

Abschlussbericht
zum Projekt
Betriebsverhalten von Industrie- und Landtechnikmotoren
Abgasstufe EU COM IV im Biodieselbetrieb

<p>Zuwendungsempfänger Universität Rostock Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik Lehrstuhl Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren</p>	<p>Förderkennzeichen AGQM 550_2013_2</p>
<p>Laufzeit des Vorhabens 01.01.2015 – 30.06.2017</p>	
<p>Berichtszeitraum 01.01.2015 – 30.06.2017</p>	
<p>Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf / Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz Bearbeiter Dr. rer. nat Ulrike Schümann Dr.-Ing. Volker Wichmann Dipl.-Ing. Evelyn Flügge Dipl.-Ing. Thomas Sadlowski</p>	

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	7
2	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	8
3	VERGLEICH DER KRAFTSTOFFEIGENSCHAFTEN	10
4	MONTAGE UND APPLIKATION DES MOTORS	14
4.1	VERSUCHSAUFBAU MIT ABGASNACHBEHANDLUNG UND MESSSTELLENPLAN	15
4.1.1	<i>Versuchsmotor Deutz TCD 3.6 final</i>	16
4.1.2	<i>Abgasnachbehandlungssystem</i>	17
4.1.3	<i>Abgasanalysegeräte</i>	19
4.1.4	<i>Leistungsbremse AVL DynoRoad SL</i>	21
4.2	KRAFTSTOFFVERSORGUNG DES MOTORS	22
5	ERGEBNISSE DER MOTORUNTERSUCHUNGEN	23
5.1	ARBEITSPAKET 1	23
5.1.1	<i>Einfluss der Kraftstoffe auf das Betriebsverhalten</i>	25
5.1.2	<i>Einfluss der Kraftstoffe auf das Emissionsverhalten</i>	27
5.1.3	<i>NRTC-Test</i>	30
5.2	ARBEITSPAKET 2	33
5.2.1	<i>Motorverhalten im Dauerlauf</i>	36
5.2.2	<i>Emissionsverhalten im Dauerlauf</i>	39
5.2.3	<i>Schmierölverhalten im Dauerlauf</i>	41
5.2.4	<i>Analyse des AGN-Systems über der Laufzeit</i>	43
5.3	ARBEITSPAKET 3	47
5.4	ARBEITSPAKET 4	48
5.5	ARBEITSPAKET 5	52
5.6	ARBEITSPAKET 6	55
6	ZUSAMMENFASSUNG	57
7	STAND DES VORHABENS	60
7.1	ARBEITS- UND ZEITPLAN	60
7.2	AUSGABEN-/KOSTENPLANUNG	60
8	ERREICHUNG DER ZIELE	60
9	ERGEBNISSE DRITTER	60
10	ÄNDERUNGEN IN DER ZIELSETZUNG	60

11	ERFINDUNGEN/SCHUTZRECHTSANMELDUNGEN UND ERTEILTE SCHUTZRECHTE.....	61
12	WIRTSCHAFTLICHE ERFOLGSAUSSICHTEN.....	61
13	WISSENSCHAFTLICHE UND/ODER TECHNISCHE ERFOLGSAUSSICHTEN.....	62
14	WISSENSCHAFTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE ANSCHLUSSFÄHIGKEIT	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Destillationscharakteristik von DK und B100	10
Abbildung 3-2: Oberflächenspannung von DK und B100 in Abhängigkeit von der Temperatur.....	11
Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2: Fahrstand und Motorprüfstand	14
Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des Prüfstandaufbaus mit Messstellen für Druck, Temperatur und Abgasmessstellen.....	15
Abbildung 4-4: Tier IV Motor auf dem Prüfstand.....	16
Abbildung 4-5: Aufbau des Abgasmachbehandlungssystems des Tier IV Motors auf dem Prüfstand	17
Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7: AdBlue-Dosierung mit Kühlung, Mischerstrecke und Tank mit Pumpe	18
Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9: Bestückung der Messzylinder mit Sensoren für T, p und Abgas	18
Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11: Darstellung der Bohrkernentnahme und vorbereitete Bohrkern für die Bestückung des DOC.....	18
Abbildung 4-12: ABB und die Messbereiche der Messgrößen	20
Abbildung 4-13: 2 Stück CEB II und die Messbereiche der Messgrößen	20
Abbildung 4-14: Sesam IV und die Messbereiche der Messgrößen.....	20
Abbildung 4-15: Leistungsbremse AVL DynoRoad SL des Motorprüfstandes.....	21
Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17: Kraftstofflager für B100.....	22
Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19: Tagestank am Motorprüfstand und Kraftstoffwaage mit Kraftstoffkonditionierung	22
Abbildung 5-1: Motorkennfeld mit C1-Zyklus- und zusätzlichen 5 Betriebspunkten .	23
Abbildung 5-2: Darstellung von Motordrehzahl und Moment vom NRTC-Zyklus.....	24
Abbildung 5-3: Vergleich der Vollastkurve und dem spezifischen Verbrauch zwischen DK und B100	25
Abbildung 5-4: gemessener Kraftstoffverbrauch im Vergleich DK zu B100.....	26
Abbildung 5-5: Abgastemperatur im Vergleich zwischen DK und B100	27
Abbildung 5-6: FSN im Vergleich zwischen DK und B100.....	28
Abbildung 5-7: O ₂ , CO ₂ , NO _x und THC-Konzentrationen im Vergleich zwischen DK und B100 beim Lastpunkt 6 über das AGN-System	28
Abbildung 5-8: Vergleich der NO _x und CO-Konvertierung im C1-Test zwischen DK und B100	29

Abbildung 5-9: Messdaten des C1-Tests im B100-Betrieb	29
Abbildung 5-10: Drehzahl- und Drehmomentenverlauf im NRTC im B100-Betrieb ..	31
Abbildung 5-11: NO _x -Verlauf im Rohabgas und EoP im DK und B100-Betrieb.....	32
Abbildung 5-12: Abgastemperatur von DK und B100 über die Laufzeit vom NRTC .	32
Abbildung 5-13: Vergleich der THC-Konzentrationen mit Rohabgas und EoP zwischen DK und B100 im NRTC.....	33
Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15: Lage der Bohrkernentnahme am DOC und Zeitplan.....	35
Abbildung 5-16: Spezifischer Kraftstoffverbrauch und Ansaugtemperatur vor Zylinder für Punkt 2 und 5 über die Betriebsstunden	36
Abbildung 5-17: Luftmassenstrom für Punkt 2 und 5 über die Betriebsstunden	37
Abbildung 5-18: Vergleich Start- und Endmessung der AGN-Temperatur je AGN System	38
Abbildung 5-19: Vergleich der Einspritzmenge über der Ansteuerdauer in Abhängigkeit der Laufzeit.....	39
Abbildung 5-20: Stickoxide und Kohlenmonoxid über der Laufzeit.....	40
Abbildung 5-21: Vergleich des Konvertierungsverhalten von NO _x und CO von 100 Bh mit 900 Bh	40
Abbildung 5-22: Viskosität und TAN des Schmieröls über der Laufzeit.....	41
Abbildung 5-23: FAME-Gehalt im Schmieröl über der Laufzeit	42
Abbildung 5-24: Fe, Al und Cu-Gehalt im Schmieröl über der Laufzeit	43
Abbildung 5-25: BET vom DOC über die Laufzeit von 1000 h.....	43
Abbildung 5-26: BET vom SCR über die Laufzeit von 1000 h	44
Abbildung 5-27: T50 und T80-Werte der SCR-Performance in Abhängigkeit der Laufzeit.....	45
Abbildung 5-28: T50 und T80-Werte der DOC-Performance in Abhängigkeit der Laufzeit.....	45
Abbildung 5-29: RFA/ICP-Analyse vom SCR über die Betriebsstunden	46
Abbildung 5-30: RFA/ICP-Analyse vom DOC über die Betriebsstunden	46
Abbildung 5-31: Drehzahl- und Drehmomentenspur vom Niederlastzyklus.....	48
Abbildung 5-32: Abgastemperaturen über dem Niederlastzyklus	49
Abbildung 5-33: NO _x -Konzentration im Niederlastzyklus	49
Abbildung 5-34: THC- und CO-Konzentration im Niederlastzyklus.....	50
Abbildung 5-35: O ₂ - und CO ₂ -Konzentration im Niederlastzyklus.....	50

Abbildung 5-36: Bilder vom DPF (links vor dem 100 Stunden Niederlastzyklus, Mitte nach dem Testlauf, rechts nach Stand Still)	51
Abbildung 5-37: Bilder vom DOC (links vor und rechts nach 100 Stunden Niederlastzyklus	51
Abbildung 5-38: Vergleich der Vollastkurven der unterschiedlichen Blends	52
Abbildung 5-39: Vergleich des Momentenverlaufs bei unterschiedlichen Blends	53
Abbildung 5-40: Motordrehmoment bei 1900 min^{-1}	53
Abbildung 5-41: Filtersmokenumber im Rohabgas des C1-Tests in Abhängigkeit vom Blend	54
Abbildung 5-42: NO _x -Konzentration in Abhängigkeit vom B100-Gehalt im Rohabgas und EoP.....	54
Abbildung 5-43: Abgastemperaturen im StandStill von DK und B100	55
Abbildung 5-44: CO ₂ -Konzentration im StandStill von DK und B100	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Kennwerte von Dieselkraftstoff und Biodiesel.....	12
Tabelle 3-2: Vergleich der Metallgehalte von Dieselkraftstoff und Biodiesel	12
Tabelle 4-1: Technische Daten des 4-Zylinder Versuchsmotors Deutz TCD 3.6 final	16
Tabelle 4-2: Abgaskomponenten und entsprechende Analysatoren	19
Tabelle 5-1: Lastpunkte des C1-Zyklusses.....	24
Tabelle 5-2: Lastpunkte vom C1-Test bei DK und B100.....	26
Tabelle 5-3: Ergebnisse des C1-Tests mit Grenzwerten	30

1 Einleitung

Zum Antrieb von Fahrzeugen werden auf Grund ihrer hohen Energiedichte hauptsächlich flüssige Kraftstoffe, momentan zum größten Teil fossilen Ursprungs, eingesetzt. Um die Abhängigkeit vom Erdöl und gleichzeitig die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, wird seit vielen Jahren nach alternativen und regenerativen Kraftstoffen gesucht. Die EU-Kommission verfolgt mit ihrem „Aktionsplan zur Förderung von Biokraftstoffen“ das Ziel, bis zum Jahr 2020 10 % der europaweit eingesetzten konventionellen Kraftstoffe durch biogene Kraftstoffe zu ersetzen. Auch die Richtlinie 2009/28/EG fordert einen Anteil von 10 % erneuerbaren Energien im Verkehrssektor, wobei davon 5 % aus Reststoffen, wie z.B. Altfetten produziert sein sollen.

Ein Flottenbetrieb mit 100 % Biodiesel (B100) im Agrarsektor ist ein Weg, der nennenswert zur Erfüllung der Quotenverpflichtung beitragen kann. Da es aktuell keine Freigabe für Motoren der Abgasstufe IV für 100 %igen Biodiesel gibt, soll in diesem Vorhaben der prinzipielle Nachweis für die Eignung von 100 % Biodiesel für den Betrieb von Serienmotoren der Abgasstufe EU COM IV (non-road) für Industrie- und Landtechnikanwendungen an einem typischen landwirtschaftlich genutzten Motor Deutz TCD 3.6 L4 erbracht werden.

Dabei werden primär mögliche Deaktivierungen des Abgasnachbehandlungssystems (AGN-System) aufgrund von Kraftstoffspurenelementen (P, K, Na, Ca,...) im Langzeitbetrieb untersucht. Detaillierte Analysen des Dieselpartikelfilters (DPF) beinhalten die Untersuchung der Beladung und der kontinuierlichen Regeneration mittels des durch NO₂ getragenen CRT-Effektes. Damit ein störungsfreier Betrieb für den Endnutzer mit B100 realisiert werden kann, wird auch die Funktion der „On-Board-Diagnose“ (OBD) überprüft.

Im Rahmen dieses Projektes werden 6 Arbeitspakete durchgeführt, die folgende Schwerpunkte beinhalten: Zunächst erfolgt eine umfangreiche Funktionserprobung des Motors und des AGN-Systems im stationären Betrieb (C1-Zyklus und ausgesuchte stationäre Lastpunkte) mit Referenz-DK (EN 590) und Biodiesel (EN 14214). In einem weiteren Arbeitsschritt wird ein instationärer Dauerlauf (NRTC-Zyklus) von 1.000 h mit B100 durchgeführt, um das Langzeit-Betriebsverhalten von Motor und AGN-System zu testen. Im Anschluss wird ein 300 h Dauerlauf im stationären B100-Betrieb zur Bestimmung der lastabhängigen Deaktivierung des AGN-Systems absolviert. Im nächsten Arbeitspaket wird das Potential einer B100-

Applikation abgeschätzt. Hierfür werden mittels eines teiloffenen Steuergerätes erstmals die Bestromungssignale der Injektoren sowie die Abgasrückführung (AGR) variiert. Bedingt durch die geringe Energiedichte und die hohe Siedelage kann es zur Verschleppung der Verbrennung kommen, was sich im Niedriglastbereich verstärkt. Daher wird in einem weiteren Arbeitspaket das Betriebsverhalten im langandauernden Niedriglastbetrieb analysiert. Zum Abschluss soll ein Blend aus 50 % Biodiesel und 50 % DK (EN 590) im Motorbetrieb getestet werden, da zu erwarten ist, dass der Endnutzer mitunter beliebige DK-B100-Mischungen tankt. Gleiche zuvor angefahrne Lastpunkte garantieren dabei die Vergleichbarkeit der Daten

Gesamtziel des Projektes ist, allgemeine wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen, ob und unter welchen Bedingungen hochmoderne Landmaschinen der Abgasstufe EU IV (Tier 4 final) mit Biodiesel bzw. Biodieselblends betrieben werden können, damit geeignete und erprobte Antriebsaggregate zeitnah für den Einsatz von B100 in der Landwirtschaft zur Verfügung stehen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Einsatz von Biodiesel nach EN 14214 in Landmaschinen wird seit Anfang der neunziger Jahre untersucht und diskutiert. Der kurzzeitige Wegfall der Agrardieselbeihilfen im Herbst 2001, bei gleichzeitiger Mineralölsteuerfreiheit von Biodiesel, führte zu einem signifikanten Entwicklungsschub für den Einsatz von Biodiesel in Landmaschinen. Dies geschah parallel zu den umfangreichen Entwicklungsarbeiten eines niedersächsischen Automobilherstellers, der einige Fahrzeugreihen (mit kleiner RME-Sonderausstattung) der Modelljahre 1996 bis 2004 für den Betrieb mit Biodiesel freigegeben hat.

Im Ergebnis dieser Arbeiten erfolgten umfangreiche Freigaben von Landmaschinen aller großen Hersteller für den Betrieb mit Biodiesel (RME), welche die damals aktuellen Motoren der Abgasstufe EU COM I und II umfassten. Diese Motoren besaßen teilweise schon Common-Rail-Einspritzsysteme, aber keine Abgasnachbehandlungseinrichtungen. Die Abgasgrenzwerte konnten durch innermotorische Maßnahmen erreicht werden. Bei den damals erteilten Freigaben wurden mitunter Betriebsauflagen erteilt, wie zum Beispiel halbierte

Ölwechselintervalle oder Nutzung von Kraftstoffadditiven, um Ablagerungen im Kraftstoffhochdrucksystem zu vermeiden.

Die seinerzeit erarbeiteten Freigaben können nicht direkt auf heutige Motoren für Landmaschinen übertragen werden. Daher liegen aktuell keine Freigaben für 100 %-igen Biodieselbetrieb bei Motoren ab der Abgasstufe EU COM IV vor. Eine der hauptsächlichsten technologischen Veränderungen zwischen Abgasstufe III und IV betreffen die Abgasnachbehandlungssysteme der Motoren.

Zur Einhaltung der Abgasnormen können unterschiedliche Lösungsansätze gewählt werden. So ist es denkbar, die NO_x-Minimierung mittels einer selektiven katalytischen Reduktion (SCR-System) zu realisieren. Dabei wird Ammoniak über einer Hydrolyse und Thermolyse aus einer wässrigen Harnstofflösung hergestellt, welches dann mit den Stickoxiden (NO_x) reagiert. Bedingt durch die im Biodiesel enthaltenen Alkalimetallspuren (K, Na) kann es zu einer Deaktivierung des Dieseloxidationskatalysators (DOC) sowie des SCR-Systems kommen, was eine Verschlechterung der Konvertierungsrate zur Folge hätte.

Weitere schädliche, reglementierte Abgaskomponenten sind Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) sowie Partikel (PM). Für die Senkung von CO und HC kommt der DOC zum Einsatz. Dieser beschichtete Katalysator oxidiert CO zu CO₂ sowie HC zu H₂O und CO₂.

Für den Rückhalt der Partikel wird ein Dieselpartikelfilter (DPF) genutzt. Im DPF werden die Rußpartikel bei der Durchdringung einer porösen Filterwand gefiltert. Aufgrund der zurückgehaltenen Partikel im Filter steigt der Abgasgegendruck. Um dies zu verhindern, muss der Filter regeneriert werden. Dies kann zum einen durch eine kontinuierliche Regeneration (CRT-Effekt) oder zum anderen durch eine Zwangsregeneration erfolgen. Bei der letzteren werden die Abgastemperaturen im Filter auf über 600 °C gebracht, wobei die Partikel im Filter abbrennen. Diese Temperaturerhöhung kann durch innermotorische Strategien oder durch einen Brenner ermöglicht werden. Bedingt durch die hohe Siedelage des Biodiesels können als Folge der schlechteren Verbrennung Beeinträchtigungen der Regeneration auftreten.

Auf Grund des Gehalts von Aschebildern im B100 kann es zu einer erhöhten Ascheablagerung im DPF kommen, welche nicht regenerierbar ist und damit eine frühere Alterung des Aggregates zur Folge hat.

3 Vergleich der Kraftstoffeigenschaften

Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen und chemischen Kraftstoffeigenschaften vom Biodiesel (EN 14214) zum Diesel (EN 590) sind Unterschiede in der Verbrennung zu erwarten. Diese Unterschiede fallen umso stärker ins Gewicht, je weiter die Brennverfahren entwickelt und auf die genormten Kraftstoffe angepasst sind.

Es ist bekannt, dass es einen wesentlichen Unterschied zwischen B100 und mineralischem Dieseldieselkraftstoff hinsichtlich ihrer Siedelage gibt (siehe Abbildung 3-1). Da es sich bei Dieseldieselkraftstoff 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 Dieseldieselkraftstoffes beginnt bei ca. 170 °C. Im Unterschied dazu hat der Biodiesel einen anderen Siedeverlauf. So ist festzustellen, dass dessen homogene Zusammensetzung zu einem sehr schmalen Siedebereich führt, welcher über 300 °C beginnt.

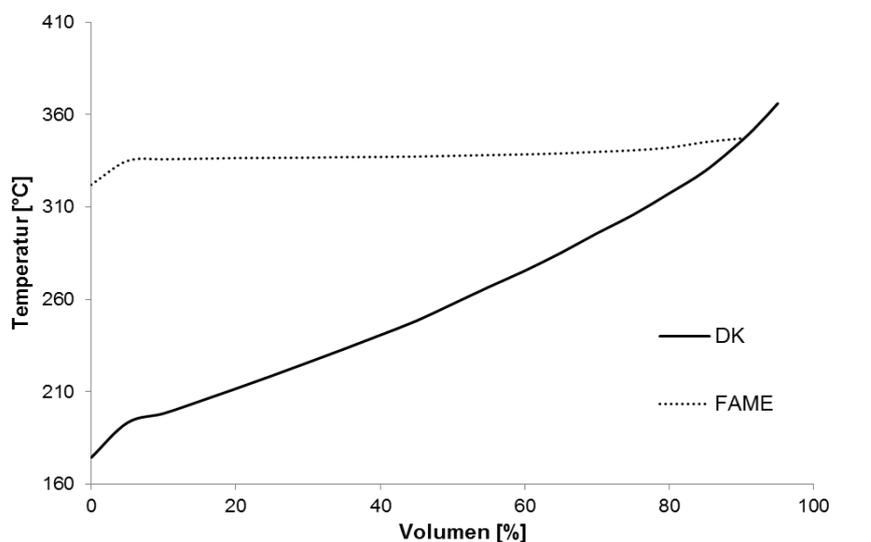


Abbildung 3-1: Destillationscharakteristik von DK und B100

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. In Abbildung 3-2 ist die Oberflächenspannung

von DK und B100 in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. 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 Biodiesels (FAME) aufgrund der Polarität im Molekül deutlich oberhalb der des reinen Dieselkraftstoffes. Im übertragenen Sinn auf das Gemischbildungsverhalten bezogen bedeutet dies, dass der B100-Kraftstoff vergleichsweise schlechter zerstäubt wird als Dieselkraftstoff. 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 Biodiesel im Vergleich zum Referenzdieselmotorkraftstoff Differenzen im Brennverhalten sowie teilweise höhere NO_x-Emissionen zu erwarten.

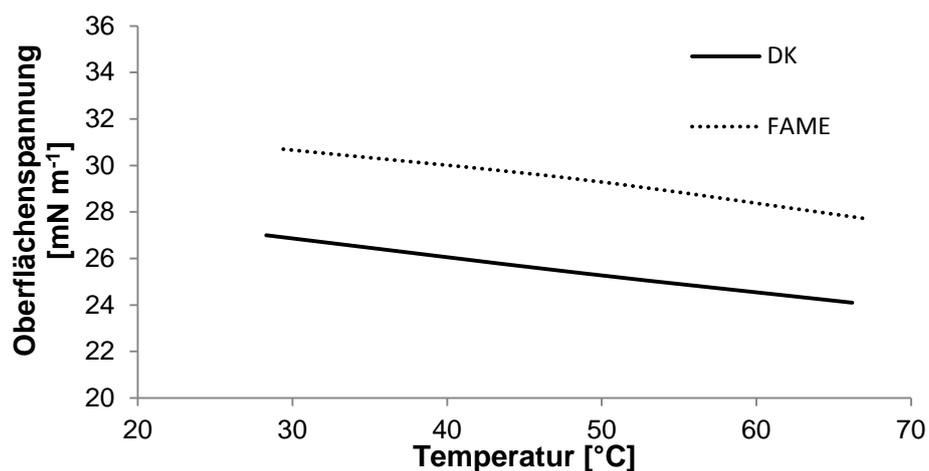


Abbildung 3-2: Oberflächenspannung von DK und B100 (FAME) in Abhängigkeit von der Temperatur.

Eine weitere Kraftstoffeigenschaft ist der Heizwert, welcher ein Maß für die Energiedichte des Kraftstoffes ist. So wird aufgrund des geringeren volumetrischen Heizwertes von B100 eine Leistungseinbuße erzielt. Des Weiteren kann es zu einer Verschiebung der Betriebspunkte im Motorkennfeld kommen, was einen Einfluss auf die Verbrennungsführung und das Abgasnachbehandlungssystem hat.

Durch den molekular gebundenen Sauerstoff im Biodiesel ist eine Verringerung der Partikelemission beim Betrieb mit B100 zu erwarten, da ein Teil des benötigten Sauerstoffs für die Verbrennung direkt durch den Kraftstoff gestellt wird. Dies hat ebenso einen Einfluss auf die Beladung des DPF und damit längere Abstände zwischen zwei Regenerationen zur Folge.

Die folgende Tabelle 3-1 enthält die typischen Kennwerte und die Tabelle 3-2 zeigt die Analyseergebnisse der Metallgehalte von Dieseldieselkraftstoff und Biodiesel.

Tabelle 3-1: Kennwerte von Dieseldieselkraftstoff und Biodiesel

Parameter	Prüfvorschrift	Einheit	DK	B100
Dichte bei 15 °C	DIN EN ISO 12185	Kg/m ³	835,6	883
Oxidationsstabilität 110°C	EN 15751	h	14,8	8,6
Oxidationsstabilität 140°C (PetroOXY-Test)	DIN EN 16091	min	35,5	
Flammpunkt	ISO 2719	°C	71	182
Viskosität bei 40°C	ASTM D 7042	mm ² /s	2,83	4,44
Wassergehalt	EN ISO 12937	mg/kg	86,1	30
Heizwert	DIN 51900-2	kJ/kg	42848	37046
Kohlenstoffgehalt	DIN 51732	% (m/m)	86,6	77,3
Wasserstoffgehalt	DIN 51732	% (m/m)	12,5	12,1

Tabelle 3-2: Vergleich der Metallgehalte von Dieseldieselkraftstoff und Biodiesel

Element	Einheit	DK	B100
Al 396.152	mg/kg	<1	<1
Ca 315.887	mg/kg	<1	<2
Cr 267.716	mg/kg	<1	<1
Cu 324.754	mg/kg	<1	<1
Fe 259.941	mg/kg	<1	<1
Mg 279.553	mg/kg	<1	<2
Mn 257.611	mg/kg	<1	<1
Mo 202.095	mg/kg	<1	<1
Na 588.995	mg/kg	<1	<2
Ni 221.648	mg/kg	<1	<1
P 213.618	mg/kg	<1	<4
Pb 220.353	mg/kg	<1	<1
S 182.034	mg/kg	<1	2,7 (ICP OES)
Si 251.612	mg/kg	<1	<1
Sn 189.991	mg/kg	<1	<1
Ti 334.941	mg/kg	<1	<1
V 292.464	mg/kg	<1	<1
Zn 206.200	mg/kg	<1	<1
Säurezahl	mgKOH/g	0,2	0,46*

* Zertifikat AGQM

Im Vergleich der Biodieselkennwerten mit der „Biodieselqualität in Deutschland“ (AGQM 2016) schneidet der genutzte B100 gut ab. Lediglich die Säurezahl, Phosphor und die Oxidationsstabilität liegen im deutschlandweiten Durchschnitt. Des Weiteren besagt die Quelle, dass der bundesweite produzierte Kraftstoff eine sehr gute Qualität aufweist und damit einen sehr geringen Anteil an Elementen.

4 Montage und Applikation des Motors

Für die umfangreichen Motoruntersuchungen im 100 % Biodieselbetrieb wurde ein neuer Landtechnikmotor der Abgasstufe EU COM IV auf einen modernen Motorprüfstand der Universität Rostock aufgebaut (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-12). An diesem Motorprüfstand fanden alle Versuche zu den folgenden 6 Arbeitspaketen dieses Projektes statt.

- AP1: Kennfeldtests auf Motorprüfstand - umfangreiche Funktionserprobungen des Motors und des AGN Systems (Abgasnachbehandlungssystem) im Vergleich von DK und B100
- AP2: Dauerlaufuntersuchungen am Prüfstand - 1.000 Bh-Dauerlauf im transienten Betrieb (NRTC) mit B100 – Abgasmessungen nach EU Stufe IV, Untersuchung der Katalysatoralterung, Befundung von AGN
- AP3: Dauerlaufuntersuchungen von 200 Bh bei stationären Betriebspunkten
- AP4: Überprüfung des Betriebsverhaltens im Niedriglastbereich 100 Bh
- AP5: Blends-Untersuchungen

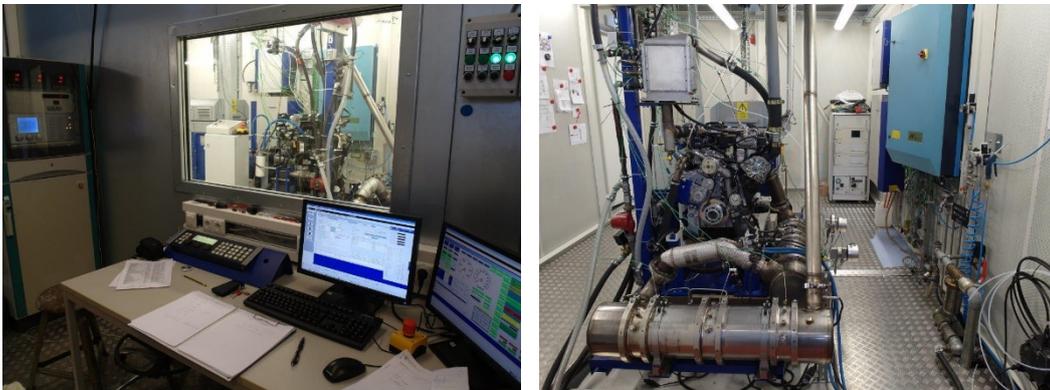


Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2: Fahrstand und Motorprüfstand

Diese Prüfstandtests, die insgesamt über mehr als 1700 Stunden gingen, hatten das Ziel, den Nachweis der Eignung von einem Serienmotor der EU Abgasstufe IV für Industrie- und Landtechnik Anwendungen mit Abgasnachbehandlungssystemen für den Betrieb mit Biodiesel bzw. Biodieselblends zu erbringen.

4.1 Versuchsaufbau mit Abgasnachbehandlung und Messstellenplan

In der folgenden Abbildung 4-3 ist der Aufbau des Motors mit den entsprechenden Druck- und Temperatursensoren sowie den Abgasentnahmestellen schematisch dargestellt. Es ist erkennbar, dass jeweils über dem Dieseloxidationskatalysator (DOC), über dem Dieselpartikelfilter (DPF) und über dem Selektiven Katalytischen Reduktionskatalysator (SCR) Differenzdrucksensoren angeschlossen sind, um die Druckveränderungen über diese AGN-Systeme zu überwachen und zu analysieren. Vor der AGN-Strecke wird das Rohabgas entnommen und dann jeweils vor und nach dem DPF sowie nach dem SCR. Durch den gewählten Aufbau der Abgasnachbehandlungsstrecke kann jede einzelne Komponente dieses Abgassystems separat untersucht werden.

Motorprüfstandsaufbau

Messstellen am Prüfling

1. Abgasturbolader
2. Ladeluftkühler
3. AGR – Kühler
4. Drosselklappe
5. AGR-Ventil
6. Rail
7. DOC
8. DPF
9. SCR
10. ASC

- Temperatursensoren
- × Drucksensoren
- Abgasentnahmestellen

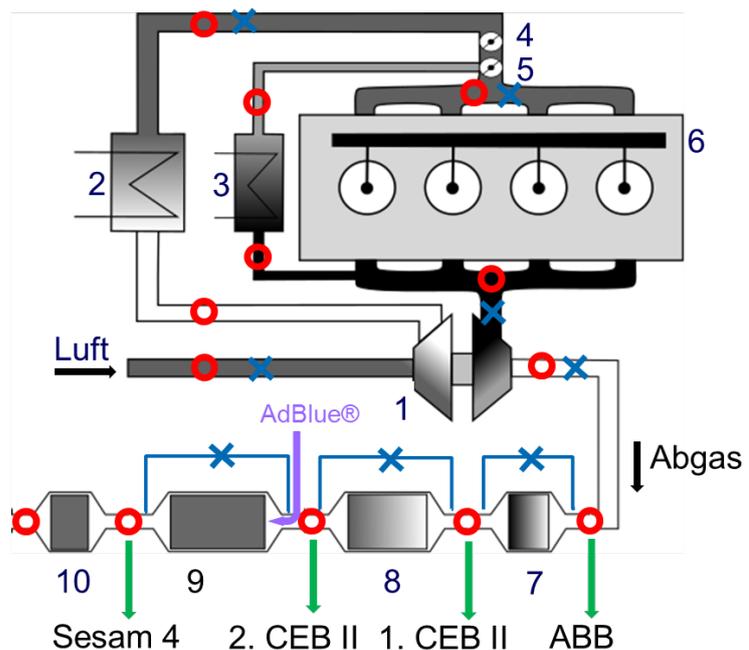


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des Prüfstandsaufbaus mit Messstellen für Druck, Temperatur und Abgasentnahmestellen

4.1.1 Versuchsmotor Deutz TCD 3.6 final

Die Untersuchungskampagnen wurden an einem modernen Common-Rail (CR) Dieselmotor der Firma DEUTZ AG durchgeführt (Motordaten Tabelle 4-1). Dieser Motor repräsentiert den aktuellen Stand der Technik. Es handelt sich um einen Motor mit einer Leistung von 100 kW und eine Hubraum von 3,6 Liter. Der Motor hat eine Zulassung für Standard-Diesel (EN 590). Das bedeutet, dass der Motor für einen Betrieb mit einem Biodieselanteil von 7 % freigegeben ist. Der Motor erfüllt die seit 2014 gültige Abgasnorm EU Stufe IV im DK-Betrieb.

Tabelle 4-1: Technische Daten des 4-Zylinder Versuchsmotors Deutz TCD 3.6 final

Parameter	Einheit	
Nennleistung	kW	100 bei 2.300 min ⁻¹
Max. Drehmoment	Nm	500 bei 1.600 min ⁻¹
Hubraum	Liter	3,6
Hub	mm	120
Bohrung	mm	98
AGR	-	Gekühlte Hochdruck AGR
Abgasnachbehandlung	-	DOC-DPF-SCR

Der Versuchsmotor wird mit dem Schmieröl Deutz RODON 10W40 Mid SAPS gefahren. Abbildung 4-4 zeigt den Deutz-Motor auf dem Prüfstand.

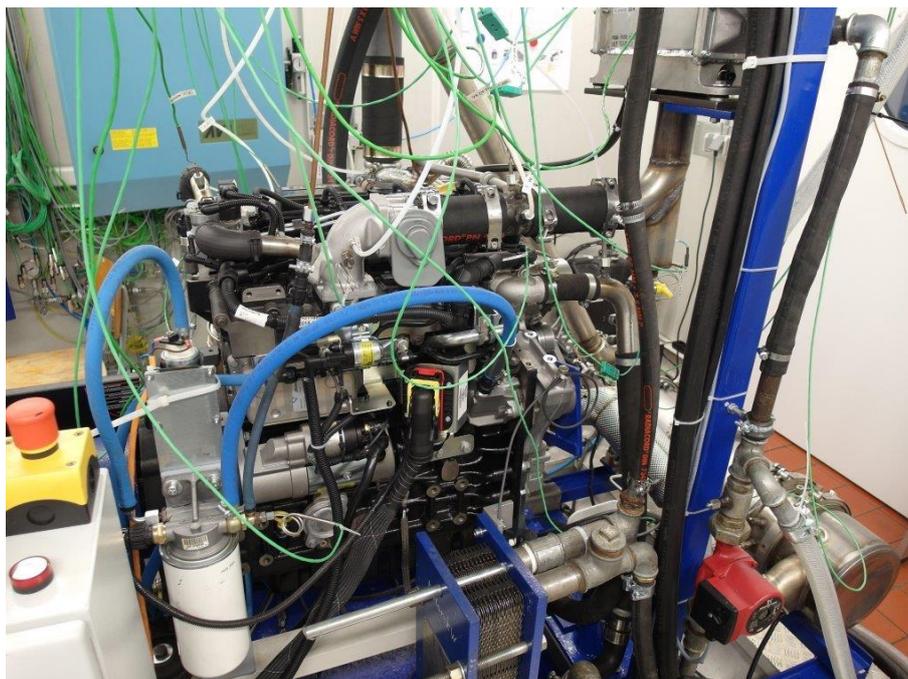


Abbildung 4-4: Tier IV Motor auf dem Prüfstand

4.1.2 Abgasnachbehandlungssystem

Der Motor besitzt ein zur Einhaltung der Abgasnorm EU Stufe IV benötigtes Abgasnachbehandlungssystem des Katalysatorherstellers Umicore, bestehend aus einem Dieseloxydationskatalysator (DOC), einem Dieselpartikelfilter (DPF), einem selektiven Katalytischen Reduktionskatalysator (SCR) und einem Sperrkatalysator (ASC), siehe Abbildung 4-5. Vor dem SCR-Katalysator befindet sich die AdBlue-Dosierstrecke, bestehend aus Dosierventil, Zuleitungen für die Kühlung und dem Tank mit Pumpe. Für die Durchmischung von Abgas und wässriger Harnstofflösung (AdBlue) wird die Mischerstrecke benötigt (Abbildung 4-6 und Abbildung 4-67).

Die Komponenten sind in seriennahen Cannings modular aufgebaut. Zwischen den einzelnen Kats sind Messzylinder angeordnet, die alle notwendigen Messstutzen für die Aufnahme der Temperatur-, Druck- und Abgasentnahmesonden enthalten (Abbildung 4-8 und Abbildung 4.9). Der gewählte Aufbau des AGN-Systems (ein Schwerpunkt dieses Projektes ist die Einhaltung der Abgasstufe IV) dient den umfangreichen Untersuchungen der einzelnen AGN-Bestandteile, insbesondere des DOC und des DPF, die sich so leicht demontieren lassen.

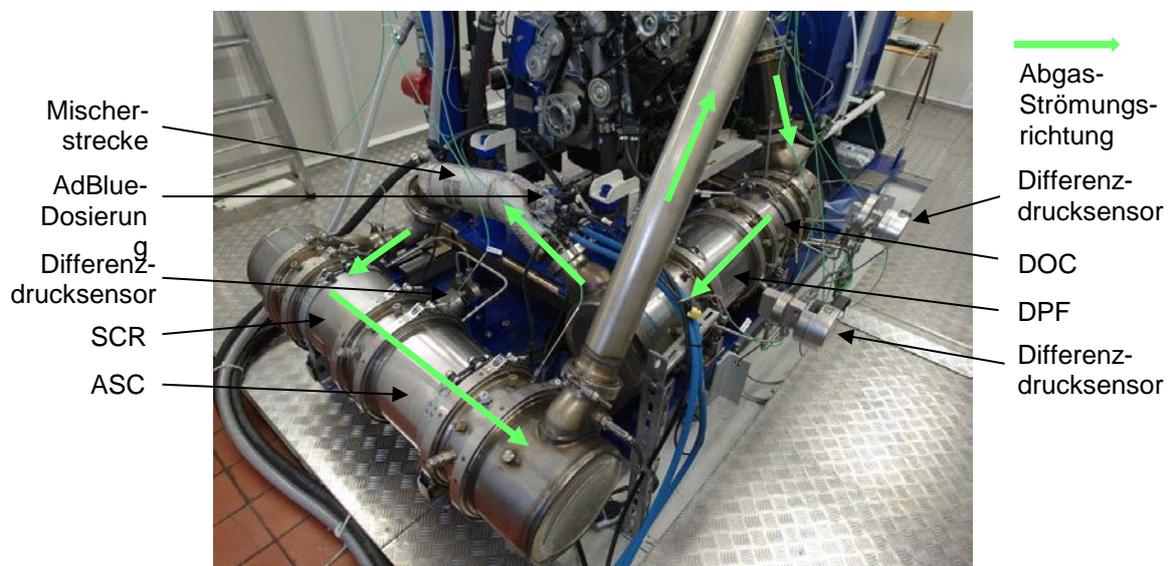


Abbildung 4-5: Aufbau des Abgasnachbehandlungssystems des Tier IV Motors auf dem Prüfstand

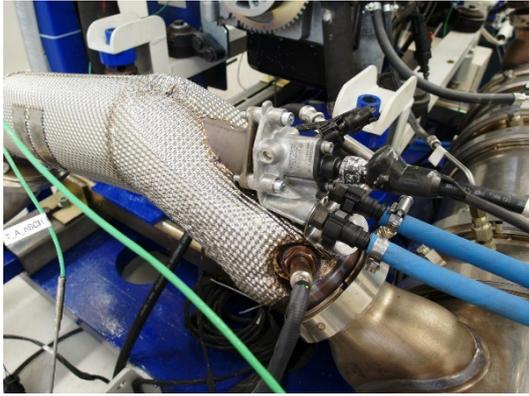


Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7: AdBlue-Dosierung mit Kühlung, Mischerstrecke und Tank mit Pumpe

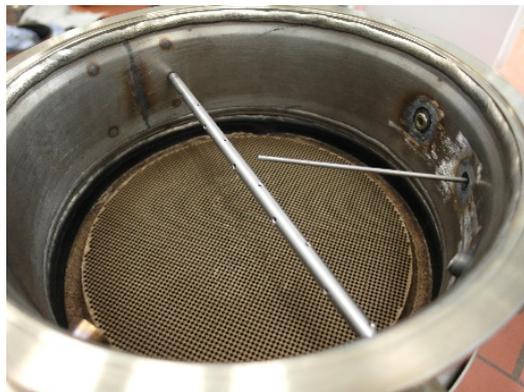


Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9: Bestückung der Messzylinder mit Sensoren für T, p und Abgas

Der DOC ist die erste Komponente im Abgasnachbehandlungssystem und daher besonders anfällig für Vergiftung durch Bestandteile der Rohabgase. Zur Bestimmung der örtlichen und zeitlichen Deaktivierung des Katalysators werden im Abstand von 100 Stunden Bohrkerne dem DOC entnommen und untersucht. Beim Wechsel selbst wird der Canning samt DOC ausgebaut, mit einem Hohlbohrer werden die Bohrkerne hergestellt, dann herausgezogen und mit einem neuen Bohrkern bestückt (siehe Abbildung 4-10 und Abbildung 4-101).

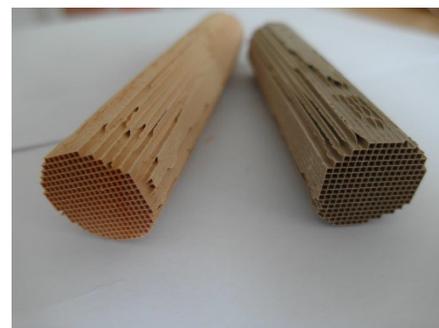
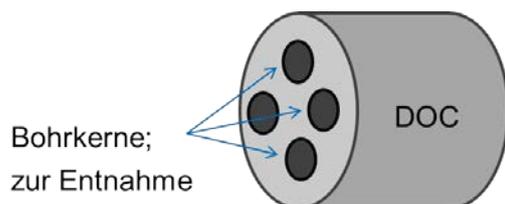


Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11: Darstellung der Bohrkernentnahme und vorbereitete Bohrkerne für die Bestückung des DOC

4.1.3 Abgasanalysegeräte

Für die Abgasanalysen kommen mehrere kommerzielle Abgasmessanlagen mit einer Messrate von 1 Hz zum Einsatz. Zu Beginn der Abgasmessungen wird eine Vergleichsmessung aller vier Geräte im/mit Rohabgas vorgenommen, um die Synchronisation der Geräte vorzunehmen. Anschließend kommen die vier Analysensysteme parallel zum Einsatz. Es wird nach der Turbine (ATL) vor DOC, nach DOC/vor DPF, nach DPF/vor SCR und nach SCR-System/EoP (End of Pipe) zeitgleich gemessen. Tabelle 4-2 zeigt die zu messenden Abgaskomponenten und die dazugehörigen Analyseverfahren der Abgasmessgeräte. Abbildung 4-12, Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 zeigen die einzelnen Abgasmessgeräte und die möglichen Messbereiche der zu messenden Messgrößen.

Tabelle 4-2: Abgaskomponenten und entsprechende Analysatoren

Messgröße	Analysator	Messprinzip
O ₂	Magnos, Fa. ABB	Magnetomechanischer Sauerstoff-Analysator
CO/CO ₂	Fourier-Transformations-Infrarotspektromete, Fa. AVLr	Nichtdispersive Infrarotabsorption
HC	Flammenionisations-Detektor(FID), Fa. AVL/ABB	Konzentrationsmessung
NO/NO ₂	Chemilumineszenz-Detektor (CLD), Fa. AVL/ABB	Photoemissionen
NO	LIMAS, Fa. ABB	Wellenlängenvergleich
Schwärzungszahl	AVL Smoke Meter, Fa. AVL	Optische Schwärzung auf Filterpapier



Messgröße	Messbereich
O ₂	0 - 25 %
CO	0 - 3 %
CO ₂	0 - 25 %
HC	0 - 4.500 ppm
NO	0 - 2.500 ppm

Abbildung 4-12: ABB und die Messbereiche der Messgrößen



Messgröße	Messbereich
O ₂	0 - 25 %
CO _L / CO _H	0 - 2.500 ppm 1.000 - 100.000 ppm
CO ₂	0 - 20 %
THC	0 - 1.000 ppm
NO _x	0 - 10.000 ppm

Abbildung 4-13: 2 Stück AVL CEB II und die Messbereiche der Messgrößen



Messgröße	Messbereich
O ₂	0 - 25 %
CO	0 - 10 %
CO ₂	0 - 20 %
NO	0 - 10.000 ppm
NO ₂	0 - 1.000 ppm
NH ₃	0 - 1.000 ppm

Abbildung 4-14: AVL Sesam IV und die Messbereiche der Messgrößen

4.1.4 Leistungsbremse AVL DynoRoad SL

Mit der Verschärfung der Abgasvorschriften von Euro II bis zur jetzigen Euro IV sind in den letzten acht Jahren grundlegend veränderte Messvorschriften einhergegangen. Bis zur Abgasstufe EU IIIB reichte für die Abgasuntersuchungen ein stationärer Test mit 8 Messpunkten (C1 nach ISO-Norm 8178-4) der mittels Wirbelstrombremsen umsetzbar war. Für die Verifizierung der Motoren nach EURO IV sind zusätzlich dynamische Tests nach dem NRTC vorgeschrieben. Diese können nur mit dynamischen Motorbremsen, sogenannten 4-Quadrantenmaschinen realisiert werden. So ist es möglich, den sekundengenau aufgelösten Fahrzyklus NRTC nachzubilden und reproduzierbare und international vergleichbare Messungen zu realisieren.

Für den Anstieg der Anforderungen an die Prüfstandausrüstung konnte im Rahmen dieses Projektes eine dynamische Leistungsbremse AVL DynoRoad SL beschafft werden, siehe Abbildung 4-15. Diese verbaute hochmoderne Leistungsbremse ist in der Lage, sämtliche Lastzustände sowohl als Antriebsmaschine als auch als Generator zu realisieren. Mit dieser Bremse werden die für die EU Stufe IV geforderten NRTC-Zyklen (Nonroad Transient Cycle) gefahren.



Abbildung 4-15: Leistungsbremse AVL DynoRoad SL des Motorprüfstandes

4.2 Kraftstoffversorgung des Motors

Durch die AGQM wurden für dieses Projekt insgesamt 17.000 Liter Biodiesel nach EN 14214 zur Verfügung gestellt (Abbildung 4-16 und Abbildung 4-167).



Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17: Kraftstofflager für B100

Der Kraftstoff wird für die Durchführung der Motorversuche in einem Tagestank vorgehalten (Abbildung 4-18). Die Einbindung des Kraftstoffes erfolgt über eine AVL Kraftstoffwaage mit anschließender AVL Kraftstoffkonditionierung (Abbildung 4-189).



Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19: Tagestank am Motorprüfstand und Kraftstoffwaage mit Kraftstoffkonditionierung

5 Ergebnisse der Motoruntersuchungen

Zur Erfüllung der Zielstellung des Projektes, den Nachweis der Eignung von einem Serienmotor der EU Abgasstufe IV für Industrie- und Landtechnikanwendungen mit Abgasnachbehandlungssystemen für den Betrieb mit Biodiesel zu erbringen, wurden sechs Arbeitspakete bearbeitet.

5.1 Arbeitspaket 1

Im Arbeitspaket 1 wurde das unterschiedliche Betriebsverhalten bei der Variation des Kraftstoffes von Dieselkraftstoff zu B100 erarbeitet. Dafür wurde im ersten Schritt eine Kennfelderprobung durchgeführt. Hier wurde mit Referenz-Dieseldieselkraftstoff (max. B7 nach EN 590) und Biodiesel (B100 nach EN 14214) der C1-Zyklus nach ISO 8178-4 gefahren. Abbildung 5-1 zeigt die Drehmomentkurve mit den dazugehörigen 8 Betriebspunkten im Motorkennfeld.

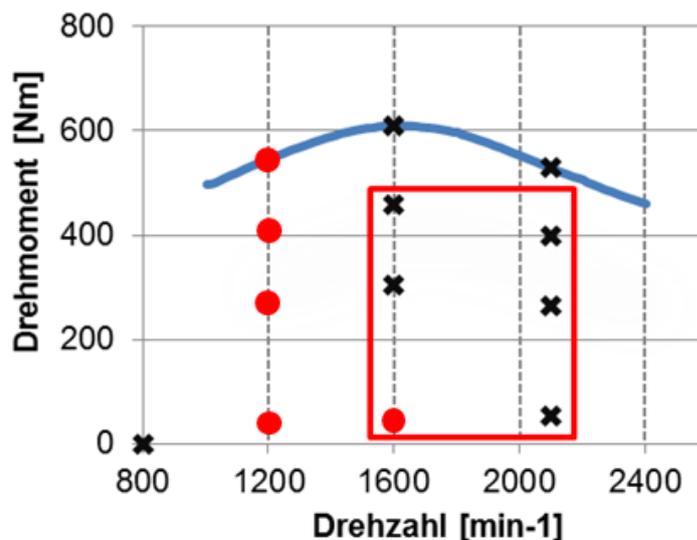


Abbildung 5-1: Motorkennfeld mit C1-Zyklus- und zusätzlichen 5 Betriebspunkten

Bedingt durch die geringe Energiedichte des B100 hatte sich die Vollastlinie im Vergleich zum Dieseldieselkraftstoff nach unten verschoben (siehe Abbildung 5-3), was andere unterschiedliche Lastpunkte im DK und B100-Betrieb zur Folge hat. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Referenz-DK und B100 zu erhalten, wurden die fünf Lastpunkte im Teillastbereich (Abbildung 5-1 roter Kasten) identisch zum Referenz-DK gelassen. In Tabelle 5-1 sind die Lastpunkte sowie die Wichtungsfaktoren vom C1-Zyklus aufgelistet.

Tabelle 5-1: Lastpunkte des C1-Zyklusses

Nr.	Motordrehzahl	Last [%]	Wichtungsfaktor
1	Nenndrehzahl	100	0,15
2	Nenndrehzahl	75	0,15
3	Nenndrehzahl	50	0,15
4	Nenndrehzahl	10	0,10
5	Zwischendrehzahl	100	0,10
6	Zwischendrehzahl	75	0,10
7	Zwischendrehzahl	50	0,10
8	Leerlaufdrehzahl	-	0,15

Die Abgasnorm EU Stufe IV stützt sich auf zwei Prüfläufe, die am Motorenprüfstand durchgeführt werden, den stationären „C1-Test“ und zusätzlich den transienten „NRTC-Zyklus“. Ein zu zertifizierender Motor muss einschließlich seines Abgassystems beide Tests bestehen.

Die nachfolgende Abbildung 5-2 stellt den NRTC-Fahrzyklus im Motorkennfeld dar.

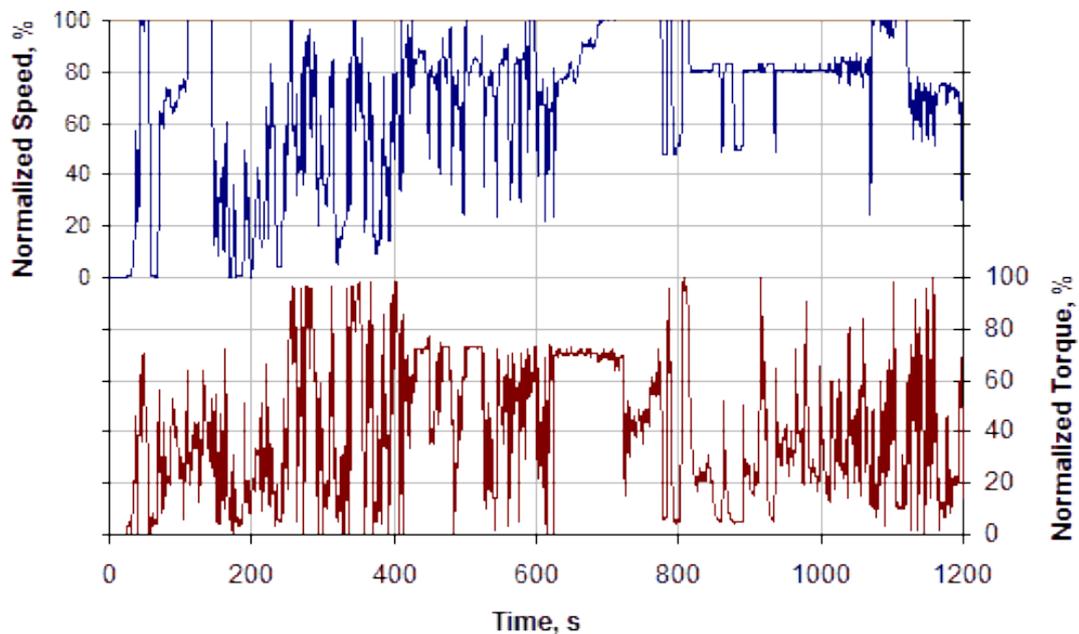


Abbildung 5-2: Darstellung von Motordrehzahl und Moment vom NRTC-Zyklus

Folgenden Untersuchungen wurden im AP1 durchgeführt:

- Aufnahme der Volllastkurve und der Betriebspunkte
- Emissionsmessung vor und nach AGN-Komponenten;
- Ermittlung der Konvertierungsraten
- Startverhalten

5.1.1 Einfluss der Kraftstoffe auf das Betriebsverhalten

Zur Untersuchung des Betriebsverhaltens des Motors wurden die Volllastkurve und das Motorkennfeld für die jeweiligen Kraftstoffe DK und B100 aufgenommen. Diese Daten bilden die Messpunkte für den C1-Test ab (siehe Abbildung 5-3).

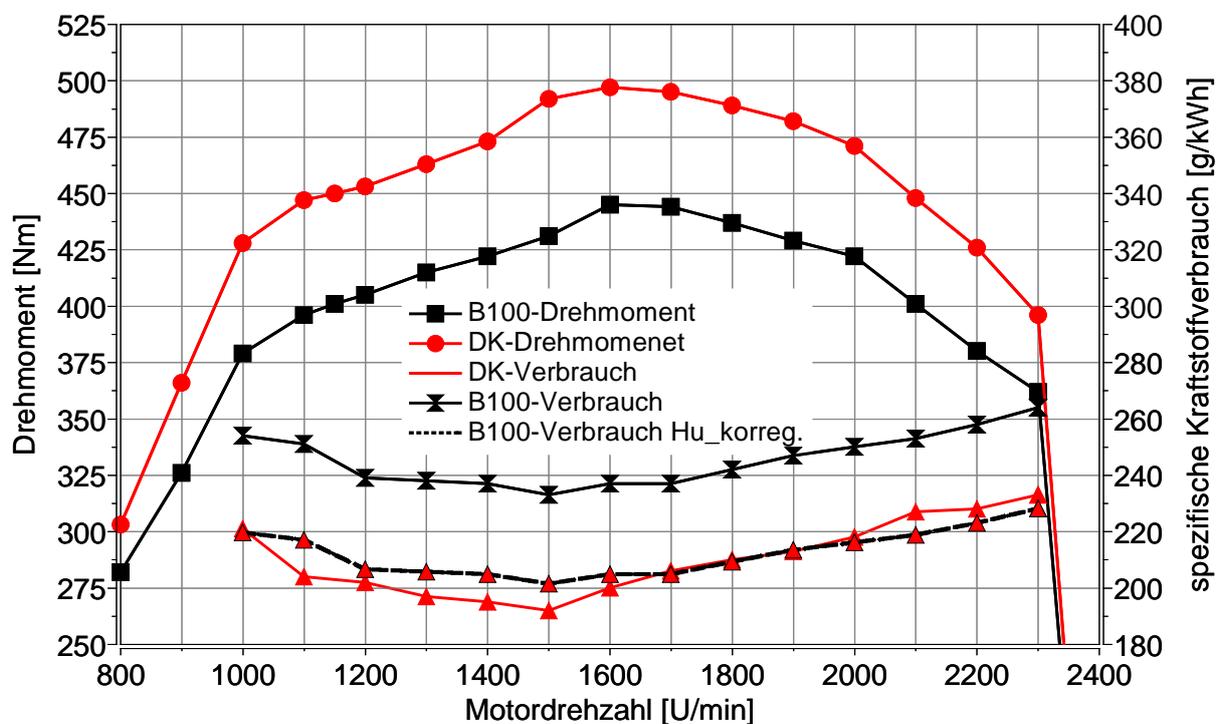


Abbildung 5-3: Vergleich der Volllastkurve und dem spezifischen Verbrauch zwischen DK und B100

Es ist zu erkennen, dass bedingt durch die unterschiedlichen Energiedichten wie erwartet die B100-Kurve unter der von DK liegt. Für die weiteren Analysen wurden acht Punkte aus dem C1-Test untersucht. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden lediglich die Lastpunkte 1 und 5 von der Volllastkurve verändert. Die weiteren Lastpunkte wurden wie im DK-Betrieb angefahren und vermessen (siehe Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Lastpunkte vom C1-Test bei DK und B100

Lastpunkte	DK		B100	
	n	M	n	M
1	2300	400	2300	362
2	2300	310	2300	310
3	2300	207	2300	207
4	2300	40,5	2300	40,5
5	1600	490	1600	442
6	1600	370	1600	370
7	1600	125	1600	125
8	800	0	800	0

Wie schon beschrieben hat der Heizwert einen besonderen Einfluss auf das Betriebsverhalten des Motors. Durch den geringen Heizwert und der damit niedrigeren Energiedichte vom Biodiesel zeigt die Volllastkurve im B100- Betrieb ein etwas geringeres Drehmoment als im DK-Betrieb.

Dies hat zur Folge, dass der Motor mit einer Lastpunkteverschiebung im Steuergerät auf den geringeren Heizwert reagiert, in dem das Steuergerät dem Momentenwunsch mit einer gesteigerten Kraftstoffmenge nachgeht. Damit ist ein Kraftstoffmeherverbrauch im Biodieselbetrieb zu verzeichnen. Abbildung 5-4 zeigt den gemessenen Kraftstoffverbrauch ohne Heizwertkorrektur. Wird der Kraftstoffverbrauch mit dem Heizwert korrigiert, relativiert sich der spezifische Kraftstoffverbrauch von B100 zu DK (siehe Abbildung 5-3).

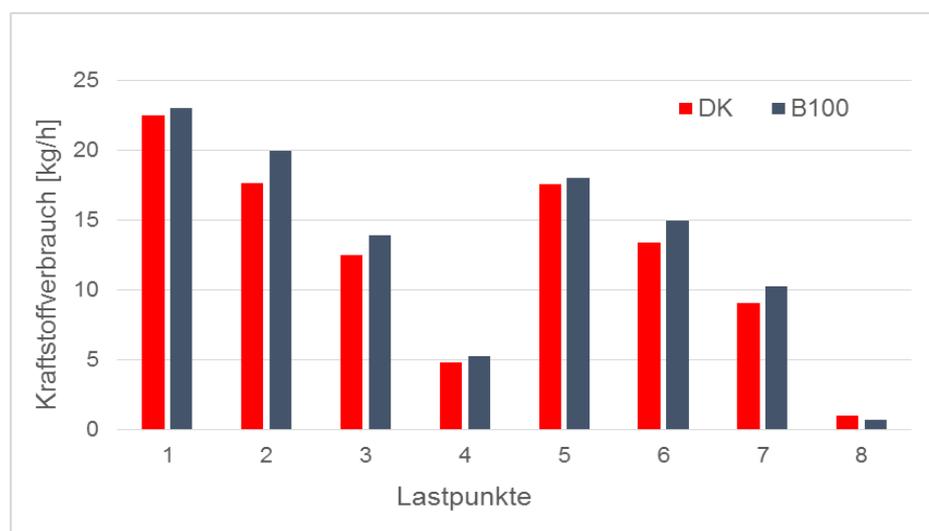


Abbildung 5-4: gemessener Kraftstoffverbrauch im Vergleich DK zu B100

Bedingt durch die geringere Energiedichte werden bei gleicher Drehmomentenanforderung der Raildruck, die Einspritzmenge und Einspritzzeitpunkte über das Motorsteuergerät angepasst. Dies hat zur Folge, dass sich im Biodieselbetrieb die Abgastemperatur, der Abgasdruck und die Luftmasse im Vergleich zum Dieselbetrieb verringert. Exemplarisch ist die Abgastemperatur vor Abgasturbolader (ATL) in Abbildung 5-5 dargestellt.

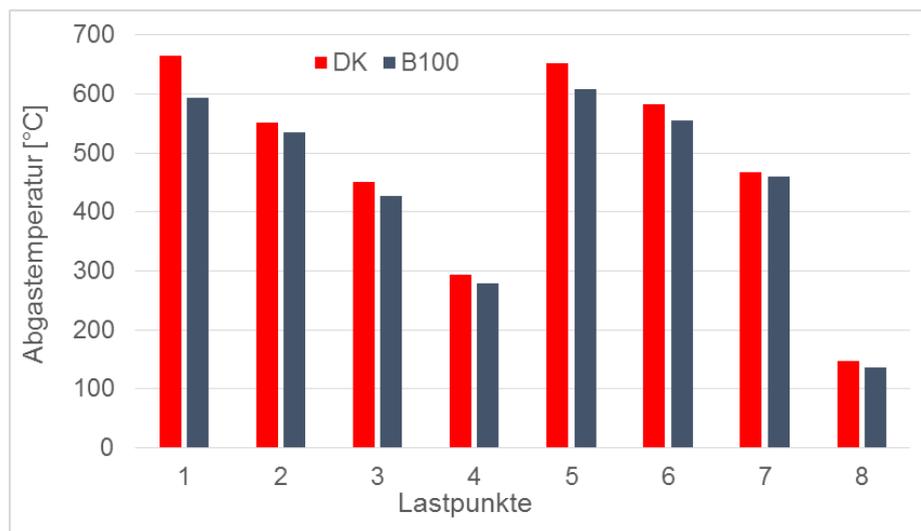


Abbildung 5-5: Abgastemperatur im Vergleich zwischen DK und B100

5.1.2 Einfluss der Kraftstoffe auf das Emissionsverhalten

Bedingt durch den gebundenen Sauerstoff im B100-Kraftstoff steigt die Sauerstoffkonzentration im Abgas. Des Weiteren bietet der zusätzliche Sauerstoff im Kraftstoff eine Verbesserung bei der Oxidation von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (THC). So konnte gezeigt werden, dass die Filtersmokenummer (FSN) sowie die THC-Konzentrationen beim Biodiesel geringer sind als im DK-Betrieb (siehe Abbildung 5-6).

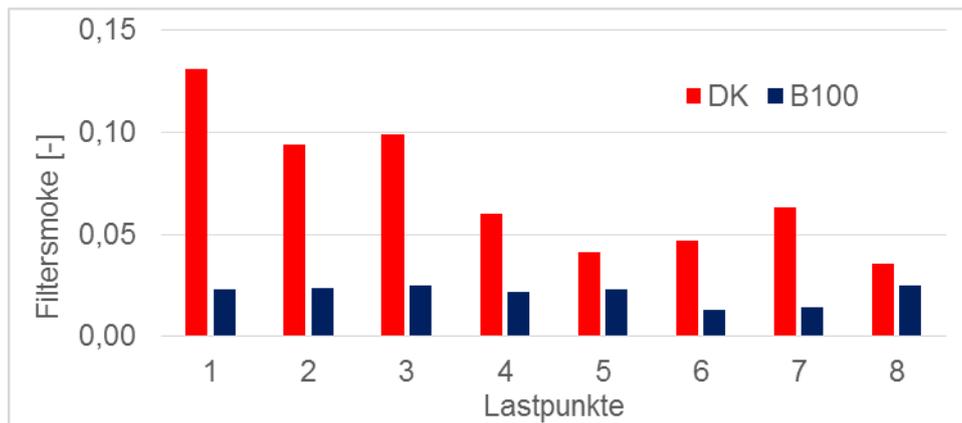
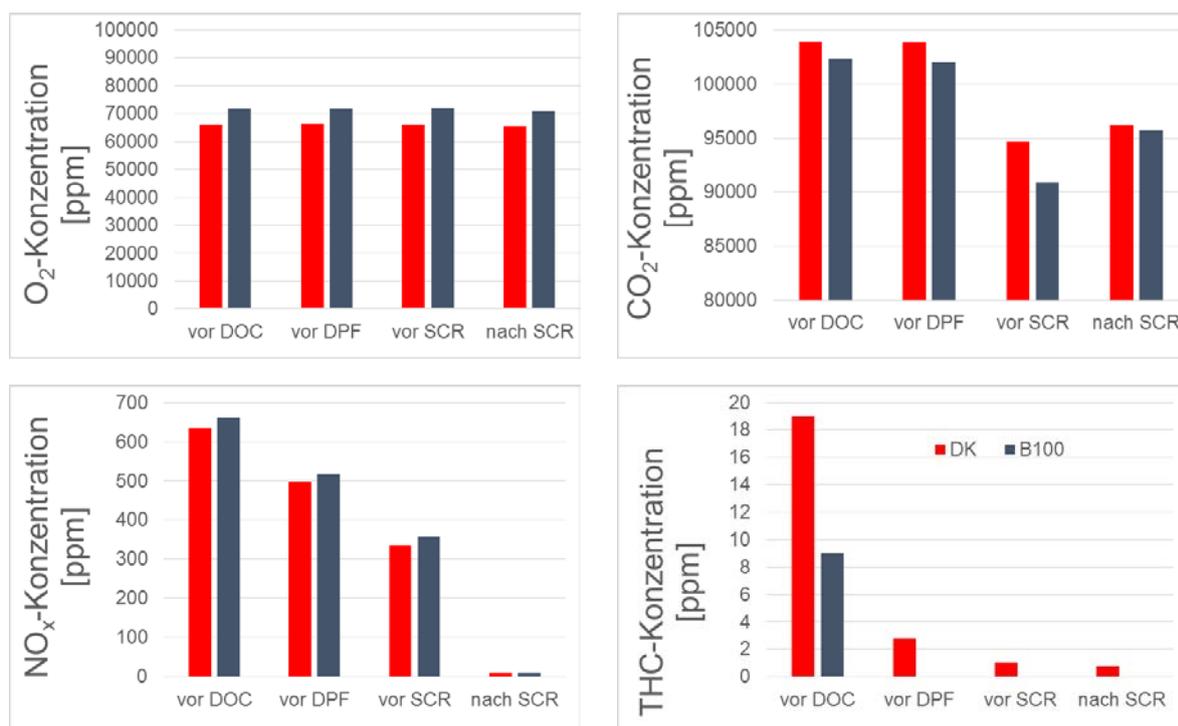


Abbildung 5-6: FSN im Vergleich zwischen DK und B100

In Abbildung 5-7 sind exemplarisch die Sauerstoff-, Kohlenstoffdioxid-, Stickoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen für den Lastpunkt 6 vor bzw. nach dem AGN-Systemen dargestellt. Wie schon genannt, ist die Sauerstoffkonzentration bei B100 etwas höher als bei DK. Dies liegt an dem gebundenen Sauerstoff im DK. Des Weiteren bleibt die Sauerstoffkonzentration über das gesamte AGN-System konstant. Die Kohlenmonoxide und der Kohlenwasserstoffanteil im Abgas sind beim B100-Betrieb deutlich geringer als im DK-Betrieb, wobei diese Werte auf sehr geringem Niveau sind. Es ist festzustellen, dass der DOC erfolgreich die Kohlenwasserstoffe und die Kohlenmonoxide zu Kohlenstoffdioxid und Wasser auf oxidiert.

Abbildung 5-7: O₂, CO₂, NO_x und THC-Konzentrationen im Vergleich zwischen DK und B100 beim Lastpunkt 6 über das AGN-System

Somit konnte nachgewiesen werden, dass das Abgasnachbehandlungssystem zuverlässig arbeitet. Die Konvertierungsraten vom DOC und SCR lagen über 90 % unabhängig vom Kraftstoff (siehe Abbildung 5-8).

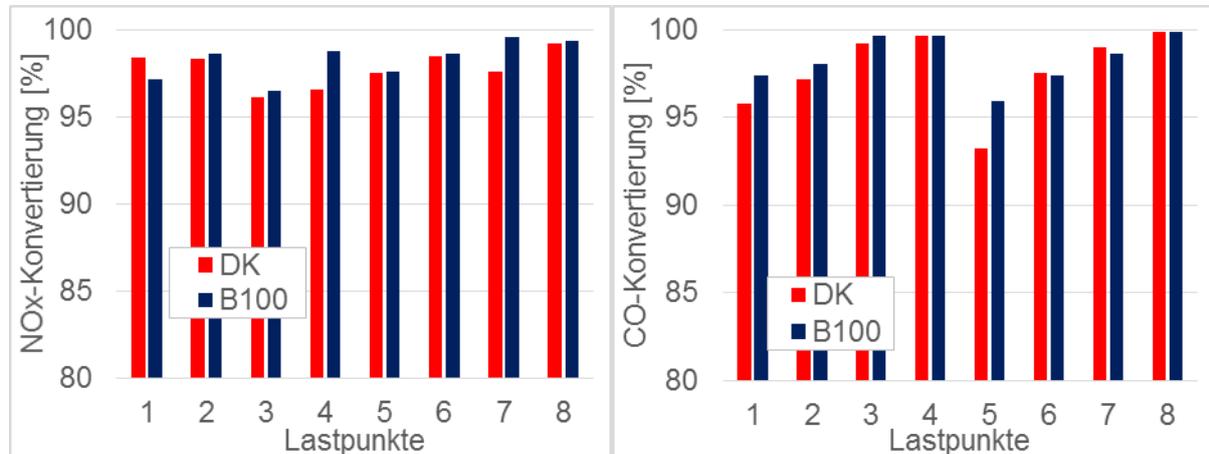


Abbildung 5-8: Vergleich der NOx und CO-Konvertierung im C1-Test zwischen DK und B100

Abbildung 5-9 zeigt die aufbereiteten Messdaten mit dem Ergebnis des C1-Tests für den B100 Betrieb.

B100-Abgasemissionsmessung am Deutz TCD 3.6 final, Uni Rostock												
laut Richtlinie 2000/25/EG vom 22. Mai 2000, ergänzt durch Richtlinie 2005/13/EG vom 21. Februar 2005												
geändert auf Richtlinie 167/2013/EG vom 05.02.2013, gültig ab 01.01.2016												
Prüfverfahren: 8-Phasen-Zyklus, C1-Zyklus nach ISO-Norm 8178-4												
Bezeichnung	Einheit	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7	Messung 8			
Leistung	kW	87,2	74,7	49,6	9,7	74,0	61,4	40,9	0,2			
Drehzahl	/min	2300	2300	2300	2300	1600	1600	1600	800			
Drehmoment	Nm	362	310	206	40	442	367	244	3			
CO	ppm(V)	1	0	1	1	1	0	1	0			
HC	ppm(V)	2	2	1	0	3	4	2	0			
NOx	ppm(V)	19	8	15	3	21	9	2	1			
Partikel	ppm(m)	6,7	0,4	0,3	0,5	1,4	0,4	0,6	0,9			
Bezeichnung	Einheit	Prüfphase 1	Prüfphase 2	Prüfphase 3	Prüfphase 4	Prüfphase 5	Prüfphase 6	Prüfphase 7	Prüfphase 8			
Wichtungsfaktor	WF _i	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15			
CO	g/h	0,283	0,189	0,204	0,134	0,200	0,132	0,117	-0,004			
HC	g/h	0,970	0,733	0,339	0,063	1,003	1,014	0,468	-0,002			
NOx	g/h	15,490	5,846	9,521	1,183	11,071	4,359	0,723	0,166			
Partikel	g/h	3,402	0,174	0,128	0,143	0,484	0,115	0,127	0,066			
Summe Schadstoffe mit Wichtungsfaktoren				Summe der Leistungen mit Wichtungsfaktoren								
CO	g/h	0,159		P kW 50,365								
HC	g/h	0,561										
NOx	g/h	6,387										
Partikel	g/h	0,652										
				EG-Typgenehmigung für Motortyp - Traktoren								
				Nutzleistung 75 kW ≤ P < 130 kW								
				ab 01.10.2014			ab 31.12.2014					
Testergebnis				Grenzwerte			EU Stufe IV			US Tier 4 final		
CO	g/kWh	0,003		CO	g/kWh	5,00		5,00				
HC	g/kWh	0,011		HC	g/kWh	0,19		0,19				
NOx	g/kWh	0,127		NOx	g/kWh	0,40		0,40				
Partikel	g/kWh	0,013		Partikel	g/kWh	0,025		0,02				

Abbildung 5-9: Messdaten des C1-Tests im B100-Betrieb

Durch die nachgeschaltete Abgasnachbehandlung ist der Motor im DK-Betrieb als auch im B100-Betrieb in der Lage, die vorgeschriebene Abgasnorm EU Stufe IV mit einer erheblichen Reserve sicher einzuhalten (siehe Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Ergebnisse des C1-Tests mit Grenzwerten

		DK	B100	Grenzwerte
CO	g/kWh	0,007	0,003	5,00
HC	g/kWh	0,026	0,011	0,19
NO_x	g/kWh	0,114	0,127	0,40
Partikel	g/kWh	0,013	0,007	0,025

Da das untersuchte AGN-System prinzipiell auch für Motoren der Abgasstufe EU V eingesetzt wird, erscheint auch hier eine B100 Freigabe grundsätzlich möglich. Lediglich die Partikelanzahl müsste für die Norm überprüft werden.

5.1.3 NRTC-Test

Wie schon beschrieben muss der Motor zur Einhaltung der Norm einen dynamischen Zyklus bestehen. Für den Traktormotor kommt der in Kapitel 5 beschriebene NRTC zum Einsatz. Beim Nonroad Transient Cycle (NRTC) wird die Drehzahl prozentual aus der Leerlaufdrehzahl und der Nenndrehzahl bestimmt. Das Moment ist eine prozentuale Angabe von der Drehmomentenkurve bei der dazugehörigen Motordrehzahl. Abbildung 5-10 zeigt die Drehzahl- und Momentenspur vom NRTC für den B100-Betrieb. Bedingt durch die unterschiedlichen Kurven der maximalen Drehmomente (Dachkurven) ergeben sich für beide Kraftstoffe unterschiedliche Lastpunkte (Drehmomente) bei den einzelnen Drehzahlen des NRTCs.

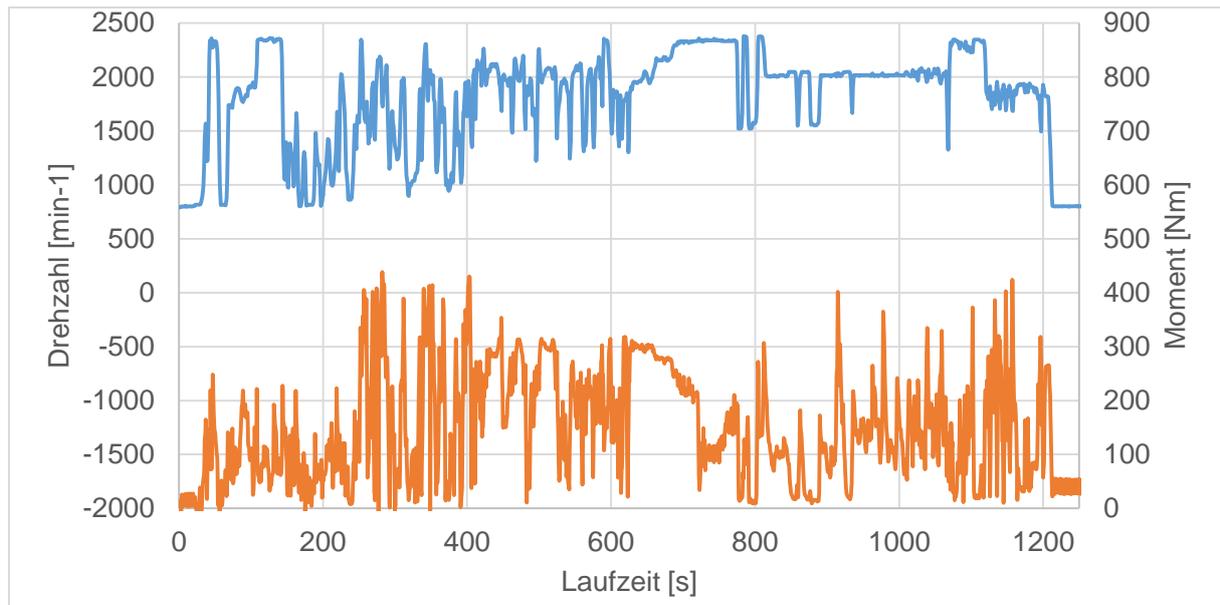


Abbildung 5-10: Drehzahl- und Drehmomentenverlauf im NRTC im B100-Betrieb

Beim NRTC wurden mit einer Messrate von 1 Hz die Abgaszusammensetzungen aufgezeichnet. Abbildung 5-11 zeigt exemplarisch den Verlauf der Stickoxidkonzentration im Rohabgas und EoP im Vergleich zwischen Dieselkraftstoff und Biodiesel. Es ist zu sehen, dass die Stickoxidwerte vom DK über denen von B100 liegen. Gründe hierfür sind die kraftstoffbedingten unterschiedlichen Zyklen. So hat der NRTC im DK-Betrieb ein etwas höheres Moment als im B100-Betrieb, was höhere Abgastemperaturen zur Folge hat (siehe Abbildung 5-12). Mit dem höheren Moment steigen auch die Brennraumtemperaturen und damit der Anteil an thermisch gebildetem NO_x.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass NO_x-Konzentrationen nach dem AGN-System (EoP) erst nach 200 Sekunden sinken. Das liegt darin begründet, dass erst die benötigten Abgastemperaturen von über 200 °C am SCR erreicht werden müssen, um eine erfolgreiche NO_x-Minimierung zu gewährleisten. Erst dann ermöglicht das Steuergerät eine anfänglich reduzierte Dosierung des AdBlue (wässrige Harnstofflösung). Beim überschreiten der Abgastemperatur von über 250 °C (siehe Abbildung 5-12) wird die volle AdBlue-Menge zur Minimierung der NO_x-Konzentration frei gegeben.

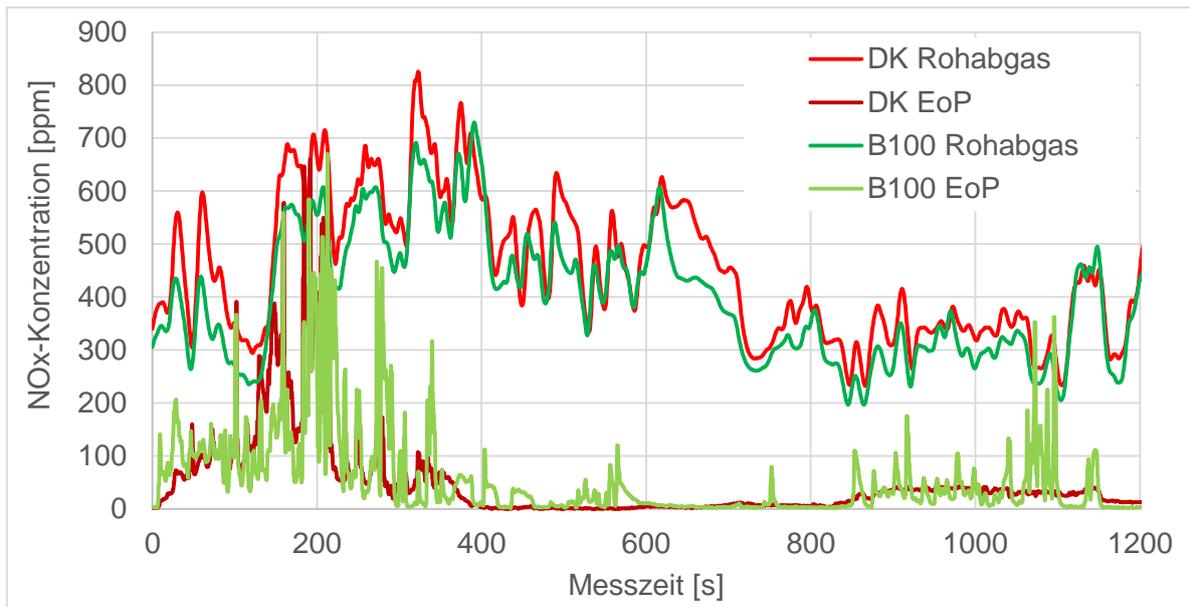


Abbildung 5-11: NO_x-Verlauf im Rohabgas und EoP im DK und B100-Betrieb

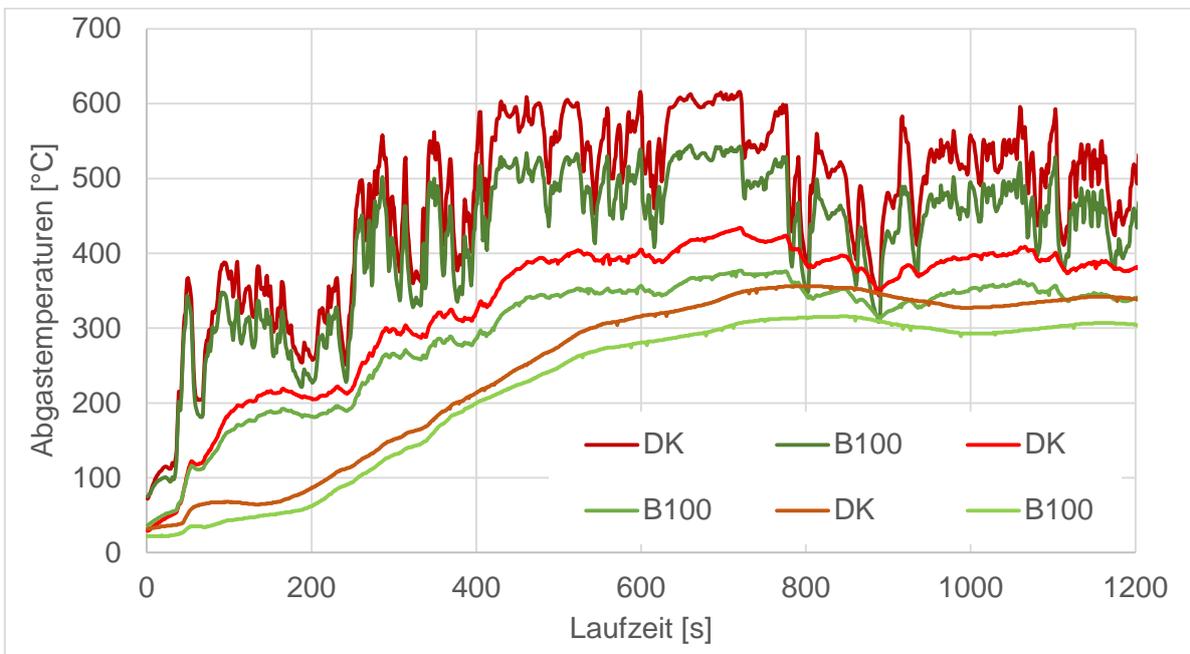


Abbildung 5-12: Abgastemperatur von DK und B100 über die Laufzeit vom NRTC

Aufgrund der sehr guten Gemischbildung und Verbrennung sind die THC-Konzentrationen auf sehr geringem Niveau. Bedingt durch die nahe Lage des DOC am Motor werden die Light-off-Temperaturen deutlich schneller erreicht. Daher wird eine hohe Konvertierung der Kohlenwasserstoffe kurz nach dem Motorstart realisiert (Abbildung 5-13).

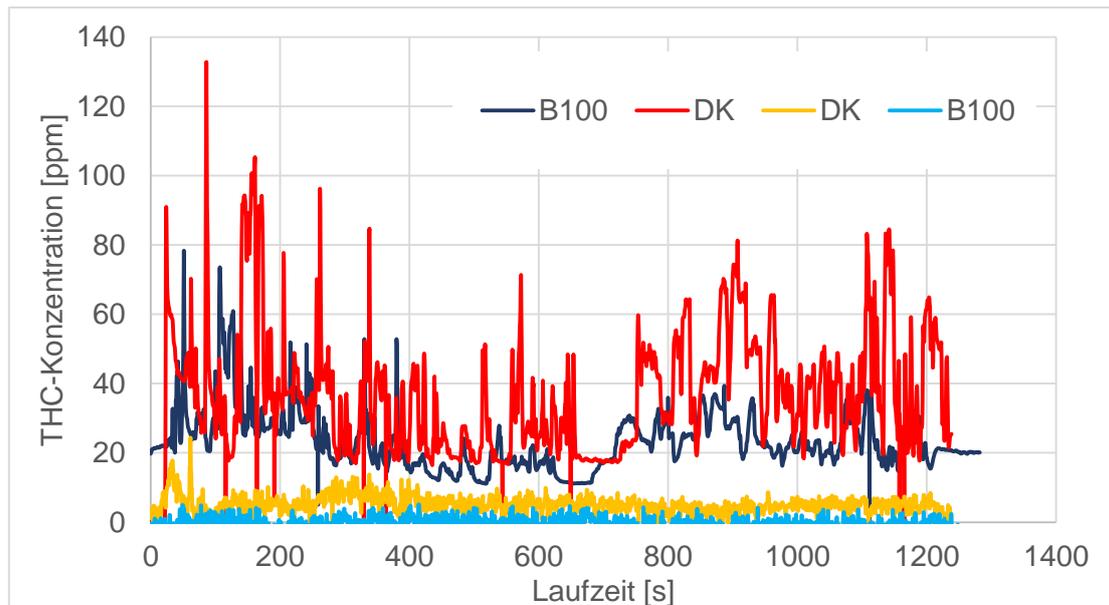


Abbildung 5-13: Vergleich der THC-Konzentrationen mit Rohabgas und EoP zwischen DK und B100 im NRTC

5.2 Arbeitspaket 2

Im 2. Arbeitspaket erfolgten die Untersuchungen des Motorverhaltens (Betriebsstabilität), Emissionsverhaltens sowie des Deaktivierungsverhaltens des Abgasnachbehandlungssystems im Biodiesel-Langzeitbetrieb. Dafür wurde ein Motordauerlauf von 1.000 Stunden auf dem Prüfstand durchgeführt. Als Grundlage für den Dauerlauf diente der Nonroad Transient Cycle (NRTC) – Test. Dieser instationäre Test (Abbildung 5-2) wird zur Abgasbestimmung von mobilen Maschinen genutzt und soll deren typische Lastkollektive abbilden.

Um einen realen Traktor/Schlepper-Einsatz widerzuspiegeln und damit den Test praxisrelevanter zu gestalten, wurde der Dauerlauf in einem Zwei-Schicht-System mit nächtlicher Abkühlphase durchgeführt. Als Kraftstoff wurde Biodiesel entsprechend EN 14214 eingesetzt. Die Ölwechselintervalle wurden nach Absprachen mit dem Motorhersteller durchgeführt.

Für die Untersuchungen des Motorverhaltens wurde der Motorzustand anhand der Messdaten über den gesamten Zeitraum beurteilt. Eine umfangreiche Beurteilung des Prüflings auf Ablagerungen wird am Ende des Projekts durchgeführt.

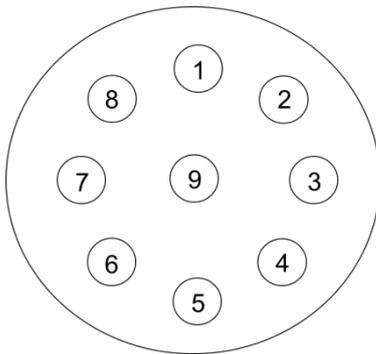
Begleitend zum Dauerlauf erfolgt in Intervallen von 100 Betriebsstunden die Analyse des Schmieröls. Dieses wird auf folgende Parameter analysiert:

- FAME-Gehalt
- Gehalt an Verschleißmetallen

- Rußgehalt
- Wassergehalt
- Viskosität, Dichte
- TBN / TAN

Messungen der Abgaszusammensetzung vor und nach den AGN-Komponenten dienten der Beurteilung des Emissionsverhaltens und der Konvertierungsrate über der Laufzeit. Im Rahmen von AP2 erfolgte die Bestimmung der Emissionen alle 100 Stunden. Die Messstellen waren vor dem DOC (Rohabgas), nach dem DOC, nach dem DPF und nach dem ASC (EoP) angeordnet. Die Emissionen wurden im C1-Test als auch über den 20-minütigen NRTC-Zyklus mit 1 Hz gemessen und summiert. Die Drehmoment- und Drehzahlvorgaben sind sekundengenau aufgelöst. Über der gesamten Laufzeit wurden keine Heat Modis gefahren. Das bedeutet, dass der DPF nicht aktiv regeneriert wurde.

Der DOC ist die erste Komponente im Abgasnachbehandlungssystem und daher besonders anfällig für Vergiftung durch Bestandteile der Rohabgase. Zur Bestimmung der örtlichen und zeitlichen Deaktivierung des Katalysators wurden in fest definierten Abständen (siehe Abbildung 5-15) Bohrkerne des DOC und SCR entnommen und analysiert. Die Bohrkernentnahme war nach folgender Versuchszeit geplant, siehe Abbildung 5-14 und Abbildung 5-145.



Laufzeit Motor [Bh]	Bohrkern aus Position:	Laufzeit Bohrkern [Bh]
50	1 + 5	50
100	3 + 7	100
200	2 + 6	200
300	4 + 8	300
500	3 + 7	400
700	2 + 6	500
800	1 + 5	750
900	4 + 8	600
1000	9 + Matrix	1000

Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15: Lage der Bohrkernentnahme am DOC und Zeitplan

Am Ende des Dauerlaufs wurden die Bohrkerne sowie das gesamte AGN-System Post Mortem untersucht. Die Beladung des DPF mit Asche wurde zu jedem Bohrkernwechsel durch Wägung verfolgt.

Leider wurde der Dauerlauf nach ca. 920 Bh durch einen Schaden am Ladeluftkühler (Wassereintrag in den Brennraum) beeinträchtigt. Dieser Schaden wurde schnellstmöglich repariert. Dennoch sind Folgen aus dem Schaden nicht auszuschließen.

5.2.1 Motorverhalten im Dauerlauf

Zur Beschreibung des Motorverhaltens über den Langzeittest wurden alle 100 Betriebsstunden der C1-Test sowie der NRTC aufgezeichnet. Das Verhalten vom Motor hatte sich über der Laufzeit kaum bis gar nicht verändert. Exemplarisch wird im Folgenden auf den spezifischen Verbrauch, die Temperatur vor Zylinder sowie die Abgastemperaturen der jeweiligen AGN-Komponenten, den Luftmassenstrom und das Injektorverhalten eingegangen.

Abbildung 5-16 zeigt den Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und der Ansaugtemperatur vorm Zylinder über die Laufzeit von 1000 Stunden. Der Motor zeigt über der Laufzeit ein konstantes Verhalten. Dies wieder spiegeln die spezifischen Verbräuche sowie die Luftmassenströme in Abbildung 5-17. Des Weiteren ist ein Einfluss der Kabinentemperatur auf die Ansaugtemperatur sichtbar.

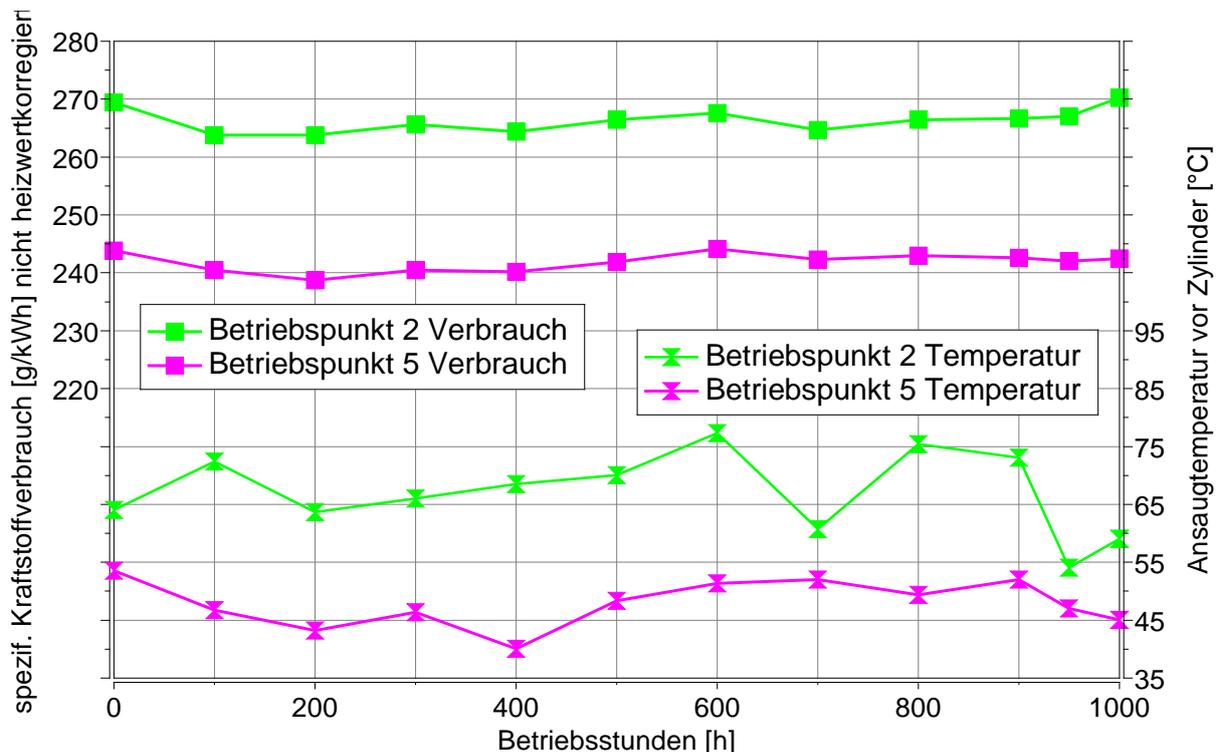


Abbildung 5-16: Spezifischer Kraftstoffverbrauch und Ansaugtemperatur vor Zylinder für Punkt 2 und 5 über die Betriebsstunden

Abbildung 5-17 zeigt die gemessenen Luftmassenströme über die Betriebsstunden. Dieses Verhalten weist kaum Schwankungen auf und bestätigt damit das konstante Betriebsverhalten des Motors. Der Luftmassenstrom schwankt minimal mit dem Umgebungsdruck und der Temperatur.

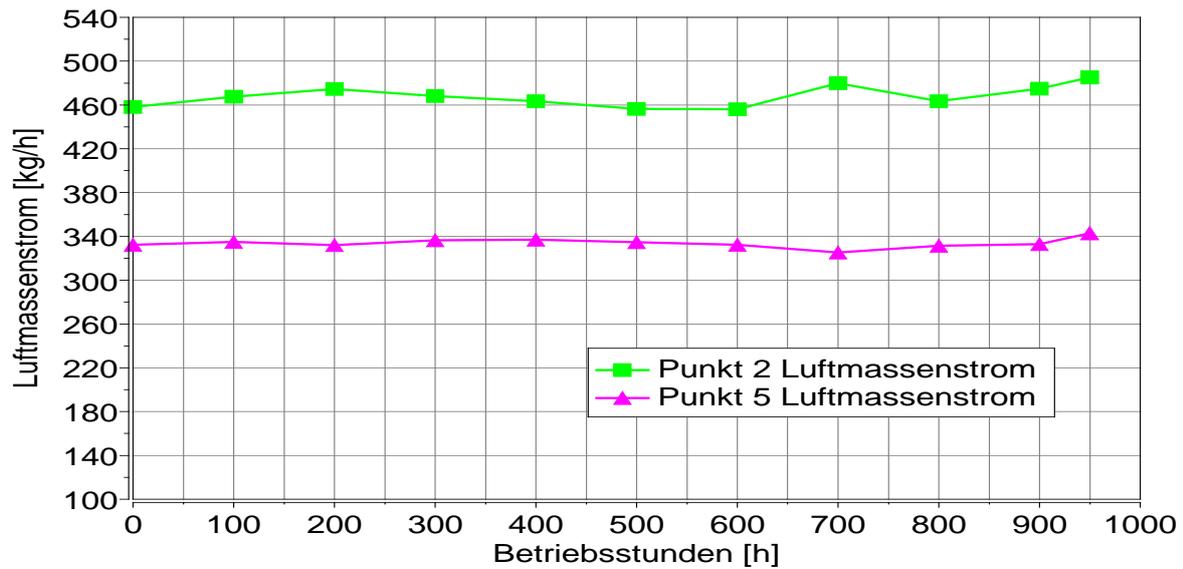


Abbildung 5-17: Luftmassenstrom für Punkt 2 und 5 über die Betriebsstunden

In der folgenden Abbildung sind die Temperaturen der AGN-Komponenten vergleichend zwischen Start- und Endmessung dargestellt. Die durchgezogenen Linien entsprechen den Startmessungen. Die Punktlinien sind die Werte der Endmessung. Hier sind ebenfalls nur kleine Abweichungen zu verzeichnen, was für eine gleichbleibende Verbrennung und damit Wärmefreisetzung im Brennraum spricht.

Lediglich der Wert mit geringer Last im Punkt 4 zeigt etwas größere Abweichungen zwischen Start- und Endmessung. Hier ist der Einfluss der Ansaugtemperatur größer einzustufen.

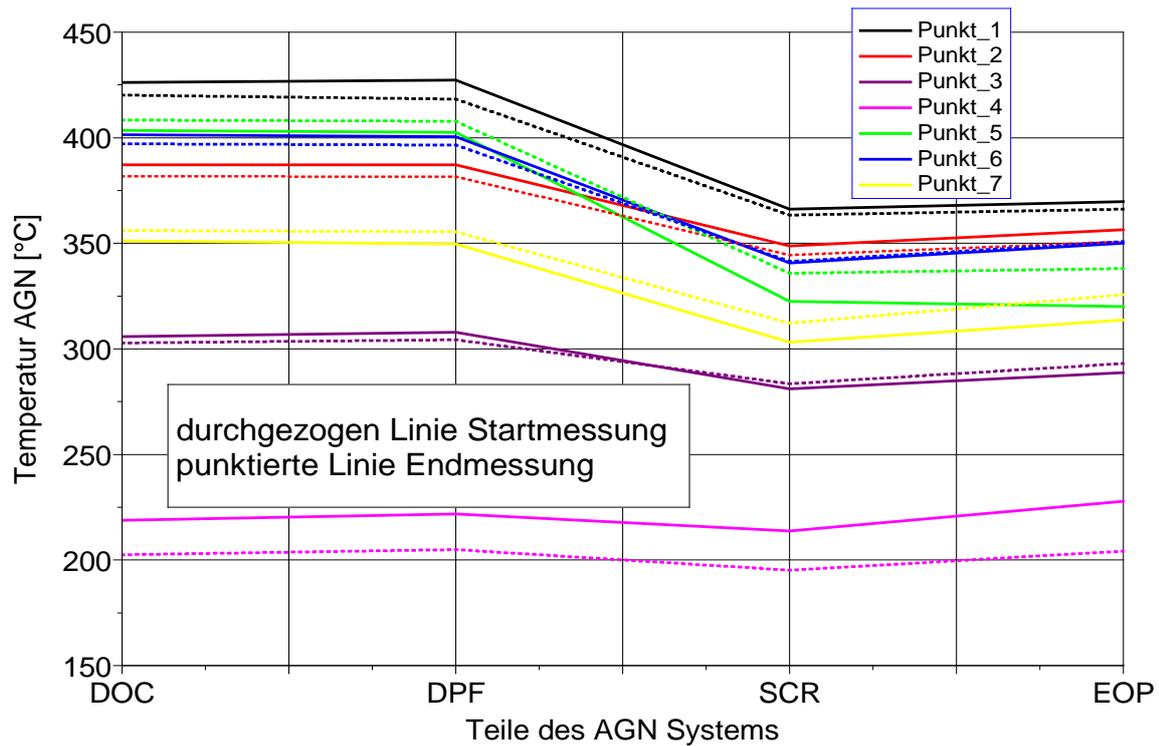


Abbildung 5-18: Vergleich Start- und Endmessung der AGN-Temperatur je AGN-System

Die Untersuchung des Einzelbauteils Injektor im Einspritzverlaufsindikator ergab, dass es keine beeinflussenden Veränderungen (Ablagerungen) im Einspritzmengenverlauf oder das Injektoröffnen über die Laufzeit gegeben hat (Abbildung 5-19). Die volle Funktion der Injektoren war über den Dauerlauf gegeben.

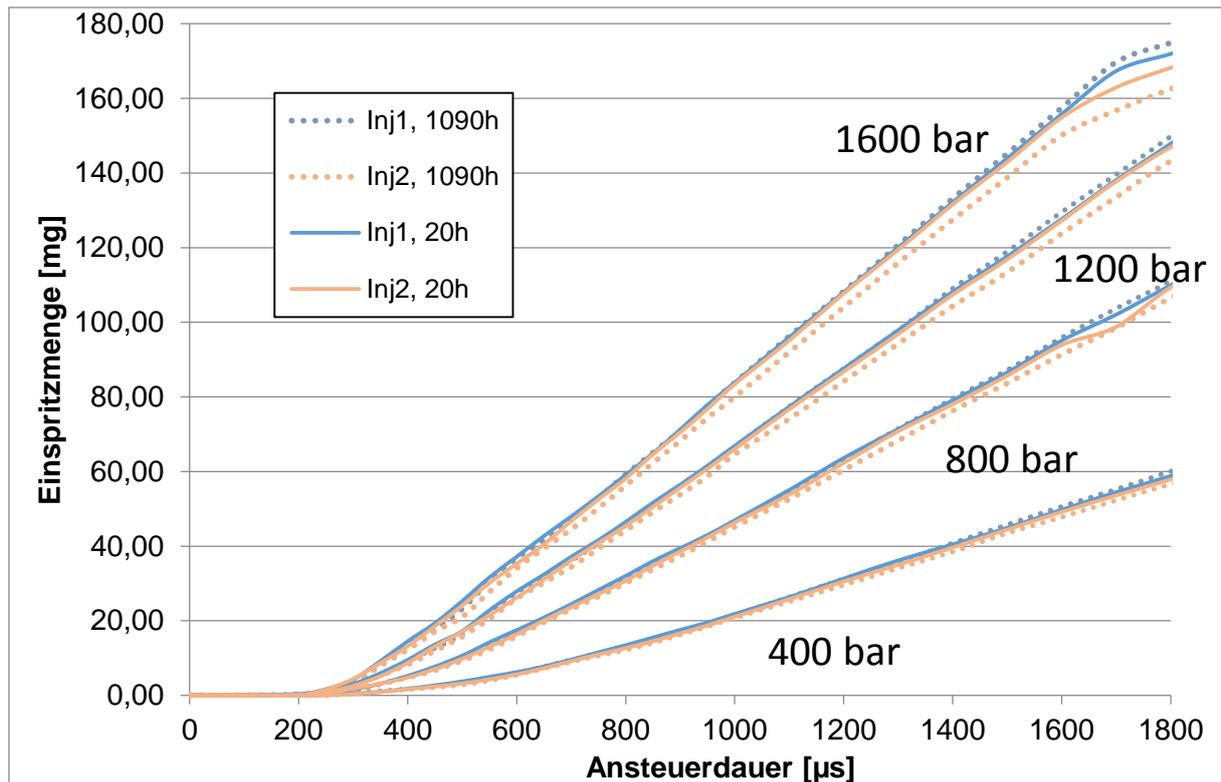


Abbildung 5-19: Vergleich der Einspritzmenge über der Ansteuerdauer in Abhängigkeit der Laufzeit

5.2.2 Emissionsverhalten im Dauerlauf

In Abbildung 5-20 sind ausgewählte Abgaskonzentrationen im Rohabgas und EoP über der Laufzeit von 1000 Betriebsstunden dargestellt. Es ist zu verzeichnen, dass keine Alterungserscheinungen im Motor und AGN-System über der Laufzeit im B100-Betrieb auftreten. Nach derzeitigem Stand des Projektes ist der B100-Betrieb in Industriemotoren uneingeschränkt, auch unter der Einhaltung der Abgasnorm EU Stufe IV, möglich.

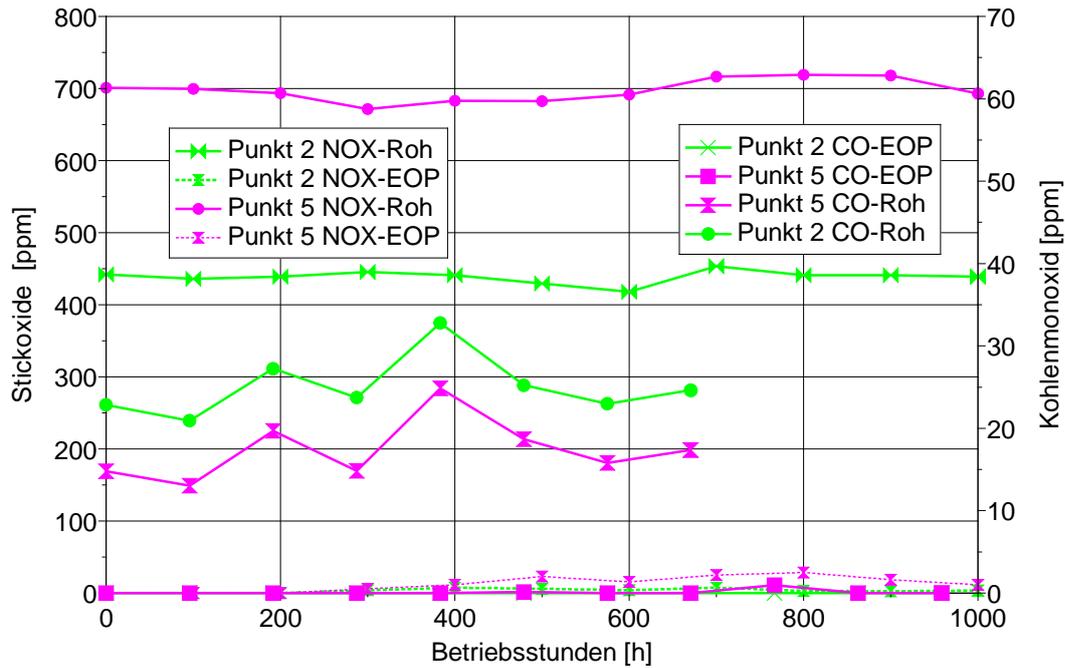


Abbildung 5-20: Stickoxide und Kohlenmonoxid über der Laufzeit

Zur Beurteilung der AGN-Performance wurde in Abbildung 5-21 die NO und die CO-Konzentration über die AGN-Komponenten vergleichend zwischen 100 Bh und 1000 Bh dargestellt. Die Konvertierung von Stickstoffmonoxid sowie von Kohlenstoffmonoxid ist über der gesamten Laufzeit von 1000 Stunden gewährleistet.

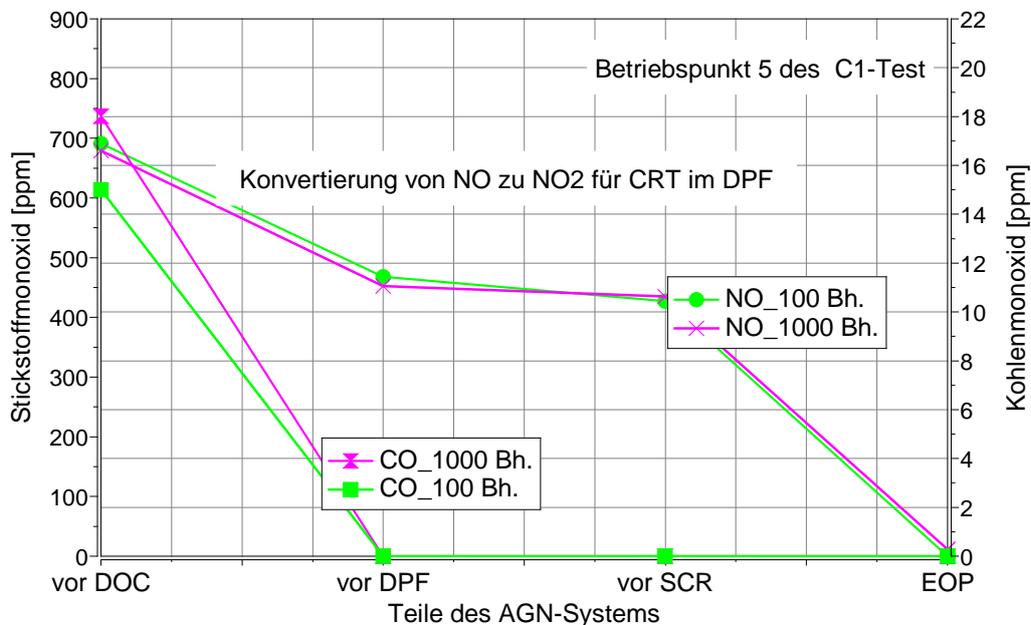


Abbildung 5-21: Vergleich des Konvertierungsverhaltens von NOx und CO von 100 Bh mit 1000 Bh

5.2.3 Schmierölverhalten im Dauerlauf

Zur Beurteilung des Biodieselbetriebs auf das Motoröl wurden alle 100 Bh Proben je 60 ml gezogen und analysiert. Nach 100 Bh waren die Verschleißmetalle bedingt durch den Motoreinlauf, schon über dem Grenzwert, so dass in Absprache mit Deutz ein kompletter Ölwechsel vollzogen wurde. Bedingt durch den defekten Ladeluftkühler bei 920 Stunden und dem damit möglichen Wassereintrag ins Schmieröl werden im Folgenden nur die Schmierölkenndaten zwischen 100 und 900 Betriebsstunden betrachtet.

Abbildung 5-22 zeigt das Viskositäts- und TAN-Verhalten über der Laufzeit. Die Viskosität des Schmieröls ist nahezu unverändert über dem Dauerlauf. Hingegen zeigt die TAN eine leichte Zunahme, welches eine normale Alterung während des Betriebs darstellt.

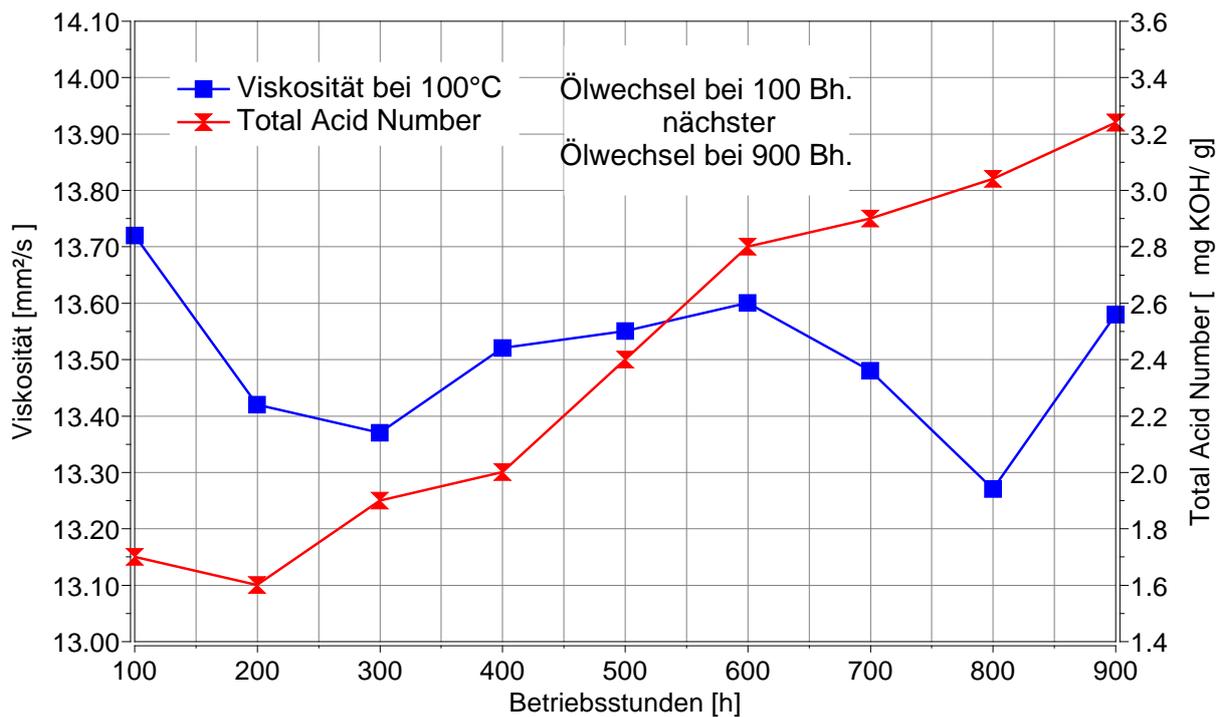


Abbildung 5-22: Viskosität und TAN des Schmieröls über der Laufzeit

Der Rußgehalt im Schmieröl lag während des gesamten Dauerlaufs unter der IR-Nachweisgrenze (<0,1 %m/m). Dies bestätigt den geringeren Rußausstoß im B100-Betrieb.

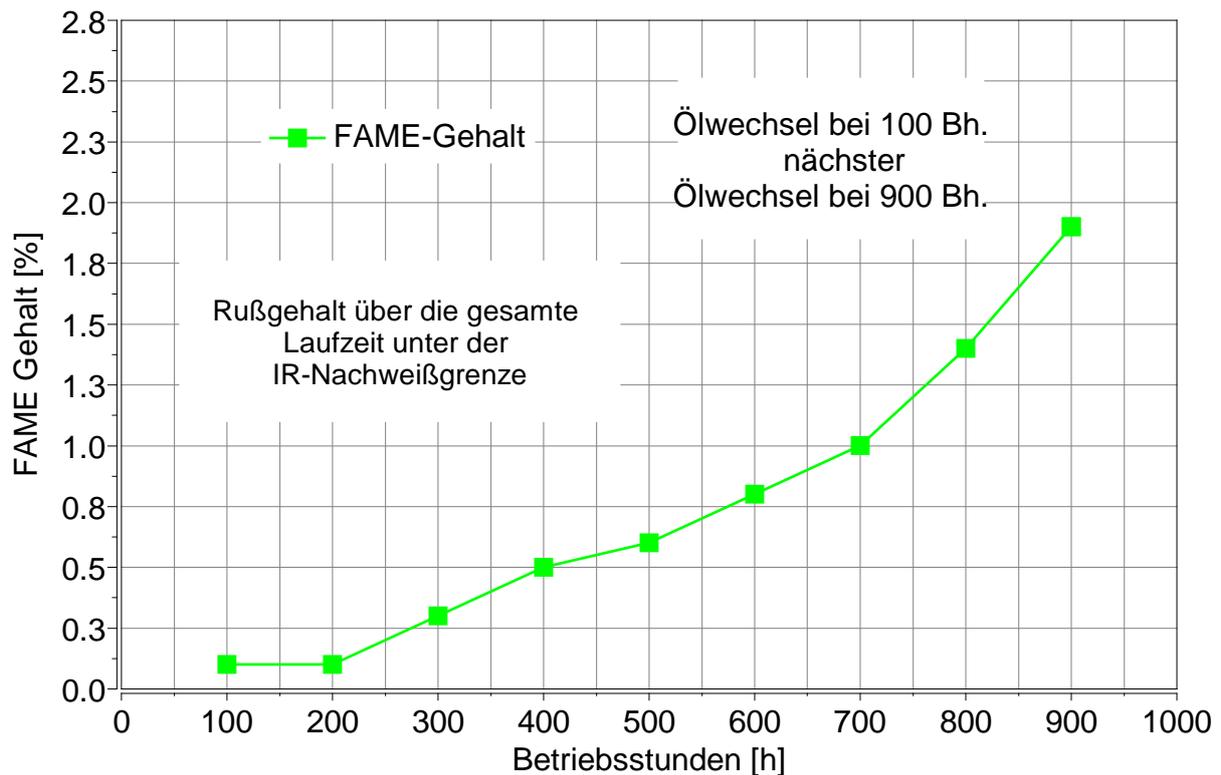


Abbildung 5-23: FAME-Gehalt im Schmieröl über der Laufzeit

Abbildung 5-23 zeigt den FAME-Gehalt im Motoröl im Zeitraum zwischen 100 und 900 Stunden. Es ist ein geringer Anstieg über der Laufzeit zu erkennen. Dieser ist durch einen geringen Kraftstoffeintrag im Schmieröl zu erklären. Infolge der optimierten Verbrennungseinstellung der Stufe IV Motoren zeigt sich gegenüber früheren Untersuchungen, dass der Eintrag an FAME in Schmieröl signifikant niedriger ist. Die

Messwerte ausgewählter Verschleißmetalle sind in Abbildung 5-24 über der Laufzeit dargestellt. Die Eisen-, Kupfer und Aluminiumgehalte zeigen einen zu erwartenden Anstieg über der Versuchszeit. Der Eisengehalt lag nach 800 Bh bei ca. 90 mg/kg. Der Grenzwert für Eisen liegt für den Motor bei 170 mg/kg. Für Kupfer und Aluminium liegt die Grenze bei 25 mg/kg. Das Schmieröl hält die Grenzwerte im betrachteten Zeitraum erfolgreich ein. Die Grenzwerte für DEUTZ Motoren (Literatur: TR 0199-99-1187/3: Gebrauchtolanalytik – Grenzwerte) werden deutlich eingehalten.

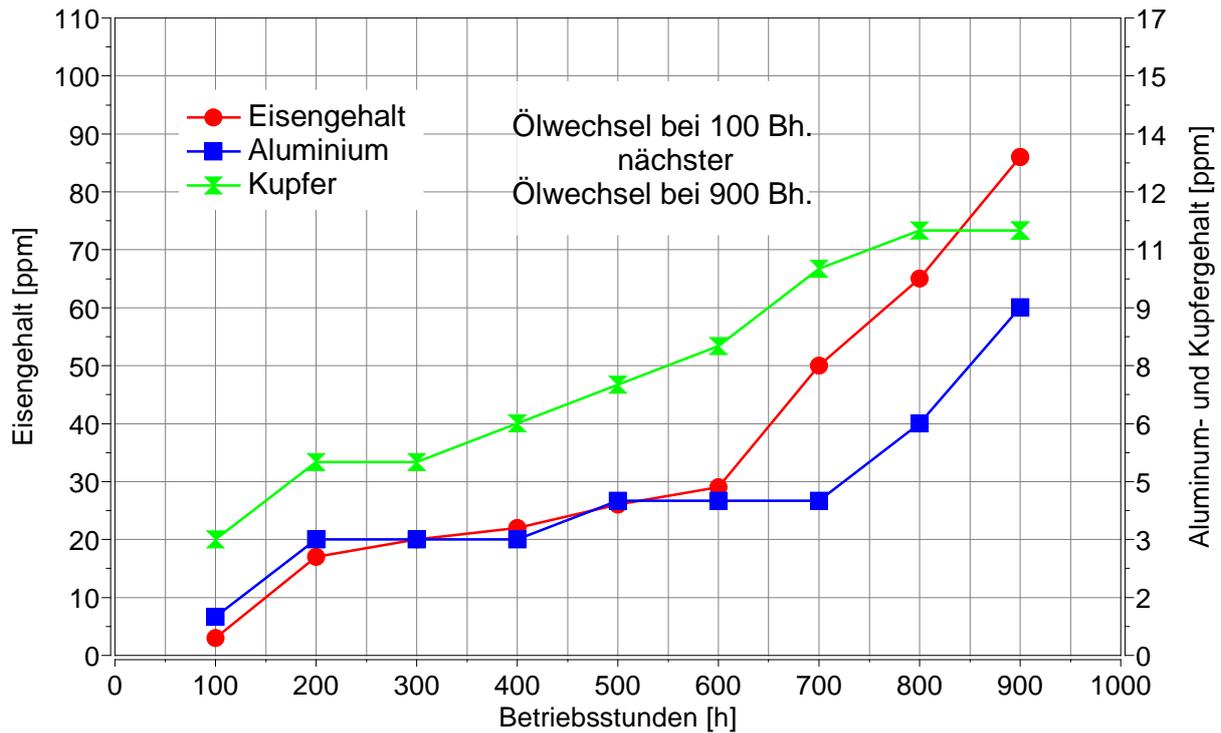


Abbildung 5-24: Fe, Al und Cu-Gehalt im Schmieröl über der Laufzeit

5.2.4 Analyse des AGN-Systems über der Laufzeit

Die einzelnen Bohrkerne wurden nach den 1000 Stunden Dauerlauf von der Firma Umicore untersucht. Als erstes wurde die spezifische Oberfläche der Katalysatoren analysiert. Hierfür wurde eine BET-Analyse gemacht. Abbildung 5-25 zeigt die BET-Werte von DOC in Abhängigkeit der Betriebsstunden. Es ist zu erkennen, dass es keine Auffälligkeiten über der Laufzeit gibt.

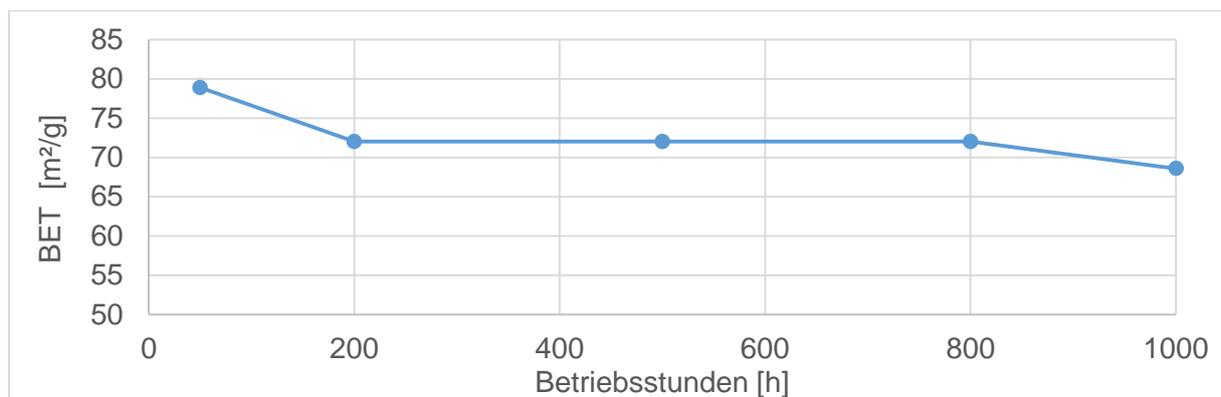


Abbildung 5-25: BET vom DOC über die Laufzeit von 1000 h

In Abbildung 5-26 sind die BET-Werte vom SCR dargestellt. Auch hier konnten keine außergewöhnlichen thermischen Belastungen über der Laufzeit festgestellt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass es kaum Belastungen für den SCR gab. Der Zustand entspricht einer hydrothermalen Alterung von maximal 16B500, was sehr gering ist.

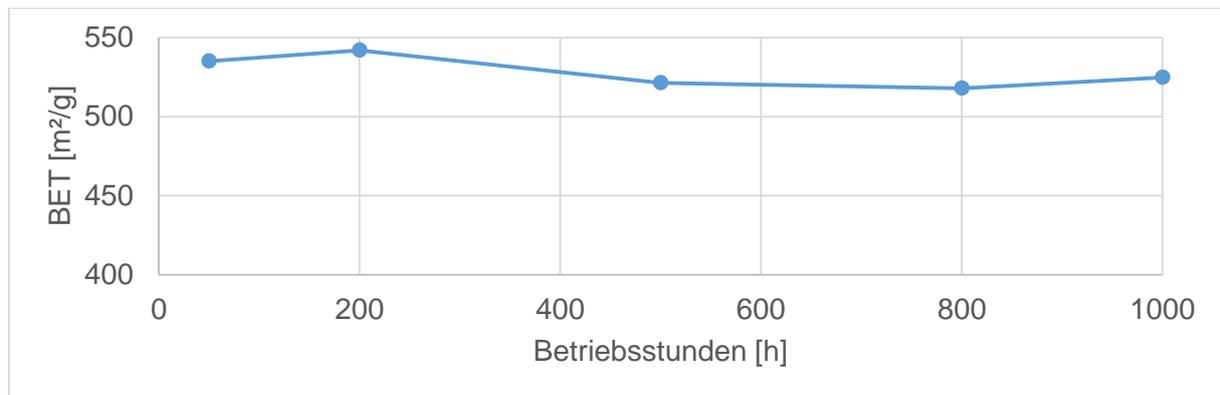


Abbildung 5-26: BET vom SCR über die Laufzeit von 1000 h

In einem weiteren Schritt wurden die Light-Offs zur Bestimmung der Umsatzraten ermittelt. In Abbildung 5-27 ist der T50 sowie der T80-Wert für die NO_x-Konvertierung dargestellt. Dabei steht T50 bzw. T80 für die Temperatur, welche für eine NO_x-Konvertierung von 50 bzw. 80 % benötigt wird. Die untere blaue gestrichelte Linie steht für den Ausgangszustand. Die rote gestrichelte Linie in der Mitte steht für die Endtemperatur des T50 (maximale hydrothermale Alterung - 30B600) sowie der Ausgangszustand des T80 (frisch). Die obere rote gestrichelte Linie gibt die maximale Temperatur für ein hydrothermal gealtert Katalysator an.

Es ist zu sehen, dass sich die NO_x-Performance (T50/T80) bis 800 Stunden im Alterungsfenster befindet. Nach 800 Stunden wird die Performance unterschritten. Der Bohrkern von 1000 Betriebsstunden wurde anschließend einer Regeneration bei 600 °C für 30 Minuten unterzogen. Dies hatte eine Performancesteigerung zur Folge. Mit einer weiteren Regeneration konnte das Alterungsfenster für T50 und T80 eingehalten werden. An dieser Stelle soll erwähnt sein, dass bei dem Dauerlauf keine aktive Regeneration oder andere Heat-Modis betrieben wurden. Es ist durchaus denkbar, dass mit aktiven Regenerationsstrategien die Performance des SCR im Alterungsfenster sein könnte.

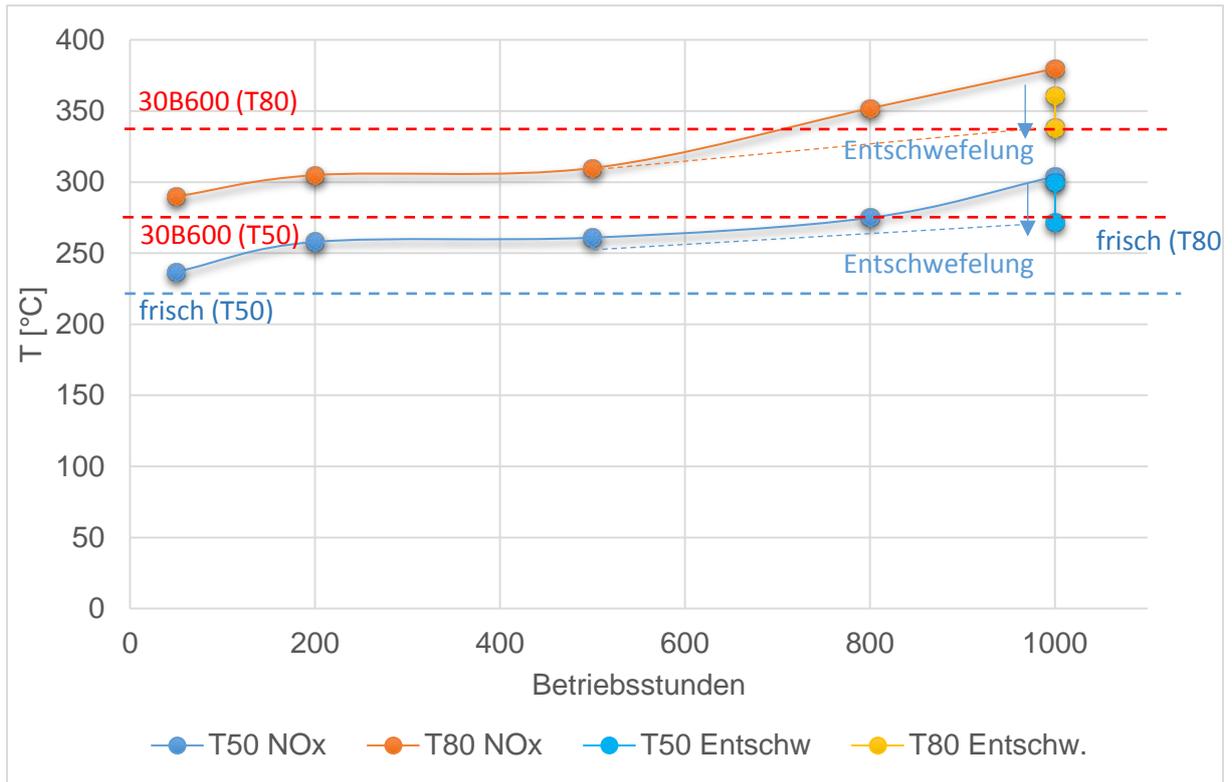


Abbildung 5-27: T50 und T80-Werte der SCR-Performance in Abhängigkeit der Laufzeit

Ein Performanceabfall über die Zeit, insbesondere hinsichtlich der NOx-Konvertierung ist im DOC zu beobachten (Abbildung 5-28), obwohl dieser weniger stark ausgeprägt ist als beim SCR.

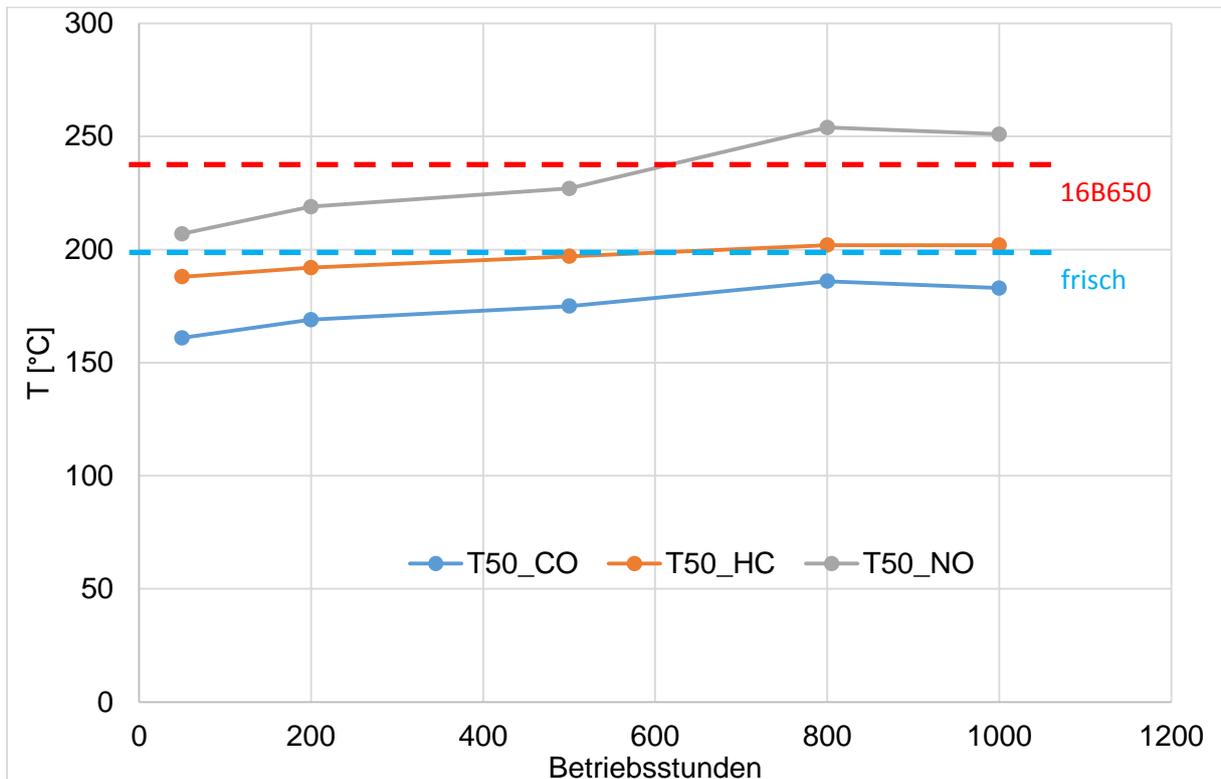


Abbildung 5-28: T50 und T80-Werte der DOC-Performance in Abhängigkeit von der Laufzeit

In einem weiteren Schritt wurde mittels RFA / ICP Analyse (Röntgenfluoreszenzanalyse) Phosphor und Schwefel auf der Katalysatoroberfläche untersucht. In Abbildung 5-29 ist eine deutliche Verschwefelung bereits ab 200 Betriebsstunden zu erkennen. Ab 800 Stunden ist sogar ein starker Eintrag zu verzeichnen. Bei Phosphor konnte keine nennenswerte Kontamination detektiert werden.

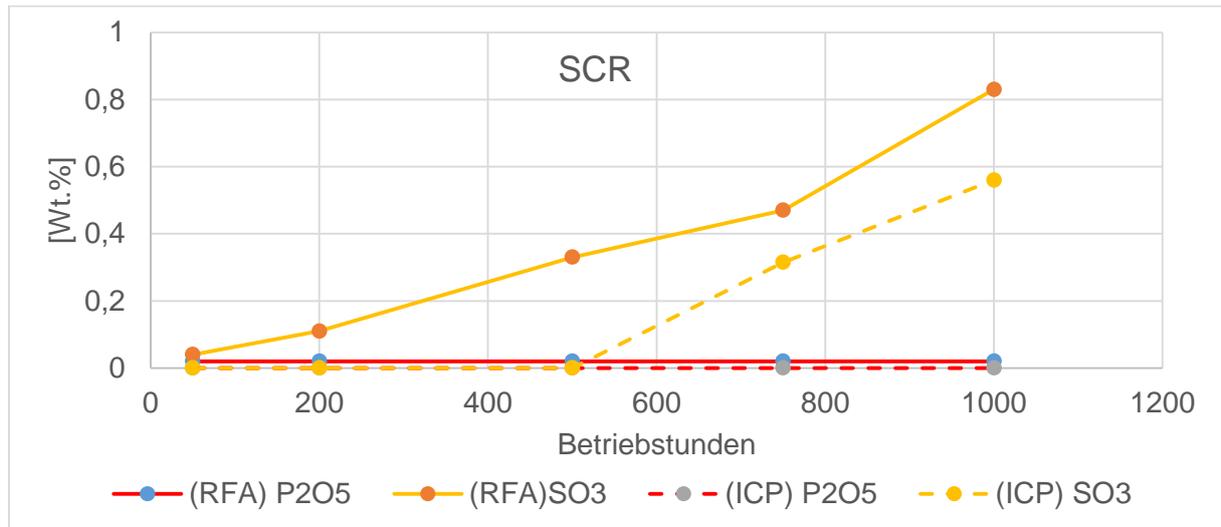


Abbildung 5-29: RFA/ICP-Analyse vom SCR über die Betriebsstunden

Eine ähnliche Verschwefelung ist ebenfalls im DOC ersichtlich. Dazu kommt eine leichte P-Kontamination ab 200 Betriebsstunden (Abbildung 5-30).

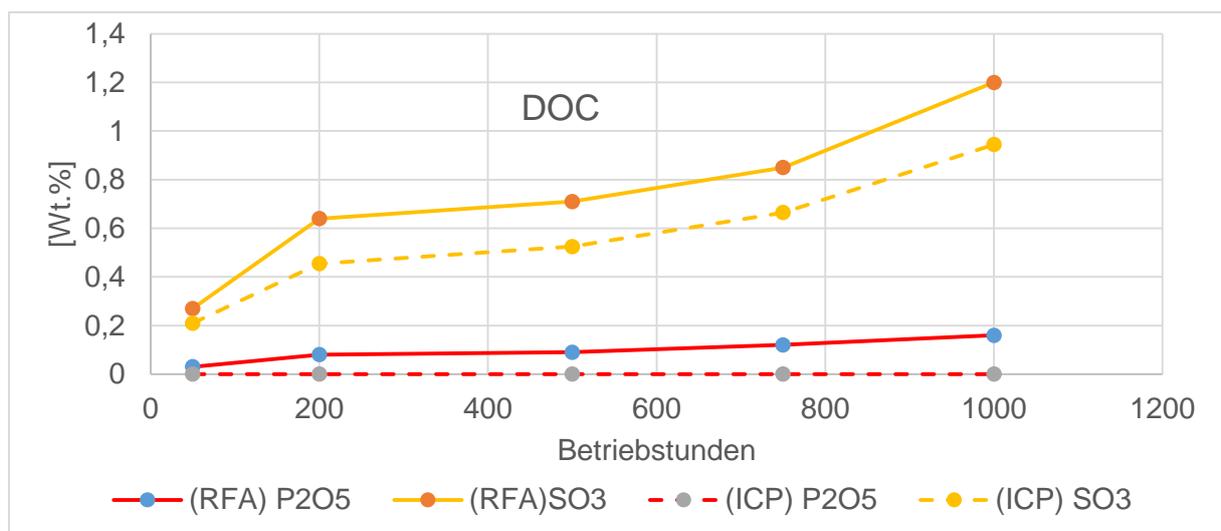


Abbildung 5-30: RFA/ICP-Analyse vom DOC über die Betriebsstunden

Zusammenfassend zur Katalysatorperformance kann festgehalten werden, dass das Abgassystem thermisch nur mäßig belastet wurde. Eine Vergrößerung des Washcoats konnte nicht festgestellt werden. Die aktive Oberfläche blieb über der Laufzeit erhalten. Über die Laufzeit wurden allerdings beträchtliche Sulfatmengen adsorbiert, was zu einer Abnahme der Systemperformance führte. Diese konnte am Prüfstand nicht nachgewiesen werden.

Nach „Filter-Regeneration“ (Stand-Still bei 590 °C, 30 Minuten) konnte die Performance wieder gesteigert werden und liegt im Alterungsfenster etwas unterhalb des erwarteten Wertes. Die Ursache für die Verschwefelung lag vermutlich an einer Kraftstoffleitung im Prüfstand, welche nicht entsprechend des Datenblattes B100 verträglich war. Nach einem Einlagerungsversuch von 5 Tagen mit dem genutzten Schlauchtyp in einer B100 Kraftstoffprobe stieg der Schwefelgehalt im Biodiesel von 10,5 mg/kg auf 21,5 mg/kg deutlich an. Der Kraftstoff selbst war nahezu schwefelfrei und kann daher für die Schwefelkontamination nicht der Grund sein. Dieser Schlauch wurde für die Prüfstandsapplikation verbaut, ist aber nach Rücksprache mit dem Hersteller nicht Bestandteil der Serienausstattung des Motors.

5.3 Arbeitspaket 3

Um die Veränderungen an AGN-Komponenten nicht nur aufwendig experimentell bestimmen zu können, werden Simulationswerkzeuge eingesetzt. Die im AP3 gewonnenen Informationen dienen der Verifikation von Rechenmodellen zur Simulation der Befüllung von AGN-Komponenten. Zur Klärung der lastpunktbedingten Beladung des DPF sowie der Deaktivierung des DOC wurden zwei Dauerläufe von 100 h unter stationären Bedingungen gefahren. Dabei wurde der Motor in den beiden Lastpunkten 2 und 6 für jeweils 100 h betrieben.

Es ist festzustellen, dass die Veränderungen auf den Oberflächen der AGN-Systeme sehr gering sind. Eine Lastpunkteabhängigkeit, die über den Massendurchsatz hinausgeht, konnte nicht festgestellt werden. Die Abhängigkeit vom Massendurchsatz (Lastpunkt) wurde erwartungsmäßig bestätigt. Die Abgastemperaturen lagen in beiden Betriebspunkten deutlich unterhalb der Alterungstemperaturen der AGN-Komponenten.

5.4 Arbeitspaket 4

Landmaschinen werden auch über längere Zeit mit sehr niedrigen Lasten betrieben (Lüfterbetrieb über Zapfwelle), daher erfolgte im Arbeitspaket 4 die Bewertung des Motorbetriebsverhaltens sowie des AGN-Systems bei Abgastemperaturen unter 200 °C. Dies ist notwendig, weil die hohe Siedelage des B100 eine Verschleppung des Zündzeitpunktes zur Folge hat und dadurch unverbrannter Kraftstoff ins Abgassystem gelangen kann. Dieser kann dort auskondensieren, was sich negativ auf den Verbrauch und die Emissionsminimierung auswirkt. Des Weiteren werden durch die Verschleppung der Verbrennungslage geringere Abgastemperaturen erreicht. Für eine optimale Funktionalität des SCR werden Abgastemperaturen von über 225 °C benötigt. Als Grundlage für die Durchführung der Versuche dient ein Gabelstaplerzyklus. Die Drehzahl- und Drehmomentenspur ist in Abbildung 5-31 zu sehen. Der Zyklus ist mit 10 Hz aufgelöst und zieht damit schnelle Lastwechsel mit sich.

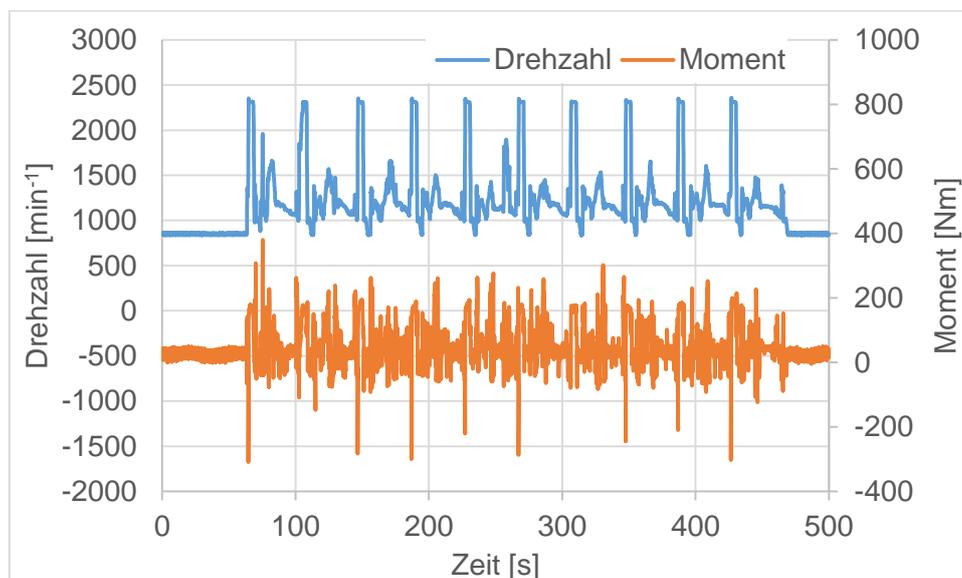


Abbildung 5-31: Drehzahl- und Drehmomentenspur vom Niederlastzyklus

Wie erwartet wurde im Testzyklus keine Dosierfreigabe für AdBlue vom Steuergerät erteilt. Der Grund hierfür liegt an den geringen Abgastemperaturen. In Abbildung 5-32 kann der Temperaturverlauf über dem Zyklus verfolgt werden. Die maximale Temperatur vorm SCR liegt bei 202 °C und ist damit deutlich unter der Freigabetemperatur (im Steuergerät hinterlegt).

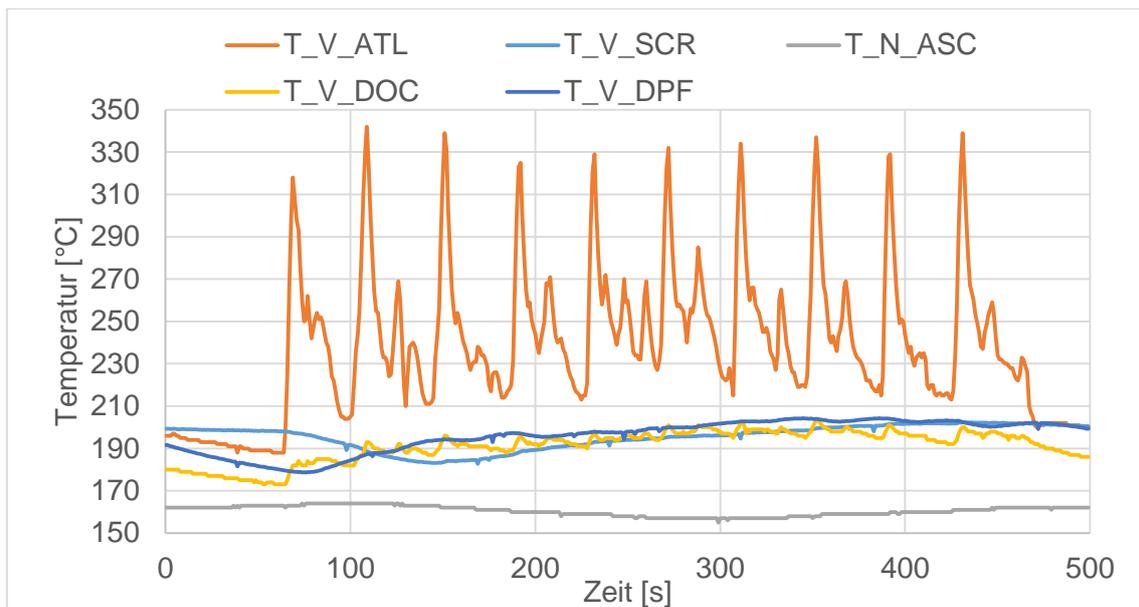


Abbildung 5-32: Abgastemperaturen über dem Niederlastzyklus

Ohne Freigabe der Dosierung vom AdBlue ist auch keine NO_x Reduzierung über den SCR möglich. Dies bestätigten die Messungen der NO_x-Konzentrationen im Zyklus (Abbildung 5-33).

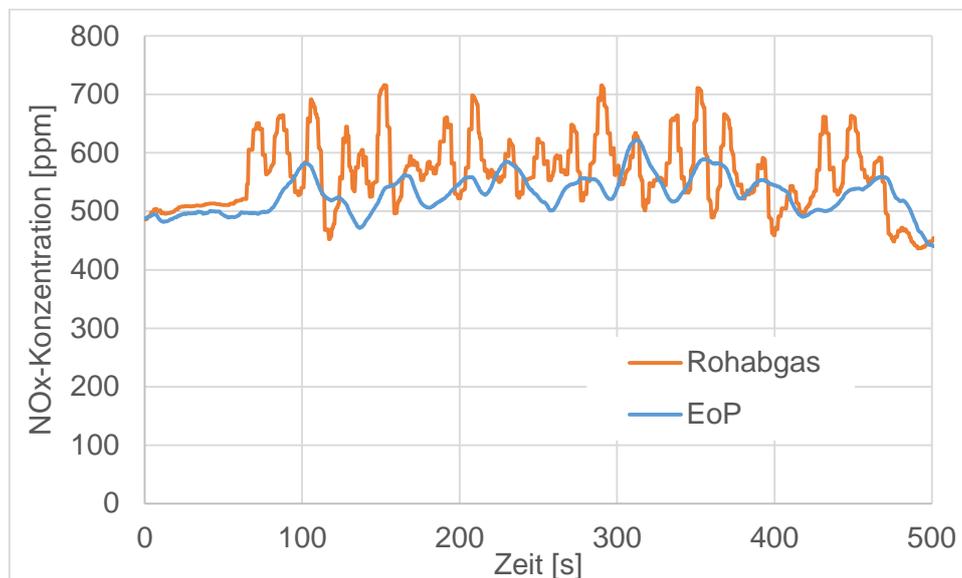


Abbildung 5-33: NO_x-Konzentration im Niederlastzyklus

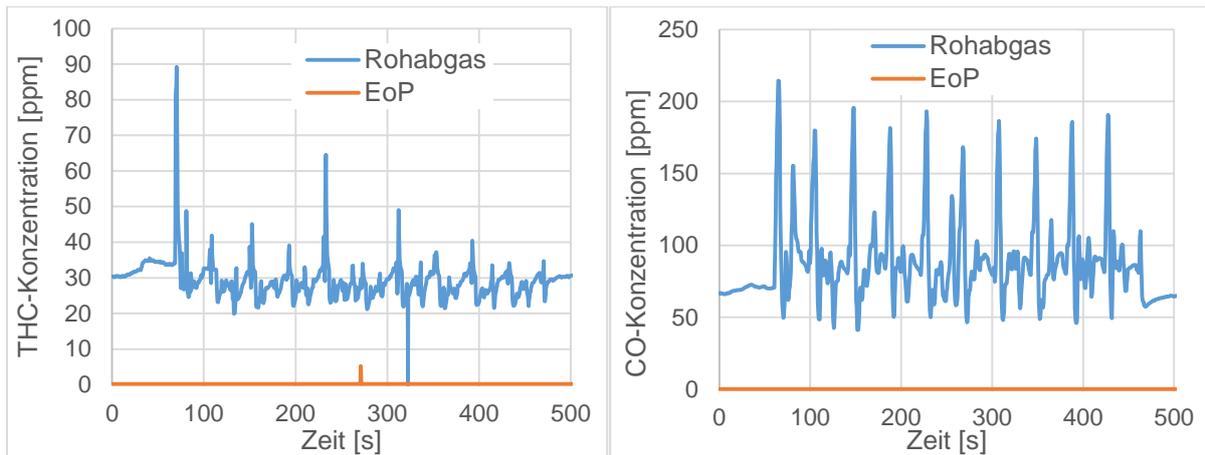


Abbildung 5-34: THC- und CO-Konzentration im Niederlastzyklus

Die Abgastemperatur vor dem Oxidationskatalysator lag über dem gesamten Testzyklus oberhalb von 170 °C. Daher war eine Konvertierung von Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoff möglich. In Abbildung 5-34 ist zu erkennen, dass die Konvertierung von CO und THC über 90 % lag.

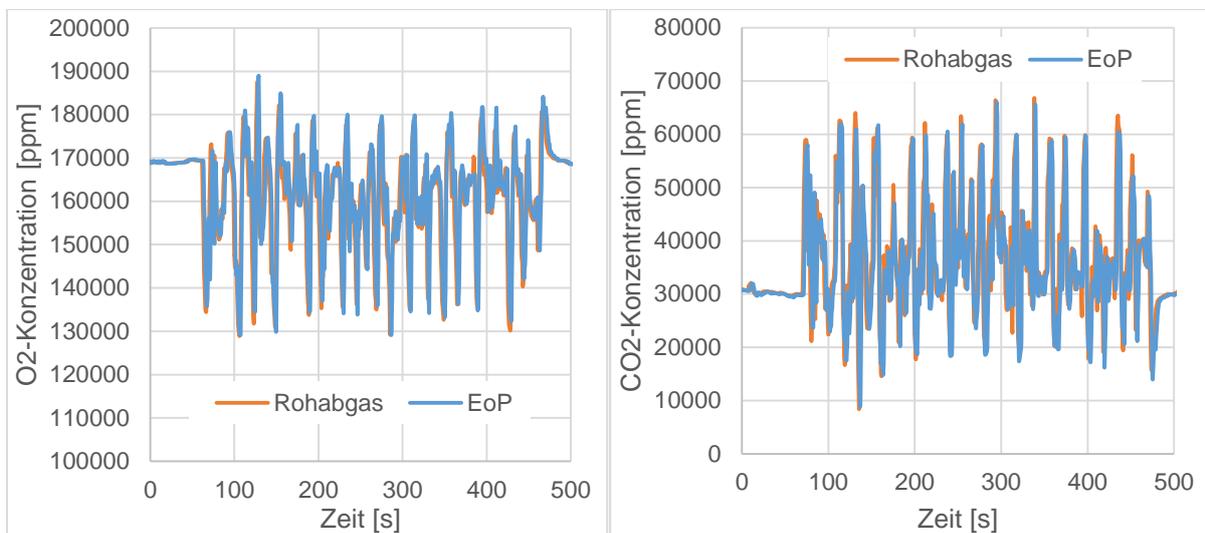


Abbildung 5-35: O₂- und CO₂-Konzentration im Niederlastzyklus

Weiteren Abgaskomponenten wie Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid verhielten sich normal über dem Niederlastzyklus (Abbildung 5-35).

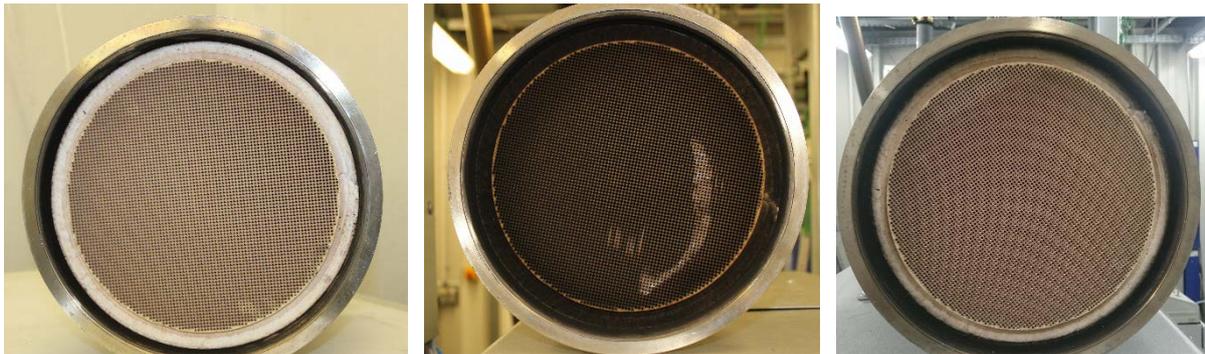


Abbildung 5-36: Bilder vom DPF (links vor dem 100 Stunden Niederlastzyklus, Mitte nach dem Testlauf, rechts nach Stand Still)

Eine weitere Erkenntnis war, dass der Motor durch die geringen Abgas- und damit auch geringen Brennraumtemperaturen zu Rußbildung neigte. Dies wird zum einen aus Abbildung 5-36 ersichtlich. Im linken Bild ist der DPF vor dem Niederlastzyklus zu sehen und im rechten Bild danach. Es ist ein deutlicher Anstieg der Rußablagerungen auf der Eintrittsfläche des DPFs zu sehen. Das gleiche Verhalten zeigte sich am Oxidationskatalysator (Abbildung 5-37).



Abbildung 5-37: Bilder vom DOC (links vor und rechts nach 100 Stunden Niederlastzyklus)

Durch die Rußablagerung stieg die Masse des DPF von 8059,1 g auf 8068,6 g. Das bedeutet, es wurden 9,5 g Ablagerungen auf dem DPF über 100 Stunden Niederlastzyklus erzeugt. Im Anschluss des Niederlast-Tests wurde eine Regeneration mittels Stand Still durchgeführt. Dabei konnten die Ablagerungen weitestgehend aufoxidiert werden (siehe Abbildung 5-36 rechts kaum Ablagerungen). Die Masse des DPFs wurde durch den Stand Still auf 8060,9 g und damit um 7,7 g reduziert.

5.5 Arbeitspaket 5

Es ist zu erwarten, dass der Endnutzer mitunter beliebige Diesel / Biodiesel-Mischungen tankt, so wurde im Arbeitspaket 5 wie im AP1 der C1-Test mit seinen 8 stationären Betriebspunkten durchgeführt. Als Kraftstoffe kamen eine B20, B30 und eine B50-Mischung aus DK und B100 zum Einsatz. Die B30 und B20-Blends wurden auch gewählt, weil die neu EU-Norm 16709 und die amerikanische ASTM D7467 Blends in der Größenordnung von B20/B30 bzw. B20 ermöglichen. Da die gleichen Lastpunkte wie in AP1 gefahren wurden, konnten die Daten untereinander verglichen werden. Hierbei wurden die Lastpunktverschiebungen, Rohemissionen sowie die Konvertierung des Abgasnachbehandlungssystems verfolgt. Die Ergebnisse aus AP5 dienen der Kontrolle, ob sich ein proportionales Motor- und Emissionsverhalten zum Zumischungsverhältnis von Biodiesel ergibt.

Wie zu erwarten zeigte sich, dass die Leistung mit steigendem B100-Anteil, wie im Arbeitspaket 1 beschrieben, sinkt. Es ist zu sehen, dass sich der B50 im Mittel zu DK und B100 verhält.

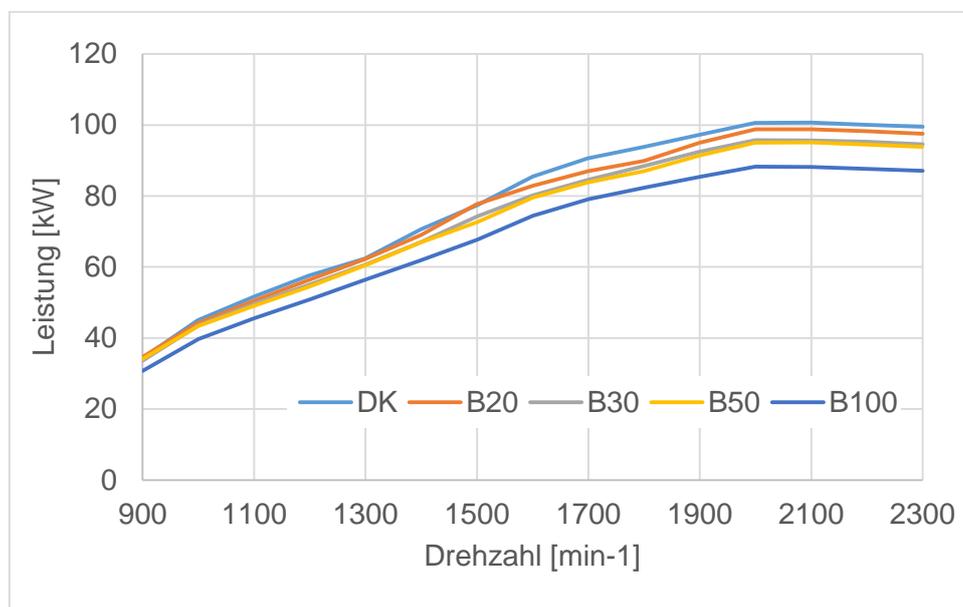


Abbildung 5-38: Vergleich der Vollastkurven der unterschiedlichen Blends

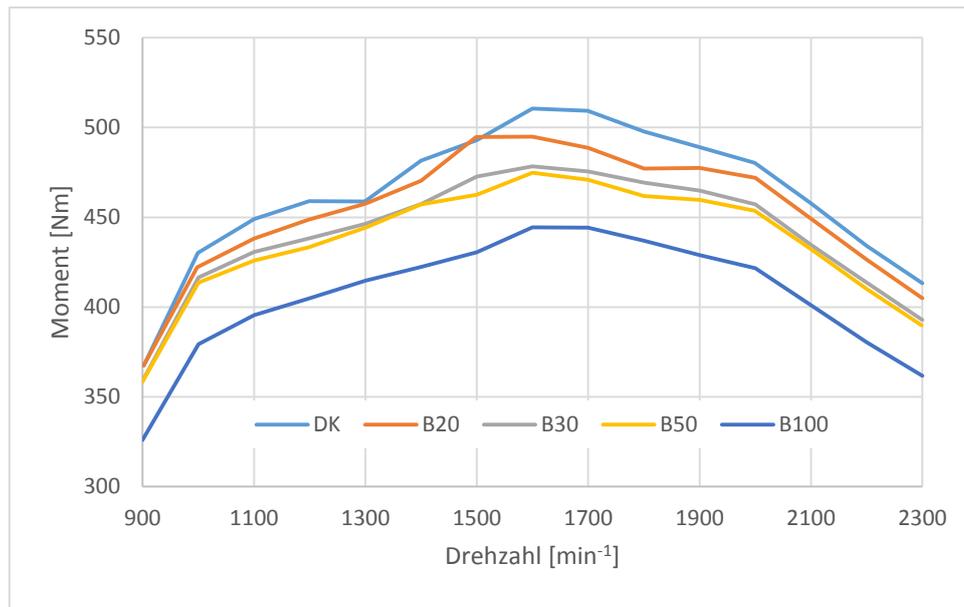


Abbildung 5-39: Vergleich des Momentenverlaufs bei unterschiedlichen Blends

Da sich die Leistung aus dem Drehmoment entwickelt, ist im Momentenverlauf das gleiche Verhalten zu sehen (Abbildung 5-39). Werden zum Beispiel nur die Drehmomente bei 1900 min^{-1} verglichen, ist ein lineares Verhalten festzustellen (Abbildung 5-40).

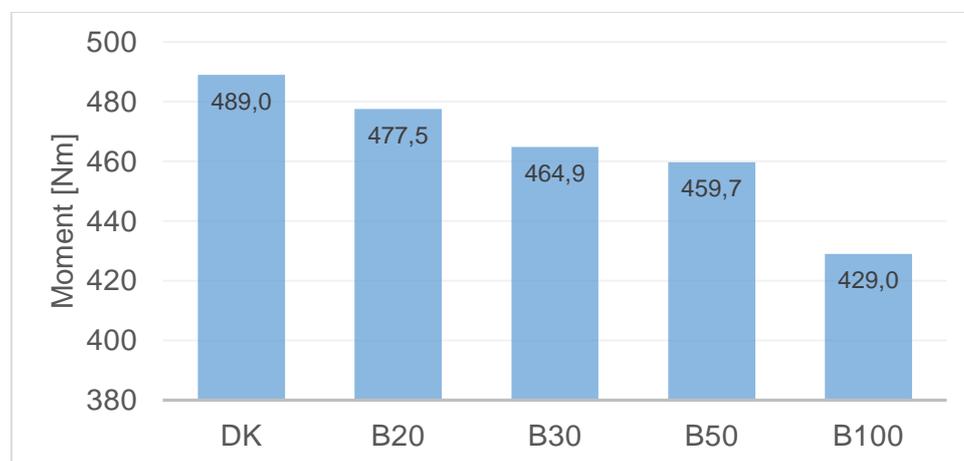


Abbildung 5-40: Motordrehmoment bei 1900 min^{-1}

Dass sich die Entwicklung des Drehmomentes nicht absolut linear mit dem Mischungsverhältnis verhält, ist darauf zurück zu führen, dass die Einspritzmenge (Menge der zugeführten Energie) auch von der Viskosität des Kraftstoffes abhängt.

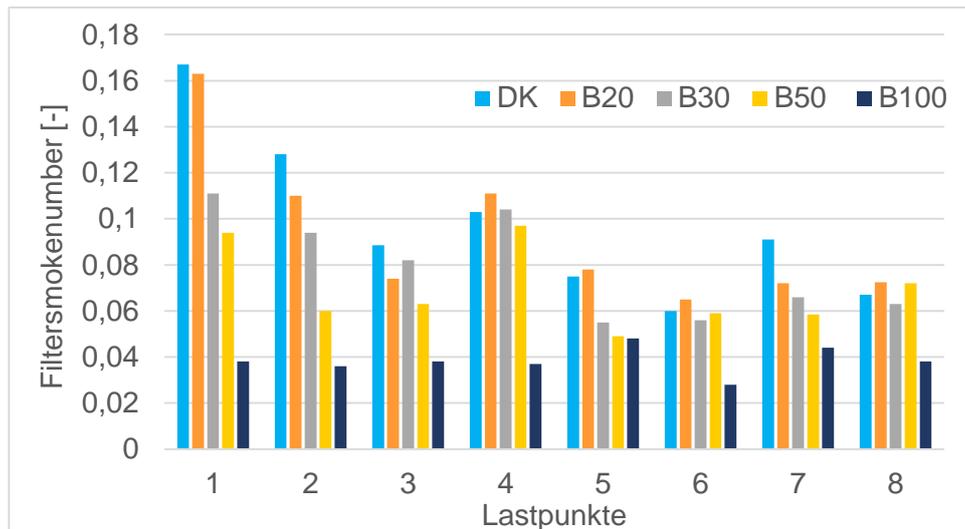


Abbildung 5-41: Filtermokenummer im Rohabgas des C1-Tests in Abhängigkeit vom Blend

Der positive Effekt vom gebunden Sauerstoff im Biodiesel auf die Filtermokenummer im Rohabgas widerspiegelt sich auch bei den Mischkraftstoffen (Abbildung 5-41). Das nicht lineare Verhalten bezüglich der Zumischkonzentration war bei den sehr geringen Werten zu erwarten.

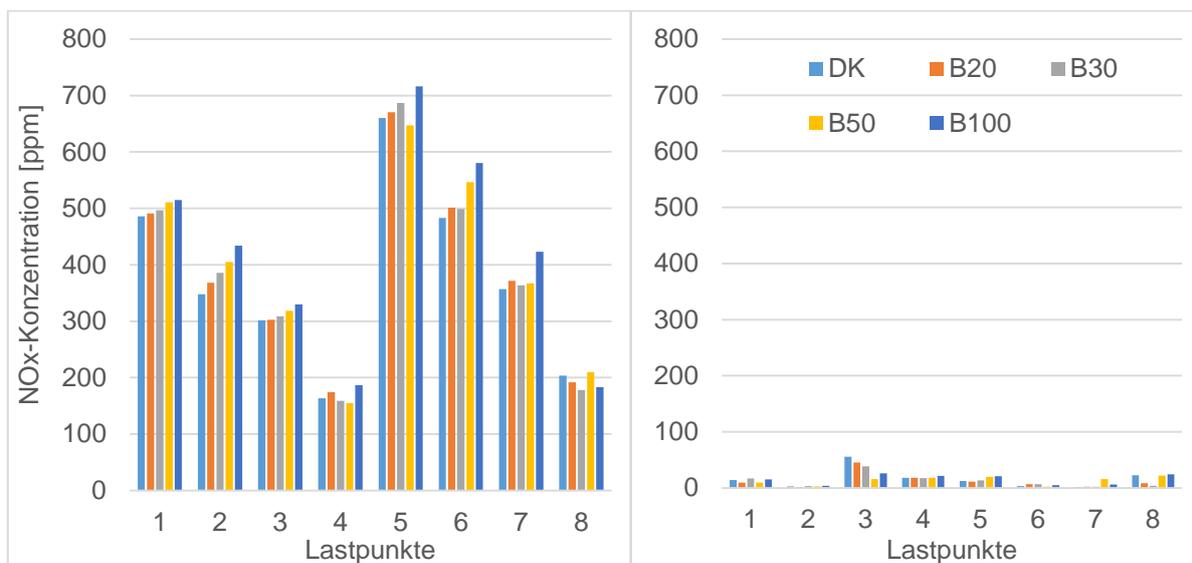


Abbildung 5-42: NOx-Konzentration in Abhängigkeit vom B100-Gehalt im Rohabgas und EoP

Der aus Arbeitspaket 1 bekannte Trend, der Anstieg der NOx-Konzentration unter B100, wurde ebenfalls bestätigt (Abbildung 5-42). Im Weiteren konnte die Funktionalität der AGN-Komponenten in jedem Blend bestätigt werden. In Abbildung 5-42 sind die NOx-Konzentration im Rohabgas und End-of-Pipe für den C1-Test in Abhängigkeit der Blenderate aufgetragen. Es ist zu sehen, dass die NOx-Konvertierung unabhängig vom Mischkraftstoff auf einem sehr hohen Niveau liegt. Der DOC weist ebenfalls sehr hohe Konvertierungsraten auf.

5.6 Arbeitspaket 6

In diesem Arbeitspaket wurde das Stand Still-Verhalten des Motors unter Abhängigkeit des Kraftstoffes untersucht. Der Stand Still Betrieb dient der DPF-Regeneration. Dafür geht der Motor selbstständig vom Steuergerät aus auf eine feste Motordrehzahl von 1800 min^{-1} . Dabei werden sehr hohe Abgastemperaturen durch eine Verlagerung der Einspritztimings nach spät ermöglicht.

Bei den Tests lagen die Drehzahl bei 1800 min^{-1} und das Moment bei 48 Nm für beide Kraftstoffe. Der Stand Still dauerte 30 Minuten. In Abbildung 5-43 sind die Abgastemperatur von DK und B100 aufgetragen. Es ist eine Minimierung der Abgastemperatur unterm B100-Betrieb zu erkennen, wobei die Temperaturdifferenz über dem DPF deutlich geringer ausfällt. Daher ist eine erfolgreiche Regeneration für Biodiesel möglich, welche schon nach dem Dauerlauf von 100 Betriebsstunden im Niederlastzyklus erfolgreich gezeigt wurde.

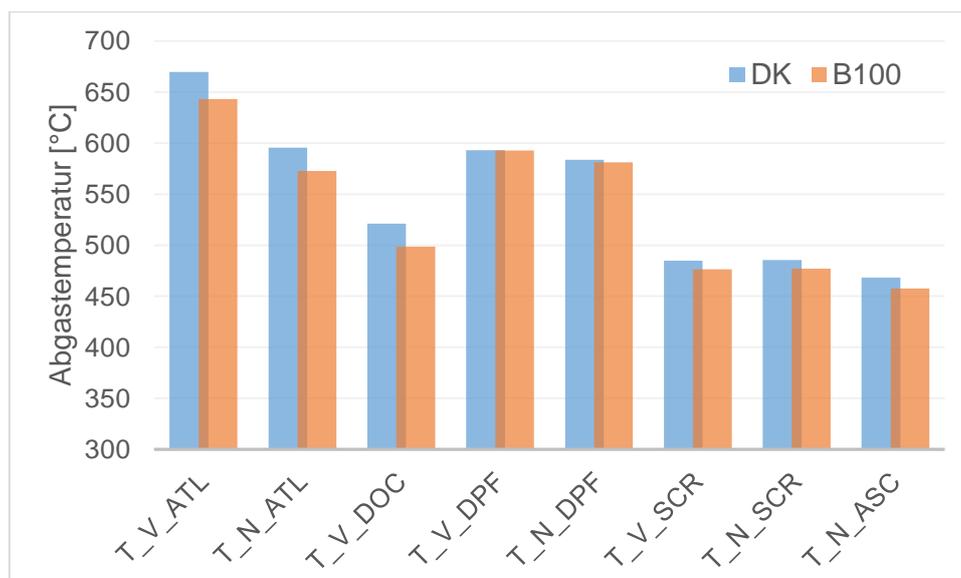


Abbildung 5-43: Abgastemperaturen im StandStill von DK und B100

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass der Rußabbrand im DPF einen Anstieg der CO_2 -Konzentration vom Rohabgas zu EoP hat (Abbildung 5-44). Die Stickoxide, die Kohlenmonoxide sowie die Kohlenwasserstoffe wurden weiterhin über dem DOC erfolgreich auf ein Minimum reduziert.

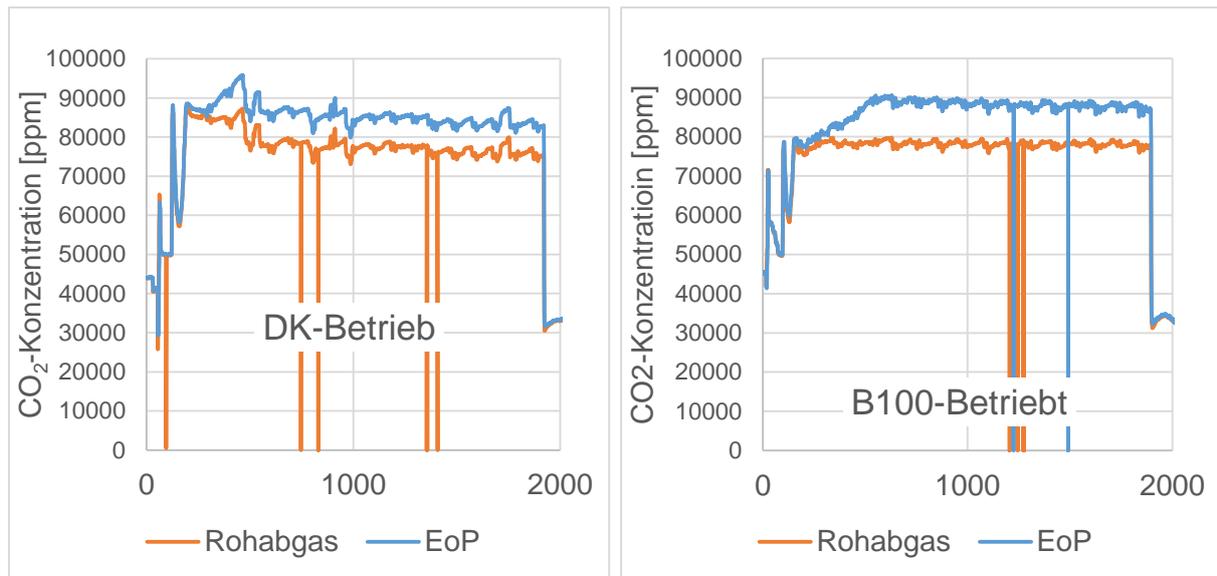


Abbildung 5-44: CO₂-Konzentration im StandStill von DK und B100

6 Zusammenfassung

Um Dieselmotoren der neuesten Generation in Landmaschinen mit alternativen Kraftstoffen betreiben zu können, müssen die Motoren und ihre Abgasnachbehandlung für die Kraftstoffe freigegeben werden. Dies setzt entsprechende Motortests voraus. Am LKV der Universität Rostock wurden im Rahmen des Projektes grundlegende Test mit mehr als 1700 Motorbetriebsstunden an einem Landtechnikmotor der Abgasstufe EU COM IV im 100 % Biodieselbetrieb durchgeführt.

Die Versuche, aufgeteilt in sechs Arbeitspakete, dienten dem Ziel, den grundlegenden Nachweis der dauerhaften Eignung von EU COM IV Industrie-Dieselmotoren und deren Abgasnachbehandlungssystemen für den Betrieb mit Biodiesel bzw. Biodieselblends zu erbringen.

Als Referenz diente der Ausgangszustand des Versuchsträgers einen Deutz TCD 3.6 L4 im Dieselbetrieb. Referenzpunkte waren die Volllastkurve sowie der stationäre C1-Test. Die anschließenden umfangreichen Untersuchungen mit Biodiesel-Betrieb fanden ohne Umbauten oder Softwareanpassungen des Motors statt.

Es konnte gezeigt werden, dass der Biodiesel bedingt durch den geringeren Heizwert einen Anstieg des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs zur Folge hat. Wird der Verbrauch mit dem Heizwert korrigiert, liegen die Unterschiede im Bereich der Messgenauigkeit (3 %). Mit der Veränderung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs ändert sich auch die Einspritzmenge je Arbeitsspiel, so dass beim Betrieb mit Biodiesel eine Verschiebung des Betriebspunkts im Motorsteuergerät festzustellen ist. Zum Beispiel wird der Einspritzzeitpunkt für die einzelnen Einspritzungen angepasst, bei höheren Einspritzmengen wird früher eingespritzt.

In den Untersuchungen zeigte sich, dass sich der Biodiesel positiv auf die Zusammensetzung des Rohabgases (nach Zylinder, vor Abgasnachbehandlung) auswirkt. So erzeugt der Motor im Biodieselbetrieb geringere Kohlenstoffmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen im Vergleich zum Dieselbetrieb. Des Weiteren konnten für den Betrieb mit Biodiesel geringere Rauchzahlen (FSN) festgestellt werden. Dieses Wissen ist von Bedeutung für eine potentielle Biodieselapplikation des Partikelfilters. Im Vergleich zum Referenzbetrieb mit Diesel waren die Stickoxide

im Rohabgas bei Biodieselbetrieb leicht erhöht, wie es auch bei allen früheren Motortest festgestellt werden konnte. Diese erhöhten Stickoxidemissionen im Rohabgas wurden durch den SCR Katalysator sicher auf Werte unterhalb der EU COM IV Grenzwerte reduziert. End of Pipe, dem für den Abgastest relevanten Messpunkt, konnten keine Unterschiede zwischen Dieselbetrieb und Biodieselbetrieb festgestellt werden.

Das Abgasnachbehandlungssystem, bestehend aus einem Dieseloxydationskatalysator (DOC), einem Dieselpartikelfilter (DPF) und einem SCR-Katalysator, arbeitete sowohl im Diesel- also auch Biodieselbetrieb entsprechend seiner Auslegung, so dass die Emissionen End of Pipe die Abgasnorm Euro IV und EURO V sicher einhielten.

Detaillierte Analysen des DPF beinhalteten die Untersuchungen der Beladung und der kontinuierlichen Regeneration mittels des CRT-Effektes. Hier konnte gezeigt werden, dass sich bedingt durch eine Verminderung der Rauchzahlen (FSN) im B100-Betrieb auch die Beladung des DPFs verringert. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Funktionalität des DOCs und des SCR-Katalysator unter B100-Einsatz voll gegeben ist. Die für die Erfüllung der Abgasnorm notwendigen Konvertierungsraten im stationären Betrieb von über 90 % werden dauerhaft sicher erreicht.

Der Versuchsmotor ist im Biodieselbetrieb langzeitstabil, was in einem 1000 h Dauerlauf nachgewiesen werden konnte. Es gab keine Veränderung der Motorperformance über der Laufzeit. Ebenso zuverlässig verhielt sich das AGN-System. Auch hier wurde nach dem 1000 h Dauerlauf die Abgasnorm Euro IV und EURO V erfolgreich eingehalten. Primär mögliche Deaktivierungen des AGN-Systems, aufgrund von Kraftstoffspurenelementen (S, P, K, Na, Ca,...) wurden im Langzeitbetrieb nicht festgestellt.

Im üblichen Betrieb des Landmaschinenmotors erfolgt die Regeneration des DPFs sowohl im DK-, als auch im Biodieselbetrieb mittels CRT-Verfahren ohne zusätzliche Abgas-Heizstrategien (Heat Modi).

Für den Fall, dass der Motor über sehr lange Zeitfenster nur im Niedriglastbetrieb arbeitet, muss eine „stand-still Regeneration“ mit zusätzlicher Anhebung der Abgastemperatur vor DPF durchgeführt werden können. Die Untersuchungen zeigten, dass eine „stand-still Regeneration“ des DPFs im Diesel- und

Biodieselbetrieb wiederholt erfolgreich möglich ist. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die hohe AGN-Performance über einen längeren Zeitraum bereitsteht.

Die Weiterentwicklung der Gemischbildung in den letzten 10 Jahren führte zu einer deutlichen Verringerung des Kraftstoffeintrages in das Schmieröl beim Biodieselbetrieb.

Aus Sicht des Projektes konnten keine grundsätzlichen Probleme erkannt werden, die einer zukünftigen Freigabe von Motoren der Abgasstufe EU COM IV für den B100-Betrieb entgegenstehen. Da das untersuchte AGN-System prinzipiell auch für Motoren der Abgasstufe EU COM V eingesetzt wird, erscheint auch hier eine B100 Freigabe grundsätzlich möglich.

7 Stand des Vorhabens

7.1 Arbeits- und Zeitplan

Der ursprüngliche Zeitplan wurde in Abstimmung mit der FNR an die erheblichen zeitlichen Mehraufwände für den Prüfstands Aufbau (länge Lieferzeit der Vier-Quadranten-Bremse usw.) angepasst. Die AP 2 bis AP 6 fanden in den vorgesehenen wissenschaftlich notwendigen Umfängen mit den vorgesehen Zeitrahmen statt.

7.2 Ausgaben-/Kostenplanung

Der Kostenplan wurde eingehalten, die durch die Projektverlängerung angefallenen erhöhten Personalkosten wurden durch die Universität Rostock getragen.

8 Erreichung der Ziele

Die Ziele des Projektes wurden erreicht.

9 Ergebnisse Dritter

Es wurden für die Durchführung des Vorhabens relevante Ergebnisse Dritter bekannt gegeben. Unterstützung erfolgte zum einen durch die Firma DEUTZ AG. Hier wurden die Injektoren im Einspritzverlaufsindikator untersucht. Des Weiteren wurde die Post-Mortem-Analyse der AGN-Komponenten und Bohrkerne bei der Firma Umicore analysiert.

10 Änderungen in der Zielsetzung

Es sind keine Änderungen in der Zielsetzung gemäß dem Antrag an die FNR vorgenommen worden.

11 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Es sind bisher keine Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte in Anspruch genommen worden.

12 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Dem wirtschaftlichen Einsatz von Biodiesel in der Landwirtschaft stehen derzeit noch Sonderregelungen im Energiesteuergesetz entgegen. Aber eine mögliche Änderung im Energiesteuergesetz bezüglich der Kraftstoffe für die Landwirtschaft wird kurzfristig einen Bedarf nach biodieseltauglichen Arbeitsmaschinen in der Landwirtschaft hervorrufen.

Durch den erfolgreichen Abschluss des Projektes ist der reine B100-Betrieb für Industrie- und Landmaschinenmotoren technisch abgesichert. Dadurch ist der Landmaschinenmarkt für biodieselbetriebene Fahrzeuge offen und Biodiesel betriebene Motoren könnten damit wieder verstärkt im Landmaschinenmarkt vertrieben und eingesetzt werden. Die Eigenschaft ihrer Motoren, diese nicht nur mit fossilem Kraftstoff betreiben zu können, erhöht die Wettbewerbsfähigkeit der Motorenhersteller. Neben den Vorteilen für die Motorenhersteller gibt es auch positive wirtschaftliche Effekte für die Landwirte. Landwirte können dann unabhängig von den Mineralölfirmen den Biokraftstoff erwerben und einsetzen. Die meisten landwirtschaftlichen Betriebe betreiben Eigenverbrauchstankstellen und sind in der Lage größere Mengen Biodiesel lagern. Eine möglich weitere Verwertung der Ergebnisse dient den Katalysatorherstellern. Auch die Simulationsbranche kann die erworbenen Kenntnisse nutzen. In dem zukünftige AGN-Systeme mit Hilfe der Simulation untersucht werden. Dadurch würden kostenintensive und zeitaufwändige Motorenversuche wegfallen.

13 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Durch den erfolgreichen Abschluss können mit dem erlangten Wissen Optimierungsmaßnahmen für den Biodiesel-Betrieb von Industrie- und Landtechnikmotoren getroffen werden. Zum Beispiel ist ein gezielter Eingriff in das Motorsteuergerät durch B100-Applikationen denkbar. Außerdem könnte das Beladungsmodell des Dieselpartikelfilters für B100 angepasst und damit gezielte Heat Modis / Regenerationsstrategien gefahren werden. Dies würde einen positiven Effekt auf den Kraftstoffverbrauch und dem DPF haben. Des Weiteren konnte im Projekt gezeigt werden, dass der Serienmotor geringere Kohlenstoffmonoxide, Kohlenwasserstoffe und Rauchzahlen erzielt. Dadurch könnten die Stickoxidemissionen innermotorisch durch eine Anpassung der Einspritztimings oder durch eine Variation der Abgasrückführrate minimiert werden.

Eine Anrechnung auf die geforderten Bio-Quoten im Verkehrssektor ist durch den reinen B100-Betrieb gewährleistet.

Des Weiteren können durch die gewonnen Erkenntnisse über die Emissionsbildung und deren Verhalten im Abgasnachbehandlungssystem im B100-Betrieb Berechnungsmodelle erstellt werden. Mit Hilfe dieser Modelle ist es möglich, die Arbeitsweise von Abgasnachbehandlungssystemen im B100-Betrieb zu optimieren. Dieses wiederum spart kostenintensive und aufwändige Prüfstanduntersuchungen. Erreichte wissenschaftlich-technische Forschungsergebnisse des Lehrstuhls für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren sind:

- Erkenntnisgewinnung über das Beladungsverhalten von Abgasnachbehandlungssystemen von Serienmotoren der Abgasstufe EU COM IV im Biodiesel-Betrieb
- Kenntnisse über die kontinuierliche Regeneration (CRT-Effekt) im niedrigen Lastbereich
- Wissenszuwachs über das Betriebsverhalten des SCR-System im Leerlauf
- Erkenntnisse über die kraftstoffbedingten Lastpunktverschiebungen im Motorkennfeld

14 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Mit der Erkenntnisgewinnung aus dem beantragten Vorhaben wurden Anschlussprojekte zu Themen wie Simulation von Alterungserscheinung von AGN-Systemen oder Simulationen von Regenerationsstrategien vom DPF im Biodieselbetrieb ermöglicht.