

**Nutzung des innermotorischen Potentials von
Biodiesel (FAME) durch Berücksichtigung der
spezifischen Kraftstoffeigenschaften im Common-
Rail-Dieselmotor**

UFOP Projekt-Nr. 540/122
-Abschlussbericht-



Autor:
Dipl.-Ing. (Univ.) Andreas Hubert

Anschrift:
regineering GmbH
Alemannenstrasse 25
D-85095 Denkendorf

September 2012

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabellen- und Abbildungsverzeichnis..... | 4 |
| Abkürzungsverzeichnis | 6 |
| Zusammenfassung | 8 |
| 1. Einleitung und Aufgabenstellung..... | 10 |
| 2. Literaturhinweise..... | 13 |
| 3. Versuchsträger und Methodik..... | 21 |
| 3.1 Versuchsträger und Messtechnik | 21 |
| 3.2 Verwendete Kraftstoffe..... | 24 |
| 3.3 Vorgehen / Methodik | 25 |
| 4. Ergebnisse der Referenzvermessungen..... | 29 |
| 4.1 Messreihe B7 | 29 |
| 4.2 Messreihe B30..... | 30 |
| 4.3 Messreihe B100..... | 33 |
| 4.4 Messreihe B30-Leistungsangleichung an B7...36 | |
| 4.5 Messreihe B100-Leistungsangleichung an B7.38 | |
| 4.6 Variation des SOE..... | 41 |
| 5. Ergebnisse des Optimierungsprozesses | 45 |
| 5.1 Optimierungsergebnis für B30..... | 45 |

| | |
|--|----|
| 5.2 Optimierungsergebnis für B100 | 48 |
| 5.3 Darstellung der Gesamtergebnisse im Vergleich | 51 |
| 6. Schlussfolgerungen | 54 |
| Literaturverzeichnis | 56 |
| Anhang..... | 63 |

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

- Tab. 1: technische Daten MP2
- Tab. 2: Übersicht Betriebspunkte
- Tab. 3: B7 - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte
- Tab. 4: B7 - Gesamtergebnis
- Tab. 5: B30 - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte
- Tab. 6: B30 - Gesamtergebnis, im Vergleich
- Tab. 7: B100 - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte
- Tab. 8: B100 - Gesamtergebnis, im Vergleich
- Tab. 9: B30 - P_{ident} - Betriebspunkteinstellung
- Tab. 10: B30 - P_{ident} - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte
- Tab. 11: B30 - P_{ident} - Gesamtergebnis, im Vergleich
- Tab. 12: B100 - P_{ident} - Betriebspunkteinstellung
- Tab. 13: B100 - P_{ident} - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte
- Tab. 14: B100 - P_{ident} - Gesamtergebnis, im Vergleich
- Tab. 15: B7 - Einstellung, Ausgangsbasis
- Tab. 16: B30 - Einstellung optimiert

- Tab. 17: B30 - optimiert - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte
- Tab. 18: B30 - optimiert - Gesamtergebnis, im Vergleich
- Tab. 19: B100 - Einstellung optimiert
- Tab. 20: B100 - optimiert - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte
- Tab. 21: B100 - optimiert - Gesamtergebnis, im Vergleich
-
- Abb. 1: prinzipieller Optimierungsprozess
- Abb. 2: NO_x - Verläufe über SOE
- Abb. 3: PM -Verläufe über SOE
- Abb. 4: spez. Energieeinsatz „SEE“-Verläufe über SOE
- Abb. 5: Vergleich der Messreihe B7, B30 (unveränderte Motoreinstellung) und B30 (optimierte Motoreinstellung)
- Abb. 6: Vergleich der Messreihe B7, B100 (unveränderte Motoreinstellung) und B100 (optimierte Motoreinstellung)

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------|---|
| ASP | Arbeitsspiel |
| b_e | spezifischer, gravimetrischer Kraftstoffverbrauch |
| B7 | Diesekraftstoff mit bis zu 7-Vol.-% FAME Anteil |
| B30 | Diesekraftstoff mit 30-Vol.% FAME Anteil |
| B100 | FAME Reinkraftstoff |
| CO | Kohlenmonoxid |
| DOE | Duration of Energizing, Injektoransteuerdauer |
| FAME | Fatty acid methyl ester, Fettsäuremethylester |
| HC | Kohlenwasserstoffe |
| M | (Dreh-)Moment |
| n | Drehzahl |
| NO _x | Stickoxide |
| OT | Oberer Totpunkt |
| P | Leistung |
| p_{me} | effektiver Mitteldruck |
| PM | Particulate Matter, Partikelemission |
| SCR | Selektive katalytische Reduktion |
| SEE | Spezifischer Energieeinsatz |

| | |
|-----------|---|
| SOE | Start of Energizing, Injektoransteuerbeginn |
| US EPA | United States Environmental Protection Agency, US-Amerikanische Umweltbehörde |
| °KW | Grad Kurbelwinkel |
| λ | Verbrennungsluftverhältnis |

Zusammenfassung

Dieses Projekt setzt sich zum Ziel, mit der Berücksichtigung der spezifischen Kraftstoffeigenschaften von Fettsäuremethylester (Biodiesel) das innermotorische Potential dieses Kraftstoffes herauszuarbeiten. Dabei kommt ein Einzylinder-Dieselmotor mit Common-Rail-Einspritzsystem zum Einsatz. Es werden drei Messreihen (je vier Betriebspunkte) als Referenz gefahren, je eine mit Diesel B7 (nach DIN EN590), eine mit Biodiesel B100 (nach DIN EN14214) und eine mit einem Blendkraftstoff B30 (30 Volumen-% Biodieselanteil, 70 Volumen-% Diesel). Im nächsten Schritt wird eine Leistungsangleichung an die Referenzwerte der B7-Messreihe durch Verlängerung der Einspritzdauer durchgeführt. Weiterhin wird für einen Betriebspunkt eine Variation des Injektoransteuerbeginns (und somit des Einspritzbeginns) bei ansonsten konstanten Bedingungen vollzogen. Damit kann insbesondere für den Kraftstoff B100 ein Zielbereich für den Ansteuerbeginn gefunden werden, bei welchem eine vergleichbare Stickoxidemission und zugleich eine

deutliche Reduktion der Partikelemission im Vergleich zu Diesel B7 möglich wird.

Mit den Kenntnissen und Ergebnissen wird eine Optimierung für B30 und B100 durchgeführt, womit bei tendenziell geringerem spezifischen Energieeinsatz und nur moderat erhöhter Stickoxidemission (B30) bzw. vergleichbarer Stickoxidemission (B100) eine starke Reduktion der Partikelemission erreicht werden kann.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Bisher werden im mobilen Sektor für den Betrieb von Dieselmotoren überwiegend sogenannte „Blendkraftstoffe“ eingesetzt. Diese setzen sich aus mineralischem Dieselkraftstoff mit seiner Bandbreite verschiedener Kohlenwasserstoffspezies und aus Fettsäuremethylestern, vielfach auf Rapsölbasis, zusammen. Damit besteht der aktuell an der Tankstelle zu erwerbende Dieselkraftstoff aus bis zu sieben Volumenprozent regenerativen Energieträgern (Stand September 2012).

Grundsätzlich ist es jedoch für bestimmte Anwendungen denkbar und sinnvoll, Reinkraftstoffe (z.B. Biodiesel, Pflanzenöl, usw.) einzusetzen (z.B. in der Landwirtschaft oder anderen Sonderbereichen). Weiterhin ist es von Interesse, wie sich höhere Biodieselanteile im Dieselkraftstoff verhalten. Die (u.a. politische) Entwicklung der letzten Jahre führte dazu, dass die Entwicklungsarbeiten für Reinkraftstoffe vergleichsweise stark eingeschränkt waren. Der Großteil der Forschung wurde von (öffentlichen) Forschungseinrichtungen durchgeführt, welche zwar die spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Reinkraftstoffe im motorischen Einsatz im

Detail analysierten, jedoch keinen Optimierungsprozess, welcher die zur Verfügung stehenden Vorteile dieser Kraftstoffe nutzt, durchlaufen haben.

Genau an dieser Stelle setzt dieses Projekt an. Es beinhaltet eine Untersuchung von Biodiesel nach DIN EN14214 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2010) im Vergleich zu Standard-B7-Diesel nach DIN EN590 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2010), welche an einem reengineering Forschungsmotor durchgeführt werden. Eine zweite Messreihe vergleicht dabei einen Blendkraftstoff bestehend aus 30-Volumen-% Biodiesel und 70-Volumen-% - Diesel (im Folgenden als B30 bezeichnet). Insbesondere wird dabei das Augenmerk auf die Emissionen (sowohl reglementierte gasförmige als auch partikelförmige Schadstoffe) gelegt.

Das Ziel soll dabei sein, die innermotorischen Potentiale von Biodiesel und B30 durch Berücksichtigung der spezifischen Kraftstoffeigenschaften im Common-Rail-Dieselmotor mit offenem Motorsteuergerät (Entwicklungssteuergerät) zu untersuchen und aufzuzeigen.

Beginnend mit einer Literaturübersicht im nächsten Abschnitt, wird im Kapitel 3 der Versuchsträger, die zum Einsatz kommende Messtechnik und die angewandte Methodik beschrieben. Die Ergebnisse der Referenzvermessungen (Kapitel 4) dienen dann als Basis für den Optimierungsprozess, dessen Ergebnisse in Abschnitt 5 vorgestellt werden. Abschließend werden die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zusammengefasst.

2. Literaturhinweise

Im Folgenden werden Hinweise und Literaturempfehlungen gegeben, welche sich unter bestimmten Gesichtspunkten dem Kraftstoff Biodiesel gewidmet haben. Dabei werden nur wesentliche Punkte aufgegriffen, die Beschreibung der detaillierten Ergebnisse der einzelnen Arbeiten ist nicht Gegenstand dieses Berichts.

Grundsätzlich gilt der vorliegende Themenbereich „Biodiesel“ zu großen Teilen als erforscht. Beispielsweise beschreibt Giebel (Giebel, 2007) den Einsatz von Biodiesel auf Rapsölbasis in Deutz-Motoren, wobei bis zu 15000 Betriebsstunden mit keinen gravierenden Auffälligkeiten gefahren werden konnten. Allerdings wird für den Langzeitbetrieb darauf hingewiesen, dass kraftstoffführende Komponenten aus Gummi und Membran-Kraftstoffvorförderpumpen jährlich auszutauschen sind und bei den Versuchen die Ölwechselintervalle halbiert wurden.

Zwei Jahre später wurden in (Knuth & Winkler, 2009) für EURO IV Common-Rail-Motoren Prüfstandsläufe und Feldtesterproben durchgeführt. Dabei wird wie auch in anderen Untersuchungen auf die im

Vergleich zu Diesel geringere erzielbare maximale Leistung (in (Knuth & Winkler, 2009) ca. 9%) und den höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch (in (Knuth & Winkler, 2009) ca. 12-Massen-%) bei unveränderter Motoreinstellung hingewiesen. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich darin, dass die höhere Dichte von Biodiesel den geringeren Heizwert nicht kompensieren kann und daher der Energieeintrag durch das Einspritzsystem nicht identisch mit dem des Dieselbetriebs bei unveränderter Motoreinstellung ist.

Weiterhin wurde mit dem aufkommenden Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen beim Dieselmotor die Auswirkungen vom Biodieselbetrieb, sowohl als Reinkraftstoff (siehe beispielsweise (Knuth & Winkler, 2009), (Tschöke, et al., 2002)) als auch als Blendkraftstoff (z.B. in (Tatur, et al., 2009), (Richter, et al., 2012)) untersucht. In (Blassnegger, 2005) wurden auch nachrüstbare Abgasnachbehandlungssysteme eingesetzt. Das Beladungs- und Freibrennverhalten im Falle eines verwendeten Partikelfilters unterscheidet sich dabei von dem des vergleichbaren Dieselbetriebs und ist daher zu beachten.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist das Motorverschleißverhalten. Unter anderem hat die Fa. Robert Bosch GmbH diese Thematik im Detail untersucht (mit dem Fokus auf das Einspritzsystem) und z.B. in (Ullmann & Stutzenberger, 2007) vorgetragen. Weitere Untersuchungen zum Thema Verschleißverhalten und Langzeitbetrieb finden sich z.B. auch in (Knuth & Winkler, 2009) und (Okamoto, 2011). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kraftstoffqualität von entscheidender Bedeutung ist und diese unbedingt eingehalten werden muss, um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten. Damit können dann auch aktuelle Motorgenerationen (z.B. EU Stage IIIB respektive US Tier 4 interim) mit Biodiesel betrieben werden, siehe dazu beispielsweise (Knuth, et al., 2012).

Eine wesentliche Schlüsseltechnologie beim Dieselmotor ist das Einspritzsystem. Daher wurde und wird auch für Biodiesel (und andere Biokraftstoffe) in verschiedenen Arbeiten beispielsweise das Sprayverhalten im Vergleich zu Dieselkraftstoff untersucht, siehe dazu z.B. (Heilig, et al., 2011), (Backofen, et al., 2010), (Kuti, et al., 2010), (Wloka, et al., 2010), oder (Battistoni, 2012).

Hervorzuheben sind dabei besonders die Ergebnisse von (Backofen, et al., 2010), welche unter anderem zu dem Resultat kommen, dass mit steigenden Einspritzdrücken deutlich oberhalb von 2000 bar die Kraftstoffsprayvolumina von Biodiesel sich denen von Diesel immer mehr annähern.

Nicht zuletzt standen und stehen die Verbrennungsmotoremissionen auch im Biodieselbetrieb meist im Fokus. Einen Einblick findet man beispielsweise in (Chien, et al., 2009), (Knothe, et al., 2009), (Blassnegger, et al., 2009). Auch bisher nicht reglementierte Abgasbestandteile von Diesel und Biodiesel wurden untersucht (Munack, et al., 2011).

Die Auswirkungen des biodieselbetriebs Verbrennungsmotors auf die Emissionen lassen sich nicht pauschal beantworten, da die Resultate abhängen von verknüpften Faktoren wie spezifische Motorkomponenten und die Art des Einspritzsystems, die ausgewählten Betriebspunkte bzw. Abgaszyklen, die Art der Probennahme bzw. die dafür eingesetzte Messtechnik usw.

Grundsätzlich, ohne konkret auf die jeweilige Vermessung einzugehen, findet man aber in nahezu allen Berichten einen Rückgang der

Kohlenwasserstoff-, der Kohlenmonoxid- und der Partikelemission im Vergleich zum Dieselpetrieb. Meist wird auch von einer (leichten) Zunahme der Stickoxidemissionen berichtet. Dieser Zusammenhang fügt sich dem bekannten „Partikel-NO_x-Trade-Off“, welcher allerdings für verschiedene Kraftstoffe auch unterschiedlich verläuft. Überwiegend wurde bisher hingegen Diesel durch Biodiesel ersetzt und keine Veränderungen am Motor (bzw. dessen Management) vorgenommen, welche die spezifischen Eigenschaften des Biodiesels (z.B. das Siedeverhalten) in einem modernen Common-Rail-Dieselmotor berücksichtigen würden.

Dabei eröffnen die gewonnenen Erkenntnisse ein weites Feld für Optimierungspotentiale. Diese Gesichtspunkte findet man auch in der Literatur wieder: (Krahl, 2002) erwähnt dabei auch prinzipiell mögliche (teils massive) konstruktive Änderungen am Verbrennungsmotor, wobei angemerkt wird, dass dies aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll erscheint. Vielmehr sei es die optimale Einstellung des Motormanagements, welche in Verbindung mit einer Kraftstofferkennung eine ökonomische Lösung darstellt und dabei die spezifischen Eigenschaften des Kraftstoffs Biodiesel nutzt. Krahl formuliert dabei

auch den Vorteil des bereits angesprochenen, günstigeren „Partikel-NO_x-Trade-Offs“. Für die Untersuchungen kam dabei ein Einzylinder MWM-Dieselmotor mitnockengesteuertem Einspritzsystem zum Einsatz. Somit ließen sich Änderungen hinsichtlich des Einspritzzeitpunktes nur manuell über eine Variation des Förderbeginns darstellen.

Auch in (Spessert & Schleicher, 2007) werden Untersuchungen an Motoren mitnockengesteuerten Einspritzsystemen (Hatz Industriedieselmotoren) durchgeführt. Die Autoren verglichen dabei das Laufverhalten, die Geräuscentwicklung und die Emissionen beim Betrieb der Versuchsträger mit Biodiesel und Pflanzenöl. Sie kommen zu der Erkenntnis, dass ohne Optimierungsmaßnahmen ein mit Dieselkraftstoff vergleichbarer Motorbetrieb nur bedingt möglich ist. So wird eine Veränderung der Einspritzpumpennockenkontur diskutiert. Allerdings ist damit auch nur in einem beschränkten Kennfeldbereich des Motors eine Verbesserung erzielbar.

Um positive Auswirkungen über den gesamten Kennfeldbereich eines Motors beim Betrieb mit Biodiesel zu erhalten, ist einnockenunabhängiges Einspritzen von Kraftstoff notwendig. Diese

Funktionalität wird von Common-Rail-Einspritzsystemen geboten. In (Knuth & Winkler, 2009) kommen derartige Motoren zum Einsatz. Hier wird auch ein „Biodieselsensor“ (Funktion: Messung der Dielektrizitätskonstante) erwähnt, mit welchem man prinzipiell die Möglichkeit hätte, den jeweiligen Kraftstoff (bzw. einen Blendkraftstoff) zu erkennen und damit dann die optimale Einstellung hinsichtlich Kraftstoffmenge und Einspritzzeitpunkt vorzunehmen. Eine Ausführung der genannten Motormanagementanpassung wird im zitierten Bericht (Knuth & Winkler, 2009) nicht beschrieben. Eine thermodynamische Analyse der Biodieselvebrennung findet sich beispielsweise in (Wichmann, et al., 2011). Wichmann et al vergleichen dabei drei Biokraftstoffe (FAME, hydriertes Pflanzenöl und Rapsölraffinat) bei jeweils gleicher Motoreinstellung. Dabei werden verschiedene Punkte im Kennfeld des Versuchsträgers (2,0l-4-Zylinder-PKW Dieselmotor, Steuergerätebedatung „Diesel-Serie“, Common-Rail-Einspritzsystem) gefahren. Etwas später wurden auch Ergebnisse von Untersuchungen mit verschiedenen Blendkraftstoffen präsentiert (Richter, et al., 2012). So wurde z.B. der Kraftstoffeinfluss auf den Zündverzug oder die NO_x –

Konvertierung beim Einsatz eines SCR-Katalysators untersucht. Eine kraftstoffspezifische Optimierung des Motormanagements fand aber auch hier nicht statt.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass dem Autor zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts keine Quelle bekannt war, welche sich dem Ziel des vorliegenden Vorhabens widmet. Dabei sind die Wirkmechanismen, welche zu unterschiedlichen Emissionsverhalten beim Einsatz von Biodiesel führen, größtenteils bekannt (z.B. Einfluss des Siedeverhaltens, des Sauerstoffgehalts, des Heizwertes usw.). Allerdings wurde bisher nicht versucht, an einem Versuchsträger mit Common-Rail-Einspritzsystem eine optimale Einstellung beim Einsatz von Biodiesel nach DIN EN14214 (bzw. einen Blendkraftstoff B30) im Vergleich zu Diesel nach DIN EN590 zu entwickeln. Dies stellt somit das Ziel dieses Vorhabens dar.

3. Versuchsträger und Methodik

Im Folgenden werden der Versuchsträger und die eingesetzte Messtechnik beschrieben. Weiterhin erfolgen die Angaben zu den verwendeten Kraftstoffen und die Methodik des Vorgehens am Prüfstand.

3.1 Versuchsträger und Messtechnik

Für dieses Vorhaben kommt der reengineering Versuchsträger „MP2“ zum Einsatz. Er basiert auf einem Senertec-1-Zylinder-Dieselmotor (freisaugend, 579 cm³ Hubraum) und ist als Forschungsmotor konzipiert. Der MP2 ist modular aufgebaut und entspricht in der verwendeten Konfiguration keinem speziellen Serienmotor. Es kann je nach Bedarf verschiedene Subsysteme (wie Aufladung, Abgasrückführsystem, Kolbenmuldengeometrie, usw.) oder spezielle Messtechnik (Indizierung, Abgasmesstechnik, Sondermesstechnik) angebracht werden. Der MP2 ist mit einem Bosch Common-Rail-Einspritzsystem (max. Common-Rail-Druck 1800 bar, bis zu 5 Einspritzungen pro Arbeitsspiel) ausgestattet

und verfügt über ein offenes Motorsteuergerät zur freien Wahl der Einspritzstrategie. Freisaugend leistet der Motor je nach Applikation (in Abhängigkeit der jeweiligen Abgasgrenzwerte) bis zu 7kW bei 2500 1/min. Die wesentlichen technischen Daten finden sich in Tabelle 1.

| | |
|---|--|
| Versuchsträger: regineering MP2 1-Zylinder-DI-Dieselmotor | |
| Hubvolumen V_h | 579cm ³ |
| Verdichtungsverhältnis ϵ | 22,5 |
| Kolbenmulde | Standardmulde MP2 |
| Ventiltrieb | Senertec, Serienzustand |
| Einspritzsystem | Bosch Common-Rail, 5-Loch-Düse Bosch-regineering |
| Aufladung | keine |
| Externe Abgasrückführung | keine |
| Abgasnachbehandlung | keine |

Tab. 1: technische Daten MP2

Für dieses Vorhaben wird der Versuchsträger als Referenz (mit Dieselkraftstoff „B7“ nach DIN EN590) so eingestellt, dass sich bei vier anzufahrenden Betriebspunkten (siehe Abschnitt 3.3)

das arithmetische Mittel der Emissionen an der für diese Motorkategorie strengsten Abgasstufe (US EPA Tier 4 < 8kW (VDMA, 2011)) orientiert.

Standardmäßig ist der MP2 mit diversen Druck- und Temperaturmessstellen ausgestattet. Diese Messstellen werden im Folgenden nicht weiter beschrieben und kommen nur dann zum Einsatz, sofern sie für diese Untersuchung relevant sind.

Es wird das Verbrennungsluftverhältnis kontinuierlich aufgezeichnet, ebenso wie der Kraftstoffverbrauch (gravimetrische Ermittlung).

Weiterhin kommt folgende Emissionsmesstechnik zum Einsatz:

- Horiba Mexa Abgasanalyse 9230 (Erfassung der gasförmigen Emission: Stickoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (HC), und Kohlenmonoxid (CO))
- Pierburg CVS-Tunnel und Partikelmessanlage (gravimetrische Erfassung der Partikelemission (im Folgenden als PM bezeichnet), Messverfahren angelehnt an EU Richtlinie 2004/26 EG (Europäisches Parlament und Rat, 2004))

Es wird die Rohemission des Versuchsträgers gemessen.

Jede Messreihe erfolgt mit konditioniertem Versuchsträger, d.h. der Motor ist betriebswarm und die Messtechnik befindet sich im Rahmen der üblichen Messtoleranz, getestet durch einen Referenzlauf zu Beginn eines jeden Messtages und einem darauf folgenden Abgleich mit Vergleichsdaten.

3.2 Verwendete Kraftstoffe

Für das Vorhaben kommen drei Kraftstoffe zum Einsatz:

- I. Diesel, nachfolgend als B7 bezeichnet, nach DIN EN590 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2010)
- II. Blendkraftstoff (B30) aus 70-Vol% Dieselkraftstoff und 30-Vol% Rapsmethylester
- III. Biodiesel, Rapsmethylester, im Folgenden als B100 bezeichnet, nach DIN EN14214 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2010)

B30 wird aus I. und III. entsprechend dem volumetrischen Mischungsverhältnis hergestellt.

Für B100 liegt ein Analyseblatt vor (siehe Anhang).

Es werden folgende Zahlenwerte für den Parameter „Heizwert“ verwendet (für die nachfolgenden Berechnungen hinsichtlich des spezifischen Energieeinsatzes, nachfolgend auch als „SEE“ bezeichnet):

- I. B7: 41,80 MJ/kg
- II. B30: 40,36 MJ/kg
- III. B100: 37,00 MJ/kg

3.3 Vorgehen / Methodik

Zu Beginn erfolgt die Vermessung von B7 als Referenzkraftstoff an folgenden Betriebspunkten:

| Betriebspunkt | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
|--|--------|----------|--------|----------|
| n [1/min] | 1500 | 1500 | 2200 | 2200 |
| Einspritzmasse für Diesel [mg] | 17 | 25,3 | 15,6 | 26,1 |
| Injektoransteuerbeginn ("SOE") [°KW v. OT] | 4 | 1 | 6 | 4 |
| Anzahl der Einspritzungen pro ASP [-] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Common-Rail-Druck [bar] | 500 | 1000 | 900 | 1000 |
| p_{me} [bar] für B7 | 3,03 | 5,58 | 3,06 | 5,31 |
| M [Nm] für B7 | 14,0 | 25,69 | 14,1 | 24,45 |
| P [kW] für B7 | 2,27 | 4,04 | 3,25 | 5,63 |

Tab. 2: Übersicht Betriebspunkte

Mit dieser Motoreinstellung erreicht der Versuchsträger im Mittel die Abgasgrenzwerte nach US EPA Tier 4 (VDMA, 2011). Es wird angemerkt, dass für die formal korrekte Ermittlung ein definierter Prüfzyklus (ISO 8178) vorgeschrieben ist. Hier erfolgt lediglich eine Orientierung am Grenzwert der angegebenen Abgasstufe für die jeweiligen Emissionen. Die Grenzwerte (Zahlenwerte) werden in Abschnitt 4 aufgelistet. Die Berechnung der spezifischen Emission in [g/kWh] wird nach EU-Richtlinie 2004/26 EG (Europäisches Parlament und Rat, 2004) durchgeführt. Das Gesamtergebnis wird über eine arithmetische Mittelwertbildung aller vier Teilergebnisse berechnet.

Im zweiten Schritt werden die Kraftstoffe B30 und B100 bei identischer B7-Motoreinstellung gefahren. Es wird ein (bei B30 geringer) Rückgang der effektiven Leistung (bzw. Drehmoment, effektiver Mitteldruck) erwartet, weil bei identischer Injektoransteuerdauer (im Folgenden als DOE: „Duration of Energizing“ bezeichnet) primär aufgrund des geringeren Heizwertes von Fettsäuremethylestern weniger Energie in den Brennraum durch den Einspritzprozess eingetragen wird.

Um dies auszugleichen, erfolgt im dritten Schritt eine Leistungsangleichung in Form einer Verlängerung der DOE und eine erneute Messreihe für B30 und B100.

Um Kenntnisse über das Emissionsverhalten in Abhängigkeit des Injektoransteuerbeginns (im Folgenden als SOE: „Start of Energizing“ bezeichnet) und des eingesetzten Kraftstoffes zu erhalten, wird im nächsten Schritt eine Variation des SOE bei ansonsten konstanten Bedingungen an einem der vier Betriebspunkte (2200_3) durchgeführt.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen beginnt die Umsetzung des Optimierungsprozesses. Prinzipiell wird dieser nach folgendem Schema durchlaufen:

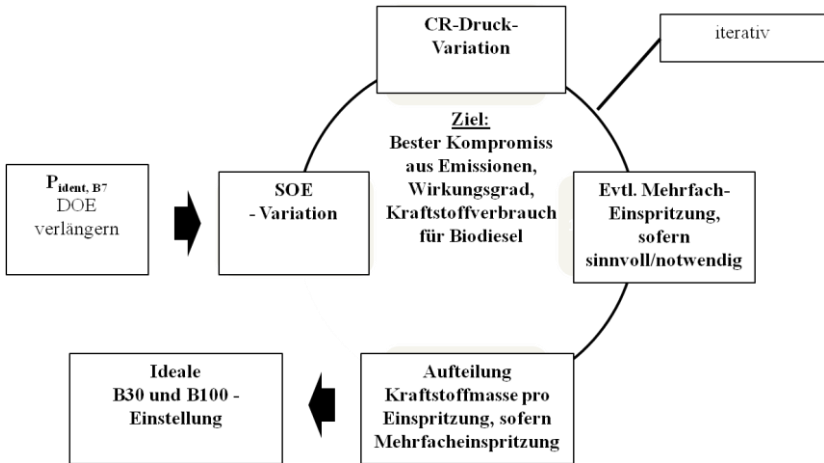


Abb. 1: prinzipieller Optimierungsprozess

Vorrangig erfolgt die Variation des SOE und des Common-Rail-Drucks (bei entsprechender Anpassung der DOE).

Das Ziel ist es dabei, mindestens das Ergebnis der Dieselmessung zu erreichen und zugleich die bestmögliche Einstellung hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs bzw. des Wirkungsgrades zu finden (jeweils für B30 und B100).

4. Ergebnisse der Referenzvermessungen

4.1 Messreihe B7

Das Ergebnis der B7-Referenzvermessung ist in Tabelle 3 dargestellt:

| B7-Betriebspunkt | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
|--|--------|----------|--------|----------|
| Kraftstoffverbrauch [kg/h] | 0,62 | 1,05 | 0,91 | 1,55 |
| Spezifischer Kraftstoffverbrauch b_e [g/kWh] | 273,13 | 260,72 | 281,40 | 275,92 |
| Spezifischer Energieeinsatz [MJ/kWh] | 11,42 | 10,90 | 11,76 | 11,53 |
| Effektive Leistung P [kW] | 2,27 | 4,04 | 3,25 | 5,63 |
| Verbrennungsluftverhältnis λ [-] | 2,77 | 1,58 | 2,93 | 1,71 |
| NO _x [g/kWh] | 5,99 | 5,88 | 8,12 | 5,08 |
| CO [g/kWh] | 6,09 | 4,92 | 1,34 | 4,11 |
| HC [g/kWh] | 0,31 | 0,05 | 0,08 | 0,06 |
| PM [mg/kWh] | 23,35 | 108,72 | 31,86 | 225,95 |

Tab. 3: B7 - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte

Mittelt man die vier Einzelergebnisse und stellt sie als Orientierung den Grenzwerten der US EPA Tier 4 (< 8KW) (VDMA, 2011) gegenüber, erhält man folgendes Resultat:

| Messreihe | US EPA Tier 4 <8kW | B7 |
|--|-----------------------|--------|
| Spez. Kraftstoffverbrauch b_e , \circ [g/kWh] | - | 272,79 |
| Spez. Energieeinsatz, \circ [MJ/kWh] | - | 11,40 |
| P, \circ [kW] | - | 3,80 |
| NO _x + HC, \circ [g/kWh] | 7,50 | 6,39 |
| CO, \circ [g/kWh] | 8,00 | 4,11 |
| PM, \circ [mg/kWh] | 400,00 | 97,50 |

Tab. 4: B7-Gesamtergebnis

Das gemittelte Ergebnis der ausgewählten Betriebspunkte liegt mit der in Tabelle 2 genannten Motoreinstellung unter den Grenzwerten der US EPA Tier 4.

4.2 Messreihe B30

Das Ergebnis der B30-Vermessung ist in Tabelle 5 und 6 dargestellt:

| | | | | |
|--|--------|----------|--------|----------|
| B30-Betriebspunkt | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
| Kraftstoffverbrauch [kg/h] | 0,63 | 1,04 | 0,97 | 1,63 |
| Spezifischer Kraftstoffverbrauch b_e [g/kWh] | 279,77 | 271,52 | 301,12 | 290,41 |
| Spezifischer Energieeinsatz [MJ/kWh] | 11,29 | 10,90 | 12,15 | 11,72 |
| Effektive Leistung P [kW] | 2,23 | 3,85 | 3,22 | 5,60 |
| Verbrennungsluftverhältnis λ [-] | 2,78 | 1,68 | 2,90 | 1,67 |
| NO _x [g/kWh] | 6,29 | 6,19 | 8,66 | 5,20 |
| CO [g/kWh] | 7,99 | 4,74 | 1,38 | 4,41 |
| HC [g/kWh] | 0,40 | 0,04 | 0,06 | 0,05 |
| PM [mg/kWh] | 93,49 | 76,19 | 31,85 | 234,45 |

Tab. 5: B30-Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte

| Messreihe | US EPA Tier 4 <8kW | B7 | B30 | Δ B30 zu B7 |
|---|--------------------|--------|--------|--------------------|
| Spez. Kraftstoffverbrauch b_e , \circ [g/kWh] | - | 272,79 | 285,70 | +4,73% |
| Spez. Energieeinsatz, \circ [MJ/kWh] | - | 11,40 | 11,53 | +1,12% |
| P, \circ [kW] | - | 3,80 | 3,72 | -1,90% |
| NO _x + HC, \circ [g/kWh] | 7,50 | 6,39 | 6,72 | +5,21% |
| CO, \circ [g/kWh] | 8,00 | 4,11 | 4,63 | +12,55% |
| PM, \circ [mg/kWh] | 400,00 | 97,50 | 109,00 | +11,82% |

Tab. 6: B30-Gesamtergebnis, im Vergleich

Auch das gemittelte Ergebnis (Messreihe „B30“) der ausgewählten Betriebspunkte liegt mit der in Tabelle 2 genannten Motoreinstellung unter den Grenzwerten der US EPA Tier 4.

Aufgrund der B7-Motoreinstellung sinkt die effektive Leistung um 1,90%, der spezifische Energieeinsatz steigt tendenziell an (+1,12%). Die spezifischen Stickoxidemissionen nehmen im Durchschnitt leicht zu (+5,21%).

Auf den ersten Blick scheint es verwunderlich, dass im Mittel auch die CO - und PM - Emissionen zunehmen. Dies liegt unter anderem an der spezifischen Angabe der Emissionswerte. Betrachtet man weiterhin die einzelnen Betriebspunkte, so erkennt man einen signifikanten Anstieg der CO – und PM – Emission im Vergleich zu B7 beim Betriebspunkt „1500_3“, also bei niedriger Last und Drehzahl. Hier herrscht ein vergleichsweise niedriges Druck- und Temperaturniveau, sowohl zum Zeitpunkt „Einlass schließt“ als auch während des Einspritzungs-, Gemischbildungs- und Verbrennungsprozesses. Hauptsächlich aufgrund des geänderten Siedeverhaltens von B30 im Vergleich zu B7 verschiebt sich der Brennbeginn nach spät. Nach Unterschreitung eines spezifischen (Verbrennungs-)

Temperaturniveaus in der Expansionsphase friert die CO-Oxidation ein. Somit lässt sich die erhöhte CO - Emission erklären.

Bezüglich der zugleich erhöhten PM-Emission sei angemerkt: aufgrund der komplexen Vorgänge beim Partikelbildungsprozess (sowohl innermotorisch, als auch beim Verdünnungsprozess in der PM-Messapparatur) wird an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen, z.B. (Turns, 2000), (Kirchen, 2008), (Frenklach, 2001). Grundsätzlich lässt sich in vielen Fällen die CO – Emission als Indikator für eine erhöhte Partikelemission ansehen, so auch in diesem Fall. An den anderen Betriebspunkten befinden sich die Emissionswerte mit Berücksichtigung der geringeren Leistung (-1,9%) auf vergleichbarem (B7-) Niveau.

4.3 Messreihe B100

Das Ergebnis der B100-Vermessung ist in Tabelle 7 und 8 dargestellt:

| | | | | |
|--|--------|----------|--------|----------|
| B100-Betriebspunkt | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
| Kraftstoffverbrauch [kg/h] | 0,62 | 1,04 | 0,94 | 1,59 |
| Spezifischer Kraftstoffverbrauch b_e [g/kWh] | 326,09 | 291,86 | 349,26 | 304,67 |
| Spezifischer Energieeinsatz [MJ/kWh] | 12,07 | 10,80 | 12,92 | 11,27 |
| Effektive Leistung P [kW] | 1,89 | 3,58 | 2,70 | 5,21 |
| Verbrennungsluftverhältnis λ [-] | 3,2 | 1,88 | 3,19 | 1,86 |
| NO _x [g/kWh] | 6,30 | 7,98 | 9,74 | 6,47 |
| CO [g/kWh] | 11,36 | 2,18 | 2,12 | 2,32 |
| HC [g/kWh] | 0,54 | 0,03 | 0,06 | 0,04 |
| PM [mg/kWh] | 110,74 | 30,03 | 28,70 | 79,37 |

Tab. 7: B100-Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte

| Messreihe | US EPA Tier 4 <8kW | B7 | B30 | B100 | Δ B100 zu B7 |
|---|--------------------|--------|--------|--------|---------------------|
| Spez. Kraftstoffverbrauch b_e \circ [g/kWh] | - | 272,79 | 285,70 | 317,97 | +16,56% |
| Spez. Energieeinsatz, \circ [MJ/kWh] | - | 11,40 | 11,53 | 11,76 | +3,18% |
| P, \circ [kW] | - | 3,80 | 3,72 | 3,34 | -11,94% |
| NO _x + HC, \circ [g/kWh] | 7,50 | 6,39 | 6,72 | 7,79 | +21,86% |
| CO, \circ [g/kWh] | 8,00 | 4,11 | 4,63 | 4,49 | +9,21% |
| PM, \circ [mg/kWh] | 400,00 | 97,50 | 109,00 | 62,20 | -36,17% |

Tab. 8: B100-Gesamtergebnis, im Vergleich

Die Messreihe „B100“ mit den ausgewählten Betriebspunkten erreicht hinsichtlich der „NO_x+HC“-

Emission nicht den US EPA Tier 4 Grenzwert von 7,5 g/kWh. Dies liegt unter anderem an der reduzierten effektiven Leistung von -11,76% im Vergleich zu B7. An dieser Stelle wäre es notwendig, die Steuergerätebedatung für B100 anzupassen, um die Grenzwerte in diesen Betriebspunkten zu erfüllen.

Das Phänomen der erhöhten CO – und PM – Emission kommt im Falle des Betriebspunktes „1500_3“ noch stärker zum Tragen als schon bei der Messreihe „B30“. Die CO – Emission ist im Vergleich zum B7-Ergebnis in diesem Betriebspunkt fast verdoppelt, ebenso steigt die PM-Emission stark an. Dieser Sachverhalt muss im Optimierungsprozess mit berücksichtigt werden.

Die weiteren Betriebspunkte, insbesondere die beiden höherlastigen Punkte (1500_5,5 und 2200_5,5), liegen innerhalb des Erwartungsrahmens verschiedener Ergebnisse der vorhandenen Literatur: die NO_x - Emissionen steigen (leicht) an bei einer signifikanten Reduktion der HC –, CO – und PM – Emissionen.

4.4 Messreihe B30 – Leistungsangleichung an B7

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, erfolgt im nächsten Schritt die Leistungsangleichung an die effektiven Leistungswerte von B7 durch eine moderate Erhöhung der DOE:

| Betriebspunkteinstellung B30- P_{ident} | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
|--|--------|----------|--------|----------|
| n [1/min] | 1500 | 1500 | 2200 | 2200 |
| DOE-Verlängerung [%] | 1,2 | 2,4 | 1,3 | 0,8% |
| Injektoransteuerbeginn ("SOE") [°KW v. OT] | 4 | 1 | 6 | 4 |
| Anzahl der Einspritzungen pro ASP [-] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Common-Rail-Druck [bar] | 500 | 1000 | 900 | 1000 |
| P [kW] | 2,27 | 4,08 | 3,26 | 5,68 |

Tab. 9: B30 - P_{ident} – Betriebspunkteinstellung

Die DOE-Verlängerung beträgt zwischen 0,8 und 2,4%. Die Abweichungen zu B7 sind vergleichsweise gering. Die Ergebnisse der mit diesen Einstellungen gefahrenen Messreihe zeigen die Tabellen 10 und 11:

| | | | | |
|---|--------|----------|--------|----------|
| B30-P _{ident} -Betriebspunkt | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
| Kraftstoffverbrauch [kg/h] | 0,63 | 1,10 | 0,97 | 1,62 |
| Spezifischer Kraftstoffverbrauch b _e [g/kWh] | 277,53 | 270,43 | 296,50 | 284,53 |
| Spezifischer Energieeinsatz [MJ/kWh] | 11,20 | 10,92 | 11,97 | 11,48 |
| Effektive Leistung P [kW] | 2,27 | 4,08 | 3,26 | 5,68 |
| Verbrennungsluftverhältnis λ [-] | 2,77 | 1,57 | 3,07 | 1,55 |
| NO _x [g/kWh] | 5,79 | 5,63 | 8,16 | 4,34 |
| CO [g/kWh] | 7,25 | 7,07 | 1,24 | 4,23 |
| HC [g/kWh] | 0,34 | 0,03 | 0,06 | 0,03 |
| PM [mg/kWh] | 76,44 | 158,77 | 23,25 | 274,78 |

Tab. 10: B30 - P_{ident} - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte

| Messreihe | US EPA Tier 4 <8kW | B7 | B30 | B30-P _{ident} | Δ B30-P _{ident} zu B7 |
|---|-----------------------|--------|--------|------------------------|-----------------------------------|
| Spez. Kraftstoffverbrauch b _e ◊ [g/kWh] | - | 272,79 | 285,70 | 282,25 | +3,47% |
| Spez. Energieeinsatz, ◊ [MJ/kWh] | - | 11,40 | 11,53 | 11,39 | -0,10% |
| P, ◊ [kW] | - | 3,80 | 3,72 | 3,82 | +0,62% |
| NO _x + HC, ◊ [g/kWh] | 7,50 | 6,39 | 6,72 | 6,09 | -4,68% |
| CO, ◊ [g/kWh] | 8,00 | 4,11 | 4,63 | 4,95 | +20,22% |
| PM, ◊ [mg/kWh] | 400,00 | 97,50 | 109,00 | 133,30 | +36,77% |

Tab. 11: B30 - P_{ident} - Gesamtergebnis, im Vergleich

Orientiert man sich erneut an den Grenzwerten der US EPA Tier 4, so werden diese für die Messreihe B30-

P_{ident} eingehalten. Der spezifische Energieeinsatz ist mit der Messreihe B7 vergleichbar. Die CO – und PM – Emissionen sind im Vergleich zu B7 deutlich erhöht. Dieser Sachverhalt gilt für die angegebene (vergleichsweise spät liegende) Einspritzstrategie, um den Stickoxidgrenzwert nicht zu überschreiten. Hier ist Optimierungspotential über eine passende Applikation des SOE und unter Umständen des Common–Rail–Drucks vorhanden. Dies wird im Optimierungsprozess mit berücksichtigt.

4.5 Messreihe B100 – Leistungsangleichung an B7

Die B100 – Leistungsangleichung an die B7 – Werte wird wie im B30 Betrieb über die Verlängerung der DOE erreicht:

| | | | | |
|--|--------|----------|--------|----------|
| Betriebspunkteinstellung B100-P _{ident} | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
| n [1/min] | 1500 | 1500 | 2200 | 2200 |
| DOE-Verlängerung [%] | 9,4 | 15,0 | 12,2 | 9,2 |
| Injektoransteuerbeginn ("SOE") [°KW v. OT] | 4 | 1 | 6 | 4 |
| Anzahl der Einspritzungen pro ASP [-] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Common-Rail-Druck [bar] | 500 | 1000 | 900 | 1000 |
| P [kW] | 2,25 | 4,08 | 3,27 | 5,65 |

Tab. 12: B100 – P_{ident} – Betriebspunkteinstellung

Die DOE – Verlängerung beträgt für den B100 Kraftstoff zwischen 9,2 und 15,0%. Mit dieser Motoreinstellung erhält man folgendes Resultat:

| | | | | |
|---|--------|----------|--------|----------|
| B100-P _{ident} -Betriebspunkt | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
| Kraftstoffverbrauch [kg/h] | 0,64 | 1,23 | 1,09 | 1,74 |
| Spezifischer Kraftstoffverbrauch b _e [g/kWh] | 284,07 | 300,91 | 332,11 | 307,71 |
| Spezifischer Energieeinsatz [MJ/kWh] | 10,51 | 11,13 | 12,29 | 11,39 |
| Effektive Leistung P [kW] | 2,25 | 4,08 | 3,27 | 5,65 |
| Verbrennungsluftverhältnis λ [-] | 2,73 | 1,66 | 2,93 | 1,75 |
| NO _x [g/kWh] | 4,86 | 6,97 | 9,26 | 5,78 |
| CO [g/kWh] | 5,91 | 7,80 | 1,53 | 5,41 |
| HC [g/kWh] | 0,21 | 0,03 | 0,03 | 0,04 |
| PM [mg/kWh] | 29,29 | 56,55 | 16,09 | 116,71 |

Tab. 13: B100 - P_{ident} - Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte

| Messreihe | US EPA Tier 4 <8kW | B7 | B100 | B100-P _{ident} | Δ B100-P _{ident} zu B7 |
|---|-----------------------|--------|--------|-------------------------|---|
| Spez. Kraftstoffverbrauch $b_{e, \circ}$ [g/kWh] | - | 272,79 | 317,97 | 306,20 | +12,24% |
| Spez. Energieeinsatz, \circ [MJ/kWh] | - | 11,40 | 11,76 | 11,33 | -0,64% |
| P, \circ [kW] | - | 3,80 | 3,34 | 3,81 | +0,40% |
| NO _x + HC, \circ [g/kWh] | 7,50 | 6,39 | 7,79 | 6,79 | +6,30% |
| CO, \circ [g/kWh] | 8,00 | 4,11 | 4,49 | 5,16 | +25,53% |
| PM, \circ [mg/kWh] | 400,00 | 97,50 | 62,20 | 54,70 | -43,92% |

Tab. 14: B100 - P_{ident} - Gesamtergebnis, im Vergleich

Im Gegensatz zur B100 – Messreihe ohne Leistungsangleichung, liegt das gemittelte Ergebnis der ausgewählten Betriebspunkte unter den Grenzwerten der US EPA Tier 4.

Dies liegt hauptsächlich an den spezifisch niedrigeren Stickoxidemissionen, welche im Mittel nur noch etwa 6% höher als im B7 – Betrieb ausfällt. Wie schon in der Messreihe B30 – P_{ident}, erhöht sich auch bei der leistungsgleichen B100-Messreihe die CO – Emission im Mittel um etwa 25% gegenüber B7, allerdings bei einer starken Absenkung der PM-Emission (im Mittel etwa -44%). Einen Grund hierfür dürfte der im Fettsäuremethylester enthaltene Sauerstoff (von etwa

11-Masse-%) sein (siehe dazu auch verschiedene Ausführungen in der Literatur, z.B. (Blassnegger, 2005) und (Blassnegger, et al., 2009)).

4.6 Variation des SOE

In diesem Abschnitt wird der Einfluss einer SOE – Variation (angegeben in Grad Kurbelwinkel, im Folgenden als °KW bezeichnet) bei leistungsgleicher B7 –, B30 – und B100 – Einstellung auf die Emissionswerte untersucht. Die Ergebnisse fließen in den darauffolgenden Optimierungsprozess mit ein.

Von der B7–SOE Einstellung am Betriebspunkt 2200_3 ausgehend, erfolgt die Verstellung des SOE im Intervall von [356°KW; 362°KW], Schrittweite 2°KW. Die Partikelemission wird aufgrund der aufwendigen Messprozedur mit der Schrittweite 4°KW gemessen. Dieser Vorgang wird für alle drei Kraftstoffe durchgeführt.

Die Ergebnisse werden mit den folgenden Abbildungen verdeutlicht:

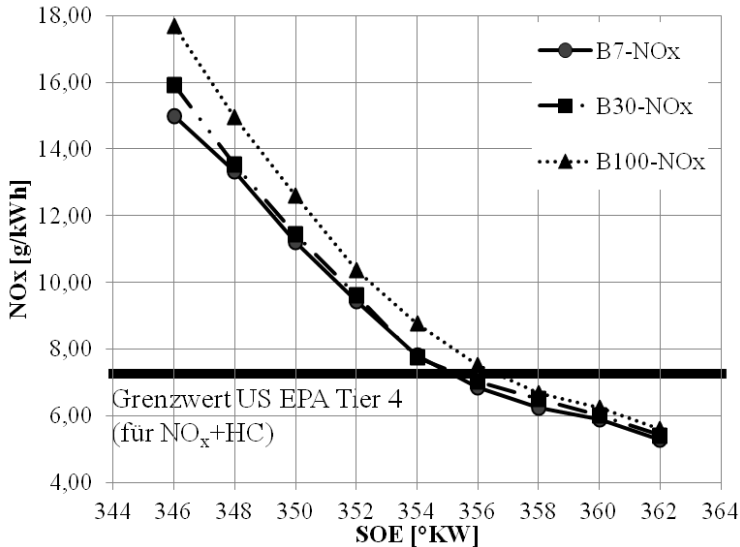


Abb. 2: NO_x - Verläufe über SOE, Betriebspunkt 2200_3

Mit früherem Injektoransteuerbeginn – und daher früherem Einspritzbeginn – steigt die Stickoxidemission aufgrund der höheren Spitzentemperatur im Brennraum. Je früher der Ansteuerbeginn, desto höher fällt die Differenz von B100 zu B7 (bzw. im kleineren Maßstab auch für B30 zu B7) aus. Vergleicht man dazu den PM – Emissionsverlauf, Abbildung 3, erkennt man prinzipiell den gegenläufigen Trend. Für diesen Betriebspunkt erkennt man deutlich die höhere „PM-Toleranz“ von B7 und auch B30 bzgl. eines frühen

Ansteuerbeginns, und damit guten Wirkungsgrades (Abbildung 4). Diese größere „Toleranz“ hinsichtlich der PM-Emission gilt auch für sehr späte SOE nach dem oberen Totpunkt (als Beispiel siehe in Abbildung 3: SOE=362°KW und etwa 420mg/kWh PM – Emission für B100, im Vergleich zu dazu B7 – PM von etwa 125mg/kWh).

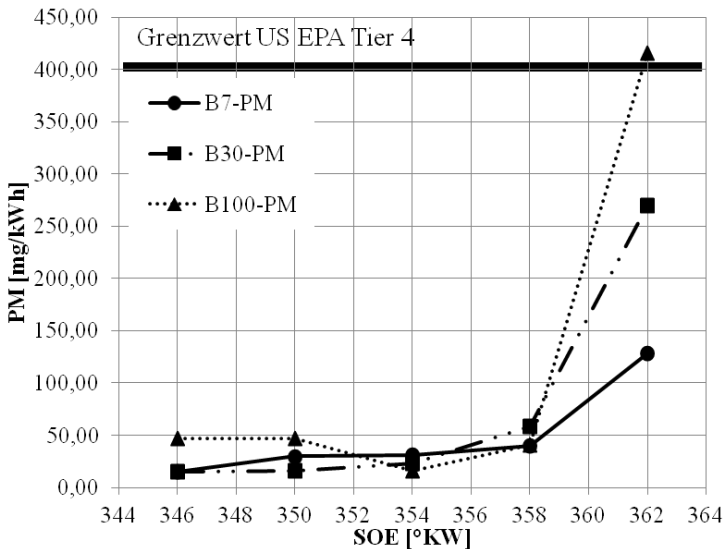


Abb. 3: PM -Verläufe über SOE, Betriebspunkt 2200_3

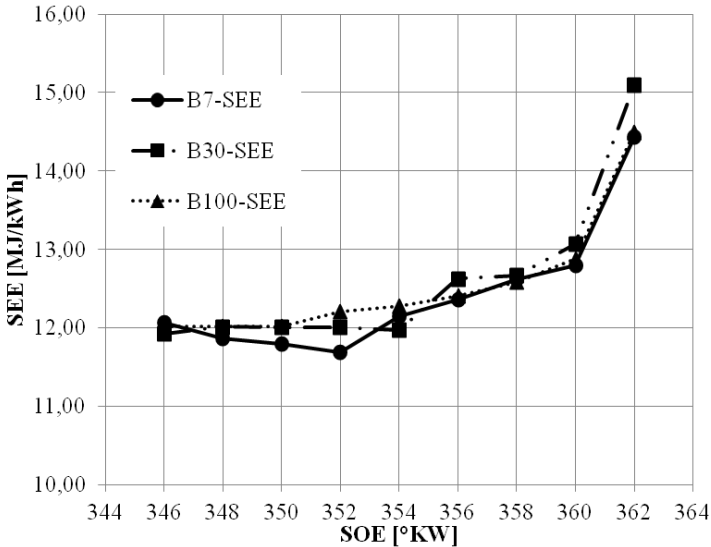


Abb. 4: spez. Energieeinsatz „SEE“-Verläufe über SOE, Betriebspunkt 2200_3

Allerdings wird die mit Abstand niedrigste PM – Emission mit B100 erreicht, und zwar in einem im Vergleich zu den anderen Kraftstoffen deutlich engerem SOE – Fenster von etwa 353°KW bis 358°KW. Dieses Fenster bildet die Grundlage des Optimierungsprozesses, da hier ein guter Kompromiss für B100 aus niedriger NO_x –, PM – Emission und Kraftstoffverbrauch (respektive spezifischem Energieeinsatz, SEE) gefunden werden kann.

5. Ergebnisse des Optimierungsprozesses

Das prinzipielle Vorgehen beim Optimierungsprozess wurde in Abschnitt 3, Abbildung 1, dargestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 4 fließen in den Prozess mit ein.

5.1 Optimierungsergebnis für B30

Die Tabellen 15 und 16 zeigen die veränderte Motoreinstellung im Vergleich zur B7-Einstellung für jeden Betriebspunkt:

| Betriebspunkt B7 | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
|--|--------|----------|--------|----------|
| n [1/min] | 1500 | 1500 | 2200 | 2200 |
| Einspritzmasse Soll[mg] | 17 | 25,3 | 15,6 | 26,1 |
| Injektoransteuerbeginn ("SOE") [°KW v. OT] | 4 | 1 | 6 | 4 |
| Anzahl der Einspritzungen pro ASP [-] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Common-Rail-Druck [bar] | 500 | 1000 | 900 | 1000 |

Tab. 15: B7 – Einstellung, Ausgangsbasis

| | | | | |
|--|--------|----------|--------|----------|
| Betriebspunkt B30-OPTIMIERT | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
| n [1/min] | 1500 | 1500 | 2200 | 2200 |
| Einspritzmasse Soll[mg] | 16,8 | 25,9 | 15,7 | 26,1 |
| DOE-Veränderung [%] | -1,2 | +2,4% | +0,6% | -2,3% |
| Injektoransteuerbeginn ("SOE") [°KW v. OT] | 4 | 1 | 5 | 5 |
| Anzahl der Einspritzungen pro ASP [-] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Common-Rail-Druck [bar] | 550 | 1000 | 900 | 1000 |

Tab. 16: B30 – Einstellung optimiert

Für die optimierte B30 – Einstellung wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Betriebspunkt 1500_3: Erhöhung des Common–Rail–Drucks zur CO– und PM– Reduzierung (inkl. Angleichung DOE)
- Betriebspunkt 1500_5,5: Verlängerung der DOE zur Leistungsangleichung
- Betriebspunkt 2200_3: SOE um 1°KW nach spät, Anpassung der DOE entsprechend
- Betriebspunkt 2200_5,5: SOE um 1°KW nach früh, Anpassung der DOE entsprechend.

Damit erreicht man folgendes Ergebnis (Tabelle 17: einzelne Betriebspunkte, Tabelle 18: Gesamtergebnis im Vergleich zu B7):

| | | | | |
|--|--------|----------|--------|----------|
| B30-OPTIMIERT-Betriebspunkt | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
| Kraftstoffverbrauch [kg/h] | 0,61 | 1,10 | 0,95 | 1,61 |
| Spezifischer Kraftstoffverbrauch b_e [g/kWh] | 272,28 | 270,43 | 288,49 | 283,30 |
| Spezifischer Energieeinsatz [MJ/kWh] | 10,99 | 10,91 | 11,64 | 11,43 |
| Effektive Leistung P [kW] | 2,26 | 4,08 | 3,30 | 5,67 |
| Verbrennungsluftverhältnis λ [-] | 2,9 | 1,57 | 3,11 | 1,72 |
| NO _x [g/kWh] | 7,91 | 5,63 | 7,64 | 5,70 |
| CO [g/kWh] | 1,63 | 7,07 | 1,73 | 4,17 |
| HC [g/kWh] | 0,07 | 0,03 | 0,07 | 0,03 |
| PM [mg/kWh] | 17,80 | 158,77 | 31,56 | 160,85 |

Tab. 17: B30 – optimiert – Messergebnisse, einzelne Betriebs-punkte

| Messreihe | US EPA Tier 4 <8kW | B7 | B30 | B30-OPT. | Δ B30-OPT. zu B7 |
|--|-----------------------|--------|--------|----------|----------------------------|
| Spez. Kraftstoffverbrauch $b_e \circ$ [g/kWh] | - | 272,79 | 285,70 | 278,63 | +2,14% |
| Spez. Energieeinsatz \circ [MJ/kWh] | - | 11,40 | 11,53 | 11,25 | -1,32% |
| P. \circ [kW] | - | 3,80 | 3,72 | 3,82 | +0,53% |
| NO _x + HC \circ [g/kWh] | 7,50 | 6,39 | 6,72 | 6,77 | +5,95% |
| CO. \circ [g/kWh] | 8,00 | 4,11 | 4,63 | 3,65 | -11,19% |
| PM. \circ [mg/kWh] | 400,00 | 97,50 | 109,00 | 71,60 | -26,56% |

Tab. 18: B30 – optimiert – Gesamtergebnis, im Vergleich

Auch mit der Optimierung für B30 liegt erwartungsgemäß das gemittelte Ergebnis der ausgewählten Betriebspunkte unter den Grenzwerten der US EPA Tier 4. Da die Summe aus $\text{NO}_x + \text{HC}$ bereits deutlich unter dem Grenzwert lag, konnte mit geringen Modifikationen eine CO- und PM-Emissionsreduzierung erreicht werden. Dies kommt auch dem SEE zu Gute. Dieser liegt unterhalb der B7-Messreihe (-1,32%).

5.2 Optimierungsergebnis für B100

Beim Einsatz von B100 Kraftstoff sind stärkere Modifikationen im Vergleich zum Änderungsbedarf für B30 notwendig.

Tabelle 19 zeigt die vorgenommenen Motoreinstellungen:

| | | | | |
|--|--------|----------|--------|----------|
| Betriebspunkt B100-OPTIMIERT | 1500_3 | 1500_5,5 | 2200_3 | 2200_5,5 |
| n [1/min] | 1500 | 1500 | 2200 | 2200 |
| Einspritzmasse Soll[mg] | 17,5 | 29,1 | 15,7 | 26,1 |
| DOE-Veränderung [%] | +2,94 | +15,0 | +5,8 | +5,0 |
| Injektoransteuerbeginn ("SOE") [°KW v. OT] | 3 | 1 | 3 | 6 |
| Anzahl der Einspritzungen pro ASP [-] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Common-Rail-Druck [bar] | 600 | 1000 | 900 | 1000 |

Tab. 19: B100 – Einstellung optimiert

Für die optimierte B100 – Einstellung wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Betriebspunkt 1500_3: Erhöhung des Common–Rail–Drucks und SOE um 1°KW nach früh (Angleichung DOE) zur CO – Reduzierung
- Betriebspunkt 1500_5,5: Verlängerung des DOE zur Leistungsangleichung
- Betriebspunkt 2200_3: SOE um 3°KW nach spät, Anpassung der DOE entsprechend
- Betriebspunkt 2200_5,5: SOE um 2°KW nach früh, Anpassung der DOE entsprechend.

Damit erreicht man folgendes Ergebnis (Tabelle 20: einzelne Betriebspunkte, Tabelle 21: Gesamtergebnis im Vergleich zu B7):

| | | | | |
|--|--------|----------|--------|----------|
| B100-OPTIMIERT-Betriebspunkt | 1500_3 | 1500_5.5 | 2200_3 | 2200_5.5 |
| Kraftstoffverbrauch [kg/h] | 0,62 | 1,23 | 1,10 | 1,70 |
| Spezifischer Kraftstoffverbrauch b_e [g/kWh] | 278,75 | 300,91 | 332,13 | 301,17 |
| Spezifischer Energieeinsatz [MJ/kWh] | 10,31 | 10,91 | 12,29 | 11,43 |
| Effektive Leistung P [kW] | 2,24 | 4,08 | 3,32 | 5,64 |
| Verbrennungsluftverhältnis λ [-] | 2,80 | 1,66 | 3,12 | 1,73 |
| NO _x [g/kWh] | 6,63 | 6,97 | 7,32 | 5,65 |
| CO [g/kWh] | 1,87 | 7,84 | 1,72 | 4,56 |
| HC [g/kWh] | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,01 |
| PM [mg/kWh] | 29,89 | 56,55 | 31,16 | 105,05 |

Tab. 20: B100 – optimiert – Messergebnisse, einzelne Betriebspunkte

| Messreihe | US EPA Tier 4 <8kW | B7 | B100 | B100-OPT. | Δ B100-OPT. zu B7 |
|---|--------------------|--------|--------|-----------|--------------------------|
| Spez. Kraftstoffverbrauch b_e \circ [g/kWh] | - | 272,79 | 317,97 | 303,24 | +11,16% |
| Spez. Energieeinsatz, \circ [MJ/kWh] | - | 11,40 | 11,76 | 11,22 | -1,60% |
| P, \circ [kW] | - | 3,80 | 3,34 | 3,82 | +0,55% |
| NO _x + HC, \circ [g/kWh] | 7,50 | 6,39 | 7,79 | 6,48 | +1,46% |
| CO, \circ [g/kWh] | 8,00 | 4,11 | 4,49 | 3,99 | -3,07% |
| PM, \circ [mg/kWh] | 400,00 | 97,50 | 62,20 | 55,66 | -42,89% |

Tab. 21: B100 – optimiert – Gesamtergebnis, im Vergleich

Das gemittelte Optimierungsergebnis der ausgewählten Betriebspunkte für B100 liegt ebenfalls unter den Grenzwerten der US EPA Tier 4. Bei geringerem SEE im Vergleich zu B7 (-1,6%) und nur leicht erhöhter NO_x+HC – Emission sinkt aufgrund des günstigeren $\text{PM} - \text{NO}_x$ Trade-Offs die Partikelemission im optimierten B100 Betrieb deutlich ab, im Mittel um etwa 43%.

5.3 Darstellung der Gesamtergebnisse im Vergleich

Die Abbildungen 5 und 6 stellen das Optimierungsergebnis jeweils für B30 und B100 im Vergleich zur B7-Messreihe zusammenfassend dar.

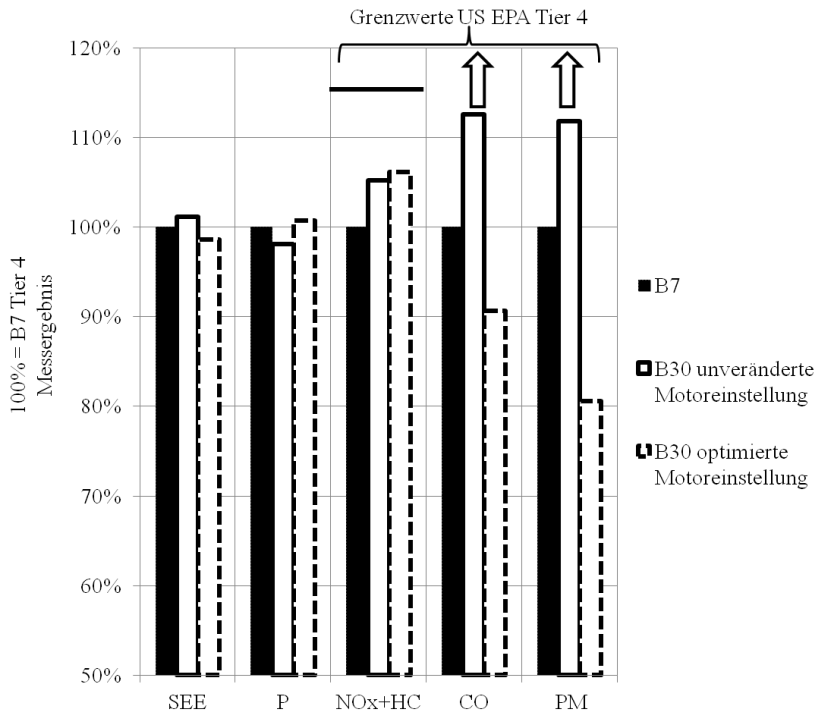


Abb. 5: Vergleich der Messreihe B7, B30 (unveränderte Motoreinstellung) und B30 (optimierte Motoreinstellung)

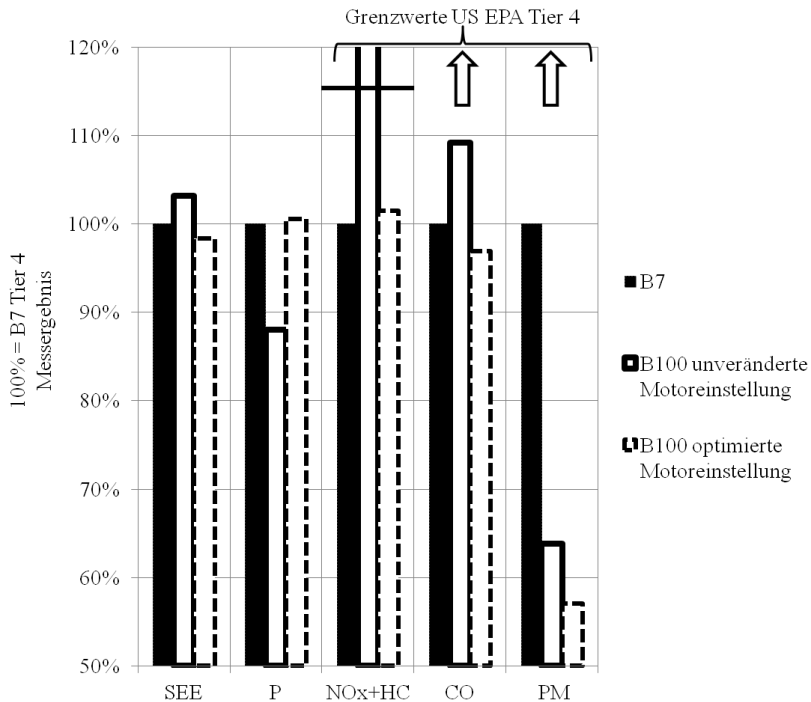


Abb. 6: Vergleich der Messreihe B7, B100 (unveränderte Motoreinstellung) und B100 (optimierte Motoreinstellung)

6. Schlussfolgerungen

Mit der Berücksichtigung der spezifischen Kraftstoffeigenschaften von Fettsäuremethylestern (wie dem Siedeverhalten oder dem günstigeren Partikel-Stickoxid-Trade-Off) gelingt es im Vergleich zur B7-Messreihe, eine signifikante Reduktion der Partikelemission bei vergleichbarer Stickoxidemission und spezifischem Energieaufwand zu erhalten. Dieses Ergebnis ist gültig für den angegebenen Versuchsträger und der beschriebenen Methodik innerhalb dieses Vorhabens.

Während die Unterschiede im Motorverhalten beim Kraftstoff B30 erwartungsgemäß geringer als bei B100 ausfallen, so finden sich doch Kennfeldbereiche (niedrige Teillast), in welchen eine erhöhte CO – und PM – Emission auftreten kann. Durch geeignete Maßnahmen im Bereich der Einspritzstrategie kann dies kompensiert werden. Für B100 Kraftstoff sollte schon alleine aufgrund der signifikanten Leistungsreduktion bei unveränderter B7 – Motormanagementbedatung eine Adaption der Einspritzstrategie erfolgen. Mit kraftstoffspezifischen Kenntnissen lassen sich die Vorteile der Partikelreduktion nutzen, ohne dabei eine

Stickoxiderhöhung oder einen Mehraufwand an Kraftstoffverbrauch (energieäquivalent) hinnehmen zu müssen.

Literaturverzeichnis

Backofen, D., König, M., Tschöke, H. & Schmidt, J., 2010. *Spray Characterization of Alternative Diesel Fuels*. Magdeburg: Institute of Mobile Systems and Institute of Fluid Dynamics and Thermodynamics, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Germany;.

Battistoni, M. G. C. a. M. F., 2012. *Coupled Simulation of Nozzle Flow and Spray Formation Using Diesel and Biodiesel for CI Engine Applications*. s.l.:SAE Technical Paper 2012-01-1267.

Blassnegger, J., 2005. *Emissionsminderungspotentiale durch optimierten Biodiesel und nachrüstbare Abgasnachbehandlung*. s.l.:Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz.

Blassnegger, J. et al., 2009. *Untersuchung: Emissionen bei der motorischen Verbrennung von Biokraftstoffen und Kraftstoffmischungen*. Graz: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz und andere.

Chien, S., Huang, Y.-J., Chuang, S.-C. & Yang, H.-H., 2009. *Effects of Biodiesel Blending on Particulate*

and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions in Nano/Ultrafine/Fine/Coarse Ranges from. s.l.:Department of Biomedical Engineering & Environmental Sciences, National Tsing Hua University;Department of Air Quality Protection and Noise Control, Environment Protection Administration; Department of Environmental Engineering and Management, Chaoyang Un.

Deutsches Institut für Normung e.V., 2010. *DIN EN14214: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Fettsäure-Methylester (FAME) für Dieselmotoren, Anforderungen und Prüfverfahren.* s.l.:s.n.

Deutsches Institut für Normung e.V., 2010. *DIN EN590 - Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Dieselkraftstoff, Anforderungen und Prüfverfahren.* s.l.:s.n.

Europäisches Parlament und Rat, E., 21. April 2004. *Richtlinie 2004/26/EG des europäischen Parlaments und des Rates.* Brüssel: s.n.

Frenklach, M., 2001. *Reaction mechanism of soot formation in flames.* Berkley, USA: Department of Mechanical Engineering, University of California.

Giebel, G., 2007. *Einsatz von Rapsölkraftstoff und RME in DEUTZ-Motoren*. Pflanzenöltagung Berlin: s.n.

Heilig, A., Kaiser, M. & Dinkelacker, F., 2011. *Spray Analysis and Comparison of Diesel and Biodiesel-Methanol Blends*. ILASS – Europe 2011, 24th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Estoril, Portugal: Institute of Technical Combustion (ITV), Leibniz University of Hanover.

Kirchen, P., 2008. *Steady-State and Transient Diesel Soot Emissions: Development of a mean value soot model and exhaust stream and in-cylinder measurements*, Dissertation. Diss. ETH No. 18088: s.n.

Knothe, G., Dunn, R. & Bagby, M., 2009. *Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels*. Peoria, IL 61604, USA: Oil Chemical Research, National Center for Agricultural Utilization Research, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture.

Knuth, H.-W. & Winkler, M., 2009. *Durchführung eines Prüfstands-Dauerlaufs über 500 h sowie Feldtesterprobung zur Freigabe von DEUTZ-*

Common-Rail-Motoren in Nutzfahrzeugen EURO IV für Biodiesel. s.l.:s.n.

Knuth, H.-W., Winkler, M., Stein, H. & Wilharm, T., 2012. *Elementbelastungen von Abgasnachbehandlungssystemen durch Biodiesel.* s.l.:Motortechnische Zeitschrift MTZ.

Krahl, J., 2002. *Rapsölmethylester in dieselmotorischer Verbrennung: Emissionen, Umwelteffekte, Optimierungspotenziale.* Braunschweig: Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL).

Kuti, O. et al., 2010. *Characteristics of the ignition and combustion of biodiesel fuel spray injected by a common-rail injection system for a direct-injection diesel engine.* s.l.:1Department of Mechanical Systems Engineering, University of Hiroshima, Higashi-Hiroshima, Japan; 2State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, People's Republic of China.

Munack, A., Bünger, J. & Krahl, J., 2011. *Untersuchung von nicht limitierten Emissionen eines Nutzfahrzeugmotors mit verschiedenen Biodieselblends.* Braunschweig und Coburg : Institut

für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Johann Heinrich von Thünen-Institut.

Okamoto, K., 2011. *Research report on the use of high biofuel blends in diesel vehicles*. s.l.:Advanced Technology & Research Institute, Japan Petroleum Energy Center.

Richter, B., Sadlowski, T. & Harndorf, H., 2012. *Einfluss von Biokraftstoffblends auf das Betriebsverhalten moderner Dieselmotoren*. FVV Frühjahrstagung: Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik - Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren.

Spessert, B. & Schleicher, A., 2007. *Einfluss von Biokraftstoffen auf die Abgas- und Geräuschemission kleiner Industriedieselmotoren*. s.l.:Motortechnische Zeitschrift MTZ.

Tatur, M. et al., 2009. *Erhöhter Biodieselanteil im Kraftstoff - Auswirkungen auf Motoren und Abgasnachbehandlungssysteme*. s.l.:Motortechnische Zeitschrift MTZ.

Tschöke, H., Schulze, L. & Braungarten, G., 2002. *Motoruntersuchung mit Abgasnachbehandlungssystemen - Abschlussbericht*

zum Forschungsprojekt „Abgasnachbehandlung bei RME-Betrieb. s.l.:Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Turns, S., 2000. *An Introduction to Combustion – Concepts and Applications.* s.l.:McGraw-Hill International Editions.

Ullmann, J. & Stutzenberger, H., 2007. *Influence of Fuel Quality on Fuel System Performance.* Haus der Technik - Fuels for combustion engines, Munich: Robert Bosch GmbH.

VDMA, V. d. M. u. A., 2011. *Abgasgesetzgebung Diesel- und Gasmotoren; Schiffe, stationäre Anlage, Mobile Maschinen, Eisenbahnen.* s.l.:VDMA - Eigenverlag.

Wichmann, V., Sadlowski, T. & Harndorf, H., 2011. *Einsatz von Rapsölkraftstoffen in Dieselmotoren.* 5. Rostocker Bioenergieforum 2011: Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik - Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren.

Wloka, J., Hubert, A. & Wachtmeister, G., 2010. *Injection Spray Comparison of Diesel Fuel and Cold Pressed Rapeseed Oil Fuel.* ILASS – Europe 2010,

23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Brno, Czech Republic: Institute for Internal Combustion Engines (LVK) - Department of Mechanical Engineering.

Anhang



Prüfmuster: Pflanzenölmethylester (Biodiesel)

Verladetank

Werkszertifikat gem. DIN EN 14214

Mannheim Bio Fuel GmbH

Inselstrasse 10
D-68169 Mannheim

Tel.: 0 6 21 / 717 61-0

Fax: 0 6 21 / 717 61-19

contact@mannheimbiofuel.com

www.mannheimbiofuel.com

Datum: 16.07.2012 aus Tank: A11
Versandnr.:

| Eigenschaft | Methode | Resultat | Einheit | Grenzwerte EN 14214 | |
|----------------------|---------------|----------|------------|---------------------|------|
| | | | | min. | max. |
| Geruch | Organolep. | Typisch | | | |
| Dichte 15°C | EN ISO 12 185 | 883 | kg/m³ | 860 | 900 |
| Flammpunkt | DIN EN 2719 | >150 | °C | 101 | |
| Estergehalt | EN 14103 | >99 | % (m/m) | 96,5 | |
| Linolensäureester | EN 14103 | 9,2 | % (m/m) | | 12 |
| Viskosität | EN ISO 3104 | 4,461 | mm²/s | 3,5 | 5 |
| Schwefel | ISO 20846 | <2 | mg/kg | | 10 |
| Koksrückstand | EN ISO 10370 | 0,1 | % (m/m) | | 0,3 |
| Cetanzahl | EN ISO 5165 | 51,1 | | 51 | |
| Sulfatasche | ISO 3987 | <0,001 | % (m/m) | | 0,02 |
| Wassergehalt | EN ISO 12937 | 177 | mg/kg | | 500 |
| Oxidationsstabilität | EN 14112 | 9,9 | h | 6 | |
| Gesamtverschmutzung | EN 12662 | 7 | mg/kg | | 24 |
| Kupfer-Korrosion | EN ISO 2160 | 1a | | Klasse 1 | |
| Säurezahl | DIN EN 14104 | 0,28 | mg KOH/g | | 0,5 |
| Jodzahl | EN 14111 | 112 | g Iod/100g | | 120 |
| Methanol | EN 14110 | <0,05 | % (m/m) | | 0,2 |
| Monoglyceride | EN 14105 | 0,42 | % (m/m) | | 0,8 |
| Diglyceride | EN 14105 | <0,1 | % (m/m) | | 0,2 |
| Triglyceride | EN 14105 | <0,1 | % (m/m) | | 0,2 |
| Freies Glycerin | EN 14105 | 0,007 | % (m/m) | | 0,02 |
| Gesamtglycerin | EN 14105 | 0,13 | % (m/m) | | 0,25 |
| Alkaligehalt | EN 14538 | <2 | mg/kg | | 5 |
| Erdaalkaligehalt | EN 14538 | <2 | mg/kg | | 5 |
| Phosphorgehalt | EN 14107 | <2 | mg/kg | | 4 |
| CFPP | EN 116 | -14 | °C | | a) |
| Cloud Point | DIN EN 23015 | -6 | °C | a) | |
| Pour Point | DIN ISO 3016 | -12 | °C | | |

Ware enthält BHT - Additiv, Konzentration 200ppm - 500ppm

15.04. bis 30.09. 0 °C
01.10. bis 15.11. -10°C
16.11. bis 28.02. -20°C
01.03. bis 14.04. -10°C

Das vorliegende Werke-Zertifikat ist zur Kunden-Information bestimmt und bezieht sich ausschließlich auf die ausgelieferte Ware. Seine Weitergabe zur Produktkennzeichnung ist nur zulässig, wenn die Ware in unveränderter Form, d. h. insbesondere ohne Vermischung mit anderen Stoffen und ohne Transport- und Lagerschäden an die nächste Handelsstufe übergeben wird.

14. Mai 2012

Unterschrift:

Geschäftsführer: Bernard Nicol | Amtsgericht Mannheim | Reg.-Nr.: B 700351
Bankverbindung: Fortis Bank Köln | BLZ 370 106 00 | SWIFT/BIC-Code: GEBAD33
Euro payments Kto.-Nr.: 1361 3511 43 | IBAN: DE19 3701 0600 1361 3511 43
US\$ payments Kto.-Nr.: 1361 3504 36 | IBAN: DE96 3701 0600 1361 3504 36