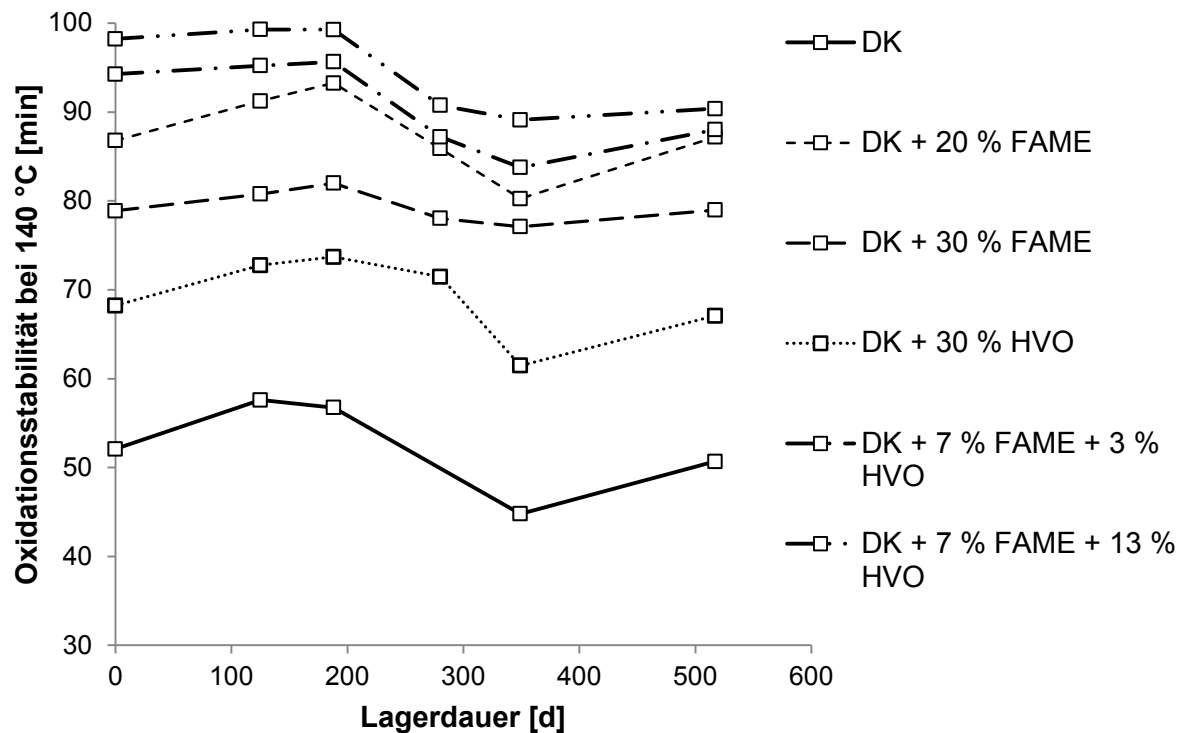


Abbildung 19: Oxidationsstabilität bei 140 °C (PetroOXY) der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.

Auffällig ist, dass der Dieselmotorkraftstoff über die gesamte Versuchsdauer die niedrigste Stabilität aufwies. Diese überraschende Tatsache konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht aufgeklärt werden. Erwartet wurde, dass der Referenz-Dieselmotorkraftstoff (B0) ohne FAME-Anteil eine höhere Oxidationsstabilität hat, da keine leicht oxidierbaren Bestandteile enthalten waren. Die FAME-haltigen Proben wiesen im Vergleich dazu eine höhere Stabilität auf, da sie im Vorfeld mit Antioxidantien stabilisiert worden sind.

Die höchste Oxidationsstabilität wurde bei der Probe DK+7%FAME+13%HVO gemessen. Weiterhin wurde festgestellt, dass bei allen Biokraftstoffblends keine signifikanten Änderungen in Abhängigkeit von der Lagerdauer auftraten, die Schwankungen der Analysenergebnisse lagen innerhalb der Wiederholbarkeit des Messverfahrens (6 %).

Der Verlauf der Oxidationsstabilitäten der Biokraftstoffproben, die bei 25 °C gelagert wurden, ist in Abbildung 20 dargestellt. Erwartungsgemäß ist ein Einfluss der erhöhten Lagertemperatur auf die resultierende Oxidationsstabilität erkennbar. So wurden bei allen Proben signifikante Änderungen festgestellt.

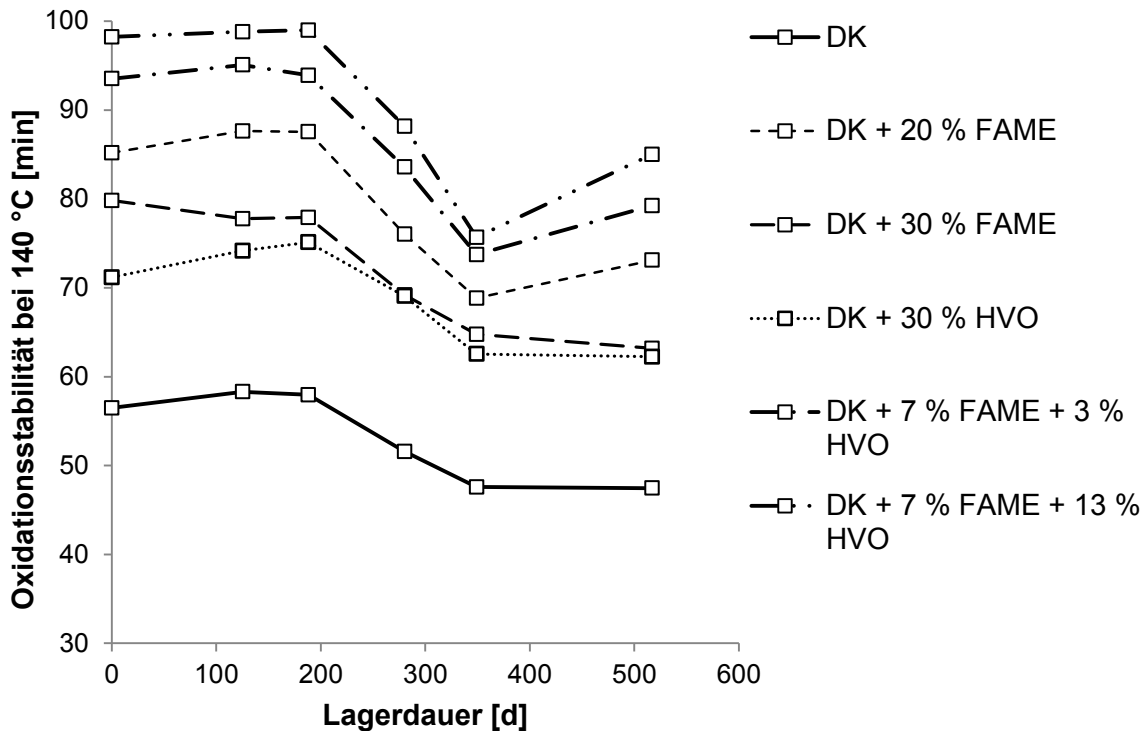


Abbildung 20: Oxidationsstabilität bei 140 °C (PetroOXY) der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.

Es konnte im Rahmen dieser Untersuchungen kein direkter Zusammenhang zwischen den beiden Methoden zur Bestimmung der Oxidationsstabilität gefunden werden. So wurden mit der PetroOXY-Methode signifikante Änderungen festgestellt, wohingegen die Rancimat-Resultate keine Abhängigkeit von der Lagerdauer aufzeigten. Dies liegt darin begründet, dass mithilfe der PetroOXY-Methode der Beginn des oxidativen Abbaus der Probe über den entsprechenden Druckabfall im System detektiert wird. Im Gegensatz dazu werden mit dem Rancimat-Messprinzip die sekundären Oxidationsprodukte erfasst, die erst am Ende der Induktionsperiode entstehen, also zu einem späteren Zeitpunkt der Alterung der Proben. Aufgrund der beiden unterschiedlichen Messprinzipien sind die Ergebnisse der beiden getesteten Verfahren nicht direkt miteinander vergleichbar.

6.2.2 Neutralisationszahl

Die Neutralisationszahl gibt Auskunft über den Gehalt der sauren Bestandteile einer Probe. Bei einem oxidativen Abbau von FAME entstehen beispielsweise freie Fettsäuren, die zu einer drastischen Minderung der Qualität führen. Eine hohe Neutralisationszahl deutet demzufolge auf eine Kraftstoffalterung hin. Im Folgenden werden die Biokraftstoffblends diskutiert, die bei 25 °C durchschnittlich gelagert wurden (vgl. Abbildung 21).

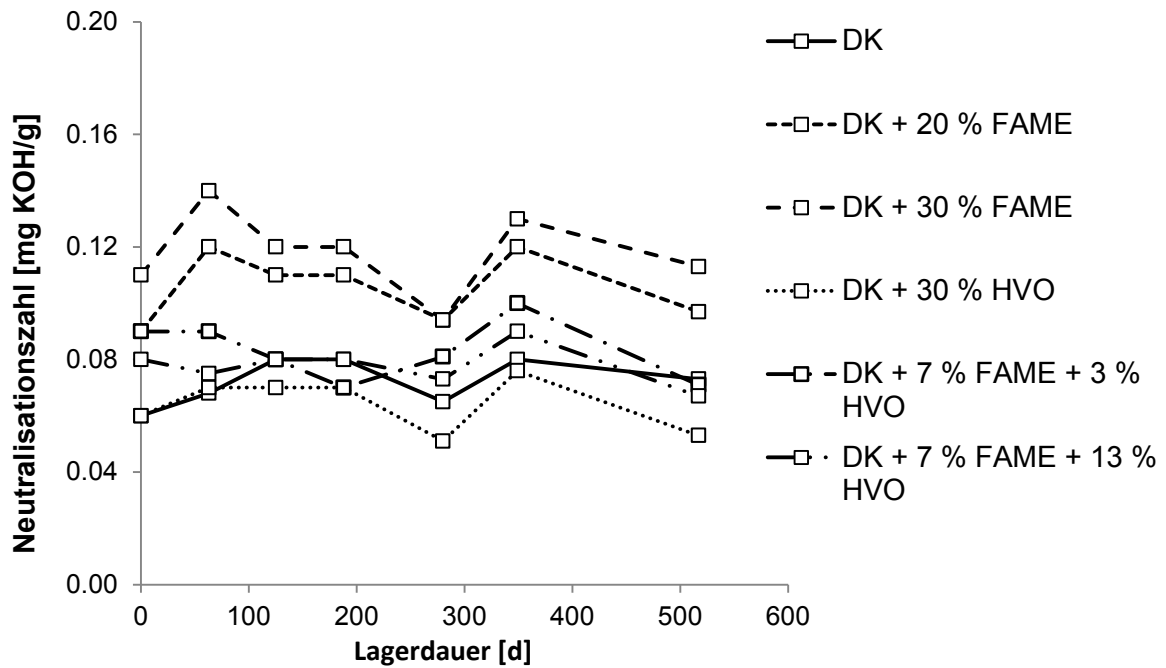


Abbildung 21: Neutralisationszahl der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.

Erwartungsgemäß wiesen die FAME-haltigen Kraftstoffe im Vergleich zu den anderen Biokraftstoffblends die höchsten Neutralisationszahlen auf. Je höher der FAME-Anteil in der Probe, desto größer waren die resultierenden Neutralisationszahlen. Die niedrigsten Messwerte wurden hingegen bei der Probe DK + 30 % HVO gemessen.

Die Proben, die bei 10 °C aufbewahrt wurden, zeigten einen sehr ähnlichen Verlauf (vgl. Abbildung 22).

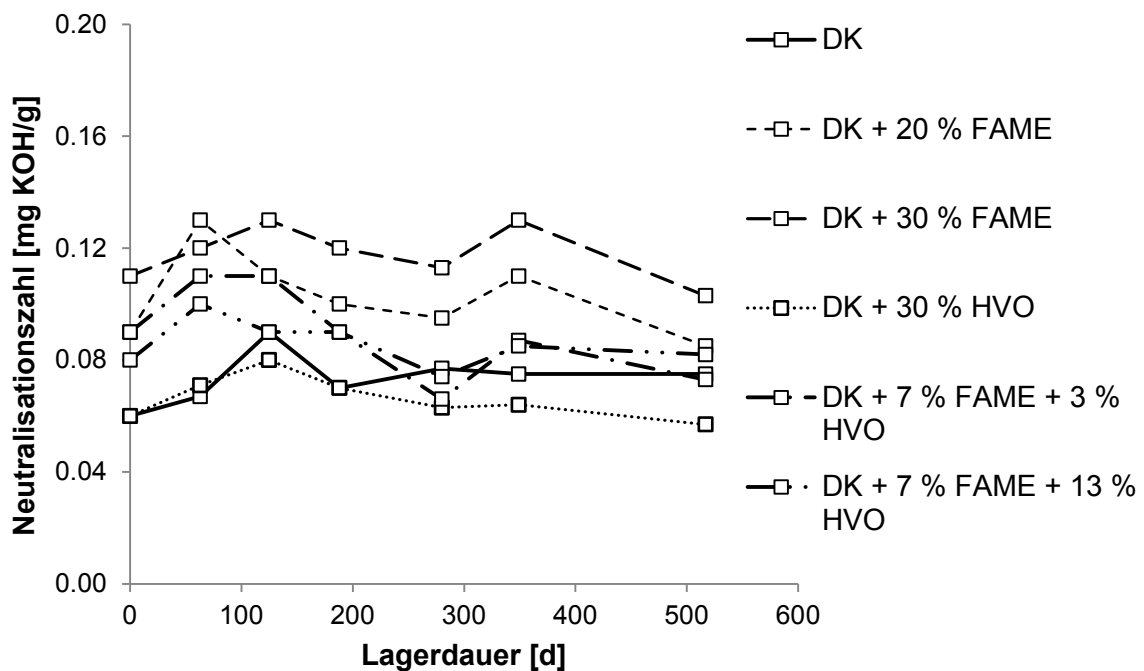


Abbildung 22: Neutralisationszahl der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.

Die Kurvenverläufe verdeutlichen, dass innerhalb des Untersuchungszeitraumes von 517 Tagen keine signifikanten Änderungen der Neutralisationszahlen in Abhängigkeit von der Lagerdauer bzw.-temperatur auftraten.

6.2.3 Viskosität

Die Bestimmung der kinematischen Viskosität erfolgte bei 40 °C gemäß ASTM D 7042. In der folgenden Abbildung 23 sind die Messwerte der einzelnen Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C dargestellt.

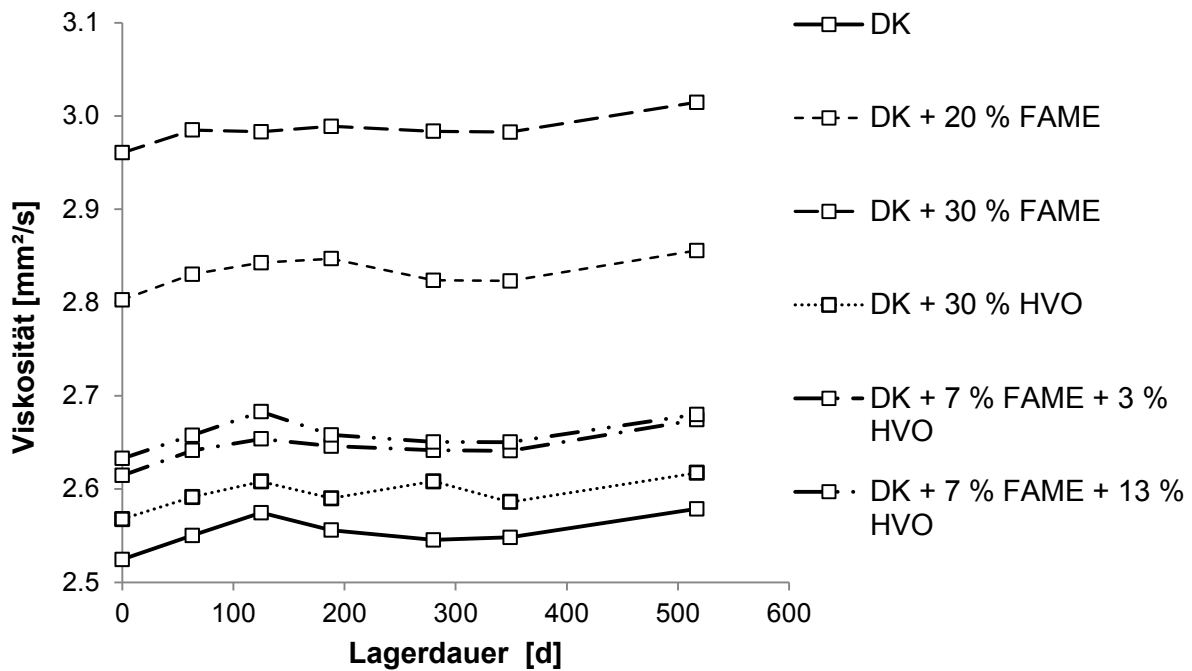


Abbildung 23: Kinematische Viskosität der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.

Die Viskositäten der Kraftstoffproben, die bei 10 °C gelagert wurden, zeigten einen sehr ähnlichen Verlauf (vgl. Abbildung 24). Über eine Lagerdauer von 17 Monaten wurden bei allen untersuchten Kraftstoffen keine signifikanten Veränderungen der Viskosität gemessen.

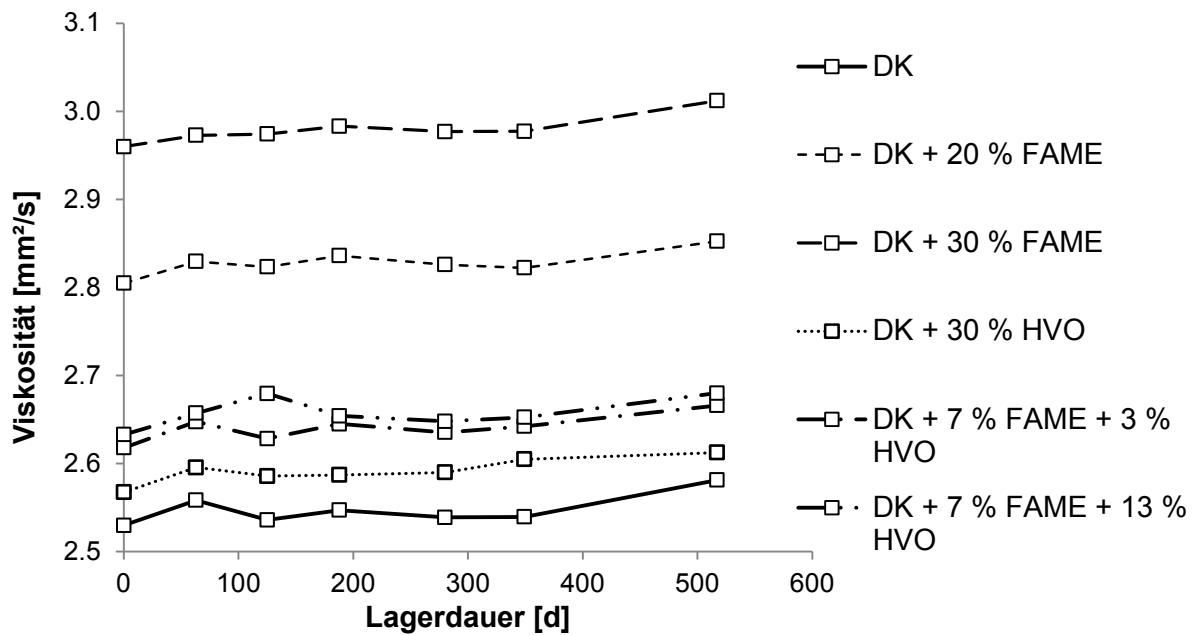


Abbildung 24: Viskosität der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.

6.2.4 Peroxidzahl

Die Peroxidzahl (nach DIN EN ISO 3960) ist ein weiteres Maß für die mögliche Verfolgung der oxidativen Alterung von Biokraftstoffen. Sie gibt die Menge Sauerstoff an, die chemisch als Peroxid bzw. Hydroperoxid gebunden ist. Während des oxidativen Abbaus der Biokomponenten (FAME) werden zunächst Hydroperoxide gebildet, die schließlich zu sekundären Oxidationsprodukten weiter reagieren, d. h. der Hydroperoxidgehalt sinkt bei fortschreitender Alterung wieder. Der Wert der Peroxidzahl ist somit stark anhängig von der zeitlichen Veränderung der Probe. Die folgende Abbildung 25 stellt die Peroxidzahl der Biokraftstoffblends, die bei 25 °C gelagert wurden, dar.

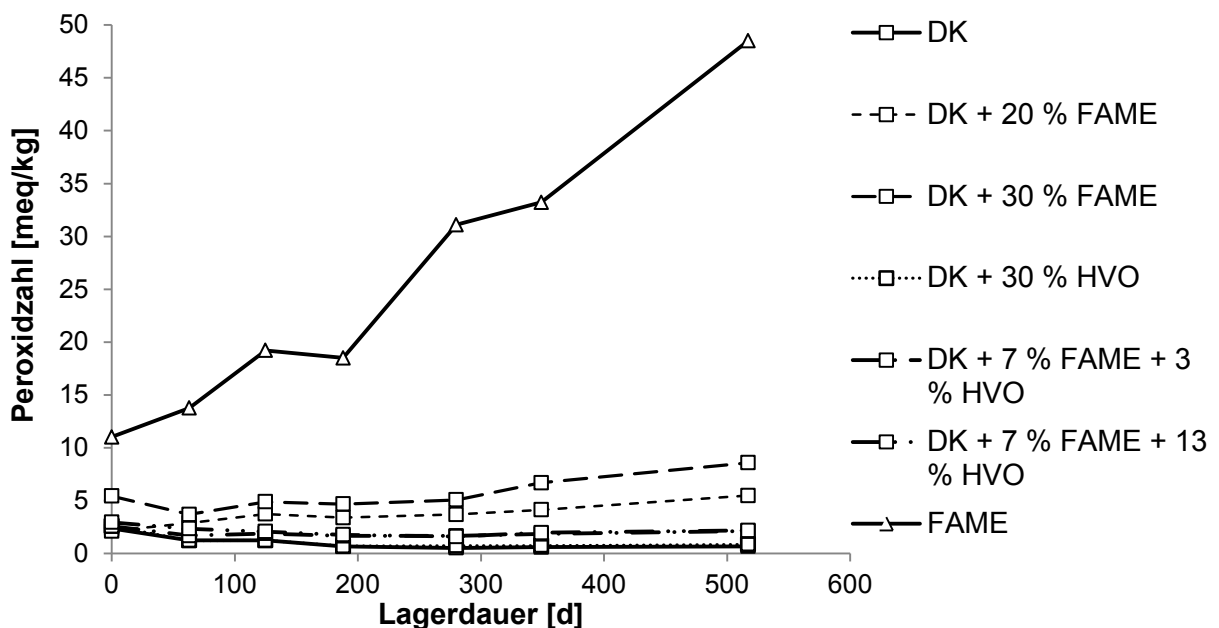


Abbildung 25: Peroxidzahl der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.

Die Resultate verdeutlichen, dass bei der Referenzprobe FAME ein starker Anstieg des Peroxidgehalts während der Lagerdauer bei 25 °C zu verzeichnen war. Die grundsätzliche Zweckmäßigkeit des Verfahrens konnte somit bestätigt werden. Es muss an dieser Stelle jedoch erwähnt werden, dass diese Methode deutliche Schwächen in der Endpunktbestimmung (visuell) sowie in der Reproduzierbarkeit aufweist. Die zuvor beschriebenen Methoden zur Bestimmung der Oxidationsstabilität (Rancimat, PetroOXY) sind für die Verfolgung einer oxidativen Alterung deutlich besser geeignet.

Bei den bei 10 °C gelagerten Biokraftstoffblends konnten in Abhängigkeit von der Lagerdauer erwartungsgemäß keine signifikanten Änderungen festgestellt werden, wie die in Abbildung 26 dargestellten Analysenergebnisse verdeutlichen.

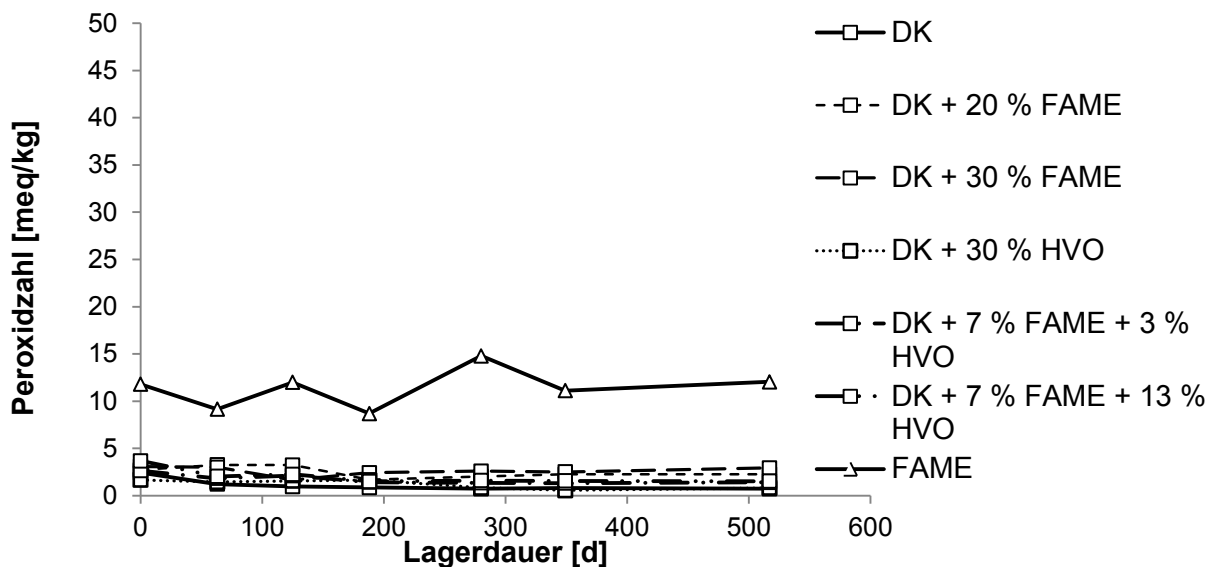


Abbildung 26: Peroxidzahl der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.

6.2.5 Polymergehalt

Ein weiteres Verfahren zur Beurteilung der Qualitätsminderung der Biokraftstoffblends ist die Bestimmung der polymerisierten Anteile, die durch den Alterung der Kraftstoffkomponenten entstehen. Mithilfe der Hochleistungs-Größenausschlusschromatographie (*engl.*: High-performance size-exclusion chromatography, *Abk.*: HPSEC) können in den Kraftstoffproben enthaltene Oligomere bzw. Polymere analysiert werden. Hierbei erfolgt die Auftrennung der einzelnen Probenbestandteile nach ihrer Molekülgröße durch Gelpermeationschromatographie. Die HPSEC-Messungen wurden an ausgewählten Proben nach E DIN EN ISO 16931 an einer Merck-Hitachi-Anlage mit einem Brechungsindexdetektor durchgeführt.

Da bei der Vergleichsprobe FAME am ehestens ein signifikanter Anstieg an oligomeren bzw. polymeren Bestandteile in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei erhöhter Temperatur zu erwarten war, sind in der folgenden Abbildung 27 die HPSEC-Elugramme der bei 25 °C gelagerten FAME-Probe zu Beginn und am Ende der Lagerstudie dargestellt.

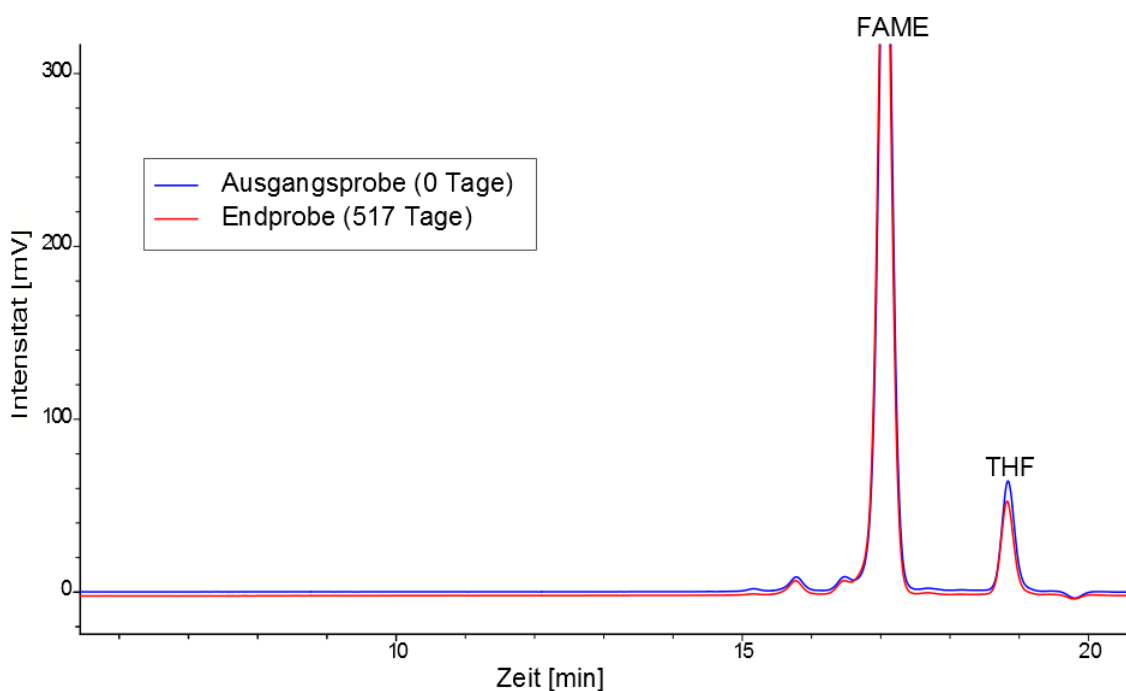


Abbildung 27: HPSEC-Analytik des FAME in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C

Bei der HPSEC-Analytik werden oligomere / polymere Bestandteile aufgrund der höheren Molekülmassen zuerst, d. h. bei kleineren Retentionszeiten (< 10 min) als die entsprechenden monomeren FAME-Komponenten detektiert.

Der o. a. Abbildung entsprechend wurden in der FAME-Probe, die 517 Tage bei durchschnittlich 25 °C gelagert wurde, keine oligomeren bzw. polymeren Bestandteile nachgewiesen. Zwar konnte anhand der sinkenden Oxidationsstabilität (vgl. Abbildung 17) der oxidative Abbau des FAME belegt werden, bei den entstehenden Oxidationsprodukten handelte es sich jedoch nicht um Polymerisationsprodukte.

Die folgende Abbildung 28 zeigt die Resultate der HPSEC-Analytik für die 25 °C gelagerten Dieselkraftstoff-Proben jeweils vor und am Ende der Lagerstudie.

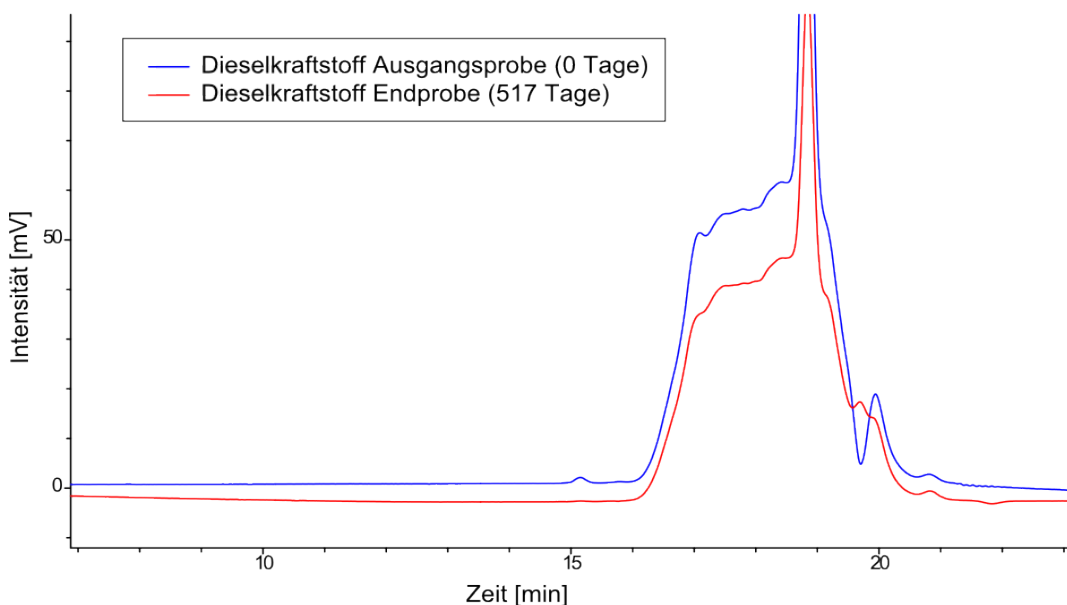


Abbildung 28: HPSEC-Analytik des Dieselkraftstoffes in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.

Anhand der hier dargestellten Elugramme wird deutlich, dass beide Proben lediglich den erwarteten Dieseldieselkraftstoffpeak (Retentionszeit: 16 min) bzw. das Signal des Eluenten (Tetrahydrofuran, Retentionszeit: 20 min) aufwiesen. Es wurden folglich keine größeren Strukturen bei Retentionszeiten <10 min detektiert. Dies bedeutet, dass innerhalb des Untersuchungszeitraums keine oligomeren bzw. polymeren Bestandteile in der Dieseldieselkraftstoffprobe gebildet wurden.

Das Resultat der HPSEC-Analytik des HVO-haltigen Kraftstoffes (DK + 30 % HVO) ist in der folgenden Abbildung 29 dargestellt.

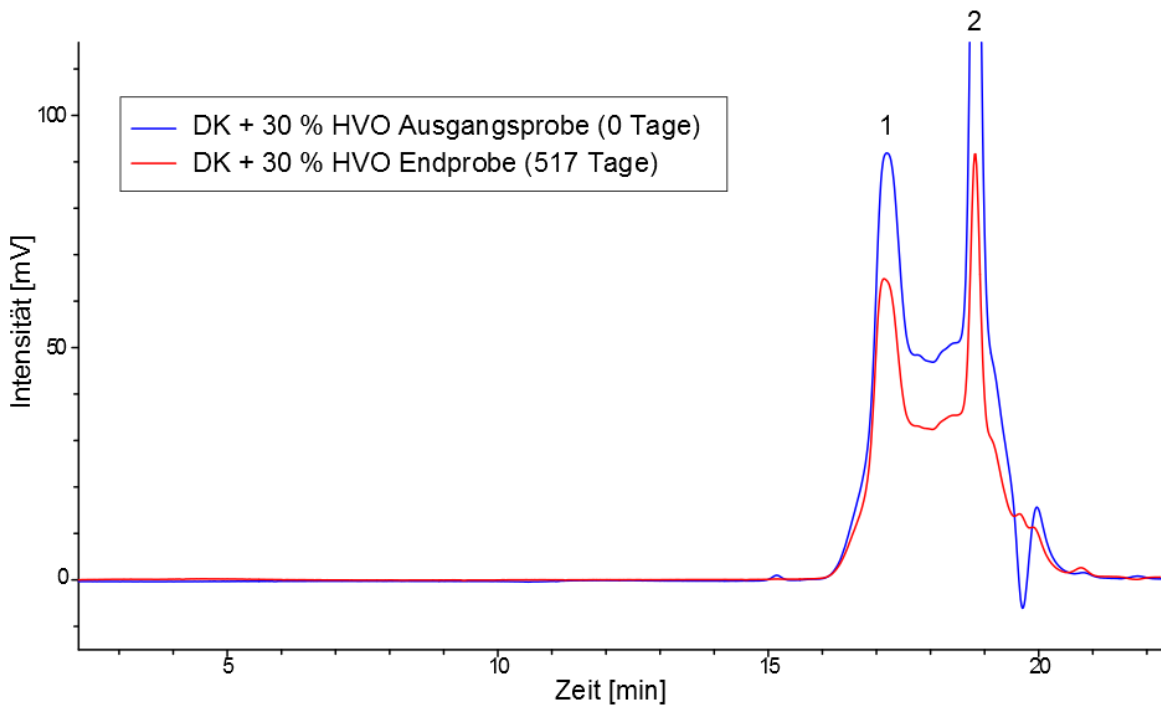


Abbildung 29: HPSEC-Analytik der Probe DK + 30 % HVO in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C

Die o. a. Elugramme verdeutlichen, dass sowohl bei der Ausgangs- als auch bei der Endprobe lediglich zwei Peaks für die beiden Hauptkomponenten HVO (Peak 1) und Dieseldieselkraftstoff (Peak 2) detektiert wurden. Es wurden keine oligomeren bzw. polymeren Bestandteile in der Probe nachgewiesen.

Mittels der HPSEC-Analyse konnten ebenso in den weiteren Biokraftstoffblends nach 18-monatiger Lagerung keine Polymere unabhängig von der Lagertemperatur nachgewiesen werden.

7 Ergebnisse der Motorkurzzeitversuche

Bei den Kurzzeitmessungen wurden unterschiedliche Kraftstoffblends an 30 Stützpunkten im Motorkennfeld untersucht (siehe Abbildung 10). Im Folgenden werden die Ergebnisse an repräsentativen Punkten dargestellt und diskutiert. Es wird auf einen Betriebspunkt ohne AGR mit hoher Motorlast bei $n = 3.500 \text{ min}^{-1}$, einen Punkt mit AGR bei $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und den Leerlaufpunkt eingegangen.

7.1 Einfluss der Kraftstoffblends auf das Motorsteuergerät

Die Regelung des Drehmomentes des Versuchsmotors auf das geforderte Drehmoment erfolgte durch Anpassung der E-Gasstellung über die Prüfstandssteuerung. Auf diese Weise wurde in den Versuchen auf die unterschiedlichen Heizwerte der Kraftstoffe reagiert. Ein direkter Zugriff auf die Bestromungszeiten der Injektoren war nicht möglich. Mit der Änderung der äußeren Größe „E-Gasstellung“ wurde die Steuergerätegröße „Einspritzmenge“ verändert, dies bedeutet, in den Versuchsreihen wurde für jeden Kraftstoff eine andere Einspritzmenge vorgegeben. Da die Steuergerätegröße „Einspritzmenge“ in vielen Motorkennfeldern als Führungsgröße genutzt wird, konnten bei unterschiedlichen Kraftstoffen geringfügige Veränderungen der Betriebspunkte in den Kennfeldern des Motorsteuergerätes festgestellt werden.

Im Folgenden werden exemplarisch Daten bei einer konstanten Drehzahl von 2.000 min^{-1} dargestellt.

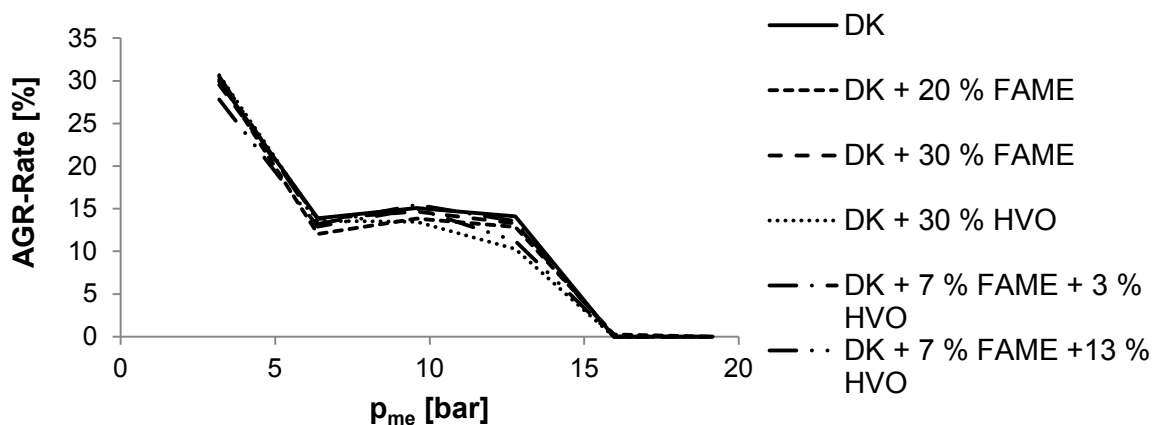


Abbildung 30: AGR bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$.

In Abbildung 30 ist die Abgasrückführrate (AGR) mit über dem effektiven Mitteldruck bei konstanter Drehzahl von 2.000 min^{-1} abgebildet. Der Sollwert der AGR ist eine Funktion der Führungsgröße „Einspritzmenge“, die wie oben erläutert kraftstoffabhängig ist. Die damit verbundene durchschnittliche Abweichung der AGR der Blend-Kraftstoffe zum Referenz-DK lag bei 3,9 %. Im Mittel zeigte sich, dass die Kraftstoffe DK + 30 % HVO und DK + 7 % FAME + 13 % HVO eine Abnahme der AGR von 6,2 %, bzw. von 5,8 % bewirkten.

Wie schon erwähnt, ist die AGR ein Verfahren zur Reduzierung der NO_x -Emissionen. Der Hauptteil der NO_x -Emissionen wird durch das thermische NO_x gebildet. Mittels der AGR wird generell der O_2 -Anteil im Brennraum reduziert. Dies hat eine Verlangsamung der Flammenausbreitung, eine Erhöhung der Brenndauer und damit geringere Spitzendrücke und -temperaturen zur Folge. Weitere Aspekte sind der Inertgas- oder Verdünnungseffekt und höheren spezifischen Wärmekapazitäten vom Wasser und Kohlenstoffdioxid. Der Regelbereich der AGR ist in Abbildung 31 zu sehen.

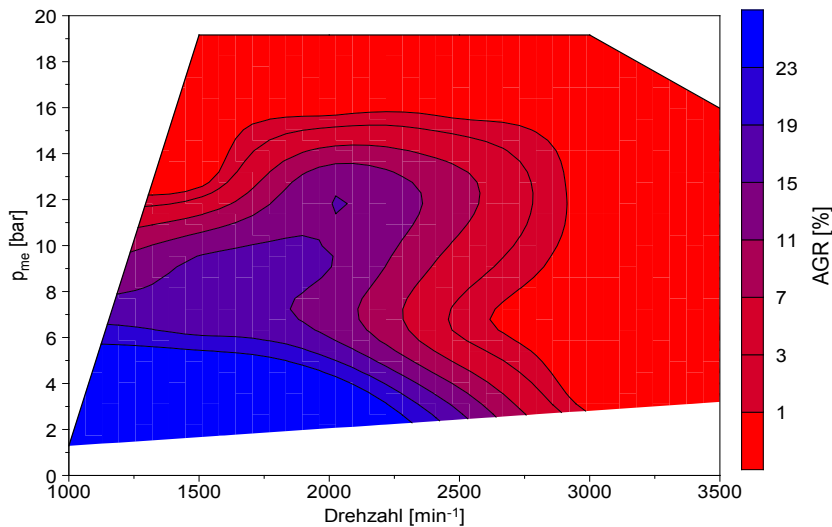


Abbildung 31: AGR im Motorkennfeld bei Betrieb mit Dieselkraftstoff.

Es ist zu erkennen, dass sich der AGR - Bereich in einem Drehzahlfenster von Leerlauf bis ca. 2.500 min^{-1} und in einem Lastbereich von 0 bis ca. 14 bar p_{me} erstreckt.

Durch den Einfluss der leicht unterschiedlichen AGR-Raten findet eine Verschiebung der Lambda-Werte um ca. 2 % nach oben statt. Das liegt darin begründet, dass der Anteil des Inertgases durch die Ansaugluft ersetzt wird. Abbildung 32 enthält die Lambda-Werte in Abhängigkeit von der Leistung. Es ist gut zu erkennen, dass die Lambda-Werte mit steigender Last bis zum Ausschalten der AGR bei $p_{me} = 12,6 \text{ bar}$ sinken. Im Betriebspunkt ohne AGR bei $p_{me} = 15,9 \text{ bar}$ steigen die Lambda-Werte wieder an und fallen danach erwartungsgemäß mit zunehmender Last.

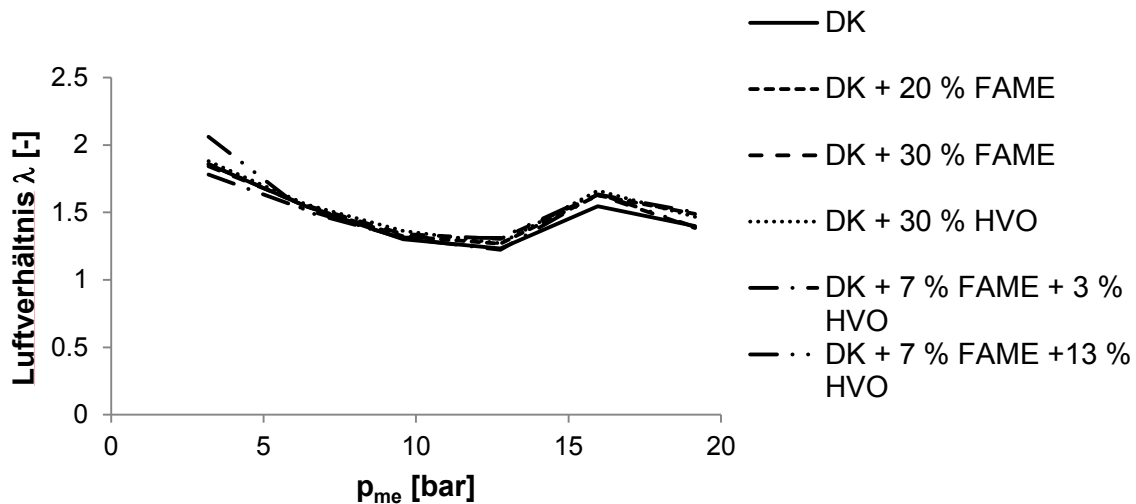


Abbildung 32: Luftverhältnis λ bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$.

7.2 Einfluss der Kraftstoffblends auf das Brennverhalten

Die direkte Wirkung der Kraftstoffeigenschaften auf das Brennverhalten ist nur im Betriebsbereich ohne AGR (Hochlastbereich) zu detektieren, da der vielschichtige Einfluss (Ladeluftdruck; AGR; AGR-Temperatur; VTG) des Steuergerätes im Teillastbereich den Kraftstoffeinfluss deutlich überlagert.

In Abbildung 33 sind der Brennraumdruck und der Brennverlauf im Betriebspunkt $n = 3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 9,6 \text{ bar}$ dargestellt.

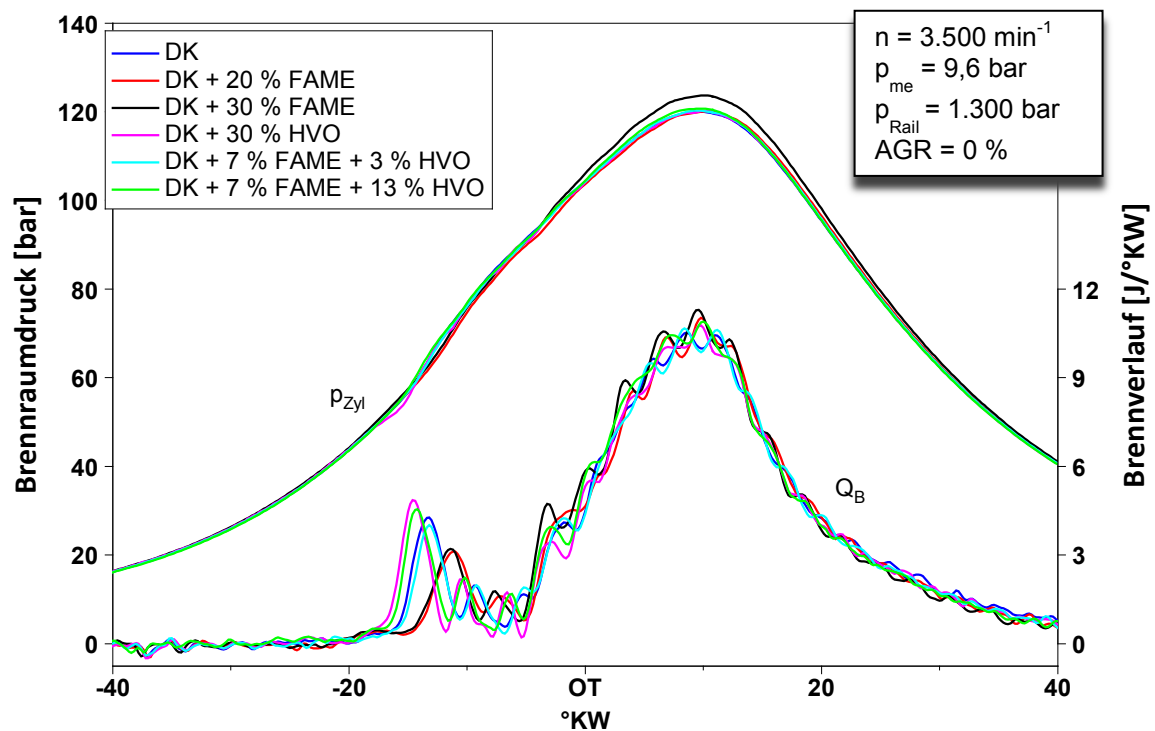


Abbildung 33: Brennraumdruck und Brennverlauf bei $n=3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me}=9,6 \text{ bar}$.

In diesem Betriebspunkt ist eine ausgeprägte Vorverbrennung (Pilotverbrennung) zu sehen, die aus der Voreinspritzung resultiert. Die Untersuchungen haben bestätigt, dass die Vorverbrennung stabilisierend auf die Hauptverbrennung für alle sechs untersuchten Kraftstoffe wirkt.

Am Verlauf der Vorverbrennung (Abbildung 34) wird der Kraftstoffeinfluss deutlich sichtbar. Es ist ein frühes Zünden und Verbrennen der Kraftstoffe mit HVO-Anteilen zu sehen. Das optimale Verdampfungsverhalten infolge der Kohlenwasserstoffkettenlänge des im Kraftstoff enthaltenen HVO-Anteils fördert erkennbar die Verbrennung. Aus der Lage der Vorverbrennung wird ersichtlich, dass diese Kraftstoffe einen geringeren Zündverzug aufweisen (vgl. Abbildung 35). Ihre hohe Cetanzahl und ihre niedrige Verdampfungstemperatur garantieren das frühe Entzünden des Kraftstoff-Luft-Gemisches.

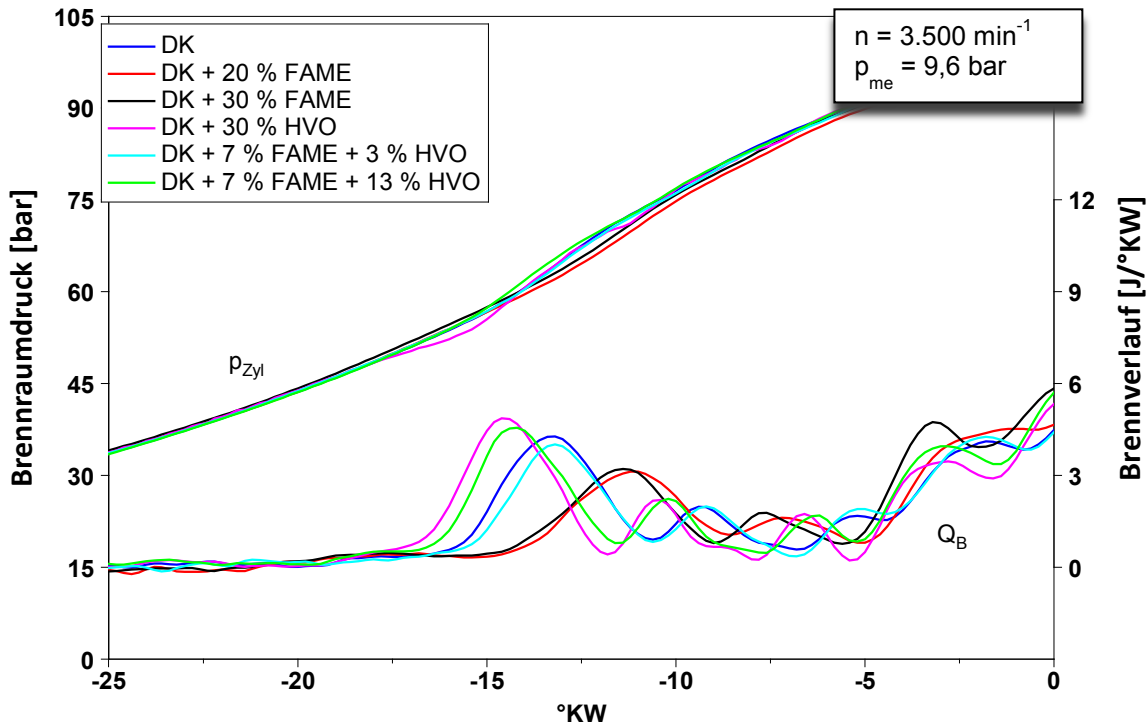


Abbildung 34: Brennverlauf der Vorverbrennung bei $n=3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me}=9,6 \text{ bar}$.

Eindeutig erkennbar ist auch die Reihenfolge in der die Kraftstoffe mit der Vorverbrennung beginnen. Die Vorverbrennung von DK mit 30% HVO und DK mit 13% HVO läuft vorzeitiger und unter höherer Energiefreisetzung ab. Gefolgt vom Referenz-DK setzt sich die Abfolge des Brennbeginns in Richtung der Blends mit geringeren Cetanzahlen und Heizwerten fort.

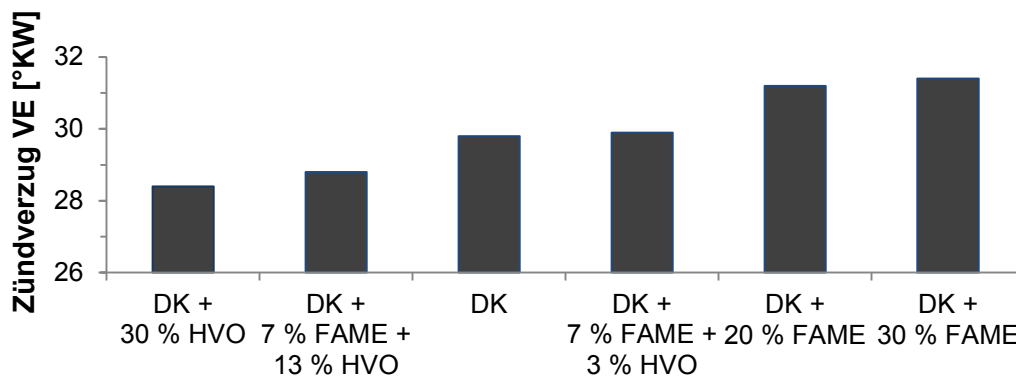


Abbildung 35: Zündverzug in Abhängigkeit der Kraftstoffe bei $n=3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me}=9,6 \text{ bar}$.

Hier wird sichtbar, dass steigende FAME-Anteile die Kraftstoffqualität mindern und die Verbrennung geringfügig nachteilig beeinflussen. Der verspätete Brennbeginn der Vorverbrennung wird von einer eingeschränkten Energiefreisetzung begleitet.

Die Verschiebung der Vorverbrennung nach spät mit einer deutlichen Reduzierung der Brenngeschwindigkeit (siehe Abbildung 36) könnte ein Grund für die sinkenden NO_x -Emissionen sein. Der Brennbeginn und die Brenngeschwindigkeit der Hauptverbrennung sind für alle sechs Kraftstoffe im Rahmen der Messgenauigkeit identisch.

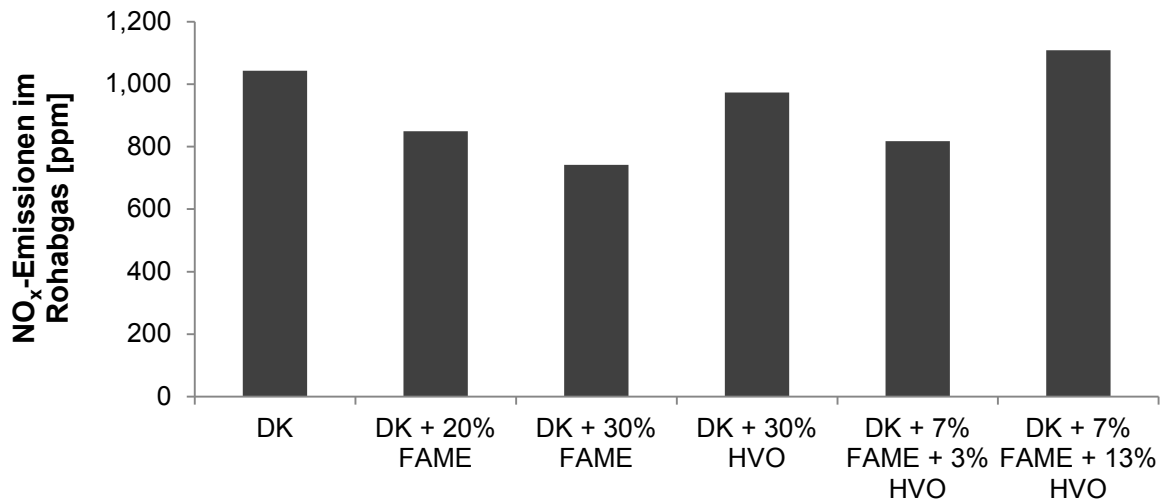


Abbildung 36: NO_x-Emissionen im Rohabgas bei $n = 3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 9,6 \text{ bar}$.

Im Kleinlastbereich (Leerlauf) ist kein Einfluss der unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften festzustellen, da durch die Brennverfahrensentwicklung des EURO-VI-Motors hohe Prozess-temperaturen vorliegen.

Im klassischen Dieselmotor liegen im Leerlaufbereich die Verbrennungsluftverhältnisse deutlich über 4. Bei diesem Verbrennungskonzept (EURO-VI) wird durch den Einsatz einer ungekühlten AGR-Rate von 40 % das Verbrennungsluftverhältnis auf ca. 2,3 reduziert. Dies beinhaltet immer noch eine ausreichende Sauerstoffkonzentration zur Bildung geringer Schwärzungszahlen, führt aber zu einem deutlichen Anstieg der Arbeitsgastemperaturen und damit zu höheren Kompressionstemperaturen. Folglich liegen sehr gute Zündbedingungen vor, die eine schnelle Zündung unabhängig vom Kraftstoff ermöglichen (siehe Abbildung 37). Gleichzeitig kommt es zu einer Anhebung der Abgastemperatur (geringerer Abgasmassenstrom zum Beispiel gegenüber EURO-IV-Applikationen); so kann eine verbesserte Funktion von DOC und SCR gewährleistet werden.

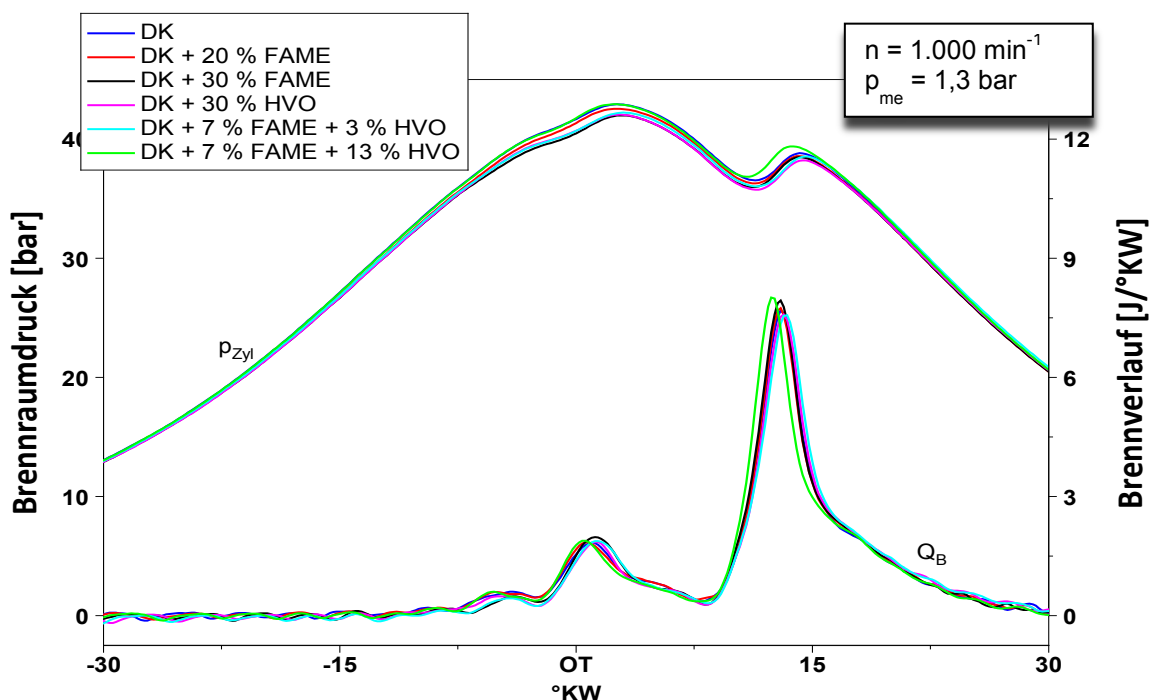


Abbildung 37: Brennraumdruck und Brennverlauf bei $n=1.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me}=1,3 \text{ bar}$.

In Abbildung 38 sind der Brennraumdruck und Brennverlauf bei einer Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und einem effektiven Druck $p_{me} = 9,6 \text{ bar}$ abgebildet.

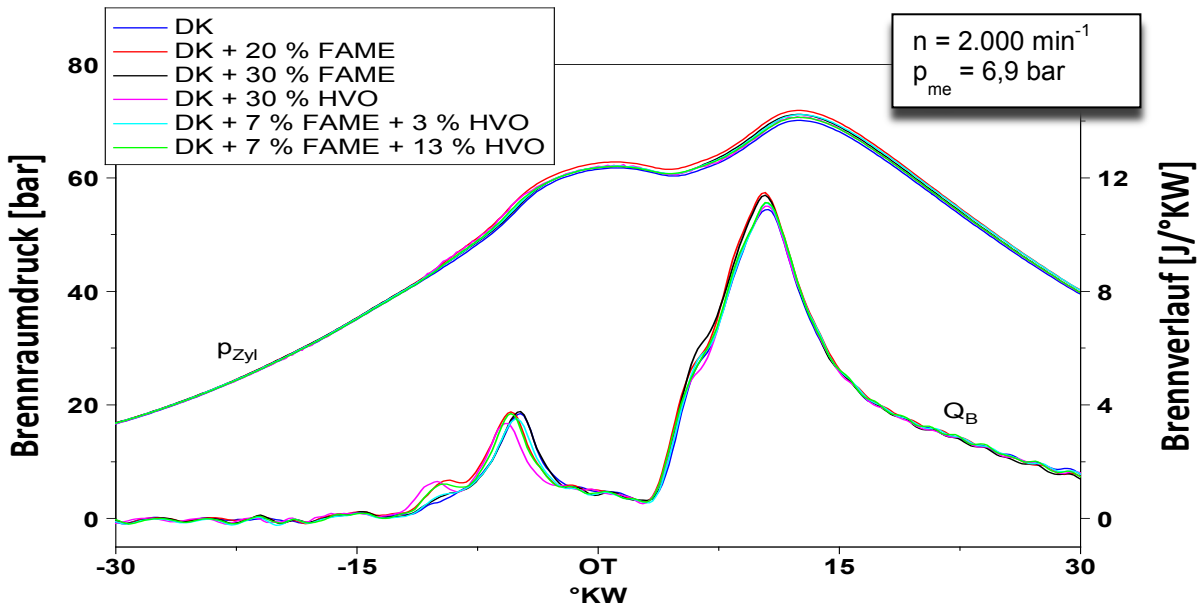


Abbildung 38: Brennraumdruck und Brennverlauf bei $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 6,9 \text{ bar}$.

In diesem Betriebspunkt bestätigt sich ebenfalls, dass die Vorverbrennung stabilisierend auf die Hauptverbrennung wirkt. Dennoch ist zu bemerken, dass sich die Kraftstoffeigenschaften im Teillastbereich kaum auf den Brennverlauf auswirken, da hier die Stellmöglichkeiten der Motorsteuerung (AGR und VTG-Steller) im Vergleich dazu einen größeren Einfluss haben.

7.3 Einfluss der Kraftstoffblends auf das Emissionsverhalten

Die AGR nimmt einen direkten Einfluss auf die Stickoxidemissionsbildung, wie in der folgenden Abbildung 39 ist deutlich anhand der Zweiteilung des Kennfeldes zu erkennen ist. In dem PKW-typischen Bereich des Motorbetriebs erfolgt durch innermotorische Maßnahme der AGR eine Reduzierung der Stickoxide. Im Bereich hoher Lasten, welche im realen Motorbetrieb selten genutzt werden, erfolgt keine NO_x -Reduzierung durch die AGR.

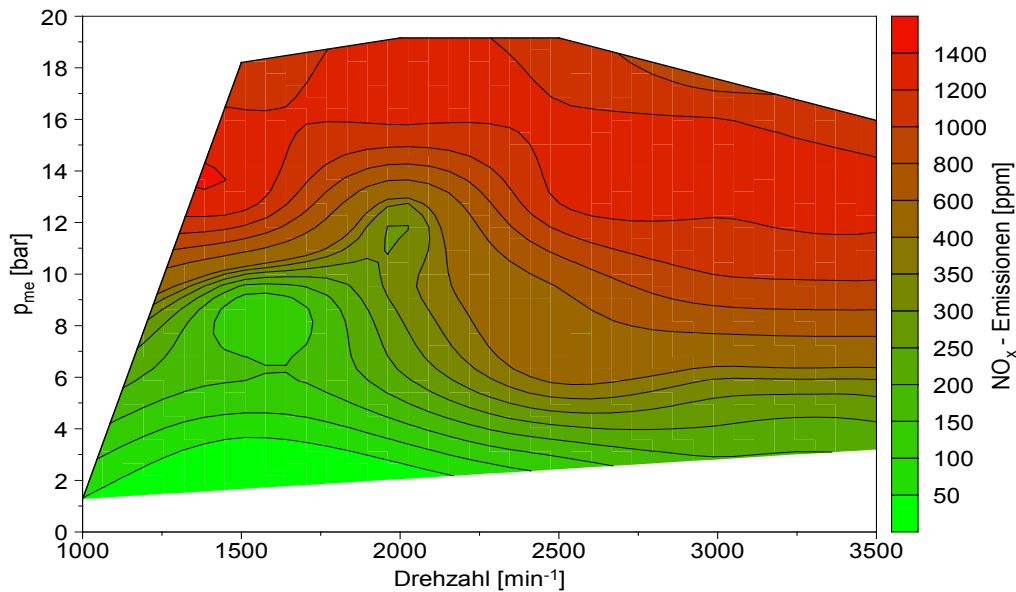


Abbildung 39: NO_x-Emissionen im Kennfeld für Dieselkraftstoff.

In Abbildung 40 ist zu sehen, dass die NO_x-Emissionen im AGR geregelten Bereich ($3,3 < p_{me} < 12,6$) auf sehr geringem Niveau sind. Nachdem die AGR abgeschaltet ist, steigen die NO_x-Emissionen auf Werte von über 1.200 ppm an.

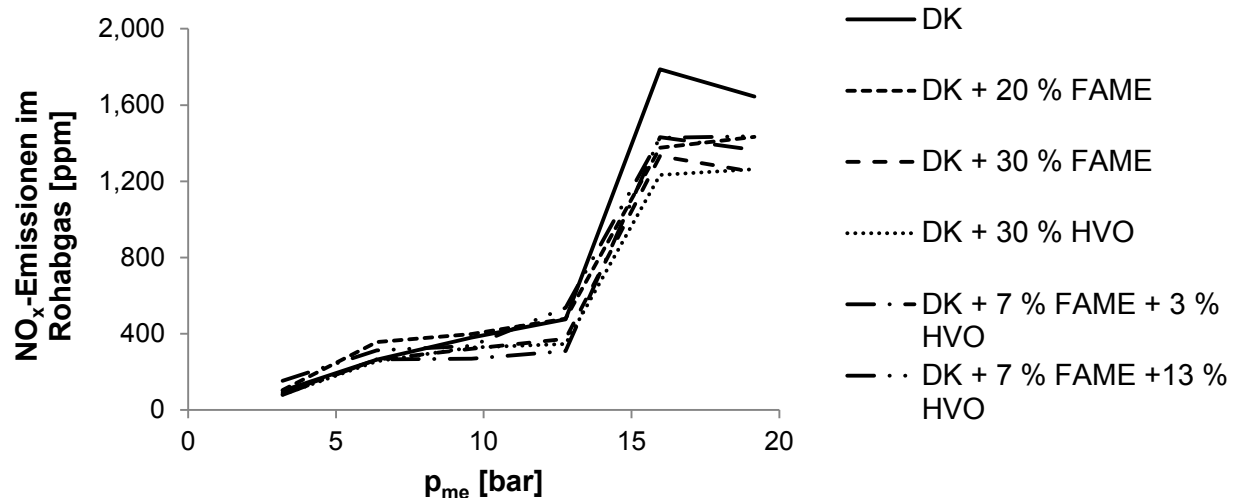


Abbildung 40: NO_x-Emissionen im Rohabgas bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n=2.000 \text{ min}^{-1}$.

Es ist zu verzeichnen, dass das Abgasnachbehandlungssystem (SCR) zur NO_x-Konvertierung im Abgastest-relevanten Bereich mit Werten von über 90 % sehr effektiv arbeitet (siehe Abbildung 41) und die Schwankungen in den Rohemissionen kompensiert. Die Blend-Kraftstoffe führten zu keiner Erhöhung der Motoremissionen im zulassungsrelevanten Bereich (nach Abgasnachbehandlungssystem). Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die NO_x-Konvertierung im oberen Lastbereich über 45 % lag.

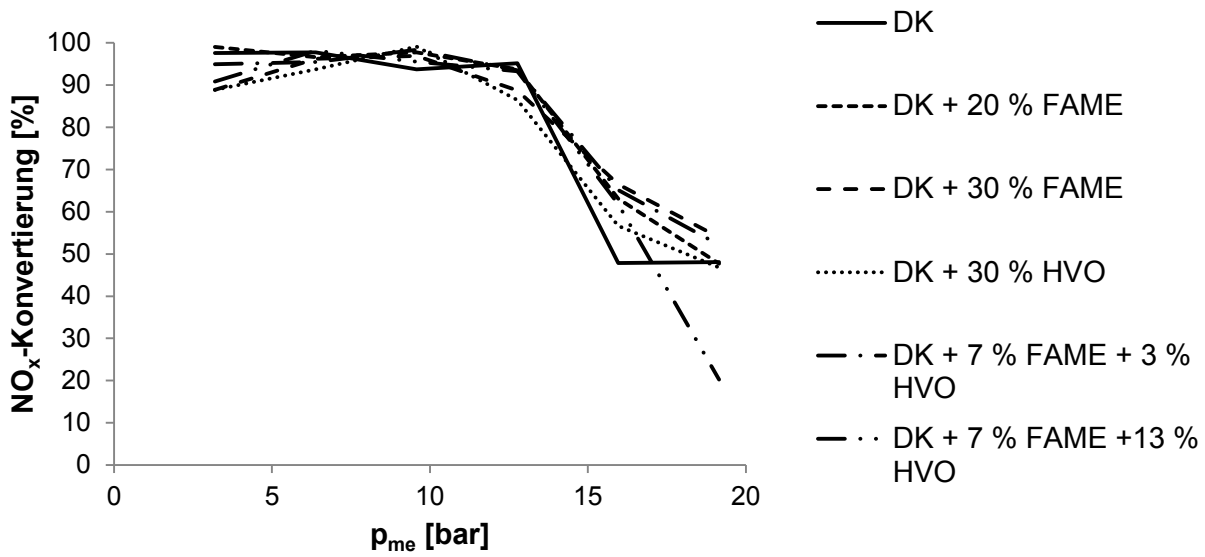


Abbildung 41: NO_x-Konvertierung bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$.

Die Schwärzungszahl (FSN) als ein Äquivalent für die Rußkonzentration ist in Abbildung 42 mit steigender Last bei konstanter Drehzahl von 2.000 min^{-1} dargestellt.

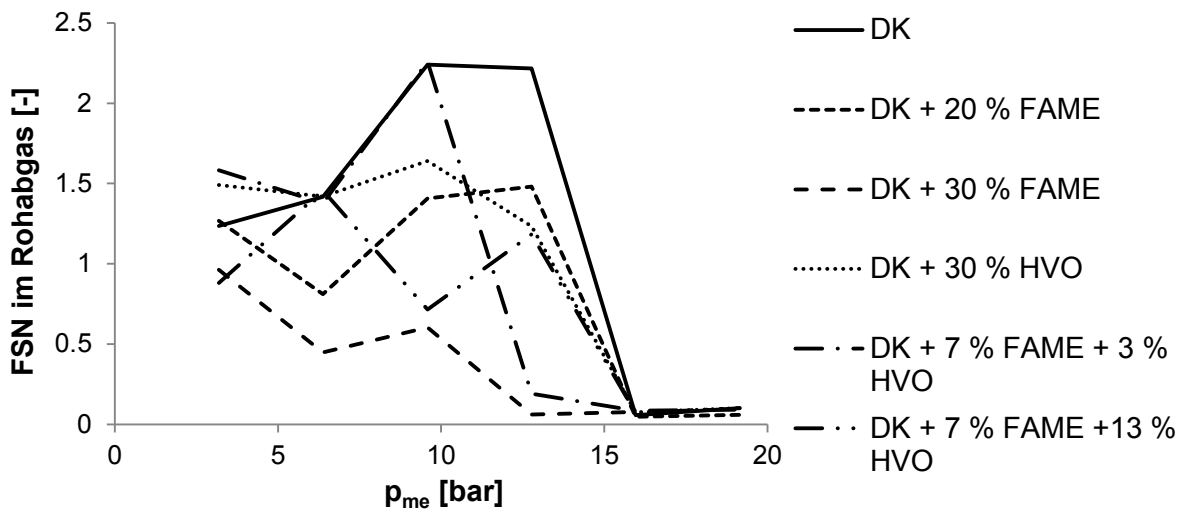


Abbildung 42: FSN im Rohabgas bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$.

Es ist auffallend, dass die Kraftstoffe mit höherem FAME-Anteil gegenüber dem Referenz-DK eine geringe FSN aufweisen. Das liegt darin begründet, dass mit FAME eine Verbesserung der Sauerstoffversorgung vorliegt und damit eine Verringerung des O_2 -Mangel-Zustandes an den Grenzflächen Tropfen – Verbrennungsluft im Brennraum erreicht wird. Dadurch wird die Partikelbildung verringert.

Mit Abschalten der AGR wird kein Inertgas, welches die Verbrennung verschleppt, in den Brennraum geleitet. Dies hat zur Folge, dass die Brennraumtemperaturen steigen und vermehrt thermisches NO_x gebildet wird. Im Zuge dessen wird der Kraftstoff unter wärmeren Brennraumbedingungen optimal umgesetzt, was eine Minderung der Ruß-Konzentration und damit ein Sinken der FSN nach sich zieht.

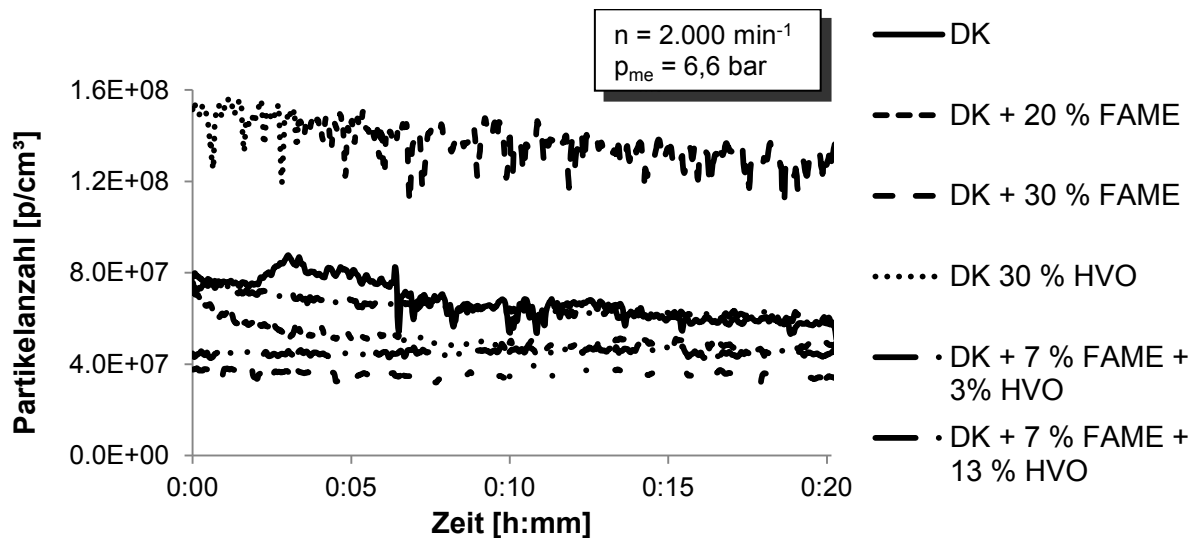


Abbildung 43: Zeitlicher Verlauf der Partikelanzahl [p/cm^3] in Abhängigkeit vom Kraftstoff.

In Abbildung 44 ist die Partikelanzahl [p/cm^3] bei einer Drehzahl von 2.000 min^{-1} und einem p_{me} von $6,6 \text{ bar}$ dargestellt. Hier kann festgestellt werden, dass der FAME-Anteil im Kraftstoff (DK + 20 % FAME und DK + 30 % FAME) eine Minderung der Partikelanzahl bewirkt. Diese Erkenntnis wird durch die Messung der FSN bestätigt (siehe Abbildung 45).

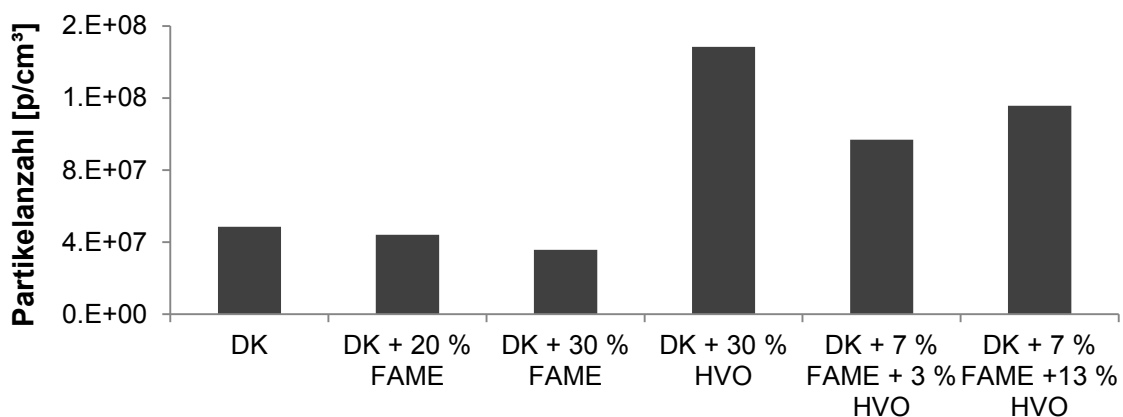


Abbildung 44: Partikelanzahl [p/cm^3] bei $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 6,6 \text{ bar}$.

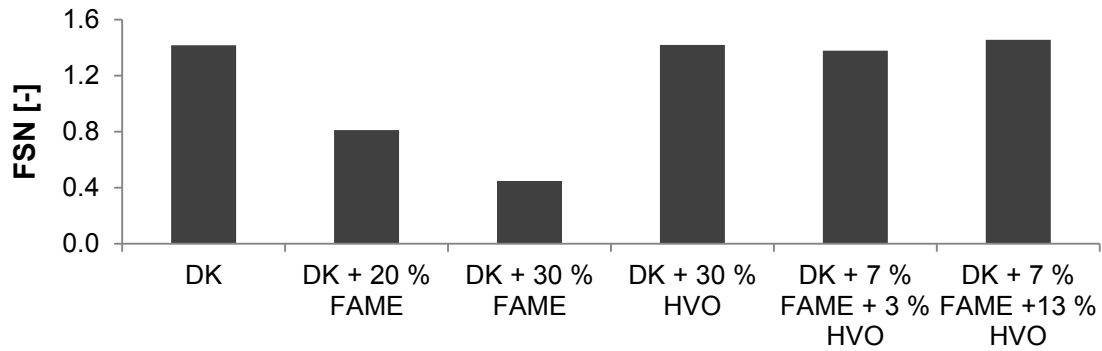


Abbildung 45: FSN bei $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 6,6 \text{ bar}$.

Der FAME-Anteil im Kraftstoff bewirkt in dem Betriebspunkt ($n = 2.000 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 6,6 \text{ bar}$) aufgrund des gebundenen Sauerstoffs eine Halbierung der FSN. Weiterhin ist anzumerken, dass die Kraftstoffe mit HVO nahezu gleiche FSN-Werte im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff aufwiesen. Hingegen wurden bei der Partikelanzahl deutlich höhere Werte gemessen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die durchschnittliche Partikelgröße beim HVO-haltigen Kraftstoff kleiner sein muss.

Des Weiteren wurde die Konvertierung der Partikelanzahl über den DPF bestimmt (siehe Tabelle 14). Es ist festzustellen, dass der geschlossene Partikelfilter eine Reduzierung der Partikelanzahl im untersuchten Bereich über 99 % erzielte.

Tabelle 14: Konvertierung [%] der Partikelanzahl über den DPF.

	DK	DK + 20 % FAME	DK + 30 % FAME	DK + 30 % HVO	DK + 7 % FAME + 3 % HVO	DK + 7 % FAME + 13 % HVO
1.500 min⁻¹ 3,3 bar	100,00	100,00	99,99	99,71	99,99	99,95
2.000 min⁻¹ 3,3 bar	99,97	99,85	99,93	99,98	98,90	100,00
2.000 min⁻¹ 6,6 bar	99,89	99,99	99,83	99,81	100,00	99,99
1.875 min⁻¹ 1,3 bar	99,99	99,88	99,99	99,98	100,00	100,00
Durchschnitt	99,96	99,93	99,94	99,87	99,72	99,98

Zusätzlich wurde die Partikelanzahl wie im Abschnitt 5.3 beschrieben, bei einem Lastsprung gemessen. In Abbildung 46 ist die Partikelanzahl bei 19 gleichen aufeinander folgenden Lastsprüngen im DK-Betrieb dargestellt.

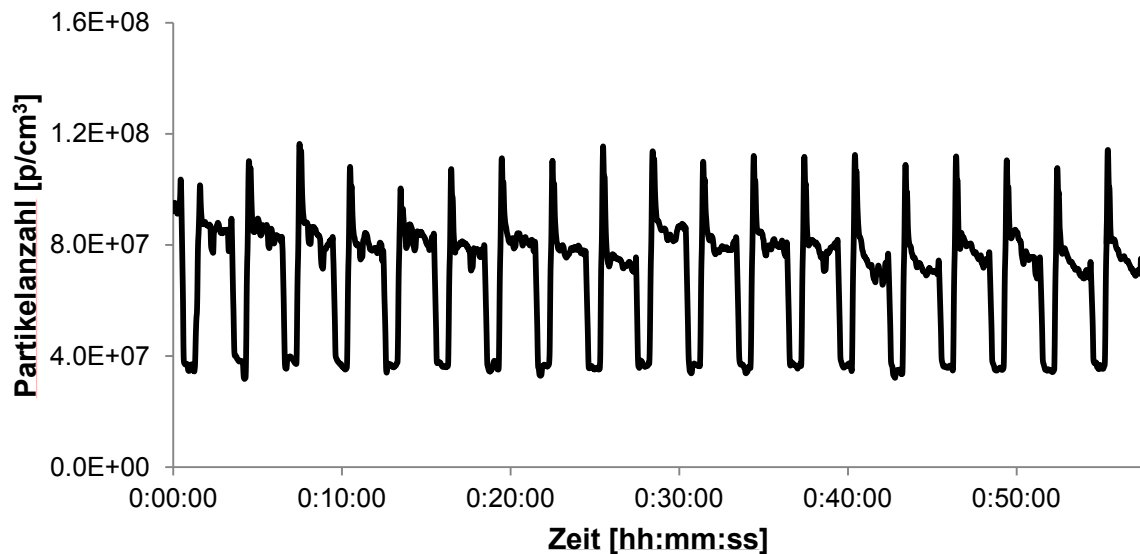


Abbildung 46: Partikelanzahl $[\text{p/cm}^3]$ im Verlauf bei der Sprungmessung mit Dieselkraftstoff.

In Abbildung 47 wurden die in Abbildung 46 dargestellten Lastsprünge zeitlich synchronisiert, überlagert sowie statistisch ausgewertet.

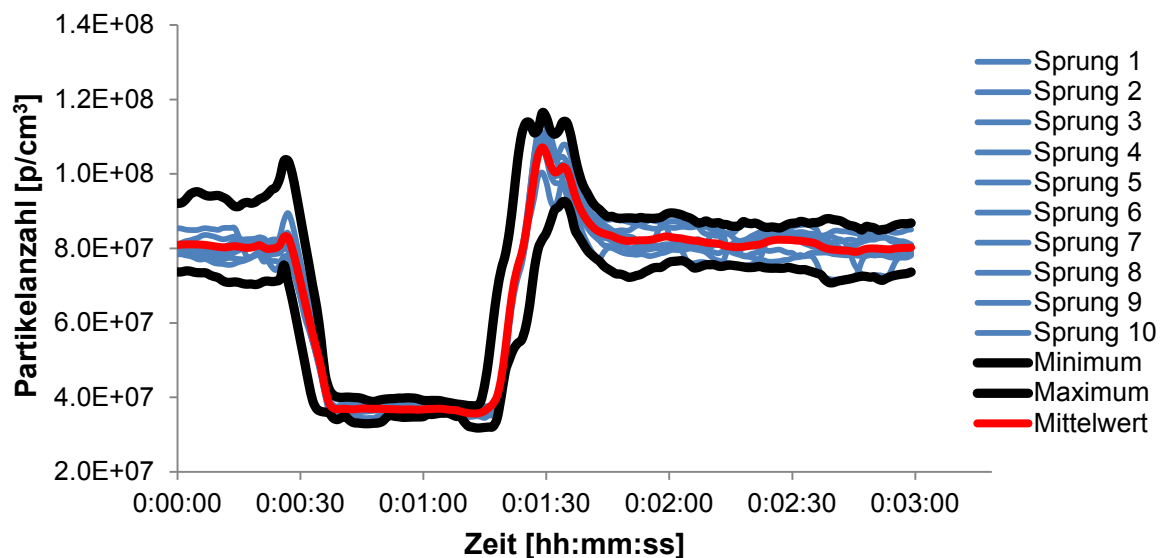


Abbildung 47: Statistische Auswertung der Partikelanzahl beim Lastsprung mit Dieselkraftstoff.

Hier wird sichtbar, dass sich die Partikelanzahl mit steigender Last verringert. Das liegt darin begründet, dass die Brennraumtemperatur aufgrund der mehr eingebrachten Kraftstoffmenge steigt und dadurch ein besserer Partikelnachbrand erfolgt. Des Weiteren kann gezeigt werden, dass aufgrund der Trägheit des VTG-Stellers und der Drosselklappe beim Lastwechsel eine Sauerstoffunterversorgung für einen Partikelanstieg verantwortlich ist. Beim Sprung von höherer Last zur kleineren, kommt es kurzzeitig zu einer Minderung der Pro-

zessgastemperatur mit einer Verringerung des Partikelausbrandes und einer damit verbundenen Erhöhung der Partikelanzahl.

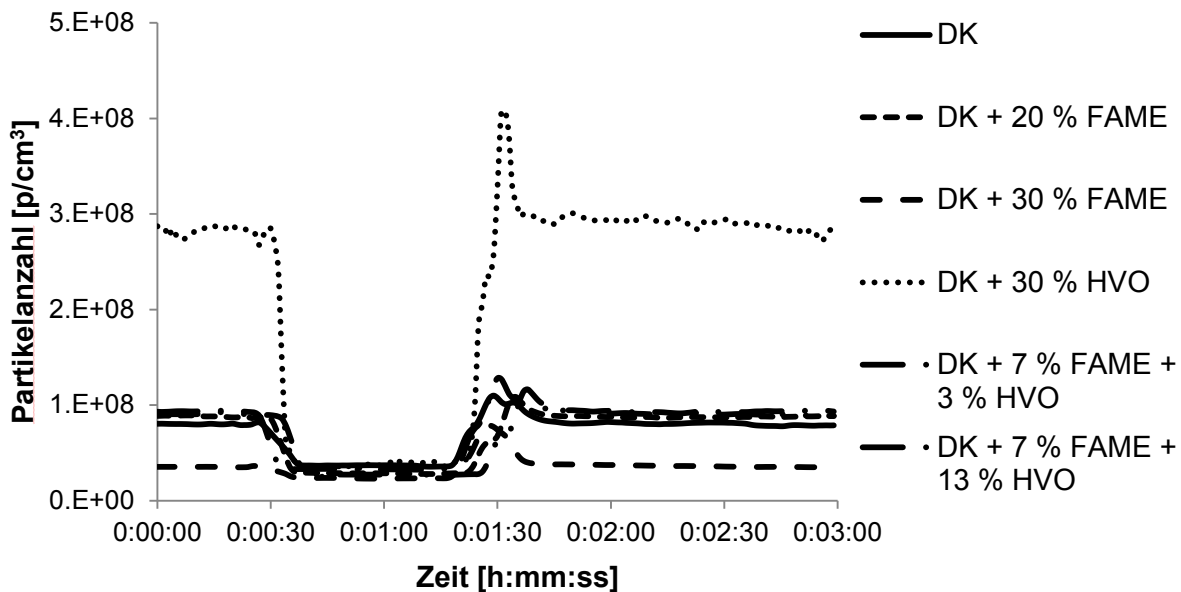


Abbildung 48: Vergleich der Partikelanzahl beim Lastsprung unter Variation verschiedener Kraftstoffe.

In Abbildung 48 sind die Partikelanzahlen der unterschiedlichen Mischkraftstoffe als Mittelung der Lastsprünge vergleichend dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass der Kraftstoff DK + 30 % FAME im Bereich der kleineren Last ($n = 1.100 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$) sehr wenig Partikel emittiert. Dagegen weist DK + 30 % HVO die höchste Partikelanzahl in diesem Betriebspunkt auf. Dies bestätigt die Ergebnisse von den Messungen der Partikelanzahl in den stationären Betriebspunkten.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich die Partikelanzahl im hohen Lastbereich ($n = 2.200 \text{ min}^{-1}$; $p_{me} = 6 \text{ bar}$) verringert. Bei der Betrachtung der Partikelanzahl ist das gleiche kraftstoffabhängige Verhalten wie im Kleinlastbereich zu erkennen (siehe Abbildung 49). Der Kraftstoff mit 30 % FAME-Anteil zeigt die geringste und der HVO-haltige (30 %) Kraftstoff die höchste Partikelanzahl.

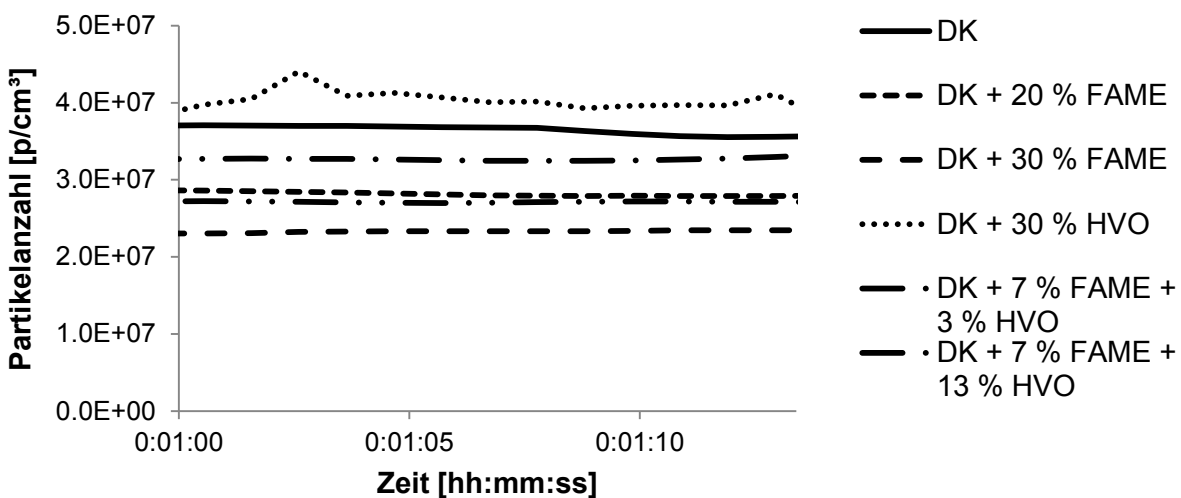


Abbildung 49: Auszug Abbildung 48, Vergleich der Partikelanzahl beim Lastsprung unter Variation des Kraftstoffes.

7.4 Einfluss der Kraftstoffblends auf das Motorschmieröl

Die Überwachung der Motorölqualität erfolgte anhand verschiedener Parameter. Tabelle 15 zeigt die ermittelten Kennwerte nach den Kurzzeitversuchen.

Tabelle 15: Kennwerte der Schmieröle nach den Kurzzeitversuchen.

Kraftstoff	Betriebs- stunden	Viskosität bei 40 °C	TBN	NZ	Rußgehalt
	[h]	[mm ² /s]	[mg KOH/g]	[mg KOH/g]	[%]
Referenzwert	0	73,1	6,0	1,4	0,00
DK	27	71,4	6,2	1,5	0,12
DK+ 20% FAME	22	70,1	6,3	1,9	0,16
DK+ 30% FAME	28	70,4	6,2	1,9	0,20
DK+ 30% HVO	26	70,2	6,2	2,3	0,21
DK+ 7% FAME +3% HVO	17	69,6	6,2	2,2	0,24
DK+ 7% FAME +13% HVO	18	70,0	6,2	2,2	0,29

Die o. a. Analysenergebnisse verdeutlichen, dass innerhalb der jeweiligen Einsatzdauer des entsprechenden Kraftstoffes bei keinem der analysierten Parameter signifikante Änderungen im Vergleich zum Frischöl auftraten. Es wurde keine Beeinträchtigung der Schmierölqualität in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff festgestellt. Folglich bestand in keinem Fall die Veranlassung für einen Wechsel des Motorschmieröls.

8 Ergebnisse der Langzeituntersuchungen

8.1 Steuergeräte-Daten bei den Dauerläufen

Über die Laufzeitdauer der durchgeführten Messkampagne wurden jeweils nach 100 Betriebsstunden Motortests durchgeführt, um so Einflüsse der Kraftstoffzusammensetzung frühzeitig detektieren zu können. Die Tests beinhalteten neben Messungen der Abgaszusammensetzung auch das Auslesen des Steuergerätes bei 10 Betriebspunkten. Im Folgenden wird exemplarisch auf die Steuergerätedaten während der Dauer der Langzeitversuche im Betriebspunkt $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 6,9 \text{ bar}$ eingegangen.

Wie schon im Abschnitt 7.1 beschrieben, dient die „Einspritzmenge“ als Führungsgröße im Motorsteuergerät. Dabei ist die momentbildende Einspritzmenge insbesondere abhängig von der Energiedichte des Kraftstoffes. In Tabelle 16 sind zum Vergleich die Heizwerte der bei den Dauerläufen eingesetzten Kraftstoffe dargestellt. Bei der Betrachtung des volumetrischen Heizwertes kann festgestellt werden, dass der Referenzkraftstoff den höchsten und der FAME-haltige Kraftstoff den niedrigsten volumetrischen Heizwert besitzt.

Tabelle 16: Heizwerte der Kraftstoffe der Dauerläufe.

Dauerlauf	Kraftstoff	Dichte (15 °C) [kg/m ³]	Heizwert [kJ/kg]	Heizwert [kJ/l]
1	DK + 7 % FAME	836,7	42414	35488
2	DK + 30 % FAME	851,7	40862	34802
3	DK + 30 % HVO	820,6	42944	35240

In der folgenden Abbildung 50 ist die Einspritzmenge bei einem ausgewählten Betriebspunkt ($p_{me} = 6,9 \text{ bar}$, $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$) für die drei Dauerläufe vergleichend dargestellt. Es ist zu erkennen, dass aufgrund der geringeren Energiedichte von DK + 30 % FAME mit einer größeren Einspritzmenge zur Darstellung des gleichen Betriebspunktes reagiert werden musste. Hingegen wurde die Einspritzmenge beim DK + 30 % HVO auf ein etwas höheres Niveau gegenüber dem Referenzkraftstoff korrigiert. Es konnten bei allen eingesetzten Kraftstoffen über die Laufzeit keine Veränderungen festgestellt werden.

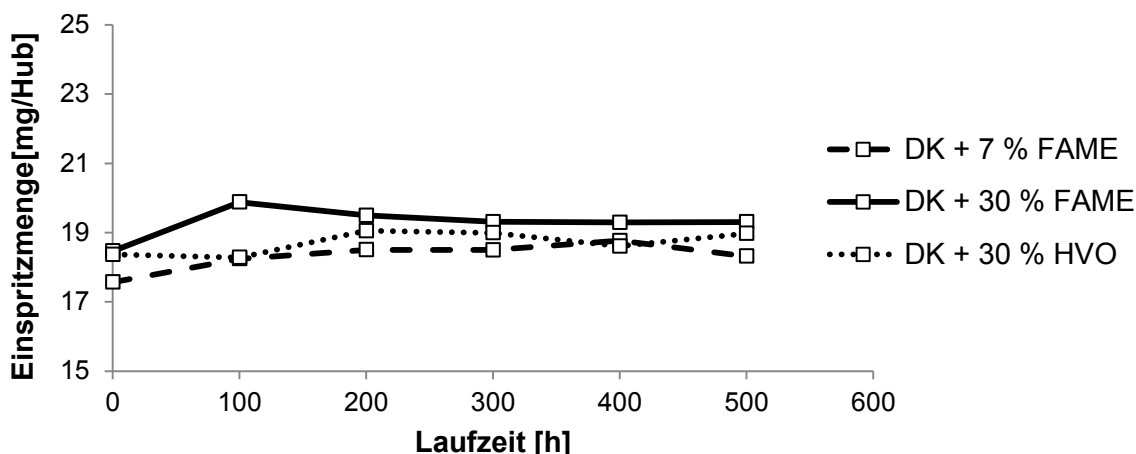


Abbildung 50: Einspritzmenge bei $p_{me} = 6,9 \text{ bar}$ und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Die Luftmasse des Motors wird über den Lambda-Soll-Wert (im Steuergerät hinterlegt) sowie den Lambda-Ist-Wert (mit Lambda-Sonde gemessen) geregelt und ist damit direkt von der

Einspritzmenge abhängig. Folglich ist der Verlauf der Luftmasse der drei Dauerläufe über die Einsatzdauer unmittelbar verknüpft mit der Einspritzmenge und somit ähnlich im Verlauf (siehe Abbildung 51).

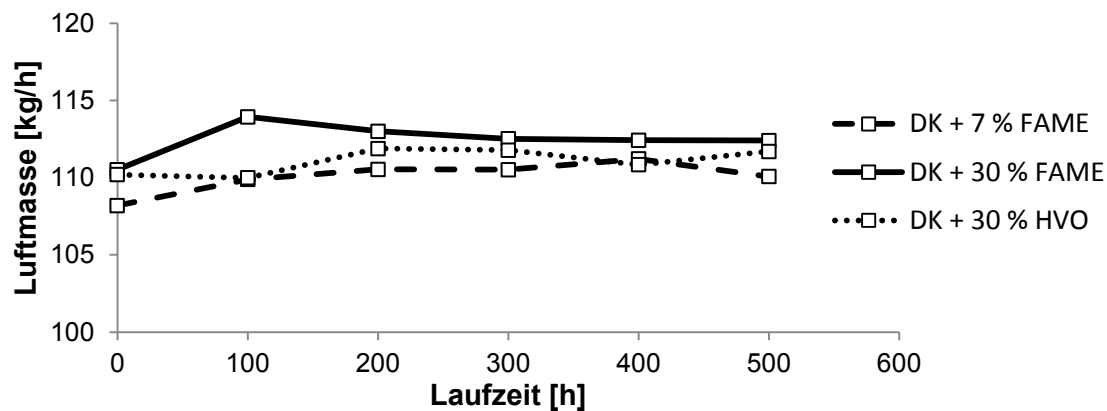


Abbildung 51: Luftmasse bei $p_{me} = 6,9$ bar und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Die AGR dient wie bereits erwähnt zur innermotorischen Reduzierung der Stickoxidemissionen. In Abbildung 52 ist die AGR von den Dauerläufen über die Betriebsstunden dargestellt.

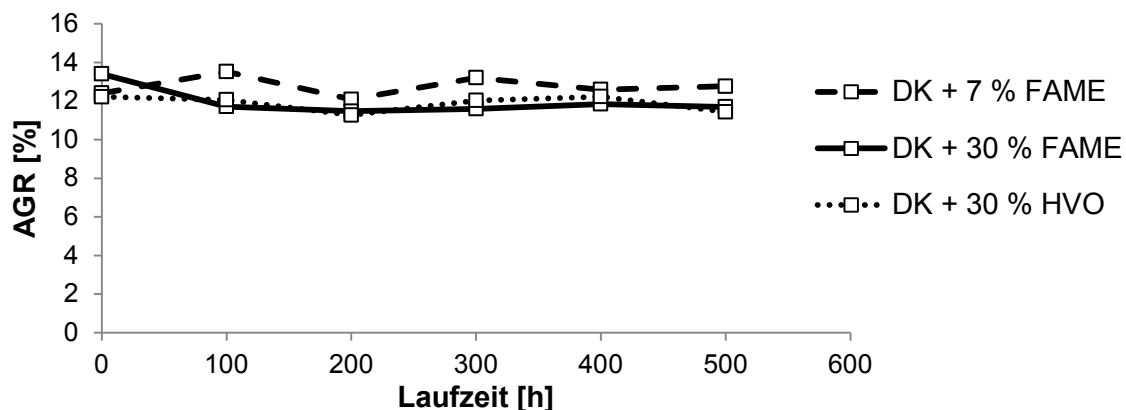


Abbildung 52: AGR bei $p_{me} = 6,9$ bar und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Es kann festgestellt werden, dass aufgrund der unterschiedlichen Einspritzmengen eine leichte Betriebspunktverschiebung im Motorkennfeld stattfand. Die Abweichung lag hier bei 6 %. Die höchste AGR zeigte sich bei DK + 7 % FAME mit durchschnittlich 12,7 %. Dagegen lag die AGR bei den anderen Kraftstoffen im Mittel bei 11,9 % auf etwa gleichem Niveau.

8.2 Emissionsverhalten über der Laufzeit

Abbildung 53 zeigt den Verlauf der FSN von den drei Dauerläufen. Hier konnten die Ergebnisse der Kurzzeitversuche im gleichen Betriebspunkt bestätigt werden. So zeigt sich, dass beim 2. Dauerlauf mit 30 % Biodieselanteil die geringsten Schwärzungszahlen im Vergleich zu den beiden anderen Dauerläufen gemessen wurden. Ursache hierfür ist, wie schon erwähnt, der im FAME Molekül gebundene Sauerstoff, welcher eine bessere Kraftstoffoxidation bedingt und damit einer Rußentstehung positiv entgegen wirkt.

Weiterhin kann gezeigt werden, dass der HVO-haltige Kraftstoff aus dem 3. Dauerlauf ebenfalls eine geringere FSN zum Referenzdieselmotorkraftstoff aufwies.

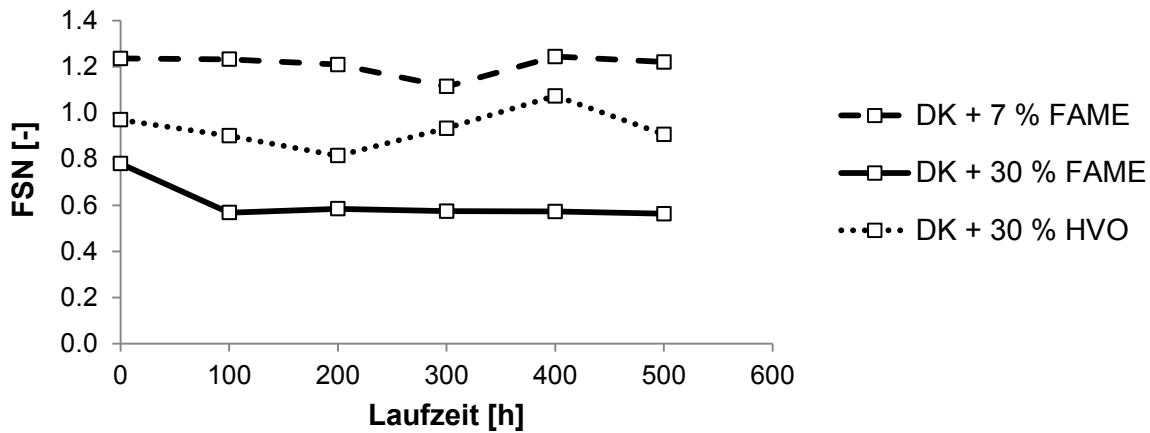


Abbildung 53: FSN bei $p_{me} = 6,9$ bar und $n = 2.000$ min^{-1} in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

In Abbildung 54 ist der gemessene Sauerstoffanteil im Rohabgas für die drei Dauerläufe in Abhängigkeit von den jeweiligen Betriebsstunden dargestellt.

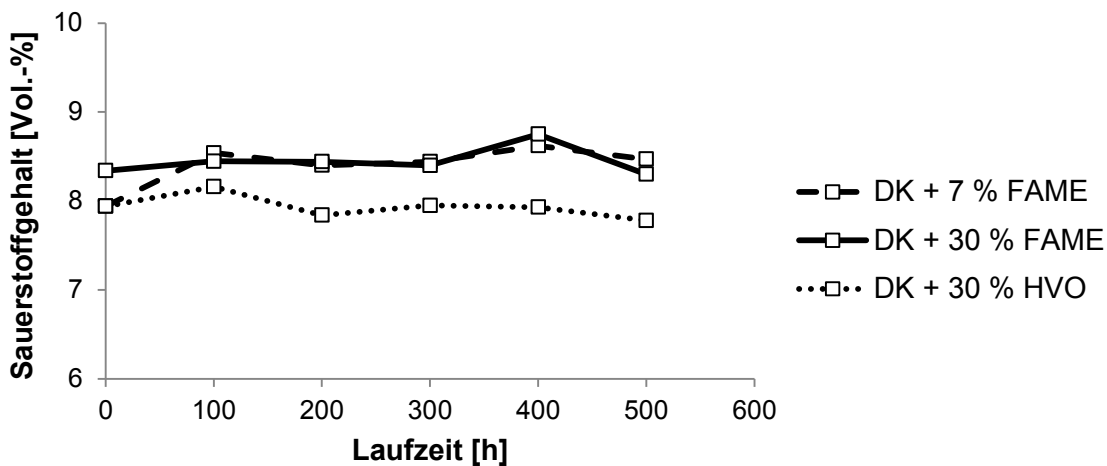


Abbildung 54: Sauerstoffgehalt bei $p_{me} = 6,9$ bar und $n = 2.000$ min^{-1} in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Hier zeigt sich, dass DK + 30 % FAME bei gleicher AGR wie DK + 30 % HVO einen höheren Sauerstoffanteil als der HVO-haltige Kraftstoff aufwies. Das liegt zum einen in dem im FAME gebundenen Sauerstoff und zum anderen in der höheren angeforderten Luftmasse durch die Verschiebung des Betriebspunktes.

Die Stickoxidemissionen, die in den Dauerläufen ermittelt wurden, sind in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer in der folgenden Abbildung 55 dargestellt.

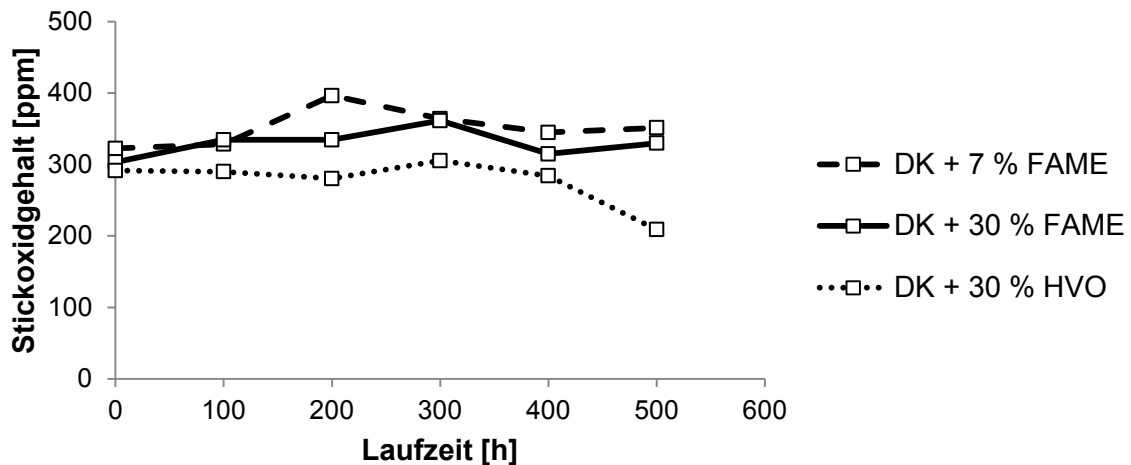


Abbildung 55: Stickoxidemissionen bei $p_{me} = 6,9$ bar und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Hier ist zu erkennen, dass der 3. Dauerlauf mit HVO eine geringere Stickoxidbildung aufweist als die anderen Kraftstoffe. Diese Tatsache kann durch die positiven Kraftstoffeigenschaften des HVO, wie beispielsweise niedrige Oberflächenspannung und günstigeres Siedeverhalten, begründet werden. Dadurch ist ein verbesserter Gemischbildungsprozess im Brennraum möglich, woraus ein geringerer Zündverzögerung sowie geringe Stickoxidbildung resultierten.

8.3 Optische Befundung des Motors nach den Dauerläufen

Für eine Beurteilung der Motorkomponenten wurde nach jedem Dauerlauf eine optische Befundung des Motors durchgeführt. Hierfür wurden die folgenden Anbauteile betrachtet






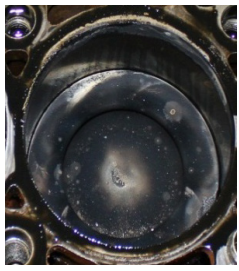
- Abgasturbolader
- AGR-Kühler
- AGR-Ventil
- Drosselklappe
- Injektoren
- Luftansaugbrücke

Für die Begutachtung des Brennraums wurde der Zylinderkopf abgenommen. Die Bauteile wurden visuell analysiert und fotografisch dokumentiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse für den Zylinder 2 dargestellt.

8.3.1 Brennraum

In der folgenden Tabelle sind die Laufbuchse und Kolbenoberseite nach den drei Dauerläufen vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 17: Dokumentation der Laufbuchse und Kolbenoberseite.

	1. Dauerlauf	2. Dauerlauf	3. Dauerlauf
Kraftstoff	DK + 7 % FAME	DK + 30 % FAME	DK + 30 % HVO
Laufbuchse			
Kolben			




Die Honspur auf den Laufbuchsen ist nach allen Dauerläufen gut erhalten. Somit war kein Einfluss auf das Schmierverhalten in Abhängigkeit vom eingesetzten Kraftstoff zu erkennen. Das Spraybild war nach allen drei Dauerläufen auf dem Kolben gut sichtbar. Folglich ist davon auszugehen, dass über die Laufzeit keine Ablagerungen, z.B. durch Verkokungen auf den Injektoren, gebildet wurden. Dies wurde durch die visuelle Analyse der Injektoren bestätigt.

Zu bemerken ist, dass nach dem zweiten Dauerlauf weiße Ablagerungen auf der Laufbuchse oberhalb des 1. Kolbenringes und des Zylinderkopfes zu erkennen waren. Aufgrund der geringen Menge konnten keine weiteren Untersuchungen der Ablagerungen durchgeführt werden.

8.3.2 AGR-Kühler

Die Aufgabe des AGR-Kühlers ist es, die Temperatur des Abgases, das zurück in den Brennraum geführt wird, zu senken. Da an dieser Komponente das unbehandelte Rohabgas vorbei geführt wird, sind auch hier direkte Einflüsse der Kraftstoffeigenschaften zu erkennen. Wie bekannt ist, weist FAME eine geringere Rußbildung auf, was durch die Befundung der Eingangsseite des AGR-Kühlers bestätigt wird (vgl. Tabelle 18). So waren eindeutig geringere Rußablagerungen nach dem 2. Dauerlauf zu erkennen. Es konnte kein Unterschied bei den Ablagerungen zwischen DK + 7 % FAME und DK + 30 % HVO festgestellt werden.







Tabelle 18: Dokumentation des AGR-Kühlers.

	1. Dauerlauf	2. Dauerlauf	3. Dauerlauf
Kraftstoff	DK + 7 % FAME	DK + 30 % FAME	DK + 30 % HVO
AGR-Kühler Einlass			

8.3.3 Abgasturbolader

Ebenfalls wurde der Abgasturbolader untersucht. Hier konnten sowohl auf der Verdichter- als auch auf der Turbinenseite keine Veränderungen in Abhängigkeit vom eingesetzten Kraftstoff festgestellt werden.

Tabelle 19: Dokumentation des Abgasturboladers.

	1. Dauerlauf	2. Dauerlauf	3. Dauerlauf
Kraftstoff	DK + 7 % FAME	DK + 30 % FAME	DK + 30 % HVO
ATL Turbine			
ATL Verdichter			

8.4 Wirkung auf das Motorschmieröl

Während des Dauerlaufbetriebs erfolgte in definierten Intervallen die Analyse ausgewählter Schmierölkennwerte. Nach Abschluss des Dauerlaufs wurde das Schmieröl bei einer Ölfemperatur von etwa 80 °C vollständig abgelassen. Die Ölwanne wurde vor dem nächsten Dauerlauf nicht mit Frischöl gespült.

In der folgenden Abbildung 56 ist die Abhängigkeit der kinematischen Viskosität (bei 40 °C) von der Laufzeit für die drei Dauerläufe dargestellt.

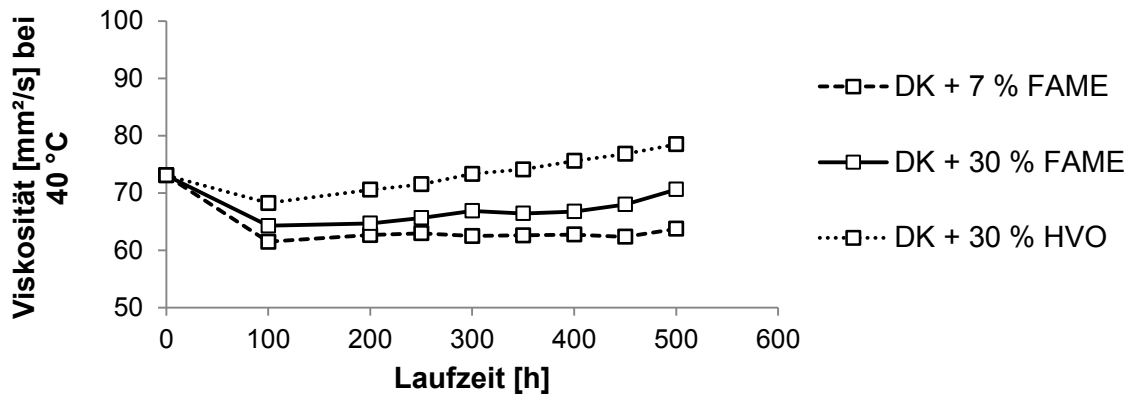


Abbildung 56: Kinematische Viskosität bei 40 °C in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Für alle drei Kraftstoffe nimmt die kinematische Viskosität den typischen Verlauf in Abhängigkeit von der Laufzeit. So wird eine anfängliche Verdünnung verzeichnet, die durch Kraftstoffeintrag bzw. Zerstörung des VI-Verbesserers durch Scherung verursacht werden kann. Anschließend bleibt die Viskosität dem 1. Dauerlauf mit DK+ 7 % FAME nahezu konstant bzw. verzeichnet bei den beiden anderen Dauerläufen einen leichten Anstieg.

Der Rußgehalt in den entsprechenden Schmierölproben war bei allen drei Dauerläufen auf einem sehr niedrigen Niveau und weit unterhalb des Grenzwertes von 3 %, wie die Resultate in der folgenden Abbildung 57 verdeutlichen.

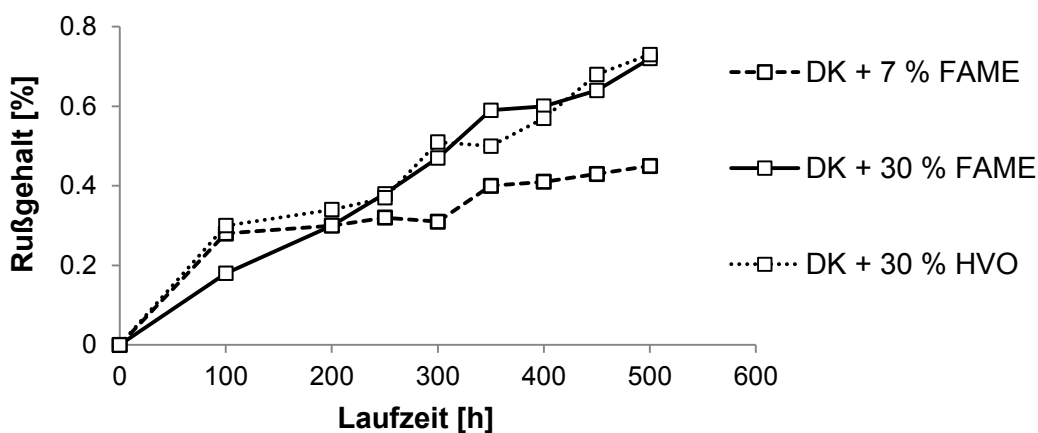


Abbildung 57: Rußgehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Die hier dargestellten Resultate bestätigen die Ergebnisse des Emissionsverhaltens von FAME-haltigen Kraftstoffen. Demnach ist bekannt, dass der Kraftstoff mit einem Anteil von 30 % FAME geringere Rußemissionen als Dieselkraftstoff aufwies (vgl. Abbildung 42). Dem-

zufolge ist auch im Dauerlauf mit DK + 30 % FAME der Rußeintrag in das Schmieröl geringer als bei den anderen beiden Kraftstoffen.

In der folgenden Abbildung 58 sind die TBN-Zahlen für die drei Dauerläufe jeweils in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer dargestellt.

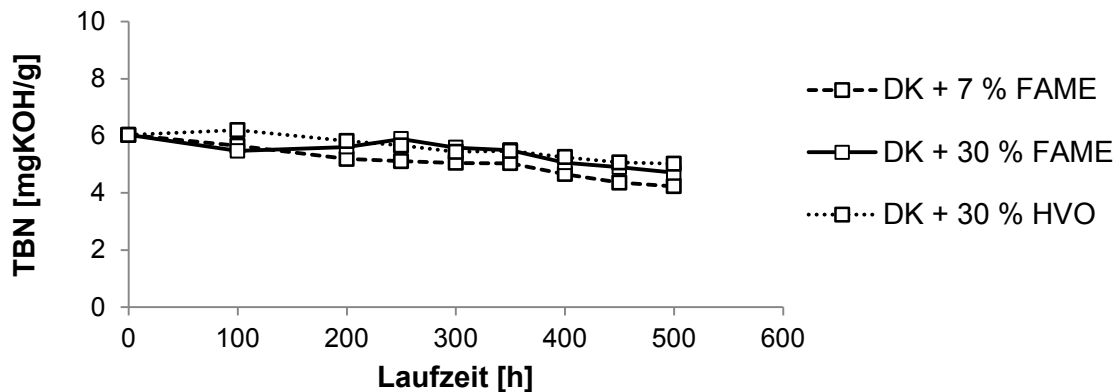


Abbildung 58: TBN des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Die Resultate verdeutlichen, dass bei allen drei Dauerläufen die alkalische Reserve des Schmieröls mit zunehmender Einsatzdauer verringert wird. Bei der eintretenden Schmierölalterung erfolgt die Bildung saurer Bestandteile, die schließlich durch die Schmieröladditive neutralisiert werden. Demzufolge ist eine Abnahme der TBN zu verzeichnen. Der Grenzwert für einen Ölwechsel (4 mg KOH/g) wird jedoch in keinem der drei Dauerläufe unterschritten.

Eine weitere wichtige Kenngröße in der Schmierölanalytik ist die Neutralisationszahl (NZ). Diese gibt Auskunft über den Gehalt an freien Säuren, die während der Schmierölalterung entstehen. Da der Anstieg der NZ bei dem Einsatz von Schmierstoffen mit definierten Biokraftstoff-Anteilen einem exponentiellen Viskositätsanstieg vorhergeht, kann bei der Verfolgung des Alterungszustandes des Schmieröls die Neutralisationszahl für die Früherkennung kritischer Ölzustände herangezogen werden (vgl. Wichmann et al. 2011). Den bereits publizierten Resultaten zufolge, wird ein Ölwechsel bei dem Anstieg der NZ von deutlich größer als 4 mg KOH/g empfohlen. Das Hauptziel dieser Untersuchungen war jedoch der direkte Vergleich der verschiedenen Kraftstoffe im Motorbetrieb über die Dauer von 500 Stunden unter gleichen Motorbedingungen. Folglich wurden alle Dauerläufe ohne einen Schmierölwechsel durchgeführt.

Die folgende Abbildung 59 zeigt den Verlauf der NZ in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer für die drei Dauerläufe.

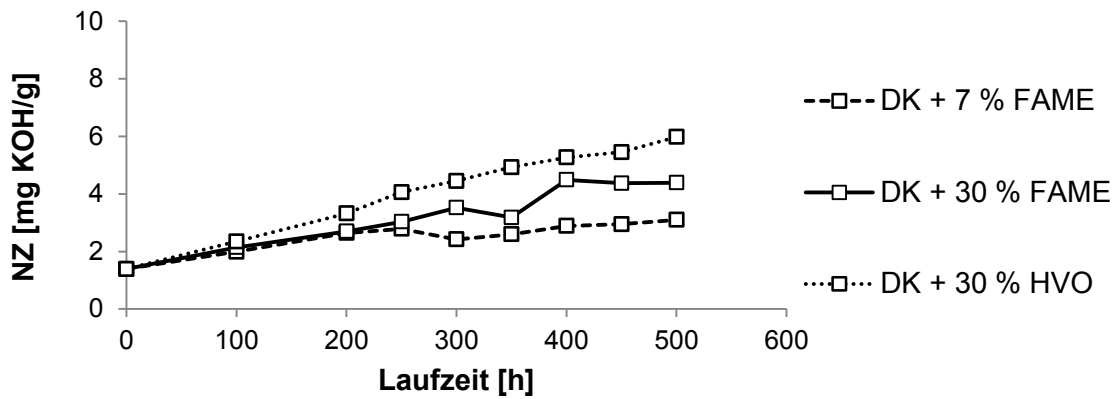


Abbildung 59: NZ des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Die Neutralisationszahl stieg innerhalb der dargestellten Ölwechselintervalle signifikant an. Bemerkenswert erscheint jedoch, dass offensichtlich kein direkter Zusammenhang zwischen der alkalischen Reserve (TBN, vgl. Abbildung 58) und dem Anstieg der Neutralisationszahl herrschte. Das bedeutet, dass nicht alle entstehenden Säuren durch die alkalische Reserve neutralisiert werden können.

Die in Abbildung 59 dargestellten Resultate belegen, dass beim Dauerlauf mit DK + 30 % HVO ein starker Anstieg auf etwa 6 mg KOH/g zu verzeichnen war, der jedoch bei dem Einsatz von HVO nicht zu erwarten war. Möglicherweise kann eine Verschleppung des FAME-haltigen Schmieröles (aus den beiden ersten Dauerläufen) die Ursache dafür sein.

Zur weiteren Veranschaulichung sind in der folgenden Abbildung 60 die FAME-Gehalte in Abhängigkeit von der Laufzeit für die drei Dauerläufe dargestellt.

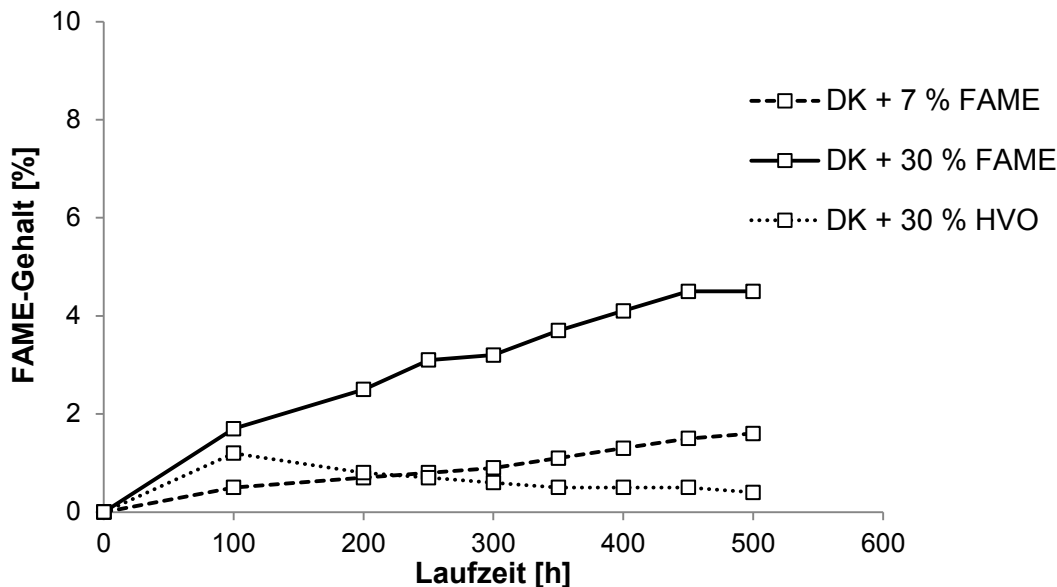


Abbildung 60: FAME-Gehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Die o. a. Resultate belegen, dass das Schmieröl im 2. Dauerlauf (DK + 30 % FAME) den höchsten FAME-Anteil von bis zu 4,5 % aufwies. Dieser Wert war jedoch als unkritisch einzustufen, da der Grenzwert von 10 % noch nicht erreicht war.

Auffällig ist, dass im dritten Dauerlauf (DK + 30 % HVO) nach 100 Betriebsstunden ein FAME-Gehalt von 1,2 % ermittelt wurde. Dieser Anteil deutet auf eine Verunreinigung durch FAME-haltige Schmierölreste aus dem 2. Dauerlauf hin. Im weiteren Verlauf war ein Absinken des FAME-Anteils zu verzeichnen. Möglicherweise werden die FAME-Reste im Schmieröl zu sauren Bestandteilen abgebaut, was sich wiederum in einer Erhöhung der Neutralisationszahl widerspiegelt. Mithilfe der IR-Methode werden lediglich die Kraftstoffbestandteile erfasst, die durch eine Estergruppe im Molekül ein entsprechendes Signal im IR-Spektrum liefern. Die sauren Komponenten, die bei der Alterung des FAME im Schmieröl entstehen, werden folglich mit der IR-Methode nicht erfasst.

Mittels der HPSEC-Analytik wurden die Schmierölproben auf möglicherweise enthaltene Polymere untersucht. In der folgenden Abbildung 61 sind die Elugramme der jeweiligen Endproben aller drei Dauerläufe im Vergleich zum Frischöl dargestellt.

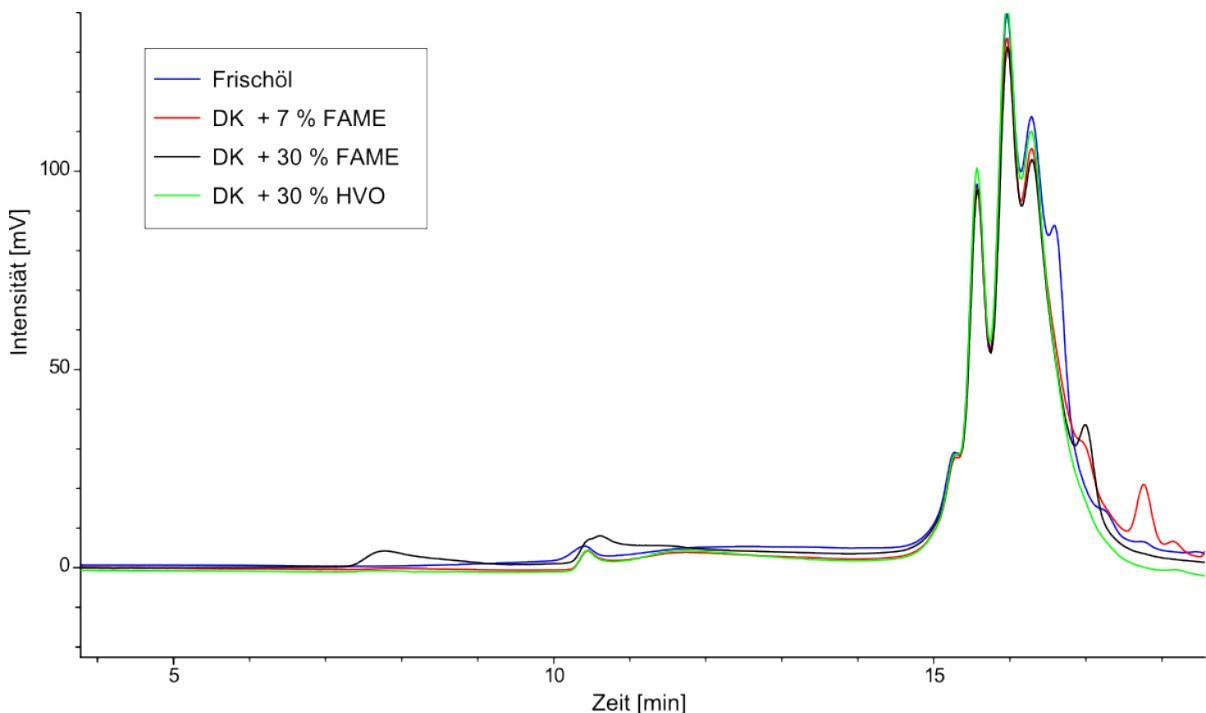


Abbildung 61: HPSEC-Analytik der Schmieröle nach 500 Betriebsstunden in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff im Vergleich zum Frischöl.

Den o. a. Elugrammen ist zu entnehmen, dass im Schmieröl des 2. Dauerlaufs (DK + 30 % FAME) ein Anstieg im Bereich der VI-Verbesserer sowie ein geringer Anteil an Polymeren bei einer Retentionszeit von 7,5 min mit einem mittleren Molekulargewicht von > 100.000 g/mol (ca. 2 %) ermittelt wurde. Dieser entsprechende Peak wurde bei den anderen Proben nicht detektiert. Diese polymeren Bestandteile zeigten jedoch keinen Einfluss auf die Viskosität der Probe.

Der Gehalt an Verschleißmetallen in den entsprechenden Schmierölproben wurde mithilfe der ICP-OES ermittelt. Im Anhang (Tabelle 20 bis Tabelle 22) sind die Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst. Erwartungsgemäß war ein Anstieg der Konzentration der Verschleißmetalle mit zunehmender Laufzeit zu verzeichnen. Beispielhaft ist nachfolgend in Abbildung 62 der Aluminiumgehalt in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer für die drei Dauerläufe aufgetragen.

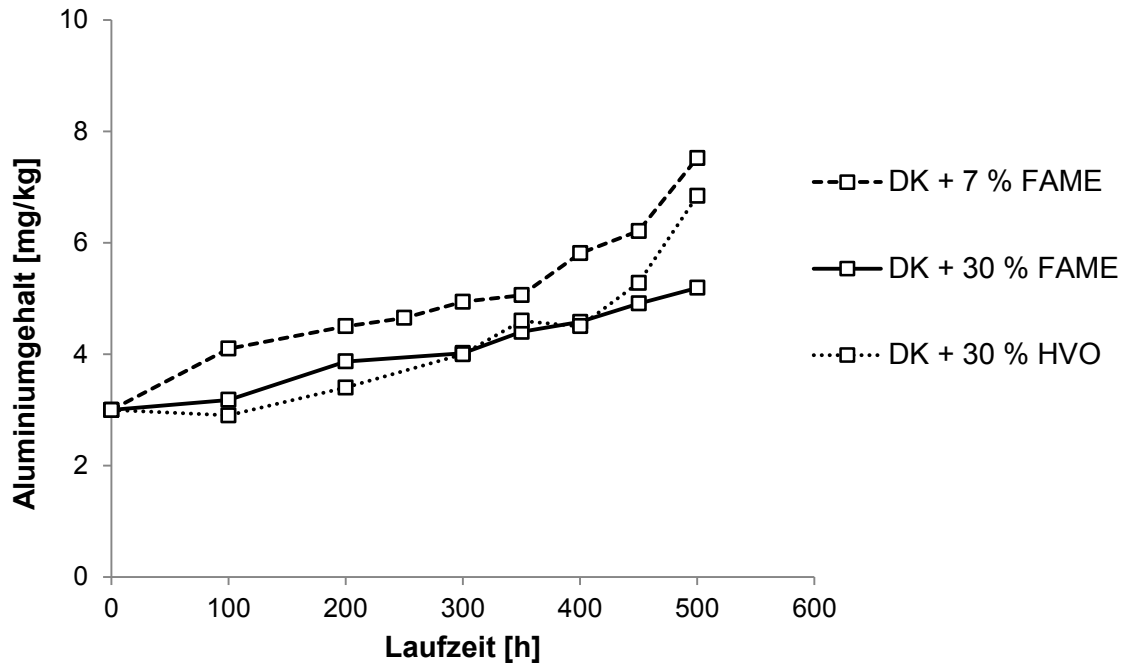


Abbildung 62: Aluminiumgehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Der steigende Aluminiumgehalt war als unkritisch einzustufen, da er innerhalb der zulässigen Toleranzen (12-55 mg/kg) lag. Ebenso lagen die entsprechenden Kupfer- sowie Eisenkonzentrationen im Schmieröl auf einem unkritischen Niveau (vgl. Abbildung 63 und Abbildung 64).

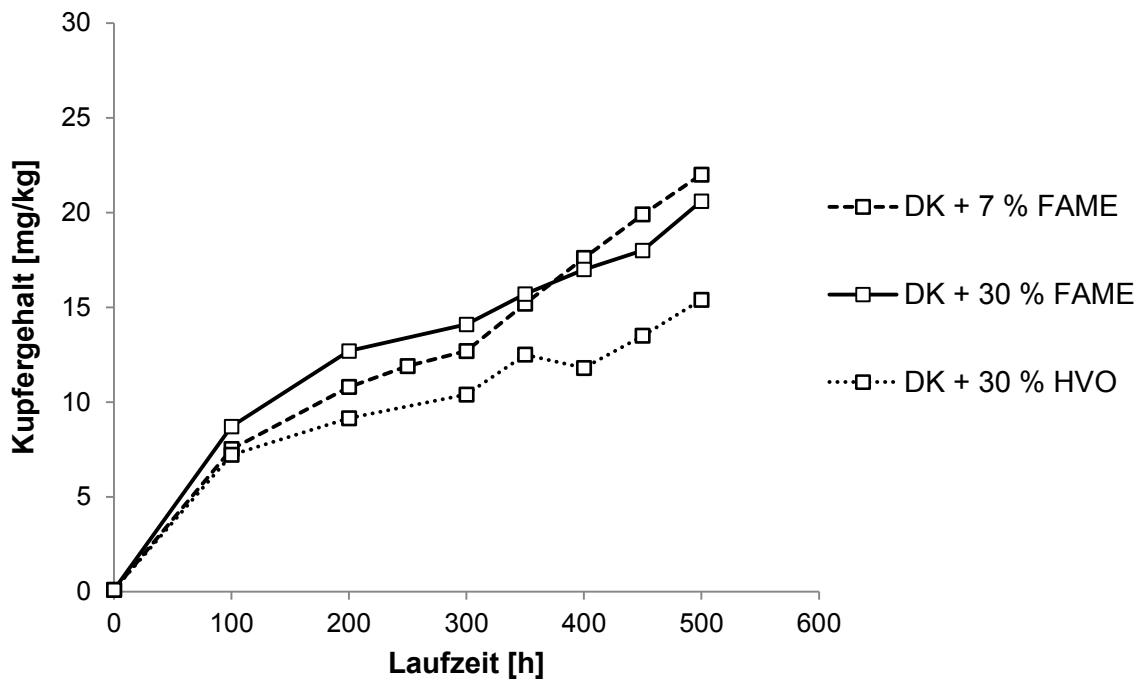


Abbildung 63: Kupfergehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

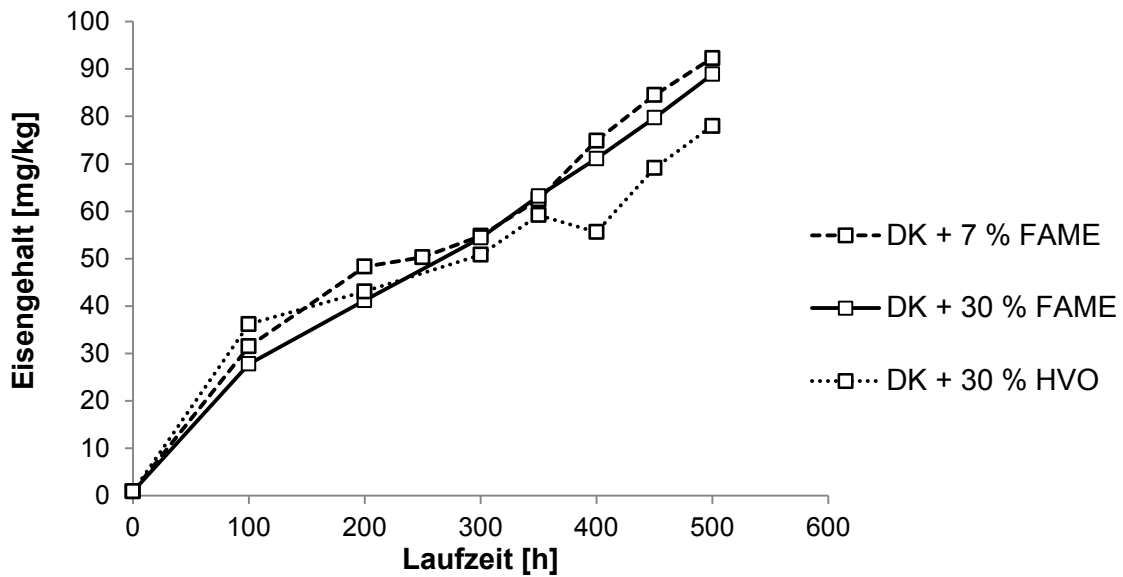


Abbildung 64: Eisengehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.

Es konnten keine Auffälligkeiten bezüglich des Verschleißes in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff festgestellt werden.

Die Gehalte an Additiv- und Verschmutzungselementen sind im Anhang in den Tabelle 23 bis Tabelle 25 aufgelistet. Mit steigender Einsatzdauer des Schmieröls im Dauerlauf war erwartungsgemäß eine Abnahme der Additivelemente festzustellen.

Silicium und Natrium gelten als sogenannte Verschmutzungselemente, die in Form von Staub als Verunreinigung in das Motorenöl gelangen können. Die ermittelten Konzentrationen waren jedoch in jedem Fall unauffällig, wie in der folgenden Abbildung 65 beispielhaft für den Siliciumgehalt dargestellt ist.

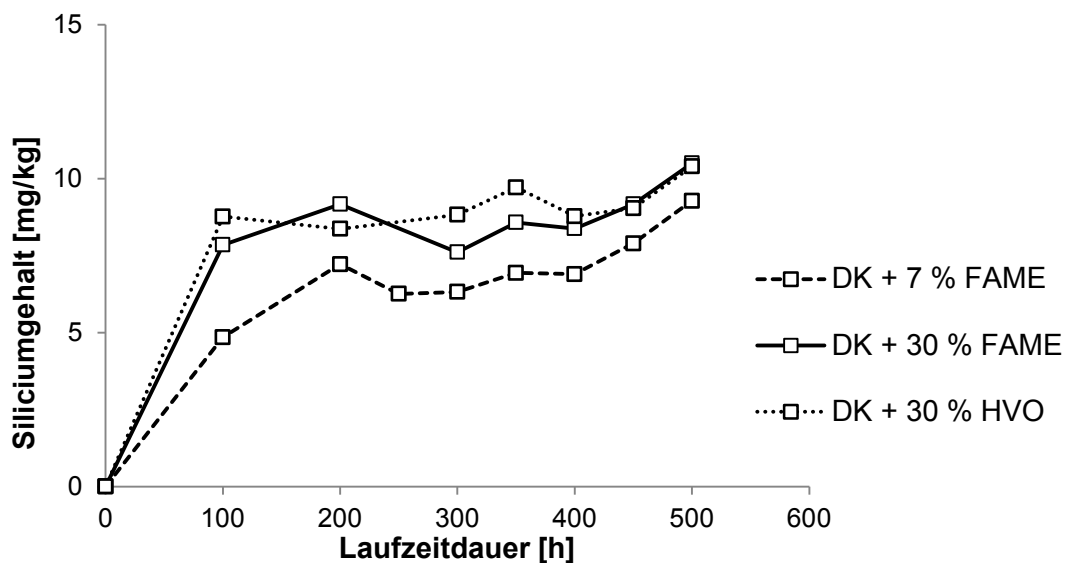


Abbildung 65: Siliciumgehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass innerhalb der drei Dauerläufe keine Abhängigkeiten der Verschleiß- und Additivelemente von dem eingesetzten Kraftstoff festzustellen waren.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden fünf verschiedene Biokraftstoffblends hinsichtlich ihrer Lagerstabilität und ihres Brenn- und Emissionsverhaltens an einem modernen 4-Zylinder PKW-Dieselmotor der Abgasstufe EURO-VI bewertet. Schwerpunkt der Tests waren sechs Kurzzeitversuche und drei Langzeitdauerläufe an ausgewählten Kraftstoffmischungen zur vergleichenden Untersuchung des innermotorischen Verhaltens, der Emissionsbildung und der Funktion des Abgasnachbehandlungssystems. Folgende Kraftstoffe kamen hierbei zum Einsatz:

- I. Dieselkraftstoff B0 (Referenz)
- II. Dieselkraftstoff mit 20 % FAME
- III. Dieselkraftstoff mit 30 % FAME
- IV. Dieselkraftstoff mit 30 % HVO
- V. Dieselkraftstoff mit 7 % FAME und 3 % HVO
- VI. Dieselkraftstoff mit 7 % FAME und 13 % HVO

Lagerstudie

Vor Beginn der Versuche wurden die FAME-Komponenten der o. g. Kraftstoffe mithilfe von Antioxidantien stabilisiert. Ziel war das Erreichen einer Oxidationsstabilität von mindestens 10 Stunden im Rancimat-Test bei 110 °C. Anschließend wurden die Biokraftstoffblends aus dem FAME und einem B0-Dieselmotor (Sommerqualität) sowie HVO aufgemischt. Die Biokraftstoffmischungen wurden über eine Lagerdauer von 17 Monaten bei zwei verschiedenen Temperaturen (10 °C, Ø 25 °C) aufbewahrt und in definierten Abständen beprobt und analysiert. Die Kraftstoffeigenschaften Viskosität und Neutralisationszahl zeigten über die Lagerdauer keine signifikanten Änderungen. Lediglich die Parameter Oxidationsstabilität und Peroxidzahl wiesen minimale Abweichungen zum Ausgangszustand auf. Die Grenzwerte der DIN EN 590 wurden über den gesamten Zeitraum sicher eingehalten. Es kann festgestellt werden, dass auch die untersuchten Blends mit hohen Biodieselanteilen bis 30 % durch gezielte Additivierung mit Antioxidantien über eine Lagerdauer von 17 Monaten stabilisiert werden konnten.

Motorkurzzeitversuche

Bei den Kurzzeitversuchen wurden sechs Kraftstoffe in ausgewählten Betriebspunkten verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass ein störungsfreier Einsatz der untersuchten Blends in einem EURO-VI-Dieselmotor zu realisieren ist. Hierbei wurde eine Betriebspunktverschiebung in den stationären Lastpunkten beobachtet, die auf die verschiedenen Kraftstoffeigenschaften (z.B. Siedeverhalten, Oberflächenspannung, Heizwert) zurückzuführen ist.

Die Abweichungen in den Brennfunktionen und der Motorsteuergerätfunktionen sind am Prüfstand quantifizierbar. Im Betrieb mit sauerstoffreichen Kraftstoffen mit Biodieselanteilen wurden größere Kraftstoffmengen bei identischen Lastpunkten (Luftmasse und Drehzahl konstant) injiziert.

Die Schwankungen der einzelnen Parameter lagen bei den sechs untersuchten Kraftstoffen unter 5 % der Nennwerte. Diese Differenzen könnten bei Bedarf in zukünftigen Motorgenerationen durch das Motorsteuergerät geregelt werden, sofern Informationen über den eingesetzten Kraftstoff im Motorsteuergerät hinterlegt werden.

Im hohen Lastbereich konnte der direkte Einfluss der Kraftstoffe auf das Brennverhalten beobachtet werden. So wiesen die Kraftstoffe mit HVO-Anteilen in der Vorverbrennung einen verringerten Zündverzögerung auf, wohingegen die Kraftstoffe mit FAME-Anteilen einen längeren Zündverzögerung verzeichneten. Die Vorverbrennung wirkte sich stabilisierend auf die Hauptverbrennung aus.

Die Resultate der FSN und der Partikelanzahl bestätigten, dass der FAME-Anteil im Kraftstoff eine Minderung der Partikelemission bewirkt. Dies ist auf den im FAME-Molekül gebun-

denen Sauerstoff zurückzuführen. Im Gegensatz dazu führten HVO-haltige Kraftstoffe zu höheren Partikelanzahlen (ca. 100 %), wohingegen die FSN keinen Unterschied zum Dieselmotorkraftstoff aufwies. Die Ursache hierfür liegt in der feineren Zerstäubung des HVO. Folglich führt der Einsatz von HVO-haltigen Kraftstoffen zur Emission von kleineren Partikeln.

Der Einfluss der Kraftstoffblends auf das Abgasnachbehandlungssystem konnte in den Kurzzeitversuchen nicht nachgewiesen werden. Die Partikelreduktion durch den Dieselpartikelfilter betrug etwa 99 %. Im Abgas-relevanten Bereich wurde durch den SCR eine Stickoxidminimierung bis zu 90 % realisiert. Im gesamten Motorkennfeld wurde eine Stickoxidkonvertierung von über 40 % ermittelt.

Motorlangzeittest

Bei den Motorlangzeitversuchen wurden die Kraftstoffe „DK + 7 % FAME“, „DK + 30 % FAME“ und „DK + 30 % HVO“ für jeweils 500 Betriebsstunden im Motor getestet. Es konnten die Erkenntnisse der Kurzzeittests bestätigt werden, z.B. die Verschiebung der Betriebspunkte sowie das Emissionsverhalten.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Motorkomponenten Injektor, Abgasturbolader, Drosselklappe und Zylinderkopf keine Auffälligkeiten im Verschleiß im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoffbetrieb aufwiesen. Nach dem Motorbetrieb mit FAME-haltigen Kraftstoffen wurden geringere Rußablagerungen auf dem AGR-Kühler nachgewiesen, was mit den Resultaten der Partikelemissionen korreliert.

Bezüglich des Motorölzustandes wurden zwischen den Dauerläufen keine Unterschiede zwischen den Schmierölen bei den Parametern Viskosität, TBN und Verschleißmetallgehalt in Abhängigkeit des eingesetzten Kraftstoffs festgestellt. Auffällig war jedoch ein starker Anstieg der Neutralisationszahl über den Grenzwert bei den Dauerläufen zwei und drei. Eine mögliche Ursache hierfür ist der Anstieg des FAME-Gehaltes im Schmieröl auf 4,5 % am Ende des 2. Dauerlaufs und die nachgewiesene Verschleppung von FAME in die neue Ölfüllung des 3. Dauerlaufs.

Ausblick

Es ist festzustellen, dass kraftstoffbedingte Unterschiede, wie sie von älteren Applikationen bekannt sind, für den untersuchten EURO-VI-Motor nicht nachgewiesen werden konnten. Dies gilt insbesondere für den typischen Anstieg der Stickoxidemissionen durch FAME-haltige Kraftstoffe. Kraftstoffbedingte Einschränkungen des Motorbetriebes konnten weder in den Kurzzeittests noch in den Dauerläufen festgestellt werden.

Es wäre wünschenswert eine Anpassung des Motorsteuergerätes auf Basis einer gezielten Kraftstoffdetektion zu realisieren. So könnte das verbesserte AGR-Potential von Kraftstoffen mit hohen FAME-Anteilen genutzt werden. Weiterhin könnte die AdBlue-Dosierung an die aktuellen Stickoxidemissionen angepasst werden, um eine Fehldosierung zu vermeiden.

10 Anhang

10.1 Literaturverzeichnis

Burgmer, Martin; Meyer, Ingo (2008): Alternative Kraftstoffe und Hybridantriebe. Bonn.

Machhammer, Otto (2007): Themenheft. Rohstoffwechsel. Weinheim, Bergstr: VCH (Chemie - Ingenieur - Technik, 79.2007,5).

Merker, Günter P.; Stiesch, Gunnar (1999): Technische Verbrennung - motorische Verbrennung. Stuttgart: Teubner.

Mollenhauer, Klaus; Tschöke, Helmut (2007): Handbuch Dieselmotoren. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10214376>.

Reif, Konrad (2010): Dieselmotor-Management im Überblick. Einschließlich Abgastechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. Online verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/47625.

Wichmann, Volker; Flügge, Evelyn; Schümann, Ulrike; Berndt, Silvia; Harndorf, Horst (2011): Betriebsverhalten von Schmieröl im Pflanzenöl- und Biodieselbetrieb. Abschlussbericht zum FVV-Vorhaben Nr. 988.

10.2 Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
ATL	Abgasturbolader
BHT	Butylhydroxytoluol
Ca	Calcium
CCR	Verkokungsneigung, <i>engl.</i> : Conradson carbon residue
CFPP	Grenzwert der Filtrierbarkeit, <i>engl.</i> : Cold filter plugging point
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CR	Common Rail
CZ	Cetanzahl
DK	Dieselmotorkraftstoff
DOC	Dieseloxydationskatalysator, <i>engl.</i> : Diesel oxidation catalyst

DPF	Dieselpartikelfilter
FAME	Fettsäuremethylester, <i>engl.</i> : Fatty acid methyl ester
FSN	Schwärzungszahl, <i>engl.</i> : Filter Smoke Number
HFRR	Schmierfähigkeit, <i>engl.</i> : High-frequency reciprocating rig
HPSEC	Hochleistungs-Größenausschlusschromatographi , <i>engl.</i> : High performance size-exclusion chromatography
HVO	Hydriertes Pflanzenöl, <i>engl.</i> : Hydrotreated vegetable oil
ICP	Induktiv gekoppeltes Plasma, <i>engl.</i> : Inductively coupled plasma
Mg	Magnesium
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NZ	Neutralisationszahl
O ₂	Sauerstoff
OES	Optische Emissionsspektroskopie
OS	Oxidationsstabilität
PIBSI	Polyisobutylensuccinimid
POZ	Peroxidzahl
RME	Rapsölmethylester
SCR	Selektive katalytische Reduktion, <i>engl.</i> : Selective catalytic reduction
SME	Sojaölmethylester
TBN	Alkalische Reserve, <i>engl.</i> : Total Base Number
THC	Kohlenwasserstoffe, <i>engl.</i> : Total hydrocarbon
VTG	Variable Turbinengeometrie
ZV	Zündverzug

10.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesetzlich vorgeschriebene Biokraftstoffanteile in Kraftstoffen laut BioKraftQuG.....	7
Abbildung 2: Abgaszusammensetzung bei der dieselmotorischen Verbrennung gemäß (Mollenhauer und Tschöke 2007).	11
Abbildung 3: Chemische Struktur von BHT.	12
Abbildung 4: Chemische Struktur von Bisphenol.....	12
Abbildung 5: Strukturformel des Detergens PIBSI.....	13
Abbildung 6: Versuchsaufbau der Lagerung im Wärmeschrank.	16
Abbildung 7: Verbrauchskennfeld für Dieselkraftstoff des Versuchsmotors.	18
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Prüfstandsbaus mit Mess- und Steuerungstechnik.....	19
Abbildung 9: Motorschema mit Messstellen für Druck, Temperatur und Abgasentnahmestellen.	19
Abbildung 10: Ausgewählte Messpunkte im Motorkennfeld.....	21
Abbildung 11: Drehmoment und Drehzahlverlauf bei der Sprungmessung.....	21
Abbildung 12: Drehzahl und Drehmoment des Dauerlauffahrzyklus.....	22
Abbildung 13: Oberflächenspannung der DK-FAME-Blends in Abhängigkeit von der Temperatur.....	24
Abbildung 14: Oberflächenspannung der DK-HVO-Blends in Abhängigkeit von der Temperatur.....	25
Abbildung 15: Destillationscharakteristik der DK-FAME-Blends.	26
Abbildung 16: Destillationscharakteristik der DK-HVO-Blends.	27
Abbildung 17: Oxidationsstabilität bei 110 °C (Rancimat) der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.	29
Abbildung 18: Oxidationsstabilität bei 110 °C (Rancimat) der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.	30
Abbildung 19: Oxidationsstabilität bei 140 °C (PetroOXY) der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.	31
Abbildung 20: Oxidationsstabilität bei 140 °C (PetroOXY) der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.	32
Abbildung 21: Neutralisationszahl der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.	33
Abbildung 22: Neutralisationszahl der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.	33
Abbildung 23: Kinematische Viskosität der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.	34
Abbildung 24: Viskosität der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.....	35
Abbildung 25: Peroxidzahl der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.	35

Abbildung 26: Peroxidzahl der Biokraftstoffblends in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 10 °C.....	36
Abbildung 27: HPSEC-Analytik des FAME in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C	37
Abbildung 28: HPSEC-Analytik des Dieselmotorkraftstoffes in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C.....	37
Abbildung 29: HPSEC-Analytik der Probe DK + 30 % HVO in Abhängigkeit von der Lagerdauer bei 25 °C	38
Abbildung 30: AGR bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$	39
Abbildung 31: AGR im Motorkennfeld bei Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff.	40
Abbildung 32: Luftverhältnis λ bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$	40
Abbildung 33: Brennraumdruck und Brennverlauf bei $n=3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me}=9,6 \text{ bar}$	41
Abbildung 34: Brennverlauf der Vorverbrennung bei $n=3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me}=9,6 \text{ bar}$	42
Abbildung 35: Zündverzug in Abhängigkeit der Kraftstoffe bei $n=3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me}=9,6 \text{ bar}$	42
Abbildung 36: NO _x -Emissionen im Rohabgas bei $n = 3.500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 9,6 \text{ bar}$	43
Abbildung 37: Brennraumdruck und Brennverlauf bei $n=1.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me}=1,3 \text{ bar}$	43
Abbildung 38: Brennraumdruck und Brennverlauf bei $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 6,9 \text{ bar}$	44
Abbildung 39: NO _x -Emissionen im Kennfeld für Dieselmotorkraftstoff.	45
Abbildung 40: NO _x -Emissionen im Rohabgas bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n=2.000 \text{ min}^{-1}$	45
Abbildung 41: NO _x -Konvertierung bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$	46
Abbildung 42: FSN im Rohabgas bei steigender Last und konstanter Drehzahl $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$	46
Abbildung 43: Zeitlicher Verlauf der Partikelanzahl [p/cm^3] in Abhängigkeit vom Kraftstoff.	47
Abbildung 44: Partikelanzahl [p/cm^3] bei $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 6,6 \text{ bar}$	47
Abbildung 45: FSN bei $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 6,6 \text{ bar}$	48
Abbildung 46: Partikelanzahl [p/cm^3] im Verlauf bei der Sprungmessung mit Dieselmotorkraftstoff.	49
Abbildung 47: Statistische Auswertung der Partikelanzahl beim Lastsprung mit Dieselmotorkraftstoff.	49
Abbildung 48: Vergleich der Partikelanzahl beim Lastsprung unter Variation verschiedener Kraftstoffe.....	50
Abbildung 49: Auszug Abbildung 48, Vergleich der Partikelanzahl beim Lastsprung unter Variation des Kraftstoffes.	50
Abbildung 50: Einspritzmenge bei $p_{me} = 6,9 \text{ bar}$ und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.....	52
Abbildung 51: Luftmasse bei $p_{me} = 6,9 \text{ bar}$ und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.	53
Abbildung 52: AGR bei $p_{me} = 6,9 \text{ bar}$ und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.	53

Abbildung 53: FSN bei $p_{me} = 6,9$ bar und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.	54
Abbildung 54: Sauerstoffgehalt bei $p_{me} = 6,9$ bar und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.....	54
Abbildung 55: Stickoxidemissionen bei $p_{me} = 6,9$ bar und $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.....	55
Abbildung 56: Kinematische Viskosität bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.	58
Abbildung 57: Rußgehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.....	58
Abbildung 58: TBN des Motoröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.	59
Abbildung 59: NZ des Motoröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.	60
Abbildung 60: FAME-Gehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.	60
Abbildung 61: HPSEC-Analytik der Schmieröle nach 500 Betriebsstunden in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff im Vergleich zum Frischöl.....	61
Abbildung 62: Aluminiumgehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.	62
Abbildung 63: Kupfergehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.....	62
Abbildung 64: Eisengehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer.....	63
Abbildung 65: Siliciumgehalt des Schmieröls in Abhängigkeit von dem eingesetzten Kraftstoff und der Laufzeitdauer	63

10.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Oxidationsstabilitäten des Rapsölmethylesters vor und nach der Additivierung .	12
Tabelle 2: Oxidationsstabilitäten des Sojaölmethylesters vor und nach der Additivierung .	12
Tabelle 3: Chemisch-physikalische Kenngrößen der FAME-Komponenten (Grenzwert gem. DIN EN 14214).	13
Tabelle 4: Kraftstoffkenndaten der Blends, Teil 1.	14
Tabelle 5: Kraftstoffkenndaten der Biokraftstoffblends, Teil 2.	15
Tabelle 6: Lagerbedingungen der Lagerstudie.	16
Tabelle 7: Parameter der Kraftstoffanalytik.	17
Tabelle 8: Technische Daten des Versuchsmotors.	17
Tabelle 9: Abgaskomponenten und entsprechende Analysatoren.	20
Tabelle 10: Messpunkte für die Partikelzählung.	21
Tabelle 11: Ausgewählte Kenngrößen für die Schmierölanalytik.	22
Tabelle 12: Zusammensetzung der Kraftstoffe für die Dauerläufe.	23
Tabelle 13: Visuelle Beurteilung der bei 10 °C gelagerten Proben.	28
Tabelle 14: Konvertierung [%] der Partikelanzahl über den DPF.	48
Tabelle 15: Kennwerte der Schmieröle nach den Kurzzeitversuchen.	51
Tabelle 16: Heizwerte der Kraftstoffe der Dauerläufe.	52
Tabelle 17: Dokumentation der Laufbuchse und Kolbenoberseite.	56
Tabelle 18: Dokumentation des AGR-Kühlers.	57
Tabelle 19: Dokumentation des Abgasturboladers.	57
Tabelle 20: Verschleißmetalle im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 1. Dauerlauf.	72
Tabelle 21: Verschleißmetalle im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 2. Dauerlauf.	72
Tabelle 22: Verschleißmetalle im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 3. Dauerlauf.	72
Tabelle 23: Additiv- und Verschmutzungselemente im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 1. Dauerlauf.	73
Tabelle 24: Additiv- und Verschmutzungselemente im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 2. Dauerlauf.	73
Tabelle 25: Additiv- und Verschmutzungselemente im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 3. Dauerlauf.	73

10.5 Verschleißmetalle und Verschmutzung im Motorschmieröl

Tabelle 20: Verschleißmetalle im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 1. Dauerlauf.

DK + 7 % FAME		Einsatzdauer nach Ölwechsel [h]								
Element	Einheit	0	100	200	250	300	350	400	450	500
Eisen	mg/kg	0,9	31,5	48,3	50,3	54,8	62,5	74,9	84,5	92,3
Chrom	mg/kg	0,1	1,1	1,7	1,8	1,9	2,2	2,6	2,9	3,3
Zinn	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Aluminium	mg/kg	3,0	4,1	4,5	4,7	4,9	5,1	5,8	6,2	7,5
Nickel	mg/kg	0,1	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6
Kupfer	mg/kg	<0,1	7,5	10,8	11,9	12,7	15,2	17,6	19,9	22,0
Blei	mg/kg	<0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Molybdän	mg/kg	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4

Tabelle 21: Verschleißmetalle im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 2. Dauerlauf.

DK + 30 % FAME		Einsatzdauer nach Ölwechsel [h]								
Element	Einheit	0	100	200	300	350	400	450	500	
Eisen	mg/kg	0,9	27,8	41,2	54,4	63,2	71,1	79,7	88,9	
Chrom	mg/kg	0,1	1,0	1,4	1,9	2,2	2,4	2,7	3,0	
Zinn	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Aluminium	mg/kg	3,0	3,2	3,9	4,0	4,4	4,6	4,9	5,2	
Nickel	mg/kg	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	
Kupfer	mg/kg	<0,1	8,7	12,7	14,1	15,7	17,0	18,0	20,6	
Blei	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Molybdän	mg/kg	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

Tabelle 22: Verschleißmetalle im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 3. Dauerlauf

DK + 30 % HVO		Einsatzdauer nach Ölwechsel [h]								
Element	Einheit	0	100	200	250	300	350	400	450	500
Eisen	mg/kg	0,9	36,2	43,1	50,8	59,2	53,5	65,1	69,1	78,0
Chrom	mg/kg	0,1	1,2	1,5	1,8	2,1	1,8	2,2	2,3	2,6
Zinn	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Aluminium	mg/kg	3,0	2,9	3,4	4,0	4,6	5,1	6,2	5,3	6,8
Nickel	mg/kg	0,1	<0,1	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Kupfer	mg/kg	<0,1	7,2	9,2	10,4	12,5	7,2	9,2	10,4	12,5
Blei	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Molybdän	mg/kg	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
----------	-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabelle 23: Additiv- und Verschmutzungselemente im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 1. Dauerlauf.

DK + 7 % FAME		Einsatzdauer nach Ölwechsel [h]								
Element	Einheit	0	100	200	250	300	350	400	450	500
Calcium	mg/kg	1520	1410	1480	1340	1370	1330	1420	1390	1410
Magnesium	mg/kg	4,0	4,5	4,9	4,5	4,5	4,5	4,7	4,8	4,8
Bor	mg/kg	1,8	1,9	1,9	0,8	0,8	0,9	1,0	0,8	0,8
Zink	mg/kg	672	589	635	540	569	544	593	582	630
Barium	mg/kg	<0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Phosphor	mg/kg	572	535	554	487	506	485	514	502	514
Schwefel	mg/kg	1930	1950	2050	1620	1700	1610	1730	1700	1720
Silicium	mg/kg	<0,1	4,9	7,2	6,3	6,9	6,9	7,9	9,3	14,5
Natrium	mg/kg	2,2	5,8	5,5	6,2	5,1	5,5	5,1	5,4	1,8

Tabelle 24: Additiv- und Verschmutzungselemente im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 2. Dauerlauf.

DK + 30 % FAME		Einsatzdauer nach Ölwechsel [h]							
Element	Einheit	0	100	200	300+	350	400	450	500
Calcium	mg/kg	1520	1470	1410	1480	1470	1480	1470	1480
Magnesium	mg/kg	4,0	4,6	4,8	4,9	5,2	5,3	5,3	5,6
Bor	mg/kg	1,8	2,4	1,9	1,5	1,8	1,7	2,1	1,7
Zink	mg/kg	672	647	602	645	646	649	644	650
Barium	mg/kg	<0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Phosphor	mg/kg	572	566	534	552	553	551	542	545
Schwefel	mg/kg	1930	1770	1640	1700	1700	1690	1660	1670
Silicium	mg/kg	<0,1	7,9	9,2	7,6	8,6	8,4	9,2	10,5
Natrium	mg/kg	2,2	8,0	7,4	7,5	7,9	8,3	8,7	9,0

Tabelle 25: Additiv- und Verschmutzungselemente im Motoröl in Abhängigkeit von der Laufzeitdauer im 3. Dauerlauf.

DK + 30 % HVO		Einsatzdauer nach Ölwechsel [h]								
Element	Einheit	0	100	200	250	300	350	400	450	500
Calcium	mg/kg	1520	1470	1590	1660	1740	1630	1750	1700	1770
Magnesium	mg/kg	4,0	4,8	5,2	5,5	5,9	5,2	5,8	5,7	6,1
Bor	mg/kg	1,8	1,7	1,5	1,6	1,6	1,4	1,1	1,1	1,0

Zink	mg/kg	672	662	679	724	740	709	779	762	788
Barium	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,2	0,2
Phosphor	mg/kg	572	618	577	614	623	565	609	589	615
Schwefel	mg/kg	1930	2030	1850	1990	2010	1620	1890	1750	1930
Silicium	mg/kg	<0,1	8,8	8,4	8,8	9,7	7,1	8,8	9,0	10,4
Natrium	mg/kg	2,2	10,1	6,8	6,8	6,9	8,5	6,7	7,9	7,2

10.6 Post-Mortem-Analyse der Abgasnachbehandlungssysteme

Nach Abschluss der Dauerläufe wurden die Abgasnachbehandlungssysteme von der Firma Johnson Matthey befundet. Die Untersuchung wurde von Herrn Dr. Claus Görsmann koordiniert.

Kontaktdaten:

Dr. Claus Görsmann
Technology Strategy Manager

Johnson Matthey Plc
Emission Control Technologies
Orchard Road
Royston, Hertfordshire
SG8 5HE
United Kingdom

Tel. +44-1763256086
Mobile: +44-7967-278489
Fax.: +44-1763-253492
E-mail: Claus.Goersmann@Matthey.com
Internet: <http://ect.jmcatalysts.com/>

CHARACTERISATION REPORT C12674

19th January 2013



Johnson Matthey
Catalysts

Post mortem analysis of three DOC/CSF/SCR systems from Rostock University

For circulation to FVV

M. Lawrence

Catalyst Characterisation Group



Confidential

Introduction



INTRODUCTION (1)

- Three DOC/CSF/SCR systems were submitted for analysis by Rostock University
- Each system comprised a DOC, a CSF and two SCR catalysts

System	Sample Label	Substrate	Dimensions (mm)
System 1	DOC	Metallic	134.8x72x63.5
	CSF	Silicon Carbide	198.33x102.2x170
	SCR A	Cordierite	140x75
	SCR B	Cordierite	140x150
System 2	DOC	Metallic	134.8x72x63.5
	CSF	Silicon Carbide	198.33x102.2x170
	SCR A	Cordierite	140x75
	SCR B	Cordierite	140x150
System 3	DOC	Metallic	134.8x72x63.5
	CSF	Silicon Carbide	198.33x102.2x170
	SCR A	Cordierite	140x75
	SCR B	Cordierite	140x150



INTRODUCTION (2)

- The three DOC/CSF/SCR systems had been tested by Rostock University using different biofuel blends:
 - System (1): Diesel (B7)
 - System (2): Diesel + 30% FAME
 - System (3): Diesel + 30% HVO
- The FAME fraction was a blend of 70% RME (rape seed methyl ester) and 30% SME (soy bean methyl ester), stabilised with antioxidants
 - 100ppm of an anti-fouling detergent of the PIBSI class was also added to the FAME fraction



INTRODUCTION (3)

- Three 500 hour tests were run to compare the exhaust after-treatment performance from standard fuel conditions vs. bio fuel blends
- All tests were carried out on a VW series EU-VI passenger car engine with 4cyl.-16V, engine number CBAC, 1968cm³ engine swept volume, 103kW at 4200rpm and max engine torque of 320Nm at 1750-2500rpm
- Post mortem analysis was carried out to investigate the level of poisoning present after ageing



EXPERIMENTAL & SAMPLE PREPARATION

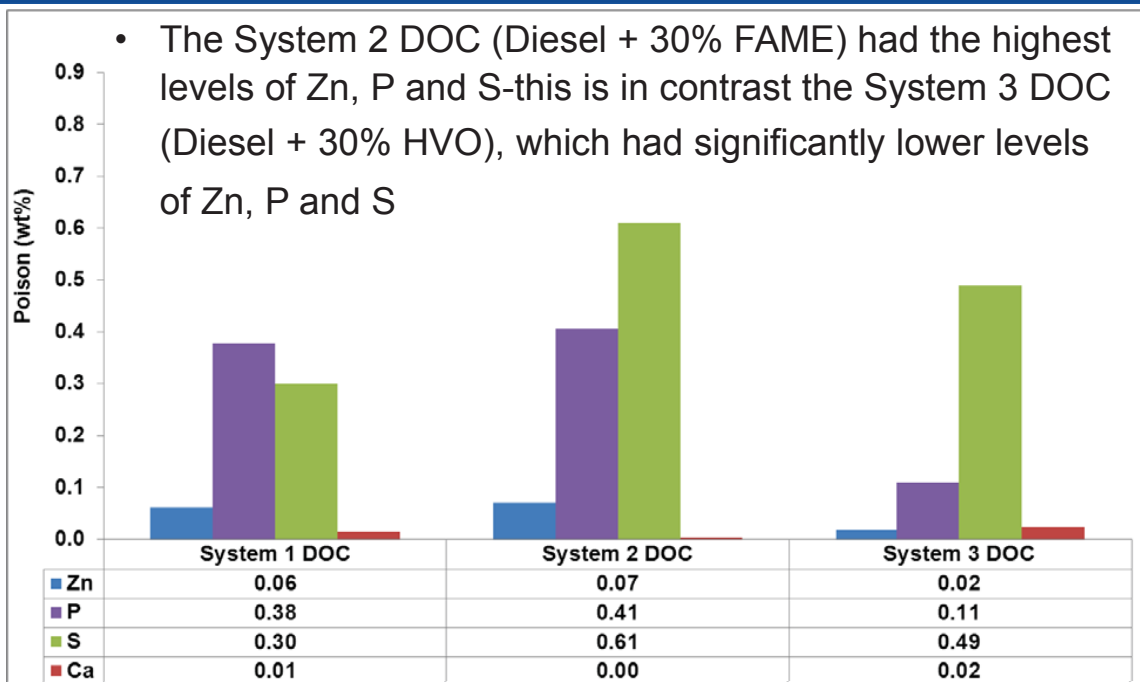
- X-ray fluorescence (XRF) was used to quantify the extent of poisoning present on all catalysts
- For the DOCs, the catalysts were drilled through and swarf collected
 - Swarf was ground and pelletized before XRF analysis
- For the CSFs cores were taken from each catalyst then divided into three sections: 'Front', 'Middle' and 'Rear'
 - These sections were ground and pelletized before analysis
- For elemental analysis of the SCRs, a quarter of each catalyst was divided into three sections: 'Front', 'Middle' and 'Rear'
 - These sections were ground and pelletized before analysis



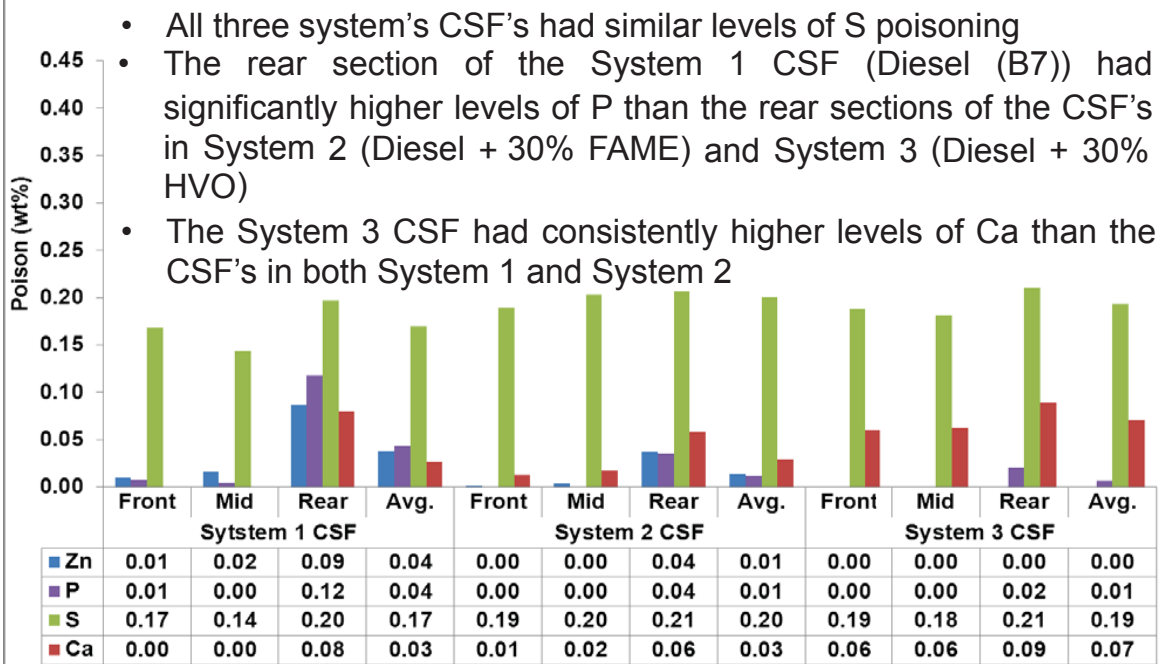
Results



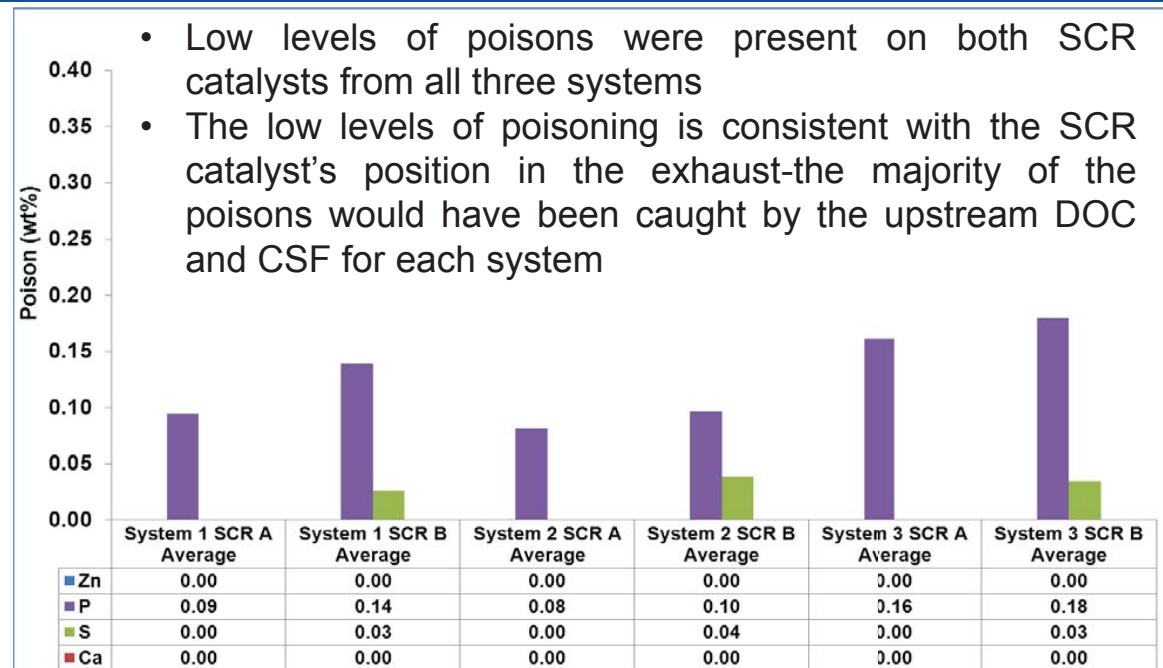
CATALYST POISONING -DOC



CATALYST POISONING -CSF



CATALYST POISONING -SCR



Conclusions



CONCLUSIONS (1)

- Three catalyst systems were submitted for analysis by Rostock University
 - Each system comprised a DOC, a CSF and two SCR catalysts
 - The three systems had been tested by Rostock University using different biofuel blends
- The System 2 DOC (Diesel + 30% FAME) had the highest levels of Zn, P and S-this is in contrast the System 3 DOC (Diesel + 30% HVO), which had significantly lower levels of Zn, P and S



CONCLUSIONS (2)

- All three system's CSF's had similar levels of S poisoning
 - The rear section of the System 1 CSF (Diesel (B7)) had significantly higher levels of P than the rear sections of the CSF's in system 2 (Diesel + 30% FAME) and System 3 (Diesel + 30% HVO)
 - The System 3 CSF had consistently higher levels of Ca than the CSF's in both System 1 and System 2
- Low levels of poisons were present on both SCR catalysts from all three systems

