

Hannes Gruber / Lukas Möltner

Einsatz von biogen/synthetischen Kraftstoffen in Dieselmotoren

121 - LEP - Low Emission Powertrains

Abstract:

In nachfolgendem Beitrag werden die Eigenschaften von biogenen Dieselkraftstoffen der zweiten Generation bei der motorischen Verbrennung beschrieben. Anhand der synthetischen Kraftstoffe BtL (Biomass to Liquid) und HVO (Hydrated Vegetable Oil) konnte eindrucksvoll das Potenzial sowohl der reinen Alternativkraftstoffe als auch verschiedener Kraftstoffmischungen mit fossilem Diesel zur Reduktion von gesetzlich limitierten Emittenten nachgewiesen werden. Auf einem Motorprüfstand wurden verschiedene im Fahrbetrieb relevante Teil- und Vollastpunkte vermessen. Applikationswerte im Steuergerät für den Betrieb mit konventionellem Diesel wurden unter Beachtung der Brennparameter an die unterschiedlichen Kraftstoffe angepasst. Diese Vorgehensweise zeigt das maximal mögliche Potenzial der alternativen Kraftstoffe gegenüber Dieselkraftstoff fossilen Ursprungs. Die Ergebnisse zeigen, dass mit BtL und HVO in allen Lastbereichen eine deutliche Reduktion der Partikelmasse erreicht werden kann und durch gezielte Anpassung der Brennparameter kann dieser Vorteil zur Verringerung von NO_x-Emissionen genutzt werden. Vor allem im Niedriglastbereich erfolgt bereits durch geringe Beimischraten eine überproportionale Reduktion der Partikelemissionen ohne Einbußen beim Wirkungsgrad bzw. beim spezifischen Verbrauch hinnehmen zu müssen.

Keywords:

Diesel, BtL, alternative Kraftstoffe, Dieselmotor

1. Einleitung

Internationale Übereinkommen zum Klimaschutz, wie beispielsweise das Kyoto-Protokoll, fordern die zunehmende Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Diese Forderungen wurden innerhalb der Europäischen Union mit der EU-Richtlinie 2003/30/EG (später ersetzt durch RL 2009/28/EG) festgelegt und wurden unter Beachtung der Versorgungssicherheit und der Nachhaltigkeit in nationale Gesetze umgesetzt (United Nations 1997, Pflaum 2010). Im Speziellen soll mit dieser Maßnahme die Verwendung von Biotreibstoffen im Straßenverkehr gefördert werden, da diese als kurz- und mittelfristig einsetzbare, erneuerbare Energieträger gelten (Pflaum 2010).

Aus der Forderung der Gesetzgebung nach immer höher werdenden Beimischraten zu fossilem Kraftstoff kann zusätzliches Potenzial zur Emissionsreduzierung durch veränderte Kraftstoffeigenschaften entstehen, welches allerdings einer Anpassung der Motorsteuerung bedarf [3]. Alternative biogene Kraftstoffe sind unter Beachtung des gesamten Lebensweges in der Lage, den Ausstoß an Treibhausgasen deutlich zu reduzieren. Aus derartigen Betrachtungen kann abgeleitet werden, dass vor allem Kraftstoffe der zweiten Generation wesentliches Potenzial zur Treibhausgasreduzierung besitzen (Edwards 2008).

Im Gegensatz zu biogenen Kraftstoffen der ersten Generation werden die Treibstoffe der zweiten Generation nicht nur aus Ölen oder pflanzlichem Zucker hergestellt, sondern aus der Gesamtpflanze. BtL bietet gute Voraussetzungen, diese Ziele zu erreichen, da dieser aus einer Vielzahl organischer Rohstoffe gewonnen werden kann. Durch die Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft fällt einerseits immer mehr biogener Abfall an, und andererseits kann die Überproduktion als zusätzlicher Energielieferant sinnvoll genutzt werden. Abbildung 1 zeigt die zeitliche Entwicklung der verpflichtenden Beimischraten am Beispiel Deutschland.

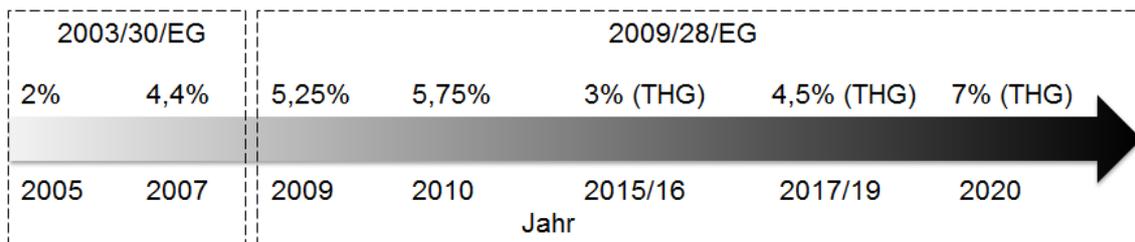


Abbildung 1: Chronologie der Beimischziele in %-Energ. durch die Richtlinien 2003/30/EG und 2009/28/EG am Beispiel Deutschland. Ab 2015/16 wird die Beimischrate durch Reduktionsziele der emittierten Treibhausgase (THG) ersetzt.

2. Grundlagen und Lösungsansatz

Die innermotorische Unterdrückung der Entstehung von Stickoxiden und Rußpartikel während der Verbrennung unterliegen einem strengen Zielkonflikt, der mit konventionellen Maßnahmen nicht entschärft werden kann (Merker 2009). So kann beispielsweise durch eine Abgasrückführung (AGR) die Bildung von Stickoxiden verringert werden, gleichzeitig erhöht sich jedoch die emittierte Partikelmasse. Mithilfe von Dieselpartikelfilter (DPF) können Partikel zwar zuverlässig zurückgehalten und der Motor somit auf geringe NO_x -Emissionen ausgelegt werden, jedoch bedeutet die notwendige sich zyklisch wiederholende thermische Regeneration des Partikelfilters einen zusätzlichen Mehrverbrauch.

Aufgrund der fast vollständigen Freiheit von aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen und der dadurch stark verringerten Neigung zur Partikelbildung bieten synthetisch hergestellte Dieselmotoren, wie z.B. BtL, einen erfolgversprechenden Ansatz zur Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Stickoxiden und Partikelemissionen (Pflaum 2010, Miers et al. 2005).

3. Methodik

3.1. Versuchsaufbau und Analytik

Die Untersuchungen wurden praxisnah an einem Versuchsmotor im Serienzustand auf einem Motorprüfstand durchgeführt. Der Versuchsaufbau setzt sich demzufolge aus der Verbrennungskraftmaschine, der Leistungsbremse, der Prüfstandssteuerung und Abgasanalytik zusammen. Als Versuchsträger kommt ein direkteinspritzender Reihenvierzylinder-Dieselmotor mit Common Rail-Einspritzsystem und Piezoinjektoren zum Einsatz. Der Motor verfügt über eine

Abgasturboaufladung mit variabler Turbinengeometrie und einer Ladeluftkühlung. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Eckdaten des Aggregats.

Tabelle 1: Technische Daten des Versuchsmotors

Hersteller / Typ	BMW/ N 47	
Motorbauart	4 Zylinder, 16 Ventile	
Hubraum	1995	cm ³
Nennleistung	130	kW
Maximales Drehmoment	350	Nm

Für den Eingriff in das Motormanagement wurde ein Applikationssteuergerät mit ETK sowie CAN-Verbindung, wie beschrieben, verwendet. Über eine Schnittstelle ist das Applikationssteuergerät mit dem Prüfstandsrechner verbunden, über welchen die Motorparameter mithilfe der Benutzeroberfläche INCA variiert werden können. Der Versuchsmotor wurde zur Messung des Zylinderinnendruckes an allen vier Zylindern anstelle von Glühstiftkerzen mit piezoelektrischen Druckquarzen ausgestattet. Zur Analyse der Abgasemissionen wird Abgas durch Entnahmestellen über beheizte Vorfilter geleitet und gelangt schließlich über Heizleitungen zu den Analyseeinrichtungen. Die Konzentrationen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid wurden mittels Infrarot-Gegentakt-Wechsellichtprinzip, Stickoxide (NO und NO₂) mithilfe eines Chemolumineszenzdetektors, Restsauerstoff im Abgas durch ein paramagnetisches Wechseldruckverfahren und unverbrannte Kohlenwasserstoffe mittels Flammenionisation bestimmt. Über eine weitere Entnahmesonde mit beheizter Leitung wird ein Teilstrom des Abgases für die optische Bestimmung der Filter Smoke Number (FSN) entnommen.

3.2. Untersuchte Betriebspunkte

Zur Bewertung der Versuchskraftstoffe wurden insgesamt zehn Betriebspunkte aus dem gesamten Betriebskennfeld des Motors stationär vermessen. Diese Betriebspunkte umfassen dabei jeweils zwei Lastpunkte in der unteren sowie in der mittleren Teillast mit Abgasrückführung (AGR), vier Punkte in der oberen Teillast ohne AGR und zwei Volllastpunkte.

Die Variationsgröße der Untersuchungen stellt in den unteren und mittleren Teillastpunkten die AGR-Rate und in den höheren Teillastpunkten der Zeitpunkt der Haupteinspritzung dar. In den Volllast-Betriebspunkten wurde keine Größe variiert und lediglich der Einfluß der verschiedenen Kraftstoffe bewertet.

3.3. Versuchskraftstoffe und -mischungen

Nachfolgende Aufzählung zeigt die untersuchten Kraftstoffe bzw. Kraftstoffmischungen. Neben Blends aus BtL und fossilem Diesel kommen auch ternäre Mischungen aus fossilem Diesel, Fettsäuremethylester (FAME) und BtL bzw. HVO zum Einsatz. Zur Abbildung eines Referenzzustandes dient standardisierter CEC RF-03-A-84-Prüfdieselmotorkraftstoff:

- 50%-vol. CEC-Diesel : 50%-vol. BtL,
- 80%-vol. CEC-Diesel : 20%-vol. BtL,

- 90%-vol. CEC-Diesel : 7%-vol. FAME : 3%-vol. BtL,
- 90%-vol. CEC-Diesel : 7%-vol. FAME : 3%-vol. HVO,
- 100%-vol. CEC-Diesel.

4. Diskussion der Ergebnisse

4.1. Spezifische NO_x- und Partikelemissionen

Abbildung 2 zeigt die spezifischen NO_x- sowie die Partikelemissionen für die untersuchten Treibstoff-Blends in Referenz zu fossilem Dieselkraftstoff exemplarisch für einen Niedriglastpunkt. Es zeigt sich bereits bei geringer Beimischung von nur 20 vol.-% BtL ein sehr starker Rückgang der Partikelemissionen im Vergleich zu reinem CEC-Diesel. Diese Erkenntnis deckt sich mit früheren Veröffentlichungen, z.B. (Schaberg et al. 2007).

Für die beiden Kraftstoffmischungen aus 90% CEC Diesel, 7% FAME und 3% BtL bzw. HVO ergibt sich im Niedriglastbereich ebenfalls ein deutlicher Rückgang der Partikelemissionen bereits bei geringen Beimischraten. Betrachtet man die spezifischen Partikelemissionen, so haben diese bei steigender AGR-Rate einen nahezu konstanten Verlauf. Dies ist auf den hohen Anteil an Sauerstoff zurückzuführen, der in diesem niedrigen Lastbereich während der Verbrennung zur Verfügung steht.

Im Gegensatz zur thermischen Bildung von NO_x aus Stickstoff und Sauerstoff entsteht Ruß durch die Präsenz von unverbrannten aromatischen Kohlenwasserstoffen, die die Rußbildung bei lokalen Temperaturen von 1200°C bis 1800°C stark fördern. Auf diese Weise wird die Bildung von neuen Rußteilchen durch partielle Oxidation sowie thermische und oxidative Pyrolyse von Aromaten unter sauerstoffarmen Bedingungen eingeleitet (Azetsu et al. 2003). Bei den aromatenarmen Kraftstoff-Blends bildet sich ebenfalls Ruß, in diesem Falle allerdings aufgrund von unzureichend homogener Gemischaufbereitung zu Beginn der Verbrennung.

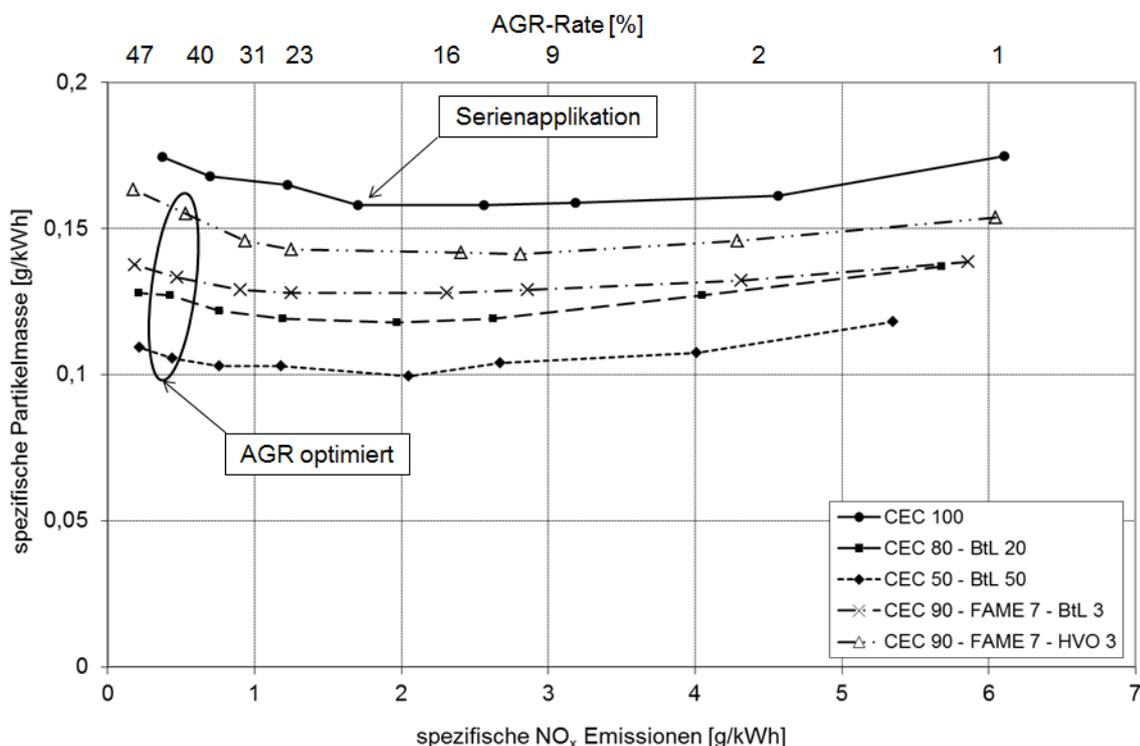


Abbildung 2: Spezifische NO_x - und Partikelemissionen bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{me}} = 2 \text{ bar}$; Variation der Abgasrückföhrtrate von 1% bis 47%.

Bei dem zum Einsatz gekommenen Dieselmotorenverfahren findet die Gemischaufbereitung nicht nur während des Zündverzuges, sondern auch nach Beginn der Verbrennung statt, sodass lokal unterstöchiometrische Gemischzonen im Brennraum entstehen. Rußbildung ist also im Falle von herkömmlichem Dieselmotorenkraftstoff einerseits auf eine unzureichende Gemischaufbereitung zu Beginn der Verbrennung, andererseits auf die Anwesenheit von unverbrannten aromatischen Kohlenwasserstoffen zurückzuführen. Als Folge der Reduzierung des Aromatengehalts kann ein deutlicher Rückgang der Rußemissionen erreicht werden, da nur noch ein Rußbildungsmechanismus zum Tragen kommt.

4.2. Spezifische Emissionen unverbrannter Kohlenwasserstoffe und Verbrauch

Abbildung 3 zeigt die spezifischen HC-Emissionen für die Variation der AGR-Rate für den bereits diskutierten Niedriglastpunkt. Der Anstieg der spezifischen HC-Emissionen mit Erhöhung der AGR-Rate kommt durch eine unvollständige Verbrennung die zunehmend unterstöchiometrische abläuft. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die AGR-Anpassung eine deutliche Reduktion der NO_x -Emissionen erwirkt werden kann, siehe Abbildung 2, ohne gravierende Nachteile bei den HC-Emissionen in Kauf nehmen zu müssen, Abbildung 3.

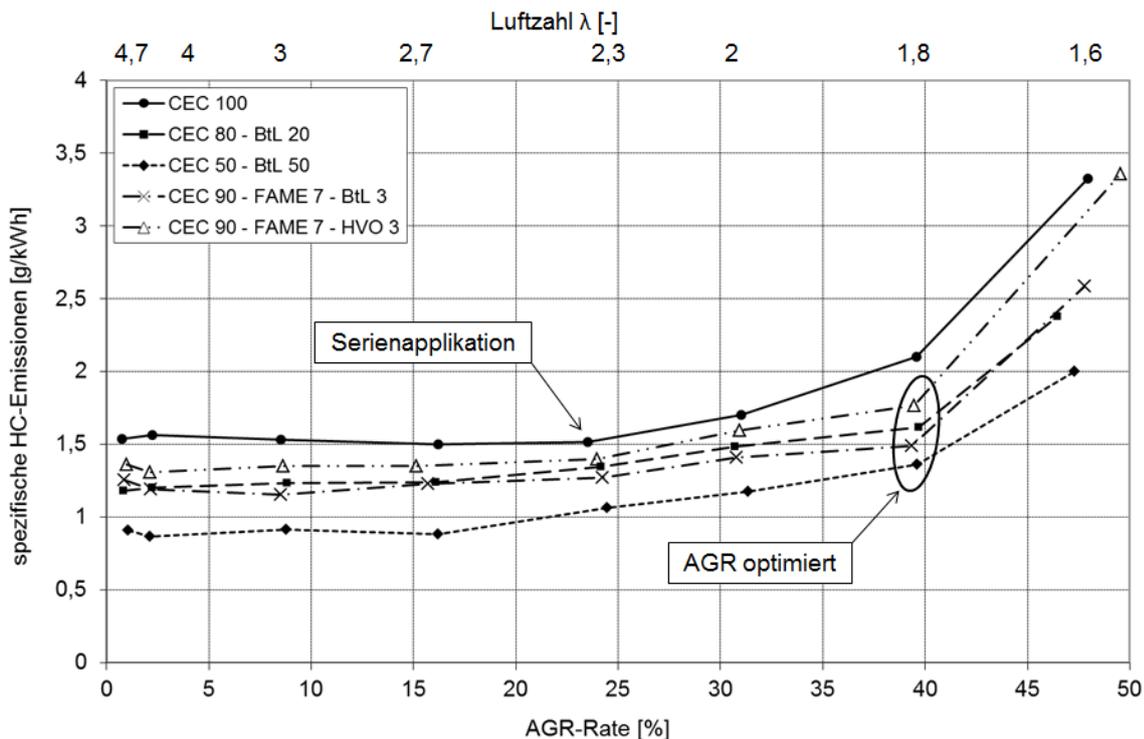


Abbildung 3: Spezifische HC-Emissionen bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{\text{me}} = 2 \text{ bar}$; Variation der Abgasrückföhrtrate von 1% bis 47%.

Abbildung 4 stellt den spezifischen Kraftstoffverbrauch bei Variation der AGR-Rate dar. Bei Erhöhung der AGR-Rate nimmt der spezifische Verbrauch zunächst ab. Dies ist auf den mit den sinkenden Verbrennungstemperaturen einhergehenden Rückgang der Wandwärmeverluste zurückzuführen. Zum

anderen fallen durch die Erhöhung der AGR-Rate die Ladungswechselverluste stark ab und führen zu einer Verbesserung des Verbrauchsverhaltens und somit zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads. Bei einer AGR-Rate von 47% wird die Verbrennung durch den steigenden CO₂-Gehalt zunehmend zu späteren Umsatzpunkten verschleppt, und führt dann zu einem sinkenden Wirkungsgrad und erhöhtem spezifischen Verbrauch. Die Anpassung der AGR zur innermotorischen Unterdrückung der NO_x-Bildung zeigt somit auch beim spezifischen Verbrauch und beim Wirkungsgrad keine negativen Auswirkungen.

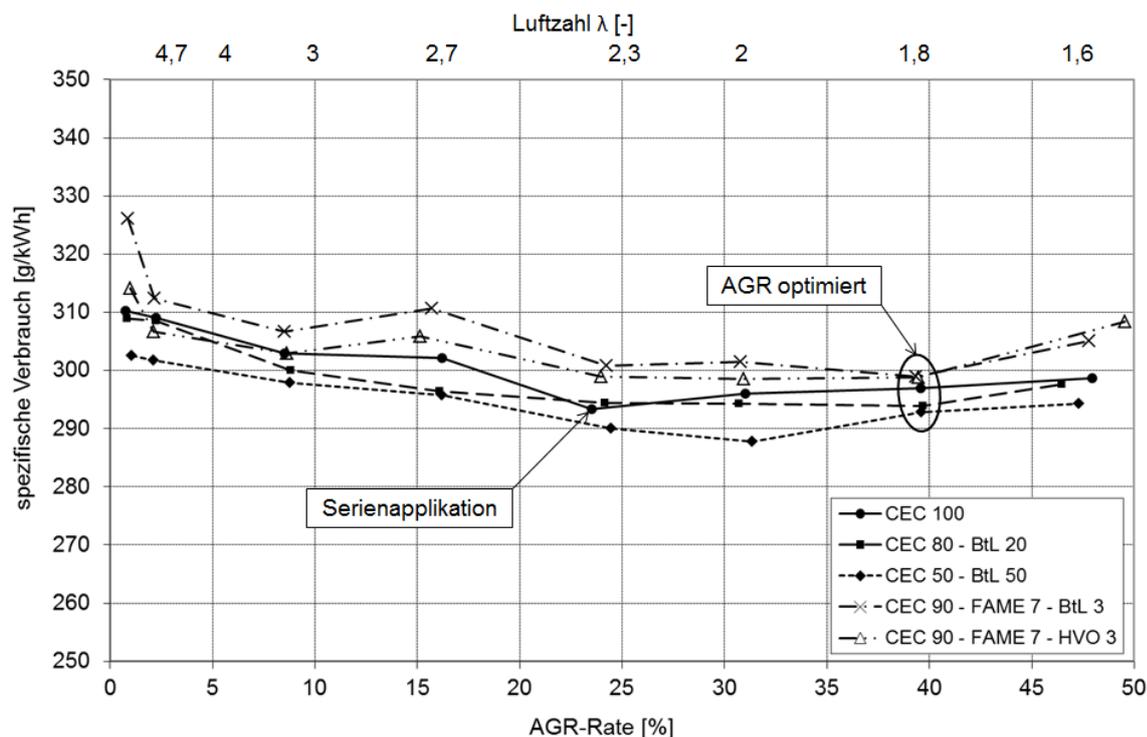


Abbildung 4: Spezifischer Verbrauch bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ und $p_{me} = 2 \text{ bar}$; Variation der Abgasrückführrate von 1% bis 47%.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Potenzial von BtL und HVO konnte eindrucksvoll nachgewiesen werden. So hat sich bei allen limitierten Emissionen ein Vorteil gegenüber fossilem Dieselmotorkraftstoff gezeigt, während sich im Gesamtwirkungsgrad keinerlei Nachteile ergaben.

Zunächst kann eine deutliche Reduktion der Partikelemissionen bei BtL und HVO, je nach Lastpunkt von über 50%, im Vergleich zu CEC-Diesel erreicht werden. Vor allem im Niedriglastbereich fällt diese bereits durch geringe Beimischraten von BtL zu CEC-Diesel überproportional aus. Der große Vorteil der untersuchten alternativen Dieselmotorkraftstoffe bei der Verringerung der Partikelmasse ist, dass das Trade-off-Verhalten mit den NO_x-Emissionen durch Anpassung der Motorparameter wie der AGR-Rate gezielt zuseiten von NO_x verschoben und somit zu deren Reduktion genutzt werden kann.

Neben den Partikelemissionen werden auch die HC- und CO-Emissionen durch den geringen Aromatenanteil in BtL und HVO deutlich reduziert. Vor allem in der unteren Teillast konnten die CO-Emissionen um über 40 %, die HC-Emissionen um über 50% reduziert werden.

Bereits durch die geringe Beimischung von 7% FAME und 3% HVO bzw. BtL zu fossilem Diesel kann eine merkliche Absenkung der Partikelemissionen, sowie auch der HC- und CO-Emissionen in der unteren Teillast erreicht werden.

Die aktuelle und zukünftig noch restriktivere Abgasgesetzgebung stellt bereits heute hohe Anforderungen an die innermotorische Reduktion der Emissionen. Die in dieser Studie untersuchten alternativen Dieselmotorkraftstoffe und Kraftstoffmischungen haben gezeigt, dass sie den Anforderungen gerecht werden können. Vor allem die Verringerung der emittierten Partikelmasse und die dadurch mögliche Reduzierung der NO_x-Emissionen birgt großes Potenzial.

Literaturliste/ Quellenverzeichnis:

United Nations (1997): Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto

Pflaum, Heiko (2010): Potenzial von synthetischen Dieselmotoren im motorischen Betrieb unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkung alternativer Brennverfahren und Einspritzstrategien auf die Ruß- und Stickoxidbildung, Dissertation an der TU Wien

Edwards, Robert (2008): Well-to-Wheels analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Well to Tank Report Version 3.0, Joint Research Center

Merker, Günter P./Schwarz, Christian (2009): Grundlagen Verbrennungsmotoren, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, ISBN 978-3-8348-0740-3

Miers, Scott A. (2005): Emissions, Performance, and In-Cylinder Combustion Analysis in a Light-Duty Diesel Engine Operating on a Fischer-Tropsch Biomass to Liquid Fuel, SAE International, Nr. SAE 2005-01-3670

Schaberg, Paul W. (2002): Exhaust Particle Number and Size Distribution with Conventional and Fischer-Tropsch-Fuels, Warrendale: SAE International, SAE 2002-02-2727

Azetsu, Akihiko (2003): Effects of Aromatic Compounds in Fuel on Flame Temperature and Soot Formation in Intermittent Spray Combustion, Yokohama: SAE International, SAE 2003-01-1913