

44

Berichte aus dem TFZ

# Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl

Projektpartner:





**Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von  
Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb  
mit Pflanzenöl**





# Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl

Georg Huber  
Alexander Scholz  
Dr. Michael Stöhr  
Dr. Christian Düsseldorf  
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl  
Dr. Klaus Thuneke  
Dr. Edgar Remmele  
Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel

In Zusammenarbeit mit:



**Berichte aus dem TFZ 44**

**Straubing, Dezember 2015**

**Titel:** Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl  
Teilvorhaben 1: Modifikation des Tier-4-Traktormotors  
Teilvorhaben 2: Kraftstoffanalyse, stationäre Emissionsmessungen und Feldtests  
Teilvorhaben 3: Untersuchungen am dynamischen Motorenprüfstand

**Projektleiter**  
**Gesamtvorhaben:** Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel  
**Teilvorhaben 1:** Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel  
**Teilvorhaben 2:** Dr. Edgar Remmele  
**Teilvorhaben 3:** Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl

**Autoren:** Georg Huber<sup>4</sup>, Alexander Scholz<sup>3</sup>, Dr. Michael Stöhr<sup>1</sup>, Dr. Christian Düsseldorf<sup>2</sup>, Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl<sup>3</sup>, Dr. Klaus Thuneke<sup>4</sup>, Dr. Edgar Remmele<sup>4</sup>, Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> B.A.U.M. Consult GmbH • Gotzinger Str. 48 • 81371 München

<sup>2</sup> John Deere GmbH & Co. KG • European Technology Innovation Center • Straßburger Allee 3 • 67657 Kaiserslautern

<sup>3</sup> Technische Universität Kaiserslautern • Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik • Verbrennungskraftmaschinen • Postfach 3049 • 67653 Kaiserslautern

<sup>4</sup> Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) • Schulgasse 18 • 94315 Straubing

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) unter dem Förderkennzeichen 22024611 gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

© 2015  
Technologie- und Förderzentrum  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.  
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil <1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

**ISSN:** 1614-1008

**Hrsg.:** Technologie- und Förderzentrum  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)  
Schulgasse 18, 94315 Straubing

**E-Mail:** poststelle@tfz.bayern.de  
**Internet:** www.tfz.bayern.de, www.praxtrak.de

**Redaktion:** Georg Huber, Rita Haas, Ulrich Eidenschink  
**Verlag:** TFZ, Eigenverlag  
**Erscheinungsort:** Straubing  
**Erscheinungsjahr:** 2015  
**Gestaltung:** Georg Huber, Ulrich Eidenschink

**Fotonachweis:** Georg Huber, Matthias Ruperti, Johannes Kastl, Dr.-Ing. Peter Emberger

## **Vorwort**

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft sowie bei der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. für die Finanzierung des Vorhabens und das entgegengebrachte Vertrauen.

Für die hervorragende Zusammenarbeit und die konstruktive Kritik beim Feldtest der Traktoren gilt unser besonderer Dank Herrn Dr. Christoph Härle und Herrn Klaus Lettenmeyer von der Versuchsstation Grub sowie Herrn Georg Hammerl und Herrn Michael Scheidler vom LVFZ Achselschwang der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) sowie deren Mitarbeitern.

Der Firma regineering GmbH mit ihrem Geschäftsführer Stefan Innerhofer danken wir für die zuverlässige Ausführung verschiedener Unteraufträge im Rahmen des Projekts.

Herrn Thomas Kaiser vom Institut für Energie- und Umwelttechnik – Brand & Kaiser GbR danken wir für die rege Netzwerkarbeit und Unterstützung des Vorhabens.

Nicht zuletzt möchten wir noch ein herzliches Dankeschön aussprechen an alle Mitarbeiter in den Werkstätten, Laboren und Büros des John Deere European Technology and Innovation Center, des Technologie- und Förderzentrums (TFZ), des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Kaiserslautern und der B.A.U.M. Consult GmbH München/Berlin, die zum Gelingen des Projekts „PraxTrak“ beigetragen haben.

Die Autoren





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>13</b>
<b>2 Aufgabenstellung .....</b>	<b>15</b>
2.1 TV1: Modifikation des Final-Tier-4-Traktormotors .....	15
2.2 TV2: Kraftstoffanalyse, stationäre Emissionsmessungen und Feldtests .....	15
2.3 TV3: Untersuchungen am dynamischen Motorenprüfstand der TU Kaiserslautern .....	17
<b>3 Stand der Wissenschaft und Technik .....</b>	<b>19</b>
3.1 Pflanzenöltaugliche Traktoren .....	19
3.2 Pflanzenölkraftstoff .....	19
3.3 Emissionsminderung in modernen Dieselmotoren.....	20
3.3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen .....	20
3.3.2 Innermotorische Maßnahmen zur Emissionsreduzierung .....	21
3.3.3 Abgasnachbehandlung .....	22
<b>4 Material und Methoden .....</b>	<b>27</b>
4.1 Traktoren .....	27
4.2 Betriebsdatenerfassung .....	29
4.2.1 Betriebstagebuch .....	29
4.2.2 Elektronisches Datenerfassungssystem .....	30
4.3 Traktorenprüfstand .....	32
4.3.1 Bestimmung von Leistung, Drehzahl und Verbrauch .....	33
4.3.2 Messung der Emissionen.....	34
4.3.3 Prüfzyklus .....	36
4.4 Abgasemissionsmessung am dynamischen Motorenprüfstand der TU Kaiserslautern .....	38
4.4.1 Vorgegebene Motorkonfiguration .....	38
4.4.2 Prüfstands Aufbau.....	39
4.4.3 Prüfzyklus und Auswertung der Daten vom Motorenprüfstand .....	42
4.5 Bestimmung des Beladungszustands des Partikelfilters .....	42
4.6 Betriebsstoffe.....	43
4.6.1 Verwendete Kraftstoffe und Kraftstoffanalysen .....	43
4.6.2 Motoröl.....	46
<b>5 Ergebnisse .....</b>	<b>47</b>

<b>5.1</b>	<b>Charakterisierung der Pflanzenöle hinsichtlich kraftstoffrelevanter Eigenschaften.....</b>	<b>47</b>
<b>5.2</b>	<b>Optimierung des Kraftstoffniederdrucksystems .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Untersuchung des Belade- und Regenerationsverhalten eines unbeschichteten Partikelfilters .....</b>	<b>53</b>
<b>5.4</b>	<b>Modifikation eines Serienmotors der Abgasstufe IV .....</b>	<b>53</b>
<b>5.5</b>	<b>Modifikation des Abgasnachbehandlungssystems.....</b>	<b>56</b>
<b>5.6</b>	<b>Ergebnisse der Emissionsmessungen am Motorprüfstand der TU Kaiserslautern .....</b>	<b>58</b>
<b>5.7</b>	<b>Untersuchungen am Traktorenprüfstand des TFZ .....</b>	<b>62</b>
<b>5.8</b>	<b>Feldtest der Traktoren .....</b>	<b>68</b>
5.8.1	Erfahrungen mit Dieselpartikelfiltern im Pflanzenölbetrieb.....	68
5.8.2	Ergebnisse der Motorölanalysen während des Feldtests .....	71
5.8.3	Verhalten der Kraftstofffilter im Pflanzenölbetrieb.....	71
5.8.4	Kaltstartverhalten der Traktoren .....	72
5.8.5	Sonstige Probleme im Feldtest.....	72
5.8.6	Abschließender Motorbefund .....	72
<b>5.9</b>	<b>Folgenabschätzung.....</b>	<b>73</b>
<b>5.10</b>	<b>Erreichte Nebenergebnisse .....</b>	<b>75</b>
	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>77</b>
	<b>Abstract .....</b>	<b>81</b>
	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>83</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für Traktoren (Quelle: Deere & Company [4]) .....	20
Abbildung 2:	Schematischer Aufbau eines geschlossenen keramischen Partikelfilters.....	24
Abbildung 3:	Abgasstufe-IIIB-Traktor im Feldeinsatz auf dem LVFZ Achselschwang .....	28
Abbildung 4:	Abgasstufe-IV-Traktor im Feldeinsatz auf der Versuchsstation Grub .....	29
Abbildung 5:	Ausschnitt aus dem Betriebstagebuch eines der Versuchstraktoren .....	30
Abbildung 6:	Übersicht des Traktorenprüfstands am Technologie- und Förderzentrum.....	32
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 .....	37
Abbildung 8:	Serienkonfiguration des Versuchsmotors (Quelle: John Deere) .....	39
Abbildung 9:	Motorprüfstand an der TU Kaiserslautern (Quelle: TU Kaiserslautern VKM) .....	40
Abbildung 10:	Schema des transienten Motorprüfstands (Quelle: TU Kaiserslautern VKM) .....	41
Abbildung 11:	Messaufbau zur Bestimmung des Partikelfilterbeladungszustands .....	43
Abbildung 12:	Kinematische Viskosität der unterschiedlichen untersuchten Pflanzenöle von -10 °C bis 100 °C .....	50
Abbildung 13:	Dichte der unterschiedlichen untersuchten Pflanzenöle von -40 °C bis 100 °C.....	51
Abbildung 14:	Simulierte Destillation der unterschiedlichen Pflanzenöle.....	51
Abbildung 15:	Finale Vollastkurve für Diesel- und Pflanzenölkraftstoff (Quelle: TU Kaiserslautern VKM) .....	54
Abbildung 16:	Zylinderdruckverlauf im Lastpunkt B75 (Quelle: TU Kaiserslautern VKM) .....	55
Abbildung 17:	Summenheizverlauf im Lastpunkt B75 (Quelle: TU Kaiserslautern VKM) .....	55
Abbildung 18:	Angepasstes Abgasnachbehandlungssystem (Quelle: TU Kaiserslautern VKM) .....	57
Abbildung 19:	CO- und HC-Emissionsverläufe des Motors während des NRTC-Tests im Betrieb mit Rapsöl unter Kaltstartbedingungen (Quelle: TU Kaiserslautern) .....	60
Abbildung 20:	NO <sub>x</sub> - und NH <sub>3</sub> -Emissionsverläufe des Motors während des NRTC-Tests im Betrieb mit Rapsöl bei Kaltstartbedingungen (Quelle: TU Kaiserslautern) .....	60

Abbildung 21: NO <sub>x</sub> - und NH <sub>3</sub> -Emissionsverläufe des Motors während des NRTC-Tests im Betrieb mit Rapsöl bei Warmstartbedingungen (Quelle: TU Kaiserslautern) .....	61
Abbildung 22: Versuchstraktor auf dem TFZ-Traktorenprüfstand (Quelle: TFZ) .....	63
Abbildung 23: Spezifische Stickstoffoxid- (NO <sub>x</sub> ), Kohlenmonoxid- (CO), Kohlenwasserstoff- (HC) und Partikelmasseemissionen (PM) des Abgasstufe-IV-Traktors beim stationären 8-Phasen-Zyklus (NRSC) im Betrieb mit Rapsöl (Quelle: TFZ) .....	64
Abbildung 24: Vollastkennlinien des Abgasstufe-IV-Traktors beim Betrieb mit Rapsöl (Quelle: TFZ) .....	65
Abbildung 25: Spezifische Stickstoffoxid- (NO <sub>x</sub> ), Kohlenmonoxid- (CO), Kohlenwasserstoff- (HC) und Partikelmasseemissionen (PM) des Abgasstufe-IV-Traktors zum Entwicklungsstand März 2014 beim stationären 8-Phasen-Zyklus (NRSC) im Betrieb mit unterschiedlichen Pflanzenölen (Quelle: TFZ) .....	66
Abbildung 26: Vollastkennlinien des Abgasstufe-IV-Traktors zum Entwicklungsstand März 2014 beim Einsatz unterschiedlicher Pflanzenöle (Quelle: TFZ) .....	67
Abbildung 27: Differenzdruck des Dieselpartikelfilters des Abgasstufe-IIIB-Traktors im Lastbereich von 70 bis 100 % und Drehzahlbereich von 1.700 bis 2.100 min <sup>-1</sup> über der Betriebszeit (Quelle: TFZ) .....	69
Abbildung 28: Zusammensetzung der Asche aus dem Dieselpartikelfilter in Masseanteilen (Quelle: TFZ) .....	70
Abbildung 29: Pflanzenölgehalt im Motoröl in Abhängigkeit der Laufzeit des Öls nach dem Ölwechsel (Quelle: TFZ) .....	71
Abbildung 30: Injektorspitzen des Abgasstufe-IIIB-Traktors nach ca. 1.200 Betriebsstunden mit Rapsölkraftstoff .....	73

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	EU-Non-Road-Richtlinie 97/68/EG (geändert durch 2004/26/EG) für mobile Maschinen und Geräte – Dieselmotoren (Quelle: VDMA [37]).....	21
Tabelle 2:	Technische Daten der Versuchstraktoren .....	27
Tabelle 3:	Auflistung der wichtigsten elektronisch erfassten Betriebswerte der beiden Versuchstraktoren .....	31
Tabelle 4:	Technische Daten von Gasanalysesystem A (GA A) .....	34
Tabelle 5:	Technische Daten von Gasanalysesystem B (GA B) .....	35
Tabelle 6:	Technische Daten von Gasanalysesystem C (GA C) .....	35
Tabelle 7:	C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 .....	36
Tabelle 8:	Eingestellte Drehzahlen, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren .....	38
Tabelle 9:	Kraftstoffparameter, Grenzwerte und angewandte Prüfverfahren nach DIN 51605 und DIN SPEC 51623.....	44
Tabelle 10:	Weitere analysierte Parameter und angewendete Prüfverfahren .....	45
Tabelle 11:	Ausgewählte Untersuchungsparameter zur Beurteilung der Motorölqualität und verwendete Analyseverfahren.....	46
Tabelle 12:	Analyseergebnisse der verschiedenen Pflanzenöle für Prüfstandsmessungen im Vergleich zur Norm DIN 51605 für Rapsölkraftstoff sowie zur Vornorm DIN SPEC 51623 für Pflanzenölkraftstoffe.....	48
Tabelle 13:	Weitere wichtige, jedoch nicht in einer Kraftstoffnorm reglementierte kraftstoffrelevante Kenngrößen .....	49
Tabelle 14:	Ergebnisse der gewichteten NRSC-Emissionsmessungen für verschiedene Pflanzenöle und Dieselmotoren .....	59
Tabelle 15:	Ergebnisse der gewichteten NRTC-Emissionsmessungen für verschiedene Pflanzenöle und Dieselmotoren .....	61



# 1 Einleitung

Mit 57 % Treibhausgasminderung weist der Einsatz von Rapsölkraftstoff einen der höchsten Standardwerte für derzeit verfügbare Biokraftstoffe aus heimischen Rohstoffen auf. Dezentral erzeugter Rapsölkraftstoff kann diesen Wert dabei noch deutlich übertreffen. Die Erzeugung von Rapsölkraftstoff aus inländischen Rohstoffen ist nachhaltig und erfüllt die Kriterien der EU-Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Die Produktions- und Treibhausgasvermeidungskosten für Pflanzenölkraftstoff sind dabei gering. Somit lässt sich der „Carbon Foot Print“ landwirtschaftlicher Erzeugnisse durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren effizient verringern.

Rapsölkraftstoff leistet aufgrund seiner hohen biologischen Abbaubarkeit und geringen Ökotoxizität einen Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz. Er eignet sich daher besonders für mobile Nischenanwendungen in der Land- und Forstwirtschaft.

Bei der Herstellung von Rapsölkraftstoff wird für Teller und Tank produziert. Das heimische Eiweißfuttermittel Rapspresskuchen, das zu rund 60 % bei der Ölsaatenverarbeitung anfällt, ist bei Viehhaltern begehrt. Dessen Erzeugung ist ein wichtiger Beitrag für die nationale Eiweißstrategie. Nicht zuletzt fördert die dezentrale Kraftstoffbereitstellung den Erhalt und die Schaffung von Arbeitsplätzen, erhöht die Wertschöpfung im ländlichen Raum, nützt der Versorgungssicherheit mit Kraftstoffen und trägt zur Preisstabilisierung am Kraftstoffmarkt bei.

Die aktuelle nationale Agrardieselregelung lässt zwar wenig Spielraum für eine vermehrte Nutzung von Pflanzenölkraftstoff in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen, die Erforschung dieses Kraftstoffpfads muss aber dennoch vorangetrieben werden, da sich sowohl der Mineralölpreis und die Verfügbarkeit fossiler Kraftstoffe als auch die politischen Rahmenbedingungen schnell ändern können.

Die Motivation für die Durchführung dieses Vorhabens besteht in der nach Stand der Technik Anfang 2012 noch nicht vollständig erreichten Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe Final Tier 4/Abgasstufe IV. Dies verlangt eine Reihe von Optimierungen:

- Senkung des Kraftstoffverbrauchs,
- Erhöhung der Leistung bei Betrieb mit Pflanzenöl,
- Verlängerung der Motorölwechselintervalle,
- Verlängerung der Standzeit des Dieselpartikelfilters (DPF),
- Optimierung des Selective Catalytic Reduction (SCR) Systems,
- Verbesserung des Umgangs mit AdBlue®.

Das Gesamtziel des Vorhabens ist deshalb die Demonstration eines optimierten, voll-funktionsfähigen Abgasstufe-IV-Pflanzenöltraktors (US Final Tier 4) unter realen Einsatzbedingungen mit verschiedenen Pflanzenölen als Kraftstoff.

Damit könnte ein wichtiger Schritt in Richtung Serienproduktion von Abgasstufe-IV-Pflanzenöltraktoren gegangen und die für den Betrieb und Service notwendigen Prozeduren definiert werden.

Dies würde es zunächst vor allem größeren landwirtschaftlichen Betrieben (> 100 ha) ermöglichen, ihre Traktoren in Deutschland mit Pflanzenöl statt mit Diesel ökologisch und wirtschaftlich effizient zu betreiben. Damit würde ein Beitrag zur Diversifizierung der Kraftstoffe, zur Bekämpfung des Klimawandels und zur Steigerung der Wertschöpfung im ländlichen Raum geleistet werden. Dabei können in Deutschland vor allem Rapsölkraftstoff und dann zunehmend auch andere Pflanzenöle zum Einsatz kommen.

Schließlich trägt das Vorhaben dazu bei, dass ein innovatives Produkt, das einen Beitrag zur Lösung der Probleme der Rohstoffknappheit und steigender Kohlendioxidemissionen bietet, in Deutschland produziert und weltweit vermarktet werden kann. Außerhalb Deutschlands ist davon auszugehen, dass neben Rapsöl vor allem Sonnenblumenöl, Sojaöl und Baumwollsaatöl sowie in selteneren Fällen Jatrophaöl als Kraftstoff verwendet werden.



## 2 Aufgabenstellung

Ziele und Aufgaben des Projekts „PraxTrak“ sind Entwicklung, Erprobung und Demonstration eines voll funktionsfähigen und praxistauglichen Traktors mit einem Motorkonzept, das zum einen die Verwendung verschiedener Pflanzenölkraftstoffe nach DIN 51605 (Rapsöl) beziehungsweise DIN SPEC 51623 (Pflanzenöle und Pflanzenölmischungen) ermöglicht und zum anderen, dass mit diesen Kraftstoffen der Abgasemissionsrichtlinie EU Abgasstufe IV (bzw. US Final Tier 4) entsprochen wird. Die Arbeiten wurden in drei verbundenen Teilvorhaben durchgeführt.

Im Folgenden wird die Aufgabenstellung nach den drei Teilvorhaben gegliedert dargestellt. Die Bearbeitung der Teilvorhaben erfolgte jedoch in enger Verzahnung, sodass die Darstellung der Ergebnisse in Kapitel 5 thematisch und nicht nach Teilvorhaben strukturiert ist.

### 2.1 TV1: Modifikation des Final-Tier-4-Traktormotors

Ziele des von John Deere (JD) durchgeführten Teilvorhabens 1 (TV1) sind die Anpassung und Kalibrierung der Motorsoftware. Weiterhin stellt JD die Versuchsträger inklusive der benötigten Ersatzteile bereit. Dies sind insbesondere zwei Motoren für die Untersuchung grundlegender Fragestellungen (z. B. Rußbelastung und Abbrandverhalten verschiedener Pflanzenöle) und die Technologieentwicklung am Prüfstand der TU Kaiserslautern (vgl. TV3) sowie ein Traktor zur Prüfung der Praxistauglichkeit im Feldtest (vgl. TV2). Die Aufgaben sind im Einzelnen:

- Durchführung von Untersuchungen am Motorprüfstand, Erstellen von Testplänen, Entwicklung der Motorsteuerungssoftware zur Erreichung der oben genannten Ziele (Regeneration, Optimierung bezüglich Kraftstoffverbrauch),
- Entwicklung eines neuen Abgasnachbehandlungskonzepts und Bau eines Prototypen, der auf die Verbrennungseigenschaften von Pflanzenölkraftstoffen abgestimmt ist und gleichzeitig einen Vorteil bei den Herstellungskosten (z. B. durch Wegfall einzelner Komponenten) oder den Betriebskosten, insbesondere dem Kraftstoffverbrauch verspricht,
- Erstellung einer Folgenabschätzung (Impact Assessment; im Unterauftrag durch B.A.U.M. Consult).

Die Aufgaben von JD umfassen zudem die Koordination des Verbundvorhabens und verschiedene Tätigkeiten zur Ergebnisverbreitung.

### 2.2 TV2: Kraftstoffanalyse, stationäre Emissionsmessungen und Feldtests

Das Teilvorhaben 2 (TV2) wird durch das Technologie- und Förderzentrum (TFZ) in Straubing durchgeführt. Die Aufgaben im Projekt umfassen Untersuchungen zur Leis-

tung, zum Kraftstoffverbrauch und zu den Emissionen am TFZ-eigenen Traktorenprüfstand. Weiterhin werden die Praxistauglichkeit und die Störanfälligkeit von Traktoren im Pflanzenölbetrieb beim Einsatz unter realen Bedingungen in verschiedenen landwirtschaftlichen Betrieben im Zuständigkeitsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) ermittelt. Die Untersuchung der Kraftstoffe hinsichtlich kraftstoffrelevanter Eigenschaften erfolgt zum Teil im eigenen Analyzelabor des TFZ, zum Teil extern durch die ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH in Neusäß.

Die Aufgaben des TFZ im Vorhaben umfassen im Einzelnen folgende Arbeitsschritte:

### **Charakterisierung der Pflanzenöle hinsichtlich kraftstoffrelevanter Eigenschaften**

- Analyse von Parametern gemäß den Kraftstoffqualitätsnormen DIN 51605 und DIN SPEC 51623 sowie zusätzlicher Eigenschaften der folgenden eingesetzten Öle: Rapsöl, Sonnenblumenöl, Sojaöl, Leindotteröl und eine HO-Variante von Sonnenblumenöl,
- Auswertung der Daten, Ergebnispräsentation, Berichterstellung.

### **Untersuchungen am Traktorenprüfstand**

- Prüfstandsvorbereitungen (Integration des Versuchstraktors in den Prüfstand, Beschaffung von Prüfkraftstoffen, Filtern und Kalibriergasen, Kalibrierung der Messgeräte etc.)
- Leistungsmessungen am Traktor (u. a. Untersuchung des Einflusses der Kraftstoffe), Erfassung des Zustands des Abgasnachbehandlungssystems (AGN-System) (Rußpartikelfilterbeladung anhand von Drucküberwachung) und gegebenenfalls Durchführung von Optimierungsmaßnahmen
- stationäre Emissionsmessungen im Roh-/Reingas am Traktor, dabei Ermittlung von:
  - Partikeln (Gesamtmasse im Reingas)
  - gesetzlich limitierten gasförmigen Emissionen: Kohlenwasserstoff-Gesamtgehalt ( $\text{HC}_{\text{gesamt}}$ ), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ , bestehend aus NO und  $\text{NO}_2$ )
  - nicht gesetzlich limitierten Emissionen mittels Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR): Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Formaldehyd ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), Acetaldehyd ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ) und weiteren, soweit nachweisbar
  - Umsetzungsraten gasförmiger Bestandteile des AGN-Systems
- Berechnung der Treibhausgasemissionen (THG)
- Auswertung der Daten, Ergebnispräsentation, Berichterstellung

## Felderprobung der Traktoren

- Feldtestplanung und -vorbereitung sowie Beschaffungen (Kraftstoff- und Betriebsmittelversorgung, Kraftstoff- und Motorölanalytik, Betriebstagebuch, kontinuierliche Traktorbetriebsdatenerfassung, Datentransfer etc.)
- Anbringung von Messstellen und Sensoren am Traktor
- Installation des nötigen Datenaufzeichnungs- und -übertragungssystems
- Betreuung des Feldbetriebs des Traktors (Qualitätsüberwachung von Kraftstoff und Motoröl, Kontrolle und Auswertung des Betriebstagebuchs sowie der kontinuierlich erfassten Betriebsdaten, Störfalldokumentation und -analyse)
- Auswertung der Daten, Ergebnispräsentation, Berichterstellung

### 2.3 TV3: Untersuchungen am dynamischen Motorenprüfstand der TU Kaiserslautern

Ziel des Teilvorhabens 3 (TV3) ist, den Betrieb von Motoren unter Einhaltung der Emissionsstufe Final Tier 4/Abgasstufe IV mit Pflanzenöl herzustellen und zu demonstrieren. Dies erfolgt in folgenden Arbeitsschritten:

- Aufbau eines Prüflings (angepasster Dieselmotor) auf einem dynamischen Motorprüfstand,
- Integration der Messtechnik zur Erfassung und Beschreibung der Zustandsgrößen des Motors,
- Vergleich der Motorcharakteristiken im Diesel- und Rapsölbetrieb,
- Optimierung der AdBlue<sup>®</sup>-Dosierung zur Reduktion der Stickstoffoxidemissionen,
- Durchführung des Non-Road-Stationary-Tests (NRSC) und des Non-Road-Transient-Tests (NRTC) zur Messung der gesetzlich limitierten Emissionen und zur Demonstration der Praxistauglichkeit des angepassten Motors mit Abgasnachbehandlungssystem im Betrieb mit Rapsöl,
- Prüfung der Übertragbarkeit des für Rapsöl optimierten Gesamtsystems auf weitere Pflanzenöle.



### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

#### 3.1 Pflanzenöлтаugliche Traktoren

Abhängig von der Emissionsstufe und der Motorentechnik sind Modifikationen eines mit Dieselkraftstoff betriebenen Standardtraktors notwendig, um diesen an den Betrieb mit Pflanzenöl anzupassen. Verschiedene Möglichkeiten der Umrüstung beschreiben beispielsweise EMBERGER et al. [18] oder THUNEKE et al. [36].

Im 2ndVegOil-Projekt ([www.2ndvegoil.eu](http://www.2ndvegoil.eu)) wurden 15 John-Deere-Traktoren der Abgasstufe IIIA und ein Vorserientraktor der Abgasstufe IIIB an den Betrieb mit Pflanzenöl angepasst. Dazu wurden die Traktoren mit einer internen Kaltstartvorwärmereinrichtung ausgestattet und das Kraftstoffversorgungssystem sowie die Motorsoftware an die physikalischen Eigenschaften des Pflanzenölkraftstoffs angepasst. Im Laufe des Projekts wurde das Abgasnachbehandlungssystem von vier Traktoren der Abgasstufe IIIA durch ein System zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR-System) erweitert, sodass mit diesen Traktoren auch die Grenzwerte der Abgasstufe IIIB eingehalten werden konnten. Das Abgasnachbehandlungssystem des Traktors der Abgasstufe IIIB wurde ebenfalls weiterentwickelt mit dem Ziel, testweise auch die Grenzwerte der Abgasstufe IV einzuhalten [35]. Auf diesem Projekt baut das hier beschriebene Vorhaben auf.

Ein pflanzenöлтаuglicher Traktor oder ein sonstiges Fahrzeug, das dauerhaft die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff einhält, war bis zum Abschluss des Projekts „PraxTrak“ nicht bekannt.

#### 3.2 Pflanzenölkraftstoff

Die Qualität von Rapsölkraftstoff ist in der Norm DIN 51605 [7] und die von Pflanzenölkraftstoff allgemein in der Vornorm DIN SPEC 51623 [8] festgelegt.

Durch die Verwendung qualitativ hochwertiger, normkonformer Kraftstoffe in pflanzenöлтаuglichen Motoren kann deren Störanfälligkeit minimiert werden. Im 2ndVegOil-Projekt wurden 24.000 Motoren-Betriebsstunden an 16 verschiedenen Traktoren ohne auf die Art des Kraftstoffs zurückzuführende Schäden erreicht. Kleinere Störungen konnten jedoch auf ungenügende Ölqualität, z. B. infolge unsachgemäßer Kraftstofflagerung zurückgeführt werden. Ein besonderes Augenmerk wurde auf möglichst geringe Gehalte der Öle an Ablagerungs- und aschebildenden Elementen wie Phosphor (P), Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) gelegt, da diese die Wirksamkeit von Abgaskatalysatoren verschlechtern können. Auch können deren Aschen zu einer reduzierten Standzeit von Partikelfiltern führen und Ablagerungen im Kraftstoffeinspritzsystem begünstigen. Die Konzentration von P, Ca und Mg ist deshalb in den relevanten Biokraftstoffnormen begrenzt.

Der Standardwert für die Treibhausgaseinsparung von Rapsöl nach EU-Richtlinie 2009/28/EG beträgt 57 % gegenüber fossilem Dieselkraftstoff. Dabei wird reines Rapsöl aus zentraler, industrieller Produktion bewertet. Im Projekt ExpResBio wird derzeit durch das TFZ regional- und verfahrensspezifisch die Treibhausgaseinsparung dezentral

produzierten Rapsölkraftstoffs detailliert untersucht. Erste Ergebnisse liefern beispielweise ENGELMANN et al. (2014) [19]. Sie weisen darauf hin, dass Pflanzenölkraftstoffe aus regionaler Produktion einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von bis zu 80 % verglichen mit Dieselmotoren leisten können.

### 3.3 Emissionsminderung in modernen Dieselmotoren

In Abbildung 1 ist die Entwicklung der Emissionsgrenzwerte in der Abgasgesetzgebung im Non-Road-Sektor dargestellt. Innerhalb nur weniger Jahre wurden die zulässigen Werte vor allem für Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und die Partikelgesamtmasse (PM) mehrfach deutlich gesenkt. Um die Anforderungen hinsichtlich der Partikelemissionen ab Abgasstufe IIIB und der NO<sub>x</sub>-Emissionen ab Abgasstufe IV zu erfüllen, sind die Fortentwicklung des Motorsystems sowie nach heutigem Wissen der Einsatz von Abgasnachbehandlungstechnologien, wie Partikelfilter oder Entstickungs- und Oxidationskatalysatoren, erforderlich.

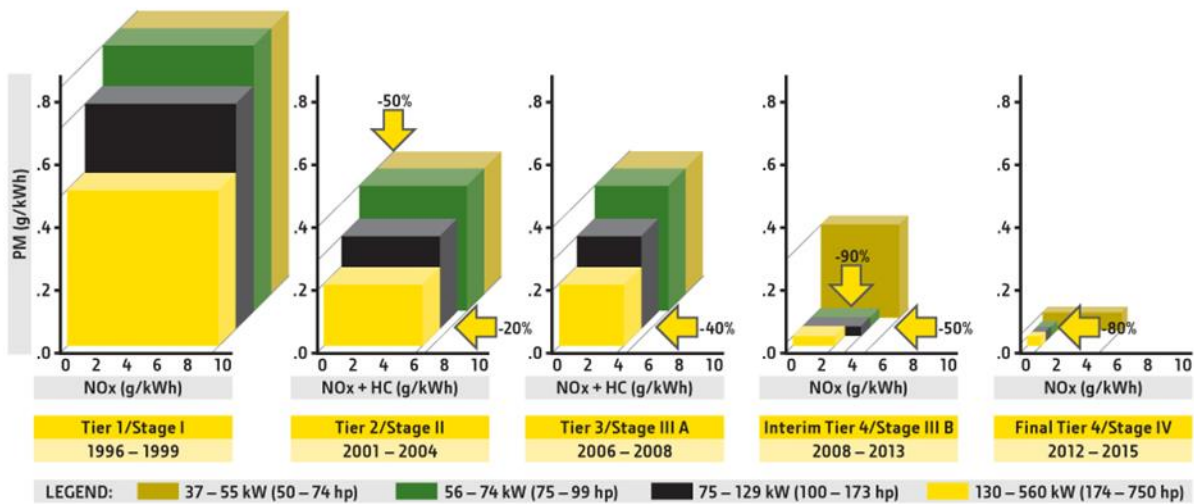


Abbildung 1: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für Traktoren (Quelle: Deere & Company [4])

#### 3.3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Landwirtschaftliche Traktoren sind der Non-Road-Fahrzeugkategorie zugeordnet und es gilt die Richtlinie 2000/25/EG [22]. Das darin vorgeschriebene Prüfverfahren beruht auf der internationalen Prüfnorm ISO 8178-4 [5]. Die Grenzwerte sind entsprechend der Richtlinie 97/68/EG [21] festgelegt, zuletzt geändert durch Richtlinie 2010/26/EU. In Tabelle 1 sind die Grenzwerte für die limitierten Emissionskomponenten je nach Motorleistung mit dem Jahr des Inkrafttretens dargestellt.

Von der Europäischen Kommission wurde am 24. September 2014 die Einführung der Abgasstufe V für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte

angekündigt. Hier ist eine weitere Reduzierung des Grenzwerts für die Partikelmasse und auch eine Limitierung der Partikelanzahl vorgesehen [23].

*Tabelle 1: EU-Non-Road-Richtlinie 97/68/EG (geändert durch 2004/26/EG) für mobile Maschinen und Geräte – Dieselmotoren (Quelle: VDMA [37])*

Leistung in kW	NO <sub>x</sub> in g/kWh	HC in g/kWh	CO in g/kWh	Partikel in g/kWh	Datum*
<b>Abgasstufe I</b>					
37 ≤ PN < 75	9,2	1,3	6,5	0,85	Apr 1999
75 ≤ PN < 130	9,2	1,3	5,0	0,70	1999
130 ≤ PN ≤ 560	9,2	1,3	5,0	0,54	1999
<b>Abgasstufe II</b>					
18 ≤ PN < 37	8,0	1,5	5,5	0,8	2001
37 ≤ PN < 75	7,0	1,3	5,0	0,4	2004
75 ≤ PN < 130	6,0	1,0	5,0	0,3	2003
130 ≤ PN ≤ 560	6,0	1,0	3,5	0,2	2002
<b>Abgasstufe IIIA</b>					
19 ≤ PN < 37	7,5 (NO <sub>x</sub> + HC)		5,5	0,6	2007
37 ≤ PN < 75	4,7 (NO <sub>x</sub> + HC)		5,0	0,4	2008
75 ≤ PN < 130	4,0 (NO <sub>x</sub> + HC)		5,0	0,3	2007
130 ≤ PN ≤ 560	4,0 (NO <sub>x</sub> + HC)		3,5	0,2	2006
<b>Abgasstufe IIIB</b>					
37 ≤ PN < 56	4,7 (NO <sub>x</sub> + HC)		5,0	0,025	2013
56 ≤ PN < 75	3,3	0,19	5,0	0,025	2012
75 ≤ PN < 130	3,3	0,19	5,0	0,025	2012
130 ≤ PN ≤ 560	2,0	0,19	3,5	0,025	2011
<b>Abgasstufe IV</b>					
56 ≤ PN < 130	0,4	0,19	5,0	0,025	Okt 2014
130 ≤ PN ≤ 560	0,4	0,19	3,5	0,025	2014

\* Datum für das Inverkehrbringen, Typgenehmigung ein Jahr vorher (außer für 130 ≤ PN ≤ 560)

### 3.3.2 Innermotorische Maßnahmen zur Emissionsreduzierung

Die Einführung neuer Emissionsstandards macht es notwendig, Motoren hinsichtlich ihrer Schadstoffemissionen zu optimieren. Mögliche innermotorische Maßnahmen sind eine Optimierung des Brennverfahrens, der Dieseleinspritzung und der Abgasrückführung. Durch die Anwendung dieser Maßnahmen sind moderne, elektronisch gesteuerte Dieselmotoren mit Common-Rail-Technik in der Lage, aktuelle Emissionsgrenzwerte bis

etwa Abgasstufe IIIA einzuhalten. Noch strengere Grenzwerte erfordern jedoch zusätzliche Verfahren zur Abgasnachbehandlung [29].

### 3.3.3 Abgasnachbehandlung

Abgasnachbehandlungssysteme können aus verschiedenen Komponenten, wie Oxidationskatalysator, Entstickungskatalysator und Partikelfilter, bestehen. Die Auswahl der einzelnen Komponenten erfolgt durch eine Vielzahl von Randbedingungen, wie z. B. Anforderungen des Gesetzgebers, Betriebsbedingungen, Wartungsintensität oder Lebensdauer. Auch aufgrund von Wechselwirkungen zwischen den Komponenten müssen Abgasnachbehandlungssysteme für jeden Einsatzfall individuell ausgelegt werden. Bereits im 2ndVegOil-Projekt wurde eine Recherche über den Stand der Technik von Abgasnachbehandlungskomponenten und deren Funktion mit Biokraftstoffen durchgeführt. Ein detaillierter Bericht dazu ist unter [www.2ndvegoil.eu](http://www.2ndvegoil.eu) abrufbar. Im Folgenden werden deshalb die einzelnen, für Traktormotoren relevanten Komponenten von Abgasnachbehandlungssystemen nur kurz vorgestellt.

#### Oxidationskatalysator

Die primäre Aufgabe des Oxidationskatalysators ist die Senkung der CO- und HC-Emissionen. Bei modernen Abgasnachbehandlungssystemen erfüllt der Oxidationskatalysator jedoch auch weitere Funktionen. Hierzu zählen Oxidation flüchtiger Partikelbestandteile zur Reduktion der Partikelemissionen, Verbesserung des Verhältnisses von Stickstoffdioxid zu Stickstoffmonoxid zur Förderung der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) der Stickoxide, Freisetzung von Wärme durch bewusste Zufuhr von CO und nicht verbrannten Kohlenwasserstoffen zur Unterstützung der Partikelfilterregeneration. Zudem ist es durch den Einsatz geeigneter Beschichtungen möglich, auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen in geringem Umfang zu reduzieren [28].

Oxidationskatalysatoren setzen die Energieschwelle für die Einleitung chemischer Reaktionen (Oxidation und Reduktion) herab und erhöhen die Reaktionsgeschwindigkeit [12]. Dem Beginn solcher Reaktionen geht die Anlagerung der oxidierbaren Stoffe (CO, HC) und des Sauerstoffs an der katalytisch aktiven Schicht voraus. Dadurch wird die Aktivierungsenergie der chemischen Reaktion vermindert. Im Anschluss an die katalytische Umsetzung verlassen die Endprodukte, bei CO und HC sind dies H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub>, wieder den Katalysator, der selbst dabei nicht verändert wird.

Die Light-off-Temperatur (Erreichen von etwa 50 % Konversionsrate) liegt je nach Katalysatorzusammensetzung, Abgaszusammensetzung und Strömungsgeschwindigkeit bei ca. 150 bis 200 °C. Bei ca. 230 °C erreicht der Umsatz mehr als 90 %. Durch Oxidation an Partikeln angelagerter Kohlenwasserstoffe kann auch die Partikelmasse um 15 bis 30 % reduziert werden [32].

Oxidationskatalysatoren sind aus einem Trägermaterial, einer Zwischenschicht („Washcoat“) und einer katalytisch aktiven Beschichtung aufgebaut. Das Trägermaterial besteht meist aus einem keramischen oder metallischen Wabenkörper, durch den das



Abgas geleitet wird. Das Trägermaterial ist mit einem oxidischen Washcoat aus Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Ceroxid ( $\text{CeO}_2$ ) oder Zirkonoxid ( $\text{ZrO}_2$ ) überzogen und weist eine hohe spezifische Oberfläche auf. Auf dem Washcoat ist die katalytisch aktive Schicht – zu meist bestehend aus Platin und Palladium – aufgebracht, welche die Oxidation der Schadstoffe einleitet [28][32].

### Entstickungskatalysator

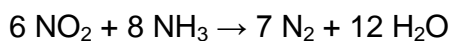
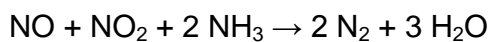
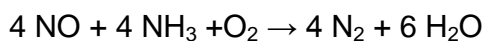
Der Entstickungskatalysator – auch Denox-Katalysator genannt – stellt ein wirkungsvolles Verfahren zur Reduzierung von Stickstoffoxiden im Abgas dar [28]. Zwei Katalysatorverfahren zur Entstickung von Dieselmotorabgas werden derzeit primär angewendet:

NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysatoren und

SCR-Katalysatoren (*Selective Catalytic Reduction*)

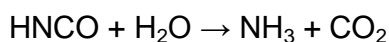
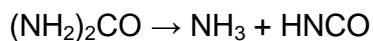
Im Bereich der Nutzfahrzeuge erfolgt die Entstickung bevorzugt mit SCR-Systemen [32]. Daher wird im Folgenden nur dieses System kurz erläutert.

Beim SCR-Katalysator wird NO<sub>x</sub> mit dem Reduktionsmittel Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) in einem geeigneten Katalysator zu Stickstoff reduziert [28]. Hierbei laufen im Wesentlichen folgende Reaktionen ab:



Die für die meisten Betriebszustände dominierenden Reaktionen sind die ersten beiden. Bei Temperaturen von unter ca. 300 °C verläuft die Reaktion überwiegend nach der zweiten Reaktionsgleichung. Zur Optimierung des Umsatzes ist ein NO<sub>2</sub>/NO-Verhältnis von 1 anzustreben. Dies kann durch einen vorgeschalteten Oxidationskatalysator erreicht werden.

Die Bereitstellung von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) erfolgt mittels folgender Reaktionen aus einer wässrigen Lösung mit 32,5 % Harnstoff (z. B. AdBlue<sup>®</sup> nach ISO 22241/DIN 70070/AUS32 [9]):



Bei niedrigen Temperaturen können in einer Nebenreaktion Ablagerungen entstehen. Daher sind Temperaturen von über 250 °C und geeignete Katalysatoren notwendig. Während sich für die SCR-Reaktionen bereits bei 180 °C gute Umsätze mit Ammoniak erzielen lassen, sind aufgrund der vorgelagerten Ammoniakherzeugung aus der Harnstofflösung höhere Temperaturen für dauerhaft gute Umsätze erforderlich [28][32].

Bei einer Überdosierung des Reduktionsmittels (dies kann lokal auch durch eine inhomogene Verteilung auftreten) wird dieses nicht mit NO<sub>x</sub> umgesetzt, sondern entweicht

unerwünscht, ohne reagiert zu haben (Ammoniak-Schlupf). Durch die Anordnung eines Oxidationskatalysators (Sperrkat) nach dem SCR-Katalysator kann überschüssiges Ammoniak weiter zu Stickstoff und Wasser oxidiert werden [28][32].

Die optimale Auslegung von SCR-Katalysatorsystemen zur Erfüllung der aktuellen und zukünftigen Emissionsanforderungen ist derzeit Bestandteil intensiver Forschungsarbeiten.

### Partikelfiltersysteme

Partikelfiltersysteme bestehen aus dem Filtermedium, der Regenerationseinrichtung sowie einer Steuerungs- und Kontrolleinheit zur Funktionsüberwachung [1]. Zur Abscheidung der Dieselpartikel, die überwiegend einen Durchmesser von  $< 100$  nm aufweisen, eignet sich für ausreichend große Abscheidewirkungsgrade nur die Filtration [28]. Da sich mit zunehmender Menge gefilterten Abgases auch der Strömungswiderstand über den Filter erhöht, ist es erforderlich, den Filter in bestimmten Intervallen zu regenerieren.

Partikelfilter können nach Bauart (geschlossen und offen) unterschieden werden [29]. Bei geschlossenen Partikelfiltern muss das gesamte Abgas durch die Filterwände hindurchströmen. Bei zunehmender Beladung lagern sich Partikel an den Wänden an und es kommt zu einer Erhöhung des Abgasgedrucks. Wird der Filter nicht rechtzeitig regeneriert, kann der Motorenbetrieb negativ beeinflusst werden [28]. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau eines geschlossenen keramischen Partikelfilters. Geschlossene keramische Filter können mehr als 95 % der Partikel zurückhalten.

Bei einem offenen Partikelfilter strömt nur ein Teil des Abgases durch die Filterwand. Durch in die Filterkanäle hineinragende Taschen wird das Abgas umgelenkt und in Richtung der Filterwand beschleunigt. Bei geringer Filterbeladung tritt das Abgas durch die Wand hindurch und die Partikel werden zurückgehalten. Mit zunehmender Beladung und dadurch steigendem Durchtrittswiderstand nimmt der Anteil unfiltriert passierenden Abgases zu. Offene Partikelfilter erreichen je nach Einsatzbedingungen Abscheidegrade zwischen etwa 30 und 70 % [29].

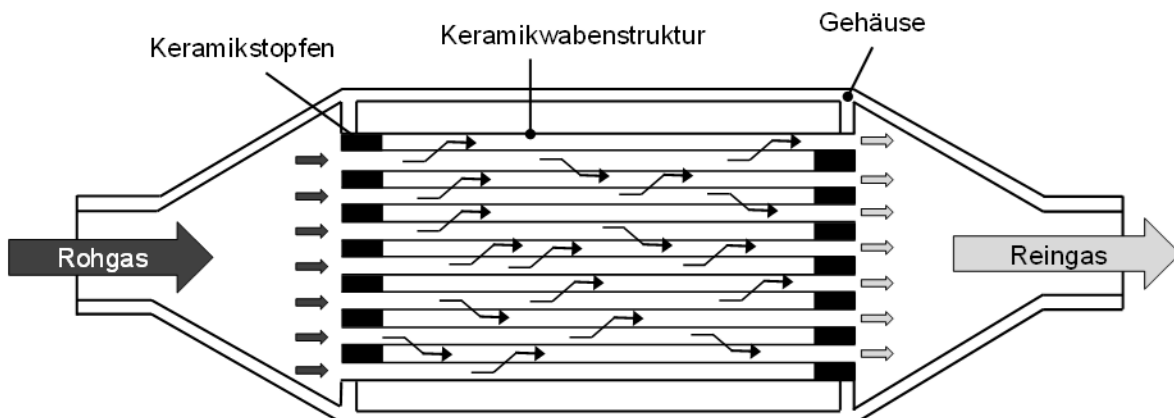


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines geschlossenen keramischen Partikelfilters

Bei fortgesetzter Abscheidung von Ruß im Filter akkumuliert dieser dort. Kann er jedoch durch ausreichend im Abgasstrom vorhandenes Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) kontinuierlich mit einer Reaktionsrate, die größer ist als die Rußeintragsrate, oxidiert werden, nimmt die Rußbelastung mit zunehmender Betriebsdauer des Filters nicht zu. Dieser Mechanismus wird auch passive Regeneration genannt. Erreicht die Rußbelastung jedoch einen bestimmten Grenzwert, muss der Ruß aus dem Filter entfernt werden. Der Grenzwert ist durch den maximal zulässigen Gegendruck des Systems und/oder durch die Materialkennwerte des verwendeten Filtermaterials im Falle der Temperaturbelastung bei Oxidation mit Sauerstoff und die bei der Reaktionsführung im Filtermaterial entstehenden hohen Temperaturen gegeben [14].

Die diskontinuierliche Rußentfernung aus dem Partikelfilter kann durch Oxidation des Rußes mit Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) bei Temperaturen bis  $400\text{ °C}$  oder durch Oxidation mit Sauerstoff bei Temperaturen  $> 500\text{ °C}$  erfolgen. Im Falle der Oxidation des Rußes mit Sauerstoff kann die Rußzündtemperatur durch Zugabe von Additiven gesenkt oder die Abgastemperatur beispielsweise durch Sekundärkraftstoffdosierung erhöht werden [14].

Aufgrund der Emissionscharakteristik und des Einsatzprofils von Nutzfahrzeugmotoren haben sich Systeme durchgesetzt, die auf einer kontinuierlichen Rußentfernung mit  $\text{NO}_2$  beruhen und zusätzlich über die Möglichkeit einer diskontinuierlichen Rußentfernung verfügen. Für die diskontinuierliche Rußentfernung sind sowohl Systeme im Markt, bei denen diskontinuierlich die Oxidation mit  $\text{NO}_2$  in einem Temperaturbereich bis  $400\text{ °C}$  stattfindet, als auch Systeme, bei denen der Ruß mit Sauerstoff bei Temperaturen oberhalb  $550\text{ °C}$  oxidiert wird, verfügbar [14].

In der Nutzfahrzeuganwendung konnten sich Systeme, bei denen die Rußzündtemperatur durch Zugabe metall-organischer Additive reduziert wird, aufgrund des mit der Anwendung verbundenen hohen Aschemengenarfs über die Laufzeit nicht durchsetzen. Ebenso gelang dem ausgiebig erprobten Wickelfiltersystem mit Acetylaceton-Eindosierung kein Durchbruch zur serienmäßigen Anwendung im Nutzfahrzeug [14].

Pflanzenölrückstand kann im Gegensatz zu Dieselmückstand bereits bei geringeren Abgastemperaturen oxidiert werden [23], dies begünstigt die Umsetzbarkeit einer rein passiven Partikelfilterregenerationsstrategie.



## 4 Material und Methoden

### 4.1 Traktoren

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Traktoren des Typs John Deere 6210R untersucht. Aufgrund des erhöhten Entwicklungsaufwands für das eigens entwickelte pflanzenölaugliche Abgasnachbehandlungssystem kam es am Anfang des Projekts zu einer verzögerten Bereitstellung des Abgasstufe-IV-Traktors. Aus diesem Grund wurde der Feldtest mit einem ansonsten baugleichen Abgasstufe-IIIB-Traktor mit Serienabgasnachbehandlungssystem begonnen, um möglichst viele Daten im Feldtest zu sammeln und das Langzeitverhalten des Partikelfilters zu beobachten. In Tabelle 2 sind die wichtigsten technischen Daten der beiden Traktoren aufgeführt.

Tabelle 2: Technische Daten der Versuchstraktoren

	Abgasstufe-IIIB-Traktor	Abgasstufe-IV-Traktor
Typ	John Deere 6210R	John Deere 6210R
Motor	John Deere Power Systems PowerTech PVX	John Deere Power Systems PowerTech PVX
Zylinder	6	6
Hubraum	6,8 l	6,8 l
Leistung	154 kW/210 PS	154 kW/210 PS
Turbolader	mit variabler Geometrie	mit variabler Geometrie
Abgasrückführung	extern, gekühlt	extern, gekühlt
Abgasnachbehandlung	Dieseloxydationskatalysator, Dieselpartikelfilter	Dieseloxydationskatalysator, Dieselpartikelfilter, SCR-Katalysator
Abgasstufe	IIIB	IV
Einspritzsystem	Common-Rail	Common-Rail
Getriebe	AutoQuad Plus	AutoPowr

Beide Traktoren mussten zunächst auf den Betrieb mit Pflanzenöl umgerüstet werden. Hierbei wurden Veränderungen am Niederdruckkraftstoffsystem und an der Motorsoftware vorgenommen sowie eine Vorwärmeinrichtung für die Kraftstoffinjektoren installiert.

Bei dem Abgasstufe-IV-Traktor handelt es sich ebenfalls um einen Abgasstufe-IIIB-Traktor, dessen Serienabgasnachbehandlungssystem komplett ausgebaut und durch ein vollkommen neu entwickeltes System ersetzt wurde. Das ursprüngliche Abgasnachbehandlungssystem besteht lediglich aus einem Dieseloxydationskatalysator (DOC) und einem Dieselpartikelfilter (DPF). Der Abgasstufe-IV-Traktor erhielt zusätzlich ein System zur selektiven katalytischen Reduktion von Stickoxiden (SCR).

Beim Abgasstufe-IIIB-Traktor wurde die aktive Partikelfilterregeneration komplett deaktiviert, da die serienmäßige Dosiereinrichtung nicht für Pflanzenölkraftstoff geeignet ist. Für das prototypische Abgasnachbehandlungssystem des Abgasstufe-IV-Traktors ist keine aktive Regeneration vorgesehen. Bei beiden Systemen wurde eine ausreichende passive Partikelfilterregeneration im Pflanzenölbetrieb erwartet.

Der Feldtest des Abgasstufe-IIIB-Traktors wurde zu Beginn des Projekts auf der Versuchsstation Grub durchgeführt. Nachdem der Abgasstufe-IV-Traktor im Herbst 2013 verfügbar war, ersetzte er den Abgasstufe-IIIB-Traktor auf der Versuchsstation Grub, der dann auf dem LVFZ Achselschwang weiter erprobt wurde. Abbildung 3 zeigt den Abgasstufe-IIIB-Traktor im Feldeinsatz auf dem LVFZ Achselschwang und Abbildung 4 den Abgasstufe-IV-Traktor auf der Versuchsstation Grub.



*Abbildung 3: Abgasstufe-IIIB-Traktor im Feldeinsatz auf dem LVFZ Achselschwang*



Abbildung 4: Abgasstufe-IV-Traktor im Feldeinsatz auf der Versuchsstation Grub

## 4.2 Betriebsdatenerfassung

Um die Betriebsdaten der Traktoren zu erfassen, deren Einsätze möglichst genau zu dokumentieren und mögliche Störungen nachvollziehen zu können, wurde zum einen ein Betriebstagebuch bereitgestellt und zum anderen auch ein elektronisches Datenerfassungssystem installiert.

### 4.2.1 Betriebstagebuch

Von den Betreibern der Traktoren wurde ein Betriebstagebuch geführt, um die mit den Traktoren durchgeführten Arbeiten zu dokumentieren und Daten zu Wartung und gegebenenfalls auftretenden Schäden zu erheben. Das Betriebstagebuch basiert auf dem im Rahmen des EU-Projekts 2ndVegOil verwendeten Tagebuch [30] und wurde in bestimmten Bereichen erweitert.

In den Betriebstagebüchern werden folgende Daten täglich dokumentiert:

- Betriebsstunden,
- Motorölstand, Motorölnachfüllmenge und Motorölwechsel,
- durchgeführte Arbeiten und Einstellungen der Arbeitsgeräte,
- Startverhalten der Traktoren,

- Tankmengen von Rapsöl und AdBlue<sup>®</sup>,
- Wartungsarbeiten, Reparaturen und Fehlercodes,
- Name des Fahrers.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus dem Betriebstagebuch. Die entsprechenden Seiten aus den Betriebstagebüchern wurden monatlich an das TFZ übermittelt, die eingetragenen Daten in eine elektronische Datenbank eingetragen und ausgewertet.


 <b>Betriebstagebuch 2014</b>		Traktor: John Deere 6210R (Prototyp)    Ort: LVFZ Achselschwang Kürzel: JD-P									
Vor der Benutzung		Betrieb		Ereignisse und Besonderheiten							
Datum	Betriebsstunden	Ölstand mm über MIN	Arbeitsvorgang (Nr. eintragen)	Startverhalten	Motoröl (Liter) gewechselt	Motoröl (Liter) aufgefüllt	Getankte Menge (Liter)			Fehlercodes / Wartungsarbeiten Reparaturen/ Sonstiges	Fahrer Unterschrift
							Pflanzenöl	Diesel	Harnstoff		
07.04 (Mo)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] ja	[ ] ja	.....	.....	.....	.....	.....
08.04 (Di)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] ja	[ ] ja	.....	.....	.....	.....	.....
09.04 (Mi)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] ja	[ ] ja	.....	.....	.....	.....	.....
10.04 (Do)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] ja	[ ] ja	.....	.....	.....	.....	.....
11.04 (Fr)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] ja	[ ] ja	.....	.....	.....	.....	.....
12.04 (Sa)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] ja	[ ] ja	.....	.....	.....	.....	.....
13.04 (So)	.....h	.....mm	a:..... b:..... c:.....	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] ja	[ ] ja	.....	.....	.....	.....	.....

Abbildung 5: Ausschnitt aus dem Betriebstagebuch eines der Versuchstraktoren

#### 4.2.2 Elektronisches Datenerfassungssystem

Um die Betriebsdaten der Traktoren kontinuierlich aufzuzeichnen und später auswerten zu können, wurden diese mit Datenloggern ausgestattet. Dazu wurde eine Marktrecherche bzgl. verfügbarer CAN-Bus-Datenlogger durchgeführt und ein System der Firma Vector Informatik GmbH aus Stuttgart ausgewählt. Ein Vorteil dieses Systems ist, dass aufgrund der benutzerfreundlichen Parametrierungssoftware keine Programmierung durch eine externe Spezialfirma notwendig ist und evtl. Änderungen oder Anpassungen durch das TFZ kurzfristig selbst vorgenommen werden können. Die notwendige Datenbank mit den CAN-Bus-Signalen wurde von John Deere bereitgestellt. Die zur Auswertung der Daten notwendigen Softwaretools CANalyzer und CANgraph, ebenfalls von der Vector Informatik GmbH, wurden beschafft. Des Weiteren wurden Erfassungsmodule bzw. Messwandler der Firma PEAK-System Technik GmbH verbaut, mit denen bis zu



acht zusätzliche Temperatursensoren erfasst und die Signale kontinuierlich in ein für den Datenlogger verarbeitbares Format umgewandelt werden können. Insgesamt können mit diesem System Daten von zwei (Vector GL1010) bzw. vier (Vector GL2000) unabhängigen CAN-Bussen, acht Temperaturen und vier Analogsignale aufgezeichnet werden. Tabelle 3 zeigt die wichtigsten erfassten Parameter. Besonders wichtige Signale wie Leistung und Drehzahl des Motors werden mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Weniger dynamische Werte wie beispielsweise Temperaturen werden mit einer geringeren Abtastrate erfasst, um Speicherplatz zu sparen. Auf die Möglichkeit einer Fernübertragung der Daten per Mobilfunk wurde verzichtet, da eine ausreichende Netzverfügbarkeit in den ländlichen Einsatzgebieten nicht gewährleistet ist. Besonderes Augenmerk wurde auf einen ausreichend großen Speicher (32 GB) gelegt, sodass ein Auslesen der Daten theoretisch nur einmal pro Jahr notwendig ist. Ein regelmäßiger Besuch mit Funktionskontrolle der Traktoren und der Datenerfassungssysteme sowie eine Datensicherung wurden jedoch im Abstand weniger Wochen durchgeführt.

*Tabelle 3: Auflistung der wichtigsten elektronisch erfassten Betriebswerte der beiden Versuchstraktoren*

Parameter	Traktor IIIB	Traktor IV
Datum und Uhrzeit	✓	✓
Betriebsstunden	✓	✓
Umgebungstemperatur	✓	✓
Fahrzeuggeschwindigkeit	✓	✓
Motordrehzahl und -last	✓	✓
Zapfwellendrehzahl und -last	✓	✓
Motoröltemperatur und -druck	✓	✓
Hydrauliköltemperatur	✓	✓
Kühlwassertemperatur und -druck	✓	✓
Ladelufttemperatur und -druck	✓	✓
Kraftstofftemperatur, -verbrauch und -druck	✓	✓
AdBlue <sup>®</sup> -Verbrauch		✓
Kurbelgehäusedruck	✓	✓
Abgastemperatur vor DOC	✓	✓
Abgastemperatur vor SCR		✓
Abgastemperatur nach AGN	✓	✓
Differenzdruck AGN	✓	✓
NO <sub>x</sub> vor und nach AGN		✓

### 4.3 Traktorenprüfstand

Die Leistungs- und Abgasemissionsmessungen wurden am Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) durchgeführt. Der Prüfstand ist konzipiert für die Messung gasförmiger Abgaskomponenten und Partikelmasseemissionen von Traktormotoren im eingebauten Zustand. Die Emissionsmessungen am Prüfstand erfolgten in Anlehnung an die Richtlinie 2000/25/EG bzw. 97/68/EG. Der wesentliche Aufbau des Prüfstands und die technischen Merkmale von Prüfstandsbestandteilen beschreiben u. a. THUNEKE et al. (2009) [36] und EMBERGER et al. (2013) [18] ausführlich.

Abbildung 6 zeigt eine Übersicht des Prüfstands.

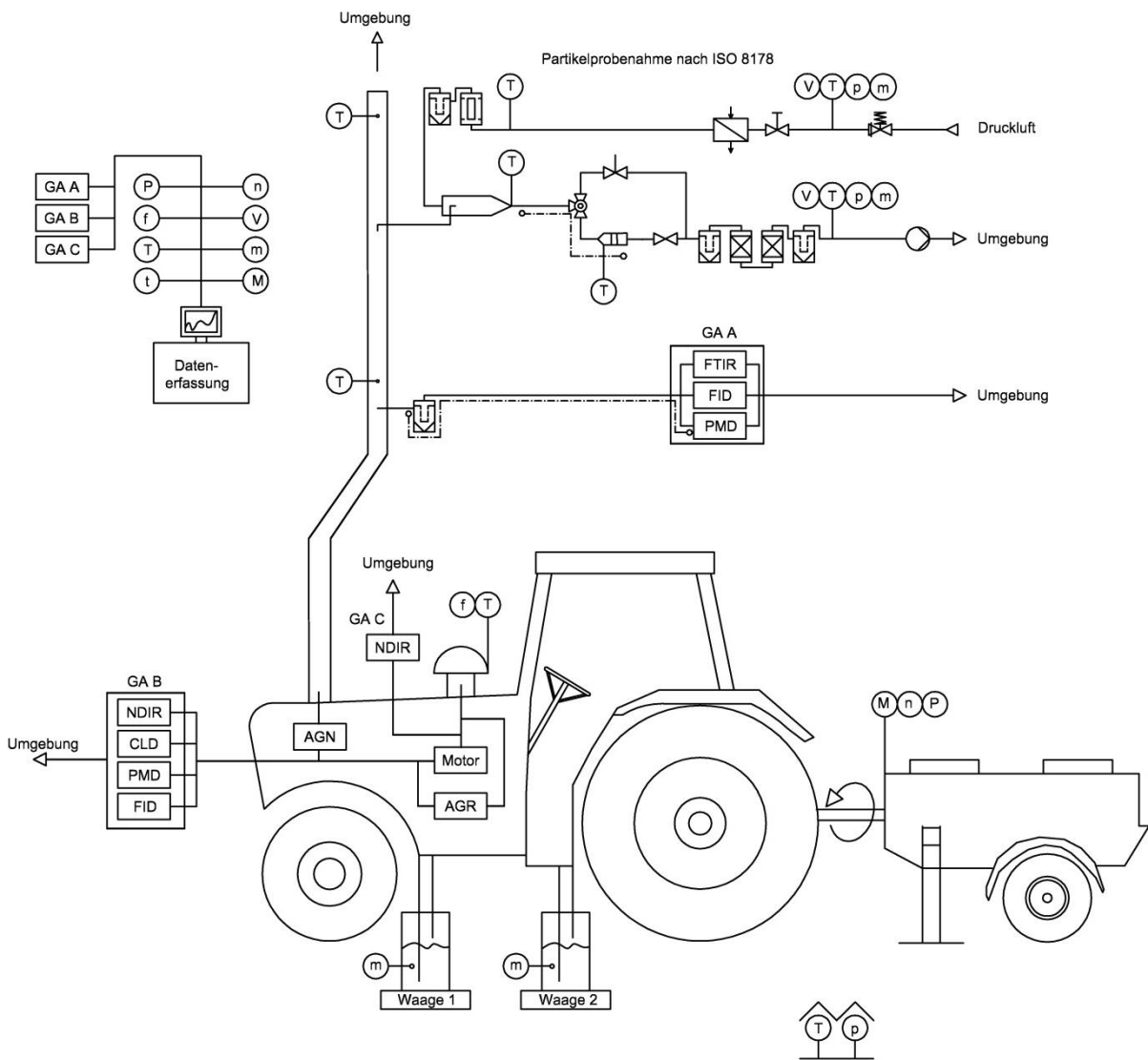


Abbildung 6: Übersicht des Traktorenprüfstands am Technologie- und Förderzentrum

### 4.3.1 Bestimmung von Leistung, Drehzahl und Verbrauch

Die Bestimmung der Motorleistung und Motordrehzahl nach Richtlinie 2000/25/EG bzw. ISO 8178 erfolgt an einem Motorenprüfstand direkt an der Kurbelwelle. Dazu ist es notwendig, den Motor aus dem Fahrzeug auszubauen.

Da bei diesem Vorhaben die Abgasemissionen von Traktormotoren, die in der Praxis in Betrieb sind, wiederkehrend getestet werden sollten, war eine Bestimmung der Motorleistung im ausgebauten Zustand nicht beabsichtigt. Daher waren Abweichungen zum Typprüfungsverfahren erforderlich. Am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums wurde die Zapfwellenleistung nach OECD Code 2 bestimmt. Nach dieser Richtlinie soll die Zapfwellenleistung nicht hinsichtlich des Atmosphärendrucks und der Umgebungstemperatur korrigiert werden. Auch nach Richtlinie 2000/25/EG bzw. ISO 8178 ist die unkorrigierte Motorenleistung bei der Auswertung der Ergebnisse heranzuziehen, jedoch werden Bedingungen für die Gültigkeit der Prüfung gestellt. Nach ISO 8178 wird der Faktor  $f_a$  zur Überprüfung der Gültigkeit der Umgebungsbedingungen definiert:

$$f_a = \left(\frac{99}{p_s}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{T_a}{298}\right)^{1,2} \quad (4.1)$$

$p_s$      atmosphärischer Druck in kPa

$T_a$      Umgebungstemperatur in K

Nach ISO 8178 ist eine Prüfung der Abgasemissionen gültig, wenn die Bedingung  $0,93 \leq f_a \leq 1,07$  erfüllt wird. Alle Messungen im Rahmen dieses Projekts bewegen sich in diesem Gültigkeitsbereich.

Die Zapfwellenleistung  $P_{ZW}$  wurde über eine Wirbelstrombremse (EGGERS PT 301 MES, max. 340 kW, Auflösung 0,1 kW) durch Messung von Drehmoment  $M_{ZW}$  und Drehzahl  $n_{ZW}$  ermittelt.

Der Kraftstoffverbrauch wurde gravimetrisch mittels einer Waage (Mettler-Toledo Tischwaage KB60.2, max. 60 kg) erfasst. Dazu wurde am Traktor das Kraftstoffsystem am Tank aufgetrennt und Kraftstoffvorlauf und -rücklauf in einen Versuchskraftstoffbehälter geleitet sowie dessen Masse über die Waage kontinuierlich ermittelt.

Auch der AdBlue®-Verbrauch wurde gravimetrisch mittels einer Waage (Mettler-Toledo Tischwaage KA32S, max. 32 kg) erfasst. Dazu wurde die Versorgungsleitung der Dosiereinheit vom Fahrzeugtank getrennt und stattdessen mit einem 10-l-AdBlue®-Kanister verbunden. Das Gewicht dieses externen Tanks wurde kontinuierlich über die Waage ermittelt. Um Störeinflüsse durch Zugluft etc. auf die Messeinrichtung zu vermeiden, wurde diese durch eine Plexiglasabschirmung geschützt.

### 4.3.2 Messung der Emissionen

Zur Gasanalyse wurden drei unterschiedliche Systeme eingesetzt: Gasanalyzesystem A (GA A) zur Bestimmung der Zusammensetzung des Abgases nach der Abgasnachbehandlung, Gasanalyzesystem B (GA B) zur Messung der Rohemissionen und Gasanalyzesystem C (GA C) zur Bestimmung der Abgasrückführrate. In Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die technischen Daten der Gasanalyzesysteme dargestellt.

*Tabelle 4: Technische Daten von Gasanalyzesystem A (GA A)*

Komponente	Messbereich	Gerät
O <sub>2</sub>	0–30 Vol.-%	PMD i60 (Magnos206)
HC	0–10.000 ppm	FID 4000hh
CO <sub>2</sub>	0–20 Vol.-%	SESAM FTIR (Thermo)
Wasserdampf	0–25 Vol.-%	
CO	0–100.000 ppm	
NO	0–10.000 ppm	
NO <sub>2</sub>	0–1.000 ppm	
NO <sub>x</sub>	0–10.000 ppm	
NH <sub>3</sub>	0–1.000 ppm	
N <sub>2</sub> O	0–1.000 ppm	
CH <sub>4</sub>	0–1.000 ppm	
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0–1.000 ppm	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0–1.000 ppm	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0–1.000 ppm	
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	0–1.000 ppm	
SO <sub>2</sub>	0–2.000 ppm	
COS	0–200 ppm	
Formaldehyd	0–1.000 ppm	
Acetaldehyd	0–1.000 ppm	
HCN	0–1.000 ppm	
HNCO	0–1.000 ppm	
HCOOH	0–1.000 ppm	
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	0–1.000 ppm	
Aromaten	0–1.000 ppm	

Tabelle 5: Technische Daten von Gasanalyzesystem B (GA B)

Komponente	Messbereich	Gerät
O <sub>2</sub>	0–22 Vol.-%	ABB AO2020
CO <sub>2</sub>	0–20 Vol.-%	
CO	0–2.000 ppm	
NO	0–5.000 ppm	Eco Physics CLD
NO <sub>2</sub>	0–5.000 ppm	
NO <sub>x</sub>	0–5.000 ppm	
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	0–10.000 ppm	M&A Thermo FID

Tabelle 6: Technische Daten von Gasanalyzesystem C (GA C)

Komponente	Messbereich	Gerät
CO <sub>2</sub>	0–20 Vol.-%	ABB AO2020

Die Partikelmasseemissionen wurden ausschließlich nach Abgasnachbehandlung, diskontinuierlich nach den Vorgaben der Richtlinie 97/68/EG bzw. ISO 8178 im verdünnten Abgas erfasst.

Bei der Messung nach Richtlinie 97/68/EG, die im Wesentlichen auf der ISO 8178 beruht, wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasstrom entnommen und über ein Übertragungsrohr in den Verdünnungstunnel geleitet. Über die Zufuhr von Verdünnungsluft wird der verdünnte Abgasstrom unmittelbar über dem Filterhalter auf Temperaturen zwischen 42 °C und 52 °C gehalten. Die Verdünnungsluft erfüllt die Druckluftklasse 1.4.1 nach ISO 8573. Das Verdünnungsluftvolumen wird über einen Massendurchflussregler (Bürkert 8711, Messgenauigkeit ± 1 %) gemessen und in Verbindung mit der Prüfstandssoftware der Volumenstrom geregelt. Die zugeführte Verdünnungsluft wird über einen Wärmetauscher auf Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C konditioniert und anschließend über einen Aktivkohlefilter (Riegler, FA 33 K) und einen Mikrofilter (Riegler, FM 33 K, Borosilikat-POM, Filterfeinheit 0,01 µm, Wirkungsgrad 99,999 %) weiter aufbereitet.

Die Partikelabscheidung erfolgt in einem Filtergehäuse durch ein im Abstand von 17 mm hintereinander angeordnetes Filterpaar (Hauptfilter und Nachfilter). Zur Abscheidung dienen teflonbeschichtete Glasfaserfilter (Pall Life Sciences, Emfab<sup>TM</sup> Filters, TX40HI20WW, 44 mm Durchmesser) mit einem Abscheidegrad von 99,9 % Dioctylphthalat (DOP 0,3 µm).

Nach der Partikelabscheidung wird das verdünnte Abgas getrocknet und gefiltert, bevor die Abgasmasse über einen Massendurchflussmesser (Bürkert 8701, Messgenauigkeit ± 1 %) erfasst wird.

Alle Temperaturen, Drücke und Volumina sowie auch die Messwerte der Gasanalyse-systeme und der Zapfwellenbremse werden kontinuierlich mithilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW™) zeitsynchron aufgezeichnet.

### 4.3.3 Prüfzyklus

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Messungen in Anlehnung an ISO 8178-1 unter Verwendung des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 durchgeführt. Dieser Prüfzyklus wird u. a. auch vom Gesetzgeber für die Prüfung von Motoren landwirtschaftlicher Zugmaschinen herangezogen. Der Prüfzyklus besteht aus acht Prüfphasen, die in einer festgelegten Reihenfolge einzustellen sind. Bei den ersten vier Prüfphasen wird die vom Hersteller angegebene Nenndrehzahl angefahren und verschiedene Leistungen eingestellt. Für drei weitere Betriebspunkte wird eine Zwischendrehzahl angefahren. Die Zwischendrehzahl wird dort festgelegt, wo der Motor sein höchstes Drehmoment besitzt. Liegt das höchste Drehmoment jedoch bei unter 60 % der Nenndrehzahl, wird die Zwischendrehzahl bei 60 % der Nenndrehzahl festgelegt, liegt sie bei mehr als 75 % der Nenndrehzahl, werden 75 % der Nenndrehzahl als Zwischendrehzahl definiert. Auch bei der Zwischendrehzahl werden drei verschiedene Leistungen eingestellt. Die letzte Prüfphase des Prüfzyklus ist der Leerlaufbetriebspunkt. Bei der Berechnung der spezifischen Emissionen des Prüfzyklus fließen die Messwerte aus den einzelnen Prüfphasen mit unterschiedlicher Gewichtung in das Endergebnis ein. Tabelle 7 gibt einen Überblick zu den Vorgaben des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178, in Abbildung 7 sind die Prüfphasen schematisch im Motorenkennfeld eingezeichnet.

Tabelle 7: C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4

Prüfphase	1	2	3	4	5	6	7	8
Drehzahl	Nenn-drehzahl	Nenn-drehzahl	Nenn-drehzahl	Nenn-drehzahl	Zwischen-drehzahl	Zwischen-drehzahl	Zwischen-drehzahl	Leerlauf
Last	100 %	75 %	50 %	10 %	100 %	75 %	50 %	0 %
Wichtungsfaktor	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15

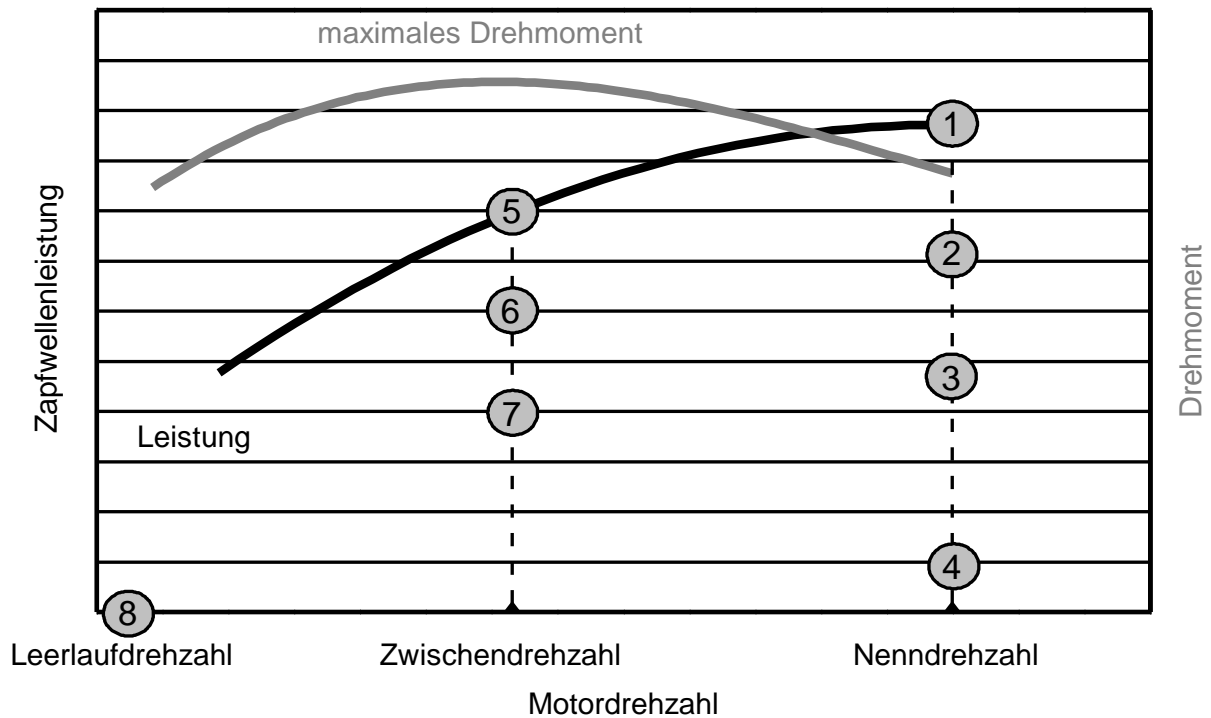


Abbildung 7: Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4

Für die Verweildauer auf der jeweiligen Prüfphase wird nach ISO 8178-4 ein Mindestzeitraum von zehn Minuten angegeben. Bei Emissionsmessungen am Gesamtsystem Traktor reicht dieser Mindestzeitraum allerdings nicht aus, um in allen Prüfphasen ein stabiles Emissionsbild zu erreichen [16]. Aus diesem Grund wurden bei der Durchführung der Messung feste Verweildauern in den einzelnen Prüfphasen definiert, nach deren Ablauf mit der Partikelprobenahme (Einzelfiltermethode für jede Prüfphase nach ISO 8178-1) begonnen werden konnte. Für die Traktoren wurden die Partikel über einen Zeitraum von zehn Minuten pro Prüfphase gesammelt. In Tabelle 8 sind die für jede Prüfphase angefahrenen Drehzahlen sowie die Verweildauer auf den einzelnen Prüfphasen vor den Partikelprobenahmen und die Partikelprobenahmedauer aufgeführt. Zur Auswertung der gasförmigen Abgasbestandteile wurden gemäß den Vorgaben der ISO 8178 die Messwerte der letzten drei Minuten der jeweiligen Prüfphase herangezogen.

*Tabelle 8: Eingestellte Drehzahlen, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren*

Prüfphase	Eingestellte Drehzahl in $\text{min}^{-1}$	Verweildauer Partikelprobenahme in min	Partikelprobe- nahmedauer in min
1	2.100	30	10
2	2.100	6	10
3	2.100	6	10
4	2.100	10	10
5	1.575	15	10
6	1.575	10	10
7	1.575	10	10
8	850	10	10

#### 4.4 Abgasemissionsmessung am dynamischen Motorenprüfstand der TU Kaiserslautern

Am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Kaiserslautern wurden Untersuchungen zur Nutzung von Pflanzenöl als Traktorkraftstoff an einem hochdynamischen Nutzfahrzeugmotorenprüfstand zur Darstellung transienter Last- und Drehzahlkollektive durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten an einem Reihensechszylindermotor mit 6,8 l Hubraum der Firma John Deere, der im Dieselmotorbetrieb die Emissionsstufe Tier 4 erfüllt, was der EU Abgasstufe IV entspricht.

##### 4.4.1 Vorgegebene Motorkonfiguration

Der Prüfmotor (s. Abbildung 8) ist mit einer Common-Rail-Direkteinspritzung und einer gekühlten externen Abgasrückführung zur Stickstoffoxidreduktion ausgestattet. Die vom Motor emittierten Abgase verlassen den Auslasskrümmer durch einen Turbolader mit variabler Turbinengeometrie, bevor sie durch einen zusätzlichen starren Turbolader in das Abgasnachbehandlungssystem eintreten.

Dessen erste Stufe bildet ein Dieseloxydationskatalysator, der Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe aus dem Abgas oxidiert. In der zweiten Stufe werden mithilfe eines geschlossenen Partikelfilters die Partikelemissionen minimiert. Hat dieser seine maximale Rußbelastung erreicht, wird er durch Anhebung der Abgastemperatur regeneriert. Erreicht wird die Temperatursteigerung durch eine Nacheinspritzung von Dieselmotorkraftstoff in den Brennraum, der in diesem Fall nicht aktiv an der Verbrennung teilnimmt. Vielmehr wird der zusätzliche Kraftstoff erst im Dieseloxydationskatalysator oxidiert.

Die Abgasnachbehandlung wird durch eine selektive katalytische Reduktion (SCR) der Stickstoffoxydemissionen mittels eines SCR-Katalysators abgeschlossen. Hierzu wird als



Reduktionsmittel eine 32,5 %ige wässrige Harnstofflösung (AdBlue®) in einen Mischer vor dem SCR-Katalysator eingebracht, die zu Ammoniak reagiert, mit dem im Anschluss die Stickstoffoxide im Abgas reduziert werden. Motorregelung und -überwachung erfolgen durch eine von John Deere entwickelte Engine Control Unit (ECU). Diese erlaubt, Sensorwerte und die vom Motorsteuergerät gesetzten Motorparameter auszulesen und Letztere anzupassen.

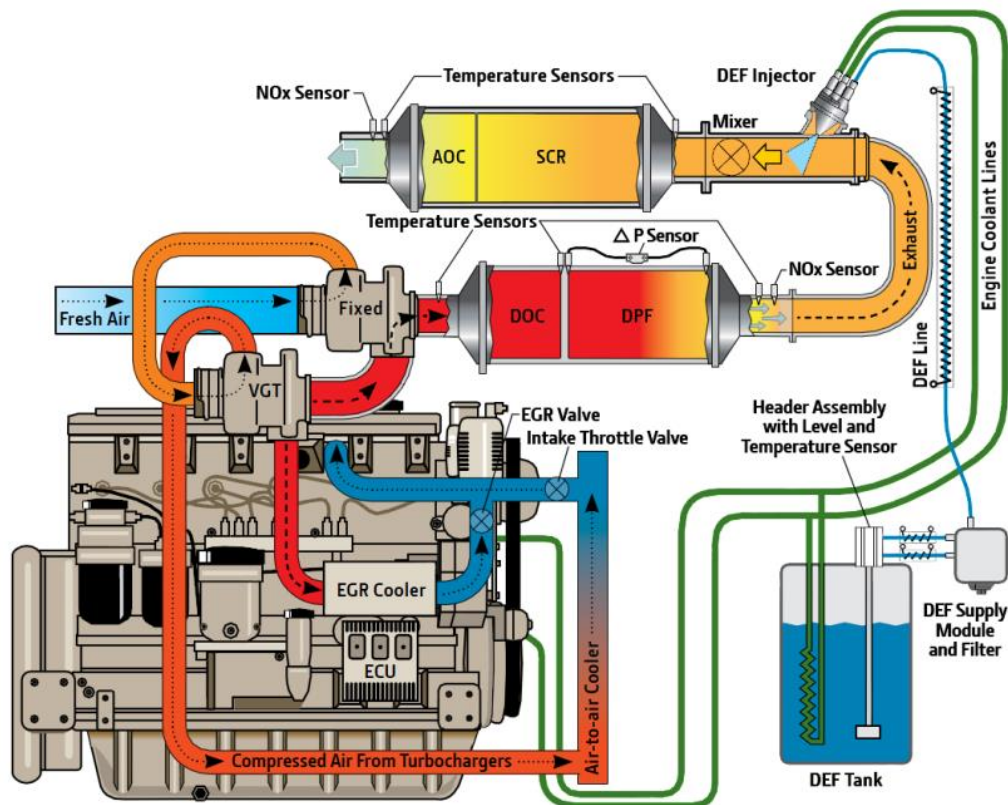
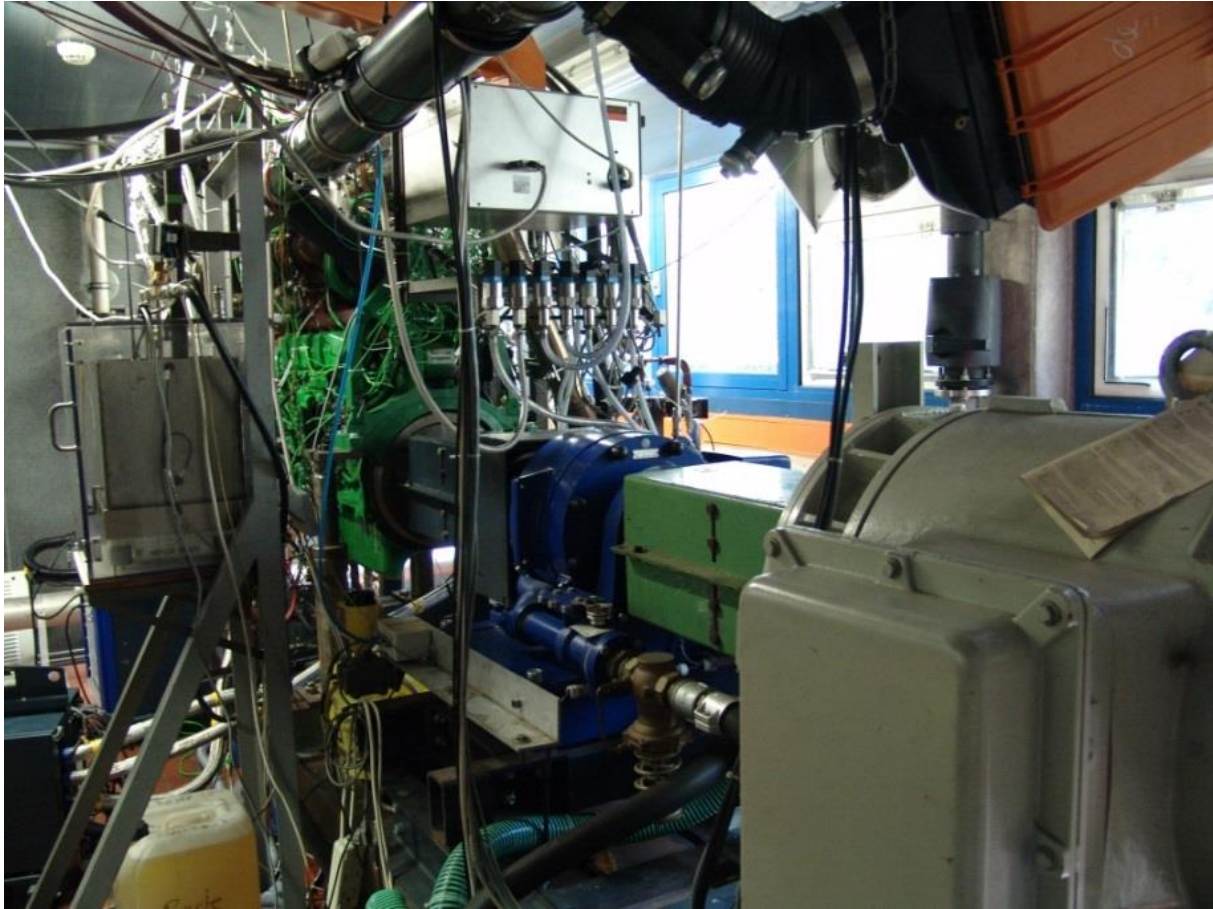


Abbildung 8: Serienkonfiguration des Versuchsmotors (Quelle: John Deere)

#### 4.4.2 Prüfstands Aufbau

Der Prüfling wurde auf einem Fundament installiert und an eine Belastungseinrichtung angekoppelt. Über eine Gelenkwelle erfolgte die Anbindung an eine hydraulische Motorbremse. Damit war es möglich, ein Drehmoment von bis zu 2.500 Nm aufzunehmen. Nachgeschaltet war ein Dynamometer, mit dem sowohl ein Brems- als auch ein Schleppmoment von 500 Nm eingestellt werden konnte. Die Synchronisation von Motorbremse und Dynamometer erfolgt über eine gemeinsame Prüfstandssteuerung. Unter Verwendung digitaler Regler kann ein Vierquadrantenbetrieb abgebildet werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, über ein sogenanntes Hybridmodul die Drehzahl und das Drehmoment mittels eines Spannungssignals von einer externen Steuerungseinrichtung

vorzugeben. Abbildung 9 zeigt ein Bild der Prüfstandsinstallation, Abbildung 10 eine schematische Darstellung.



*Abbildung 9: Motorprüfstand an der TU Kaiserslautern (Quelle: TU Kaiserslautern VKM)*

Der Prüfmotor war mit Druck- und Temperatursensoren zur Überwachung und Analyse des Motorbetriebs ausgestattet. Eine Hoch- und Niederdruckindizierung ermöglichte eine Bewertung der Heizverläufe. Sowohl die Masse des zugeführten Kraftstoffs als auch des eingebrachten AdBlue<sup>®</sup> wurden über eine Wägezelle gemessen. Zusätzlich war ein Luftmassensensor im Ansaugtrakt zwischen Luftfilter und Niederdruckverdichter angebracht.

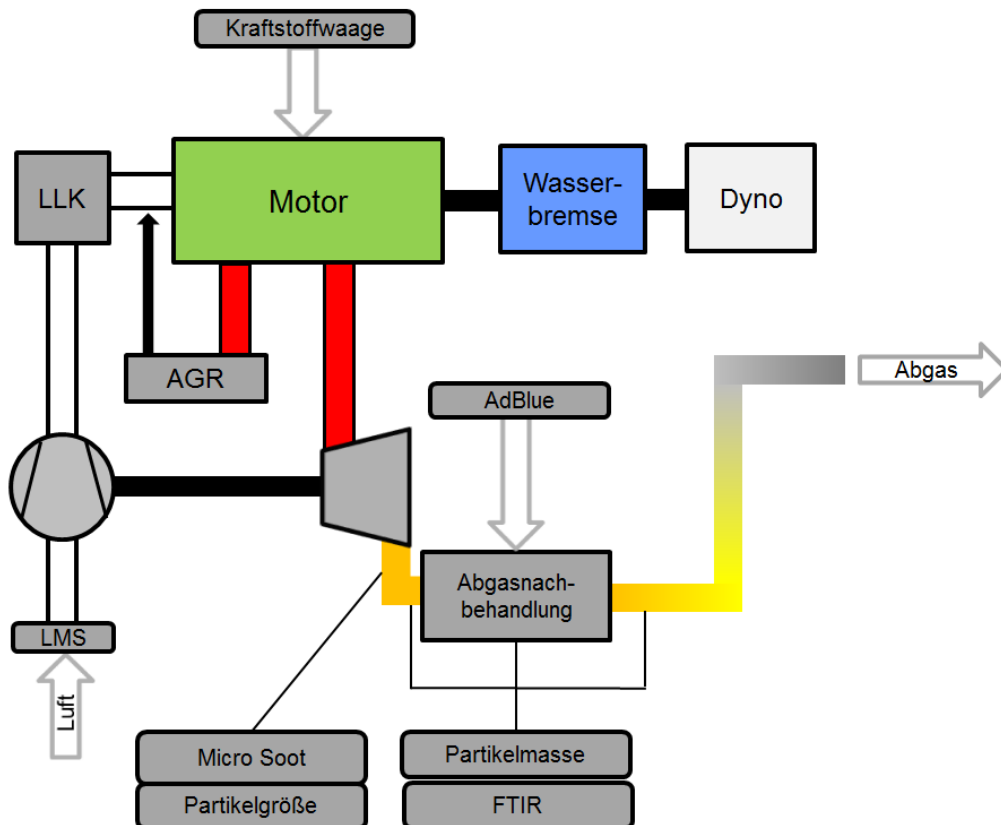


Abbildung 10: Schema des transienten Motorprüfstands (Quelle: TU Kaiserslautern VKM)

Um die Auswirkungen des Pflanzenölbetriebs hinsichtlich der auftretenden Emissionen zu erfassen und zu bewerten, wurden verschiedene Abgasanalysegeräte eingesetzt. Mithilfe eines FTIR-Spektrometers wurden die gesetzlich limitierten gasförmigen Komponenten Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_x$ ) detektiert. Weiterhin wurden zur Abstimmung des SCR-Systems die nicht gesetzlich limitierten Komponenten Isocyanat (HNCO), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) erfasst.

Von besonderem Interesse sind die Partikelemissionen des Motors. Für eine Beurteilung der Rohemissionen wurde ein sogenannter „Micro Soot“-Sensor verwendet. Mit diesem war eine schnelle quantitative Erfassung der Partikelemissionen möglich. Die Partikelgrößenverteilung bis zu einer Größe von 560 nm wurde mit einem Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) gemessen. Beide Geräte sind für Entwicklungszwecke geeignet. Für eine Zertifizierung ist eine gravimetrische Partikelmessung erforderlich. Diese erfolgte mit einem „Smart Sampler“ der Firma AVL mit einem Teilstromverdünnungstunnel.

Die gemessenen Größen wurden in einem Datenerfassungsrechner zeitsynchron aufgenommen. Für die Durchführung der transienten Prüfstandsversuche stand ein zusätzlicher Steuerungsrechner zur Verfügung, mit dem Drehzahl und -moment am Prüfstand vorgegeben werden konnten.

#### 4.4.3 Prüfzyklus und Auswertung der Daten vom Motorenprüfstand

Im Nutzfahrzeug-Offroad-Bereich erfolgen Emissionszertifizierungen am Motorenprüfstand mittels Emissionsmessungen im stationären (NRSC) und zusätzlich in einem transienten Messzyklus (NRTC). Die Grenzwerte für die Emissionen hängen von der Leistungsklasse ab, wie in Tabelle 1 gezeigt. Beim NRSC-Test am Motorenprüfstand werden dieselben stationären Prüfpunkte wie am Traktorenprüfstand getestet (vgl. Tabelle 7).

Folgende Formel dient zur Berechnung der spezifischen Emissionen beim NRSC-Test.

$$\text{spez. Emissionen NRSC} = \frac{\sum \text{Emiss. stationärer Punkte [g]} \cdot \text{Gewichtungsfaktor}}{\sum \text{Motorarbeit [kWh]} \cdot \text{Gewichtungsfaktor}} \quad (4.2)$$

Beim NRTC-Test handelt es sich um einen dynamischen Test für mobile Maschinen. Es wird ein Prüfzyklus angesteuert, der nicht stationär verschiedene Drehzahlen und Drehmomente durchläuft. Dieser Test wird zweimal durchgeführt: einmal im kalten Zustand des Motors (Raumtemperatur), bei dem Motorkühlmittel, Motoröl, Nachbehandlungseinrichtungen und Motorsteuerungshilfsmittel zwischen 20 °C und 30 °C liegen müssen, und einmal im betriebswarmen Zustand. Dabei startet der Prüfzyklus nach einer 20-minütigen Warmlaufphase, die sich unverzüglich an den Kaltstartzyklus anschließt.

Die gemessenen Emissionen werden zunächst nicht gewichtet und getrennt für die beiden Prüfzyklen wie folgt in die jeweiligen spezifischen Emissionen umgerechnet:

$$\text{spez. Emissionen} = \frac{\text{Emissionen [g]}}{\text{Motorarbeit [kWh]}} \quad (4.3)$$

Die so ermittelten spezifischen Emissionen der beiden Prüfzyklen werden dann addiert, wobei die Kaltstartphase mit 10 % und die Warmstartphase mit 90 % gewichtet werden. Die gewichtete Summe muss die gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte unterschreiten.

#### 4.5 Bestimmung des Beladungszustands des Partikelfilters

Um eine kontinuierliche Überwachung des Zustands des Dieselpartikelfilters an den Traktoren im Feldversuch zu gewährleisten, sind diese mit Differenzdrucksensoren ausgestattet. Für eine Bestimmung der Ruß- und Aschemasse im beladenen Filter ist diese Methode jedoch nicht geeignet, da auch viele weitere Einflussgrößen den Differenzdruck beeinflussen. Eine genaue Bestimmung der Beladung des Filters ist nur gravimetrisch möglich. Dazu wurde ein Versuchsaufbau am TFZ realisiert (siehe Abbildung 11). Dieser besteht im Wesentlichen aus einer Waage (Mettler-Toledo Tischwaage KB60.2, max. 60 kg), einem berührungslosen Temperatursensor (Optris CT LT) und einem System zur Datenaufzeichnung. Um eine Verfälschung der Wägung durch Kondensate im Filter zu

vermeiden und Auftriebseffekte zu berücksichtigen, wird der zu wägende Filter zuerst in einem Trockenschrank bei 140 °C für mindestens 12 Stunden konditioniert. Anschließend werden das Gewicht und die Temperatur während der Abkühlungsphase in einer Klimakammer mit definierter Temperatur (21 °C) und Luftfeuchtigkeit (50 %) aufgezeichnet. Durch Vergleich der jeweiligen Abkühlkurven kann so das Beladungsverhalten des Partikelfilters über die Projektlaufzeit dargestellt werden.



Abbildung 11: Messaufbau zur Bestimmung des Partikelfilterbeladungszustands

## 4.6 Betriebsstoffe

### 4.6.1 Verwendete Kraftstoffe und Kraftstoffanalysen

Die beiden John-Deere-Traktoren werden nach Möglichkeit sowohl im Feldtest als auch am Prüfstand nur mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 bzw. Pflanzenölkraftstoff nach DIN SPEC 51623 betrieben. Die Grenzwerte und die bei der Analyse angewendeten Prüfverfahren sind in Tabelle 9 dargestellt. Die im Rahmen des Projekts analysierten und am Traktorenprüfstand eingesetzten Pflanzenölkraftstoffe waren Sojaöl, Sonnenblumenöl, HO-Sonnenblumenöl, Leindotteröl und Baumwollsaatöl. Die Analyseergebnisse sind in Unterkapitel 5.1 erläutert. Am Prüfstand wurden nur unadditivierte Pflanzenöle als Kraftstoff eingesetzt. Beim Feldversuch wurde der Rapsölkraftstoff mit 0,1 % John Deere Fuel-Protect additiviert. Die Sonderöle sowie auch der Großteil des Rapsöls wurden von der österreichischen Öl- und Bioenergie GmbH in Friedersbach bezogen. Im späteren

Verlauf des Projekts wurde auch Rapsölkraftstoff aus Produktion der Ölmühle Hohenbrunn GmbH & Co. KG in Wolfratshausen eingesetzt.

*Tabelle 9: Kraftstoffparameter, Grenzwerte und angewandte Prüfverfahren nach DIN 51605 und DIN SPEC 51623*

Parameter	Einheit	Grenzwert DIN 51605 für Rapsölkraftstoff	Grenzwert DIN SPEC 51623 für Pflanzenölkraftstoff	angewandtes Prüfverfahren
Visuelle Begutachtung (des flüssigen Kraftstoffs – DIN SPEC 51623)	–	frei von sichtbaren Verunreinigungen, Sedimenten und freiem Wasser	frei von sichtbaren Verunreinigungen, Sedimenten und freiem Wasser	
Visuelle Begutachtung nach Abkühlen	–	–	frei von festen Stoffen, ohne Trübung	E DIN SPEC 51623 Anhang A
Dichte (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	910,0–925,0	900,0 - 930,0	DIN EN ISO12185
kin. Viskosität bei 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	max. 36,0		DIN EN ISO 3104
50 °C	mm <sup>2</sup> /s		max. 35,0	
Cetanzahl	–	min. 40	ist anzugeben	DIN EN 15195
Heizwert	MJ/kg	min. 36,0	min. 36,0	DIN 51900-2
Flammpunkt P.-M.	°C	min. 101	min. 101	DIN EN ISO 2719
Iodzahl	g Iod/ 100 g	max. 125	max. 140	DIN EN 14111
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10,0	max. 10,0	DIN EN ISO 20884
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	max. 24	DIN EN 12662:1998
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	max. 2,0	DIN EN 14104
Linolensäuregehalt	% (m/m)	–	max. 12,0	DIN EN 14103
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	min. 6,0	min. 6,0	DIN EN 14112
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 3,0	max. 3,0	DIN 51627-6
Calciumgehalt	mg/kg	max. 1,0	max. 1,0	DIN 51627-6

Magnesiumgehalt	mg/kg	max. 1,0	max. 1,0	DIN 51627-6
Wassergehalt K.-F.	mg/kg	max. 750	max. 750	DIN EN ISO 12937

Außer den in den Normen geforderten Kennwerten wurden die Pflanzenöle auch noch weitergehend untersucht, um eventuelle Unterschiede in den gemessenen Emissionen oder sonstige Auffälligkeiten anhand weiterer physikalischer Eigenschaften der Kraftstoffe erklären zu können. Des Weiteren kann dadurch die Eignung der untersuchten Pflanzenöle als Kraftstoff noch genauer bewertet werden. Beispielsweise ist in der Norm für Pflanzenölkraftstoffe nur die Angabe der kinematischen Viskosität bei 50 °C gefordert. Um Aussagen bzgl. einer möglichen Nutzung als Kraftstoff bei kalten Umgebungsbedingungen treffen zu können, ist aber auch eine Untersuchung der Viskosität bei geringeren Temperaturen notwendig. In Tabelle 10 sind die analysierten Parameter und die jeweiligen Prüfverfahren aufgelistet, die Auswertung und Diskussion der Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Unterkapitel 5.1 zu finden.

*Tabelle 10: Weitere analysierte Parameter und angewendete Prüfverfahren*

Parameter	Einheit	Prüfverfahren
Laurinsäuregehalt (C12:0)	% (m/m)	ISO 5508
Myristinsäuregehalt (C14:0)	% (m/m)	ISO 5508
Palmitinsäuregehalt (16:0)	% (m/m)	ISO 5508
Palmitoleinsäuregehalt (C16:1)	% (m/m)	ISO 5508
Stearinsäuregehalt (C18:0)	% (m/m)	ISO 5508
Ölsäuregehalt (C18:1)	% (m/m)	ISO 5508
Linolsäuregehalt (C18:2)	% (m/m)	ISO 5508
Linolensäuregehalt (C18:3)	% (m/m)	ISO 5508
Arachinsäuregehalt (C20:0)	% (m/m)	ISO 5508
Gadoleinsäuregehalt (C20:1)	% (m/m)	ISO 5508
Behensäuregehalt (C22:0)	% (m/m)	ISO 5508
Erucasäuregehalt (C22:1)	% (m/m)	ISO 5508
Lignocerinsäuregehalt (C24:0)	% (m/m)	ISO 5508
Nervensäuregehalt (C24:1)	% (m/m)	ISO 5508
Kohlenstoffgehalt	% (m/m)	DIN 51723
Wasserstoffgehalt	% (m/m)	DIN 51723
Stickstoffgehalt	% (m/m)	DIN 51723

Sauerstoffgehalt	% (m/m)	ASTM D 5291
Verseifungszahl	mg KOH/g	EN ISO 3657
Peroxidzahl	meq O/g	ISO 3960:2007
Spez. Wärmekapazität (50 °C)	J/(g·K)	DSC (Dynamische Differenzkalorimetrie)
Oberflächenspannung (10, 30, 50, 70, 90 °C)	mN/m	DIN EN 14370
Kinematische Viskosität (-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 °C)	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 7042
Dichte (-40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 °C)	kg/m <sup>3</sup>	DIN EN ISO 12185
Elementgehalte (Ag, Al, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Si, Sn, Ti, V, Zn)	mg/kg	ICP-OES
Simulierte Destillation	–	ASTM D 7169

#### 4.6.2 Motoröl

Als Motoröl wurde im Laufe des Projekts nur das vom Traktorenhersteller empfohlene John Deere Plus-50™ II verwendet. Dieses Motoröl weist einen niedrigen Gehalt aschebildender Elementen auf und ist deshalb besonders für Motoren mit Dieselpartikelfilter geeignet. Bei beiden Traktoren wurden alle 50 Betriebsstunden ca. 200 ml Motorenöl entnommen und analysiert. Eine Auswahl der wichtigsten untersuchten Parameter und die jeweiligen Prüfverfahren sind in Tabelle 11 aufgelistet.

*Tabelle 11: Ausgewählte Untersuchungsparameter zur Beurteilung der Motorölqualität und verwendete Analyseverfahren*

Untersuchungsparameter	Prüfverfahren
Pflanzenölgehalt	DIN 51639-4
Rußgehalt	DIN 51452
Verschleißmetalle (z. B. Kupfer, Eisen, Aluminium)	DIN 51363-1
Additive (z. B. Phosphor, Magnesium)	DIN 51363-1
Total Acid Number (TAN)	ASTM D 664
Total Base Number (TBN)	DIN ISO 3771
Kinematische Viskosität (40 °C und 100 °C)	ASTM 7279



## 5 Ergebnisse

Die drei Teilvorhaben wurden eng miteinander verzahnt bearbeitet. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt deshalb im Folgenden thematisch strukturiert und nicht nach Teilvorhaben. Dadurch ergibt sich ein klareres Gesamtbild der gewonnenen Erkenntnisse und erreichten Ergebnisse.

### 5.1 Charakterisierung der Pflanzenöle hinsichtlich kraftstoffrelevanter Eigenschaften

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Charakterisierung der im Rahmen des Projekts im Labor analysierten und am Traktorenprüfstand für Emissionsmessungen eingesetzten Pflanzenöle dargestellt. Hinsichtlich der Relevanz als Kraftstoff und der Marktverfügbarkeit wurden folgende Öle ausgewählt: Rapsöl, Leindotteröl, Sojaöl, Sonnenblumenöl, HO-Sonnenblumenöl und Baumwollsaatöl. Alle Öle sollten nach Möglichkeit die jeweils gültigen Vorgaben der Kraftstoffnormen erfüllen, jedoch waren zum gegebenen Zeitpunkt nicht für alle Sorten die entsprechenden Qualitäten auf dem Markt verfügbar. Beim Leindotteröl resultieren die Abweichungen von der Kraftstoffnormqualität vor allem aus der genetisch vorgegebenen Fettsäurezusammensetzung.

In Tabelle 12 sind die in den Normen für Raps- bzw. Pflanzenölkraftstoff festgelegten Grenzwerte und die entsprechenden Analyseergebnisse gegenübergestellt. Sojaöl, HO-Sonnenblumenöl und Rapsöl halten alle Grenzwerte der jeweils gültigen Norm ein. Das Baumwollsaatöl weicht lediglich bei der visuellen Begutachtung von der Normspezifikation aufgrund einer sichtbaren Trübung ab. Sonnenblumenöl hält die Vorgaben hinsichtlich der Oxidationsstabilität nicht ein. Die meisten Abweichungen weist Leindotteröl auf, auch bei diesem Öl ist eine Trübung sichtbar, ferner gibt es teils deutliche Überschreitungen bei der Iodzahl, beim Linolensäuregehalt, bei der Oxidationsstabilität und beim Wassergehalt.

In Tabelle 13 sind zusätzliche wichtige Kenngrößen der untersuchten Pflanzenöle dargestellt. Unter anderem wurden das komplette Fettsäurespektrum und die Elementarzusammensetzung der Öle bestimmt und als Anhaltspunkt für die Bewertung der Ergebnisse der Emissionsmessungen herangezogen. Die Analyseergebnisse hinsichtlich der Verseifungszahl – ein indirektes Maß für das durchschnittliche Molekulargewicht der Triglyceride – und der Peroxidzahl zur Bestimmung des Verderbenheitsgrads entsprechen den Erwartungen an ein frisches Öl der jeweiligen Sorte. Aus der Literatur sind nur wenige Informationen hinsichtlich der spezifischen Wärmekapazität und der Oberflächenspannung von Pflanzenölen zur Verwendung als Kraftstoff verfügbar. Beide Werte sind jedoch wichtige Kenngrößen für das Zerstäubungsverhalten und die motorische Verbrennung.

Tabelle 12: Analyseergebnisse der verschiedenen Pflanzenöle für Prüfstandsmessungen im Vergleich zur Norm DIN 51605 für Rapsölkraftstoff sowie zur Vornorm DIN SPEC 51623 für Pflanzenölkraftstoffe

Parameter	Einheit	Baumwollsaatöl	Sojaöl	Leindotteröl	Sonnenblumenöl	HO-Sonnenblumenöl	Rapsöl
<b>Visuelle Begutachtung (des flüssigen Kraftstoffs – DIN SPEC 51623)</b>	–	<i>trüb</i>	klar	klar	klar	klar	klar
<b>Visuelle Begutachtung nach Abkühlen</b>	–	<i>trüb</i>	klar	<i>trüb</i>	klar	klar	–
<b>Dichte (15 °C)</b>	kg/m <sup>3</sup>	921,9	923,5	924,8	922,7	916,1	919,9
<b>kin. Viskosität bei 40 °C</b>	mm <sup>2</sup> /s						34,6
<b>50 °C</b>	mm <sup>2</sup> /s	24,15	23,4	22,3	23,4	28,0	
<b>Cetanzahl</b>	–	41	41	40	41	54	48
<b>Heizwert</b>	MJ/kg	37,3	37,0	36,9	37,0	37,2	37,3
<b>Flammpunkt P.-M.</b>	°C	218	266	253	272	257	> 101
<b>Iodzahl</b>	g Iod/100 g	112	128	<i>145</i>	129	85	112
<b>Schwefelgehalt</b>	mg/kg	1,8	< 1	< 1	< 1	< 1	1,8
<b>Gesamtverschmutzung</b>	mg/kg	2	7	18	21	6	9
<b>Säurezahl</b>	mg KOH/g	0,11	0,04	1,66	0,11	0,03	0,87
<b>Linolensäuregehalt</b>	% (m/m)	0,5	6,0	<i>34,2</i>	< 1	< 1	–
<b>Oxidationsstabilität (110 °C)</b>	h	7,1	6,2	<i>2,7/2,7*</i>	<i>5,3/5,5*</i>	18,9	6,5
<b>Phosphorgehalt</b>	mg/kg	< 0,1	1,3	0,9	< 0,1	< 0,1	< 0,5
<b>Calciumgehalt</b>	mg/kg	< 0,1	< 0,1	0,6	< 0,1	< 0,1	< 0,5
<b>Magnesiumgehalt</b>	mg/kg	< 0,1	0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,5
<b>Wassergehalt K.-F.</b>	mg/kg	133	344	<i>910/877*</i>	89	232	655

\* Kursive Werte entsprechen nicht der jeweils zutreffenden Norm; mit \* gekennzeichnete Werte entstammen einer Wiederholungsmessung; Grenzwerte siehe Tabelle 9

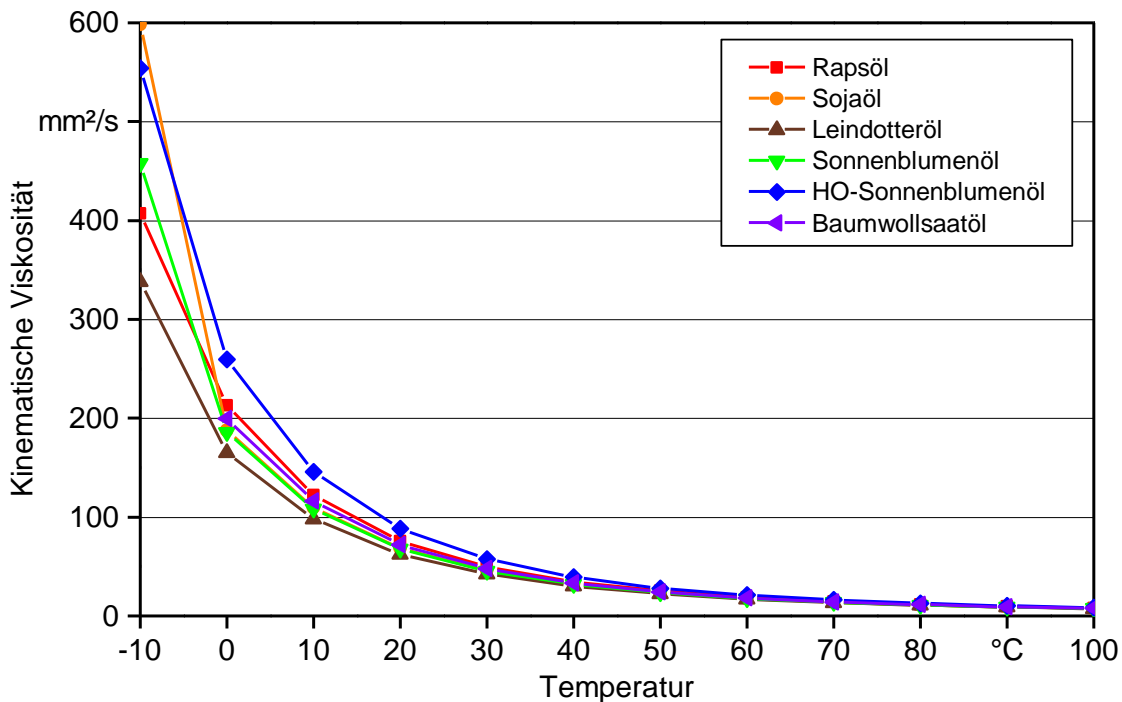
Tabelle 13: Weitere wichtige, jedoch nicht in einer Kraftstoffnorm reglementierte kraftstoffrelevante Kenngrößen

Parameter	Einheit	Baumwollsaatöl	Sojaöl	Leindotteröl	Sonnenblumenöl	HO-Sonnenblumenöl	Rapsöl
Laurinsäuregehalt (C12:0)	% (m/m)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Myristinsäuregehalt (C14:0)	% (m/m)	0,7	0,1	0,1	0,1	< 0,1	0,1
Palmitinsäuregehalt (C16:0)	% (m/m)	21,7	10,3	5,3	6,0	3,6	4,3
Palmitoleinsäuregehalt (C16:1)	% (m/m)	0,6	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9
Stearinsäuregehalt (C18:0)	% (m/m)	2,5	3,1	2,5	3,7	2,9	1,8
Ölsäuregehalt (C18:1)	% (m/m)	16,1	26,3	19,8	27,4	82,5	61,6
Linolsäuregehalt (C18:2)	% (m/m)	56,2	51,9	19,1	60,1	8,0	19,4
Linolensäuregehalt (C18:3)	% (m/m)	0,5	6,1	33,8	0,3	0,2	9,1
Arachinsäuregehalt (C20:0)	% (m/m)	0,3	0,4	1,5	0,3	0,3	0,6
Gadoleinsäuregehalt (C20:1)	% (m/m)	0,1	0,3	13,0	0,2	0,3	1,2
Behensäuregehalt (C22:0)	% (m/m)	0,1	0,5	0,3	0,8	1,0	0,3
Erucasäuregehalt (C22:1)	% (m/m)	0,1	0,1	2,5	< 0,1	< 0,1	0,1
Lignocerinsäuregehalt (C24:0)	% (m/m)	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1
Nervensäuregehalt (C24:1)	% (m/m)	< 0,1	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1
Kohlenstoffgehalt	% (m/m)	77,5	77,6	77,8	77,8	77,5	77,5
Wasserstoffgehalt	% (m/m)	11,6	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1
Stickstoffgehalt	% (m/m)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sauerstoffgehalt	% (m/m)	10,9	10,8	10,4	10,8	11,4	10,1
Verseifungszahl	mg KOH/g	198	194	184	186	182	161
Peroxidzahl	meq O/g	1	3	4	1	4	6
Spez. Wärmekapazität (50 °C)	J/(g·K)	2,03	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	2,04
Oberflächenspannung (10 °C)	mN/m	34,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	34,1
Oberflächenspannung (30 °C)	mN/m	32,3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	33,0
Oberflächenspannung (50 °C)	mN/m	30,5	31,6	32,0	32,0	31,6	31,4
Oberflächenspannung (70 °C)	mN/m	28,3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	30,0
Oberflächenspannung (90 °C)	mN/m	25,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	28,9

n. b. = nicht bestimmt

In Abbildung 12 ist die kinematische Viskosität der unterschiedlichen Pflanzenöle in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Von 0 °C bis 100 °C unterscheiden sich die Viskosität von Rapsöl, Sojaöl, Sonnenblumenöl und Baumwollsaatöl kaum. Die Viskosität

von HO-Sonnenblumenöl ist in diesem Bereich etwas höher und von Leindotteröl geringfügig niedriger. Bei noch tieferen Temperaturen steigt die Viskosität von Soja- und Sonnenblumenöl gegenüber den anderen Ölen überproportional an. Baumwollsaatöl ist bei  $-10\text{ °C}$  bereits fest. Bei Temperaturen unter  $0\text{ °C}$  ist jedoch auch die Verweildauer bei den entsprechenden Temperaturen von ausgeprägtem Einfluss auf die Viskosität.

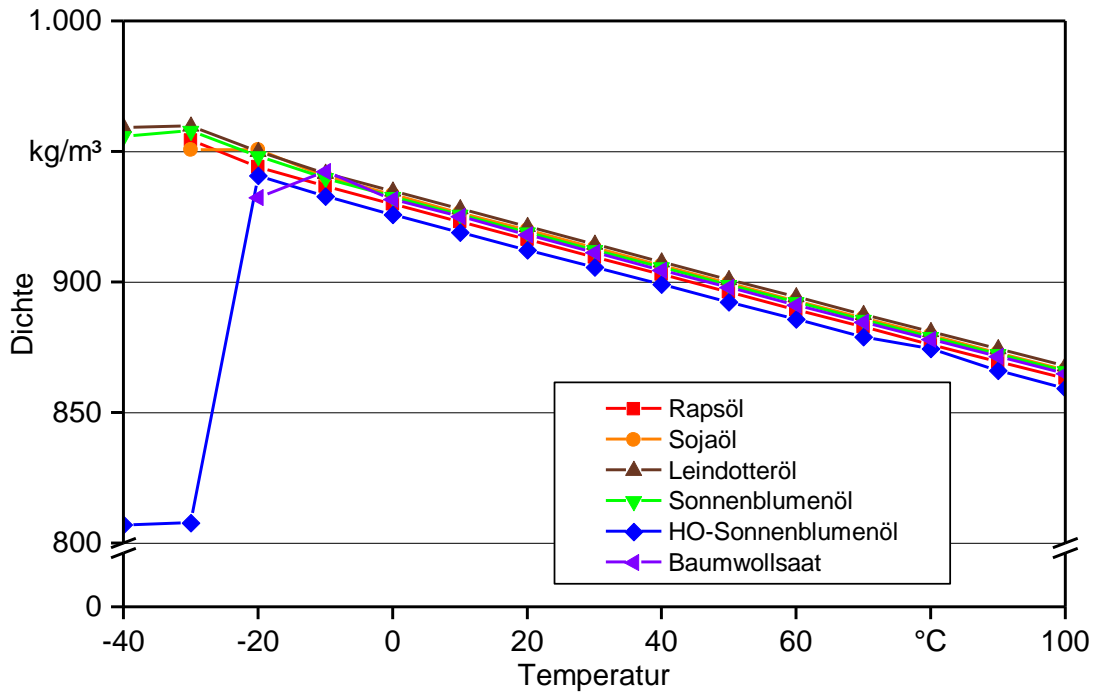


\* Baumwollsaatöl ist bei  $-10\text{ °C}$  bereits fest

Abbildung 12: Kinematische Viskosität der unterschiedlichen untersuchten Pflanzenöle von  $-10\text{ °C}$  bis  $100\text{ °C}$

In Abbildung 13 ist die Dichte der untersuchten Pflanzenöle bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Von  $-10$  bis  $100\text{ °C}$  verlaufen die Graphen parallel, wobei HO-Sonnenblumenöl stets die geringste und Leindotteröl stets die höchste Dichte aufweist. Ab Temperaturen unter  $-10\text{ °C}$  fallen die Dichten aufgrund unterschiedlicher Fettsäurezusammensetzung und damit verbundener individueller Erstarrungscharakteristiken der Öle zum Teil sprunghaft ab. Die Werte für Rapsöl und Sojaöl waren bei  $-40\text{ °C}$  und für Baumwollsaatöl bei  $-30$  und  $-40\text{ °C}$  mit der angewandten Messmethode (DIN EN ISO 12185) nicht bestimmbar.

Mit allen untersuchten Pflanzenölen wurde auch eine simulierte Destillation durchgeführt. In Abbildung 14 ist die Massenabnahme in Abhängigkeit der Kraftstofftemperatur dargestellt. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Ölen sind sehr gering, etwa 85 % der Pflanzenölmasse werden im Temperaturbereich zwischen  $590$  und  $630\text{ °C}$  umgesetzt.



\* Die Werte für Rapsöl und Sojaöl waren bei -40 °C und für Baumwollsaatöl bei -30 °C und -40 °C nicht bestimmbar.

Abbildung 13: Dichte der unterschiedlichen untersuchten Pflanzenöle von -40 °C bis 100 °C

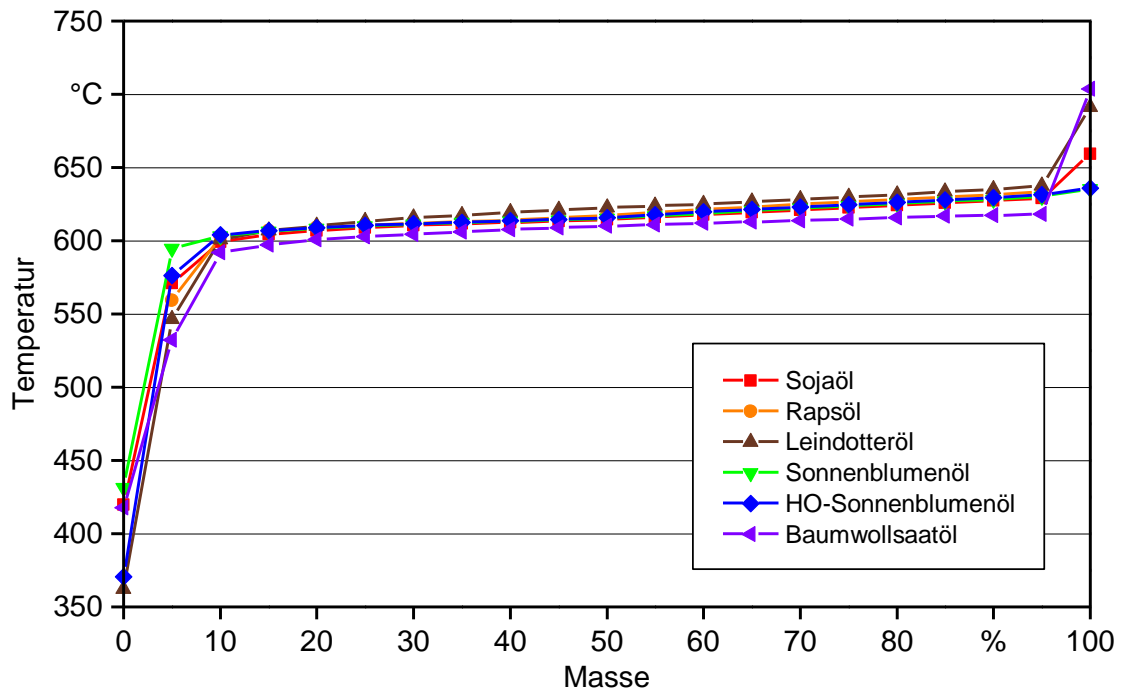


Abbildung 14: Simulierte Destillation der unterschiedlichen Pflanzenöle

Alle untersuchten Pflanzenöle wurden mittels ICP-Screening auch hinsichtlich ihrer Gehalte an den Elementen Silber (Ag), Aluminium (Al), Barium (Ba), Calcium (Ca), Cadmi-

um (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Eisen (Fe), Kalium (K), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Natrium (Na), Nickel (Ni), Phosphor (P), Blei (Pb), Silizium (Si), Zinn (Sn), Titan (Ti), Vanadium (V) und Zink (Zn) untersucht. Mit Ausnahme von Phosphor bei Sojaöl (1,2 mg/kg) lagen die Gehalte aller Elemente bei allen Ölen unterhalb der Nachweisgrenze der Messmethode von 0,5 mg/kg. Es sind also nur geringste Belastungen des Motors, des Motoröls und des Abgasnachbehandlungssystems mit diesen Elementen und deren Aschen zu erwarten.

## 5.2 Optimierung des Kraftstoffniederdrucksystems

Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Rapsöl und Diesel machen eine Anpassung des Niederdruckkraftstoffsystems notwendig. Aufgrund der hohen Viskosität von Pflanzenöl sind die Kraftstofffilter eine kritische Komponente des Kraftstoffsystems bei der Verwendung von Pflanzenöl. Um einen Überblick über die Eignung des Serienkraftstofffilters zu gewinnen, wurde dessen Betriebsverhalten mit anderen für die Anwendung mit biogenen Kraftstoffen freigegebenen Kraftstofffiltern verglichen. Zur Verringerung der Viskosität des Pflanzenöls ist es notwendig, die Kraftstofftemperatur im Niederdruckkraftstoffsystem zu erhöhen. Dazu muss in geeigneter Weise die erforderliche thermische Energie bereitgestellt werden.

Im Unterauftrag durch die regineering GmbH durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass es zweckmäßig ist, den gesamten Kraftstoffrücklauf in den Vorlauf der Vorförderpumpe zu leiten. Dadurch ergeben sich zwei Vorteile. Zum einen wird nur die Kraftstoffmenge aus dem Tank gefördert, die auch im Motor verbrannt wird, sodass die zu fördernde und zu filternde Kraftstoffmenge deutlich reduziert werden kann. Zum anderen kann dem Kraftstoff ein höherer Wärmeenergiestrom zugeführt und dieser schneller erwärmt werden. Dies steigert deutlich die Filtrierbarkeit des Kraftstoffs. Da eine Kraftstofftemperatur über 60 °C nicht wünschenswert ist, wurde ein Temperaturregelventil auf Bi-Metall-Basis eingebaut, durch das der rücklaufende Kraftstoff ab dieser Grenztemperatur nicht mehr in den Vorlauf der Vorförderpumpe, sondern in den Tank geleitet wird.

Die Untersuchungen bei niedrigen Kraftstofftemperaturen haben zudem gezeigt, dass der serienmäßige Leitungsdurchmesser von 8 mm für den hochviskosen Kraftstoff zu klein ist. Daher wurde dieser für die Verwendung im Pflanzenölbetrieb auf 14 mm vergrößert.

Bei den Kraftstofffiltertests wurden mit dem für die John-Deere-6R-Serie verwendeten Filter die besten Ergebnisse erreicht. Darum wurde dieser auch in den Feldtests verwendet.

### 5.3 Untersuchung des Belade- und Regenerationsverhalten eines unbeschichteten Partikelfilters

Im Unterauftrag wurde durch die regineering GmbH das Beladeverhalten eines Dieselpartikelfilters (DPF) mit Diesel- und Rapsölpartikeln evaluiert und die Aktivierungstemperatur der Diesel- bzw. Rapsölpartikeloxidation ermittelt. Dazu wurde ein unbeschichteter DPF verwendet. Dieser wurde mit von einem Einzylinderforschungsmotor emittierten Abgas durchströmt. Die Werte der Betriebsparameter Abgastemperatur, Kraftstofftemperatur und Luftverhältnis wurden so gewählt, dass sie mit denen des John-Deere-Vollmotors vergleichbar waren.

Im Rapsölbetrieb wurden höhere Partikelemissionen als im Dieselpetrieb festgestellt. Dies ist auf die niedrigen Abgastemperaturen bzw. Brennraumtemperaturen im Rapsölbetrieb zurückzuführen. Die Siedelinie von Rapsöl liegt in einem Temperaturbereich von 300 bis 330 °C. Im Gegensatz dazu liegt die Diesel-Siedetemperatur im Bereich zwischen 200 und 250 °C. Dadurch kommt es im Rapsölbetrieb zu einer unvollständigen Verbrennung mit dem Resultat höherer Rußemissionen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es trotz dieser schlechteren Voraussetzungen im Rapsölbetrieb möglich ist, während des Beladezyklus eine Verbrennung der eingelagerten Partikel im Partikelfilter zu erreichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass für eine effiziente aktive Regeneration des Partikelfilters eine Temperatur von mindestens 570 °C notwendig ist. Durch eine Temperatursteigerung von 500 auf 570 °C konnte im Dieselpetrieb die Reduktionsrate um das 2,6-Fache gesteigert werden. Im Rapsölbetrieb liegt diese Steigerung bei 2,7.

### 5.4 Modifikation eines Serienmotors der Abgasstufe IV

Der untere Heizwert von Dieselpkraftstoff liegt mit 43,1 MJ/kg rund 15 % über dem von Rapsöl mit 37,6 MJ/kg. Bei Betrachtung des volumetrischen Heizwerts sind die Unterschiede geringer (Dieselpkraftstoff 35,8 MJ/l; Rapsöl 34,6 MJ/l). Um im Betrieb mit Rapsöl die gleiche Volllastkurve zu erreichen wie im Betrieb mit Dieselpkraftstoff, wurde im Rapsölbetrieb die Motorsteuerung, d. h. die Einspritzstrategie angepasst. Im Schnitt wurde die Vorgabevolllastkurve für eine ausreichende Anzahl von Drehzahlstützstellen um 15 % erhöht, was näherungsweise der Heizwertdifferenz entspricht. Berücksichtigt wurden dabei auch die im Vergleich zu Dieselpkraftstoff höhere Viskosität und Oberflächenspannung des Rapsöls und die daraus resultierenden Änderungen im Gemischbildungsprozess.

Der Prüfmotor verfügt über eine sogenannte Drehzahlregelung. Mit dieser gibt der Fahrer abhängig von der geplanten Arbeit eine Drehzahl vor. In Abhängigkeit von der vom Motor abgegebenen mechanischen Leistung (Motorlast) wird die Einspritzmenge automatisch so angepasst, dass die vorgegebene Drehzahl beibehalten wird. Aus diesem Grund waren im restlichen Kennfeldbereich keine Adaptionen notwendig.

Abbildung 15 zeigt die erreichte Volllastkurve für Diesel- und Rapsölkraftstoff. Nach der Anpassung konnte im Rapsöl- wie im Dieseltreibstoff dieselbe Leistungsfähigkeit des Motors nachgewiesen werden.

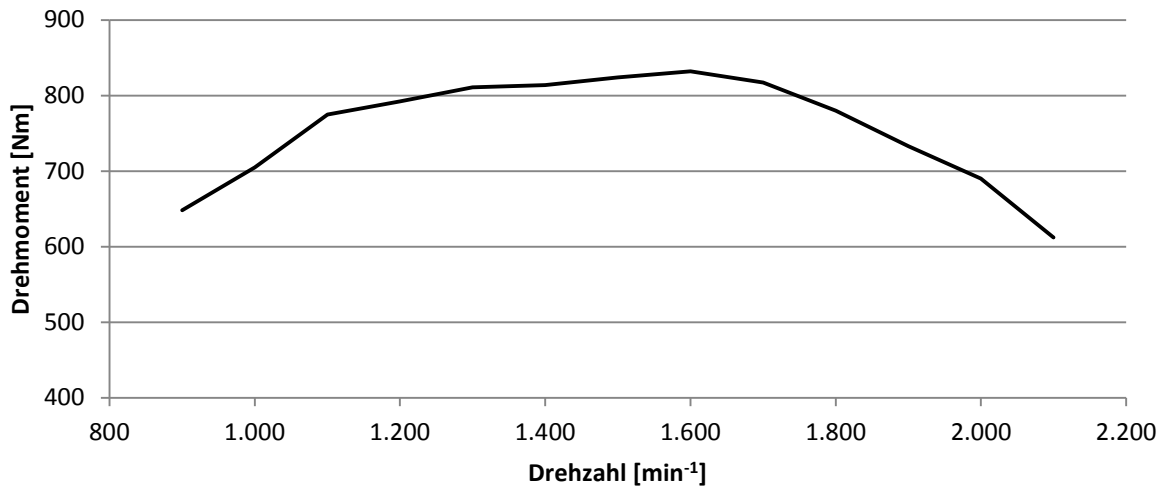


Abbildung 15: Finale Volllastkurve für Diesel- und Pflanzenölkraftstoff (Quelle: TU Kaiserslautern VKM)

Für den Prüfstandsbetrieb wurden an vier Zylindern die Glühkerzen durch Adapter mit piezoelektrischen Drucksensoren ersetzt. Damit sollte der Maximaldruck überwacht und Erkenntnisse über den gesamten Druck- und Heizverlauf im Zylinder erlangt werden. In Abbildung 16 ist für den Lastpunkt B75, d. h. bei 75 % des maximal möglichen Motordrehmoments und bei einer Motordrehzahl von 1.600 min<sup>-1</sup>, der Druckverlauf dargestellt. Am Druckanstieg zu Beginn ist zu erkennen, dass die Kompressionsphase für beide Kraftstoffe vergleichbar ist. Daraus kann geschlossen werden, dass der Ladungswechsel und die motorseitigen Regelparameter durch die Kraftstoffumstellung nur gering beeinflusst werden. Ab 10 °KW (Kurbelwellenwinkel) vor dem oberen Totpunkt ist der Zylinderdruck im Rapsölbetrieb minimal höher als im Dieseltreibstoff. Deshalb ist von einer geringfügigen Erhöhung der Ladungsmenge auszugehen.



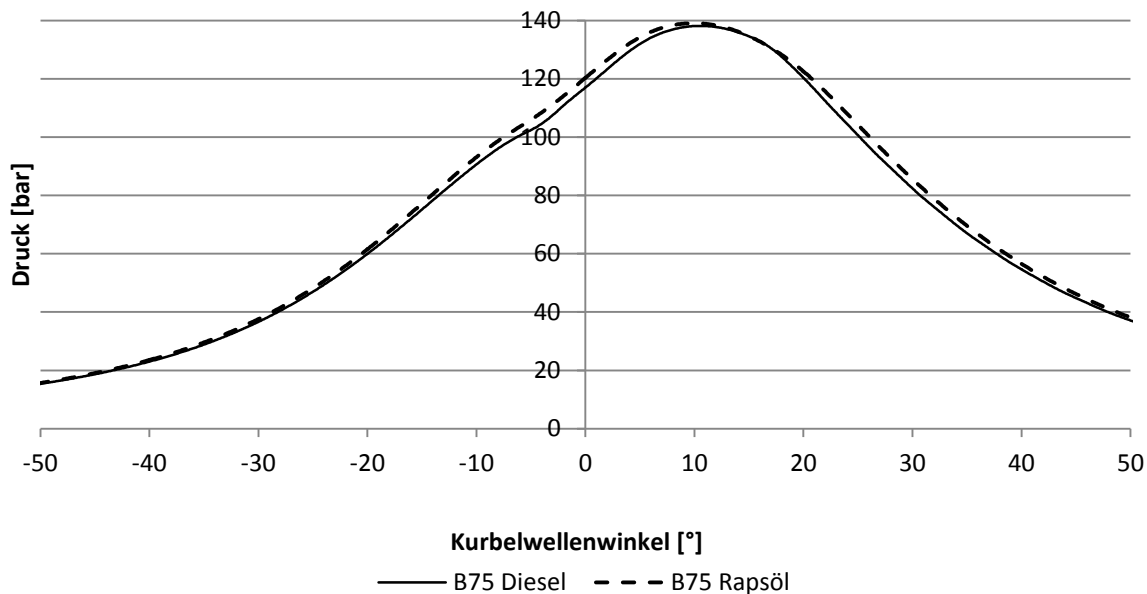


Abbildung 16: Zylinderdruckverlauf im Lastpunkt B75 (Quelle: TU Kaiserslautern VKM)

Die Motorregelung passt automatisch die Einspritzmenge an den jeweiligen Heizwert an, um den gewünschten Lastpunkt zu erreichen. Abbildung 16 zeigt, dass der Maximaldruck mit 139 bar sehr gut getroffen wird. In der Expansionsphase ist im Rapsölbetrieb ein leicht erhöhter Druck festzustellen. Dies liegt an der weiteren Umsetzung von Rapsölkraftstoff ab ca. 19 °KW, was durch den in Abbildung 17 gezeigten Summenheizverlauf bestätigt wird.

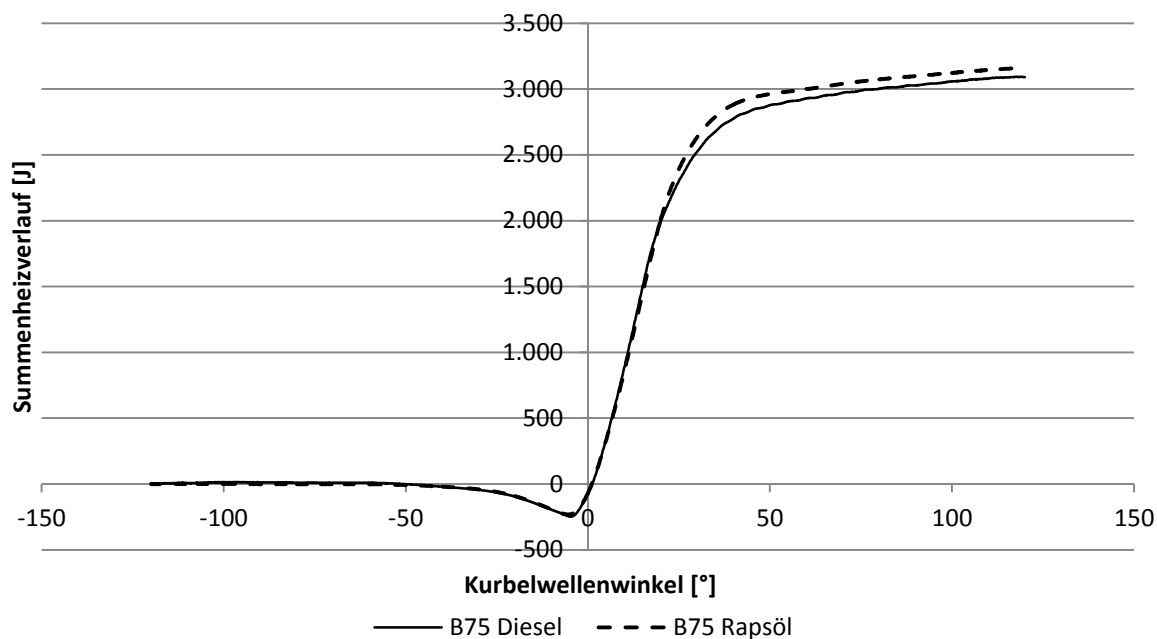


Abbildung 17: Summenheizverlauf im Lastpunkt B75 (Quelle: TU Kaiserslautern VKM)

### 5.5 Modifikation des Abgasnachbehandlungssystems

Der geschlossene Partikelfilter des Prüfmotors wird über eine Nacheinspritzung im Brennraum und die damit verbundene Temperaturanhebung bei Umsetzung der nicht verbrannten Kohlenwasserstoffe im Oxidationskatalysator aktiv regeneriert. Diese Strategie erweist sich im Betrieb mit Pflanzenöl aufgrund dessen höherer Oberflächenspannung und Verdampfungsenthalpie, die zu einer höheren Eindringtiefe des Einspritzstrahls führen, als problematisch. Letztere führt zur Benetzung der Brennraumoberfläche mit Kraftstoff und Kraftstoffeintrag ins Motoröl. Dies birgt die Gefahr einer unzureichenden Schmierung der Motorkomponenten und damit verbundener Bauteilschäden. Auch das Einbringen von Pflanzenöl mittels einer externen Dosiereinheit in den Abgastrakt gestaltet sich aufgrund der für diesen Anwendungsfall unzureichenden Zerstäubungs- und Verdampfungsfähigkeit als ungeeignet.

Dagegen zeigten die Beladungsuntersuchungen des Partikelfilters und die festgestellten geringen Partikelemissionen, dass ein passiv regeneriertes Partikelfiltersystem für die Anwendung mit Pflanzenöl geeignet ist. Hier findet bei ausreichenden Filtertemperaturen ein Umsatz von Stickstoffdioxid und Kohlenstoff statt. Allerdings wurde festgestellt, dass im Rapsölbetrieb im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoffbetrieb höhere Stickstoffoxidemissionen entstehen.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde ein motornahes Abgasnachbehandlungssystem konzipiert und in den bestehenden Prüfstand integriert. Dieses System entfernt effizient sowohl Partikel als auch Stickstoffoxide aus dem Abgas, muss jedoch regeneriert, d. h. gereinigt werden.

Dazu wird ein passives Regenerationsverfahren verwendet, das in einem Temperaturbereich von ca. 200 °C bis 450 °C stattfindet und eine ausreichende NO<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas erfordert. Eine katalytische Beschichtung des Systems und die Zugabe von Ammoniak erlauben dabei dennoch auch eine umfassende Reduktion der Stickstoffoxide.

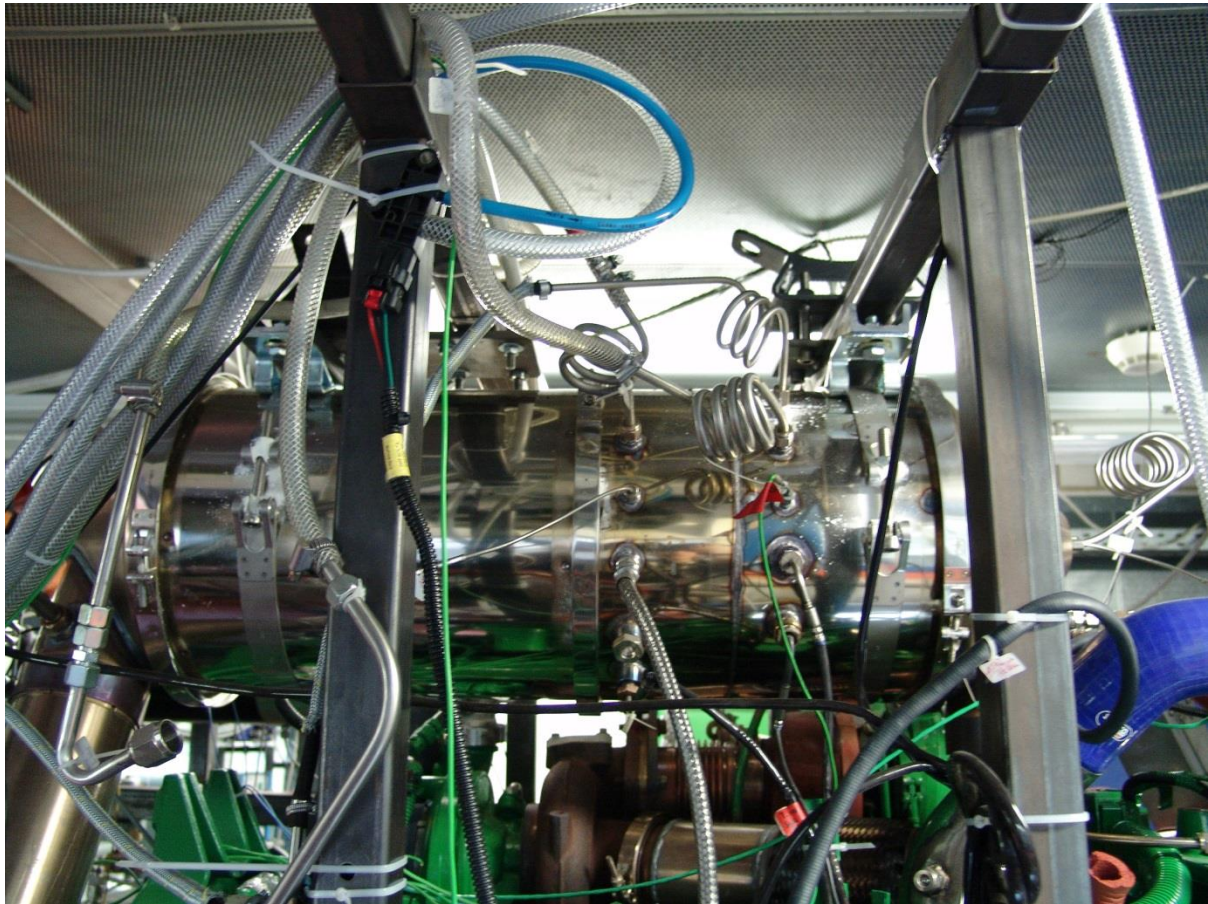


Abbildung 18: Angepasstes Abgasnachbehandlungssystem (Quelle: TU Kaiserslautern VKM)

Aus Sicherheitsgründen ist es nicht zulässig, das toxische Ammoniak gasförmig im Fahrzeug mitzuführen. Daher wird im Fahrzeugeinsatz ein System bevorzugt, das Ammoniak aus Harnstoff generiert. Dieser ist in Wasser gelöst und wird in einem separaten Tank im Fahrzeug mitgeführt. Die motornahe Installation der zweiten Stufe des Abgasnachbehandlungssystems, die im Wesentlichen die Komponenten zur Partikelfiltration und die selektive katalytische Reduktion umfasst, unmittelbar nach dem Oxidationskatalysator (siehe Abbildung 18) führt zu einem schnellen Erreichen der erforderlichen Betriebstemperatur.

Die Kombination aus DOC und angepasster zweiter Stufe des Abgasnachbehandlungssystems wurde anstelle des serienmäßig installierten Systems platziert. Dadurch wurde ein deutlich kompakterer Motoraufbau ermöglicht. Die kurzen Mischungslängen zwischen DOC und zweiter Stufe des Abgasnachbehandlungssystems stellten allerdings erhöhte Anforderungen an die Aufbereitung des Reduktionsmittels AdBlue<sup>®</sup> zu Ammoniak. Diesen Anforderungen konnte durch eine weitere Anpassung des Systemdesigns erfolgreich entsprochen werden.

Die für die Aufbereitung von AdBlue<sup>®</sup> erforderliche thermische Energie wird aus dem Abgas bereitgestellt. Reicht die so gewonnene thermische Energie nicht aus, können

über eine Zusatzheizung bis zu 600 W in das System eingebracht werden. Das aufbereitete AdBlue<sup>®</sup> wird unmittelbar vor der angepassten zweiten Stufe des Abgasnachbehandlungssystems in den Abgasstrom eingebracht. Für die Reaktion wird eine homogene Verteilung über den Querschnitt des Abgasstroms benötigt. Dies wird mithilfe strömungsoptimierter Leitbleche unterstützt.

Im Abgasnachbehandlungssystem werden dann die Stickstoffoxide NO und NO<sub>2</sub> im Temperaturbereich von 250 °C bis 450 °C selektiv zu Stickstoff reduziert. Für höchstmögliche Umsatzgeschwindigkeiten bei geringstmöglichem NH<sub>3</sub>-Einsatz und entsprechend effiziente Ausnutzung des mitgeführten AdBlue<sup>®</sup> ist ein NO-zu-NO<sub>2</sub>-Verhältnis von 1:1 erforderlich. Dieses wird durch den vorgeschalteten DOC, der dieselbe Funktion wie in der Serienkonfiguration hat, angenähert eingestellt. Er oxidiert CO und HC und stellt die Abgastemperatur auf den für das Abgasnachbehandlungssystem erforderlichen Temperaturbereich ein.

## **5.6 Ergebnisse der Emissionsmessungen am Motorprüfstand der TU Kaiserslautern**

Es wurden Emissionsmessungen gemäß NRSC und NRTC durchgeführt. Die Nenndrehzahl betrug 2.100 min<sup>-1</sup>, die Zwischendrehzahl 1.600 min<sup>-1</sup>, die Leerlaufdrehzahl 850 min<sup>-1</sup>. Die relativen Lastwerte beziehen sich auf die jeweiligen Punkte der Vollastkurve (bei Nenndrehzahl 615 Nm, bei Zwischendrehzahl 832 Nm).

Bei den stationären Messungen konnte weitgehend auf die Zusatzheizung zur AdBlue<sup>®</sup>-Aufbereitung verzichtet werden. Lediglich beim vierten Messpunkt des NRSC wurde eine Zusatzheizleistung von 300 W eingestellt, um einer Ablagerung von AdBlue<sup>®</sup> infolge unvollständiger Verdampfung entgegenzuwirken. Beim achten Messpunkt wurde auf eine Dosierung von AdBlue<sup>®</sup> verzichtet, da sowohl die Generierung von NH<sub>3</sub> als auch die spätere Reaktion mit Stickstoffoxiden im Katalysator aufgrund zu geringer Temperaturen nur eingeschränkt abläuft. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 14.

Tabelle 14: Ergebnisse der gewichteten NRSC-Emissionsmessungen für verschiedene Pflanzenöle und Dieselkraftstoff

Kraftstoffart	Spezifische Emissionen (g kWh <sup>-1</sup> )				
	NO <sub>x</sub>	CO	HC	Partikel	Partikel (Rohemissionen)
Grenzwert	0,4	3,5	0,19	0,02	-
Dieselmkraftstoff	0,23	0,06	0,005	0,0019	0,0286
Rapsöl	0,23	0,08	0,008	0,0036	0,0109
Sonnenblumenöl	0,20	0,06	0,007	0,0024	0,0108
Sojaöl	0,21	0,07	0,007	0,0024	0,0078
Leindotteröl	0,22	0,09	0,007	0,0038	0,0111

Durch das angepasste Abgasnachbehandlungssystem konnten nach Anpassung der AdBlue<sup>®</sup> Dosieraten die gesetzlichen Stickstoffoxidgrenzwerte am Ausgang um ca. 50 % unterschritten werden. Zusätzlich liegen die gemessenen Werte für Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff auf einem sehr niedrigen Niveau.

Der NRSC ist nicht für eine Zertifizierung der Partikelemissionen geeignet. Die Messwerte sind hier nur zur Information aufgeführt. Aufgrund der höheren Filterbeladungsdauern ergeben sich bei der gravimetrischen Messung für die Pflanzenöle im Vergleich zu Dieselmkraftstoff leicht erhöhte Partikelemissionswerte. Dennoch werden die NRSC-Grenzwerte deutlich unterschritten. Für die Bewertung der Motorrohmissionen wurde der sogenannte Micro-Soot-Sensor ausgewertet. Hier bringt die Umstellung auf Pflanzenölbetrieb annähernd eine Reduktion um den Faktor 3 mit sich.

Für die Emissionsmessungen nach NRTC wurde eine sogenannte Feed-Forward-Steuerung der AdBlue<sup>®</sup>-Dosierung vorgenommen. In Abhängigkeit der motorseitig verbauten NO<sub>x</sub>-Sensoren und des berechneten Abgasmassenstroms wurde auf der Grundlage eines Modells die stöchiometrische Dosiermenge für eine vollständige Umsetzung der Stickstoffoxide ermittelt. Durch Änderungen im Abgassystem hervorgerufene Abweichungen wurden mittels Erstellung eines Differenzkennfelds mit anschließender Berücksichtigung in der ECU minimiert.

Zu Beginn des „kalten“ NRTC wurde die Zusatzheizleistung zur AdBlue<sup>®</sup>-Aufbereitung auf 600 W eingestellt, um schnellstmöglich dessen Betriebsbereitschaft zu erreichen. Sobald die Mindesttemperaturvorgabe von 250 °C erreicht war, genügten 300 W, wie sich bei den Versuchen herausgestellt hat.

Im Folgenden wird auf die zeitlichen Verläufe der Emissionen eingegangen. Für die CO- und HC-Emissionen treten zu Beginn des „kalten“ NRTC deutliche Spitzen auf (siehe Abbildung 19), zurückzuführen auf die anfangs zu niedrige Temperatur des Oxidationskatalysators. Im „warmen“ NRTC treten diese nicht mehr auf.

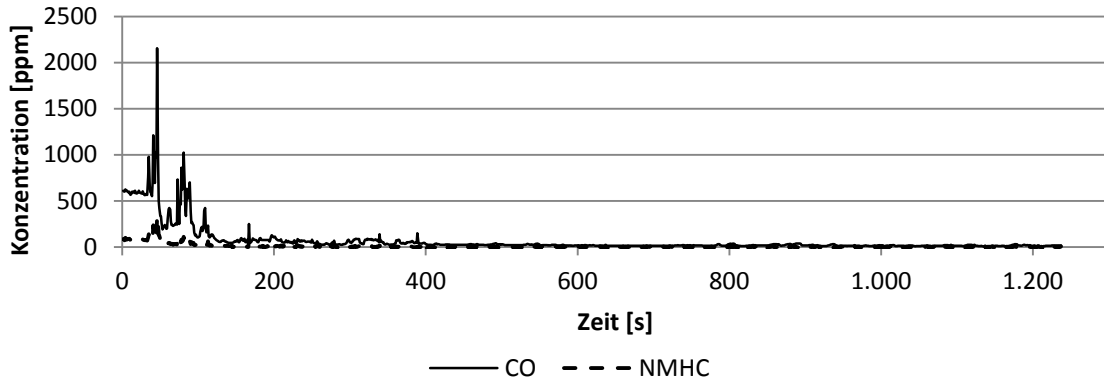


Abbildung 19: CO- und HC-Emissionsverläufe des Motors während des NRTC-Tests im Betrieb mit Rapsöl unter Kaltstartbedingungen (Quelle: TU Kaiserslautern)

Der Verlauf der  $\text{NO}_x$ -Emissionen zeigt ein vergleichbares Bild (siehe Abbildung 20). Hier spielt neben der anfangs zu geringen Oberflächentemperatur im Abgasnachbehandlungssystem noch eine Rolle, dass die AdBlue<sup>®</sup>-Dosierung erst einsetzt, wenn die  $\text{NO}_x$ -Sensoren betriebsbereit sind. Die Emissionsspitzen verschwinden bei allen untersuchten Kraftstoffen erst nach Beginn der Dosierung nach ca. 450 s.

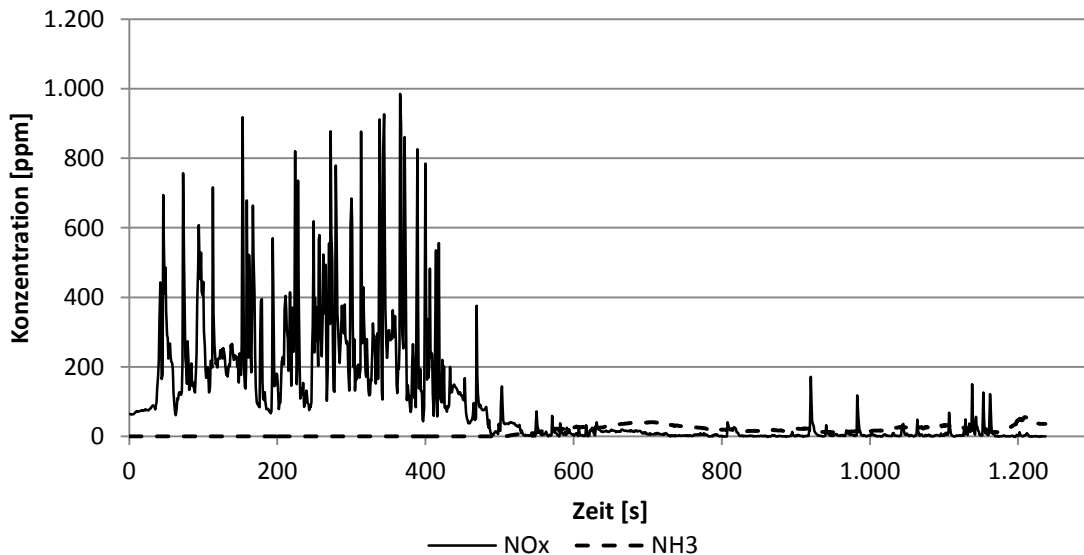


Abbildung 20:  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Emissionsverläufe des Motors während des NRTC-Tests im Betrieb mit Rapsöl bei Kaltstartbedingungen (Quelle: TU Kaiserslautern)

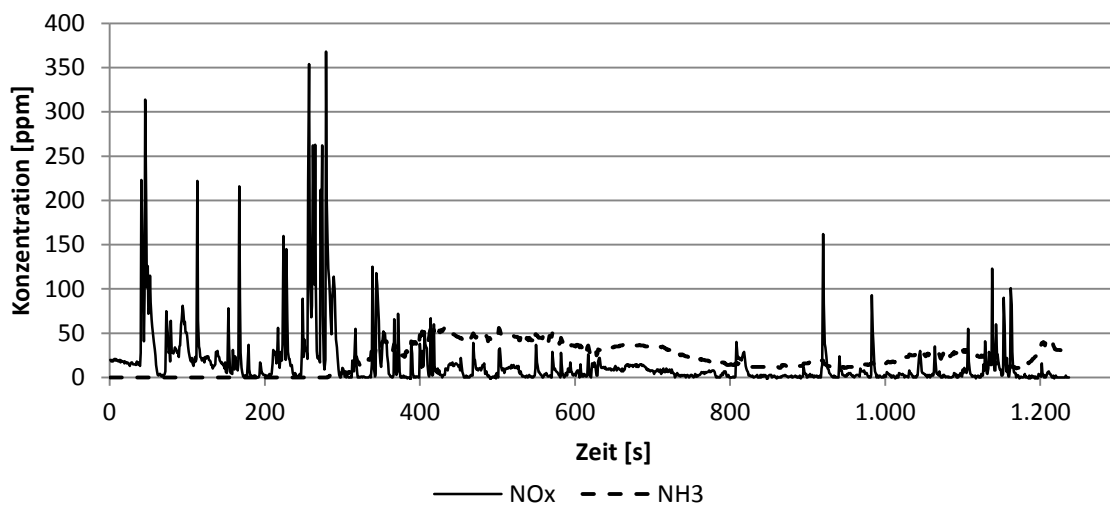


Abbildung 21:  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Emissionsverläufe des Motors während des NRTC-Tests im Betrieb mit Rapsöl bei Warmstartbedingungen (Quelle: TU Kaiserslautern)

Im Vergleich dazu zeigt der im warmen Betriebszustand ermittelte NRTC im Rapsölbetrieb deutlich geringere Spitzenwerte von Beginn an (siehe Abbildung 21). Dies lässt sich sowohl auf die Feed-Forward-Vorsteuerung als auch auf hohe Motorlasten und damit verbundene hohe Raumgeschwindigkeiten im Abgasnachbehandlungssystem zurückführen. Die Verweildauer für eine vollständige Umsetzung der Stickstoffoxide ist hierfür zu gering. Weiterhin fällt ab ca. 300 s eine Ausbildung von  $\text{NH}_3$  mit einer Konzentration von maximal 50 ppm auf. Durch weitere Optimierung des Systems könnte diese verringert werden. Alternativ könnte die Integration eines  $\text{NH}_3$ -Schlupfkatalysators nach dem Abgasnachbehandlungssystem eine Reduktion bewirken.

Tabelle 15: Ergebnisse der gewichteten NRTC-Emissionsmessungen für verschiedene Pflanzenöle und Dieselkraftstoff

Kraftstoffart	Spezifische Emissionen ( $\text{g kWh}^{-1}$ )				
	$\text{NO}_x$	CO	HC	Partikel	Partikel (Rohemissionen)
Grenzwert	0,4	3,5	0,19	0,02	-
Dieselmkraftstoff	0,31	0,10	0,006	0,0036	0,0435
Rapsöl	0,34	0,12	0,010	0,0030	0,0220
Sonnenblumenöl	0,28	0,11	0,009	0,0029	0,0229
Sojaöl	0,36	0,11	0,008	0,0030	0,0211
Leindotteröl	0,31	0,13	0,010	0,0025	0,0245

Im Vergleich zum NRSC wurden im NRTC höhere spezifische NO<sub>x</sub>-Emissionen gemessen. Dies liegt vor allem in der fehlenden Berücksichtigung der NH<sub>3</sub>-Speicherung im Abgasnachbehandlungssystem begründet. Nach Festlegung des finalen Abgasnachbehandlungssystems und Determinierung des temperaturabhängigen Ammoniakspeicherungsvermögens kann hier weiteres Potenzial zur Minimierung der Stickstoffoxidemissionen und Reduktion des NH<sub>3</sub>-Schlupfs erschlossen werden. Jedoch wurde bereits in diesem Stadium des prototypischen Abgasnachbehandlungssystems der Grenzwert unterschritten. Bei den Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffemissionen wird eine deutliche Unterschreitung sichtbar.

Neben den gasförmigen Emissionen konnte auch für die Partikelemissionen die Einhaltung der Grenzwerte abgesichert werden. Im Schnitt werden die zulässigen Grenzwerte bei allen Pflanzenölen um den Faktor acht unterschritten. Wie auch im NRSC wurden die Rohemissionen der Partikel bewertet. Die Pflanzenöle weisen im Vergleich zu Dieselmotoren nur halb so hohe spezifische Partikelemissionen auf, die selbst vor dem Abgasnachbehandlungssystem nur geringfügig über dem gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert liegen.

## 5.7 Untersuchungen am Traktorenprüfstand des TFZ

An dem John-Deere-Serientraktor, der zunächst die Abgasstufe IIIB erfüllte und im Rahmen des Projekts mit einem prototypischen Abgasstufe-IV-Abgasnachbehandlungssystem ausgerüstet wurde, wurden wiederkehrende Emissionsmessungen in Anlehnung an ISO 8178 C1 mit Rapsöl durchgeführt. Abbildung 22 zeigt den Versuchstraktor auf dem TFZ-Prüfstand. Die erste Messung erfolgte im September 2013 unmittelbar nach der Bereitstellung des Traktors durch John Deere. Nach etwa 100 Feldteststunden auf der Versuchsstation Grub wurde eine zweite Messung durchgeführt. Zwischen Dezember 2013 und März 2014 konnte saisonbedingt der Feldtest nicht fortgesetzt werden, außerdem wurde in dieser Zeit das Abgasnachbehandlungssystem durch den Hersteller nachgebessert. Unter anderem wurden das AdBlue<sup>®</sup>-Dosiersystem und verschiedene mechanische Komponenten getauscht und auch ein Update der Steuerung vorgenommen. Daraufhin erfolgte die dritte Emissionsmessung. Im April 2014 wurde ein verbesserter SCR-Katalysator eingebaut und ein vierter Prüfstandstest durchgeführt. Im Anschluss war der Traktor für etwa 350 Betriebsstunden im Feldtest. Die abschließende Emissionsmessung erfolgte im November 2014.





Abbildung 22: Versuchstraktor auf dem TFZ-Traktorenprüfstand (Quelle: TFZ)

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse der Messungen für die limitierten Abgaskomponenten Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM) dargestellt.

Die Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Partikelmasseemissionen liegen weit unterhalb der Grenzwerte der Abgasstufe IV (CO: 3,5 g/kWh; HC: 0,19 g/kWh; PM: 0,025 g/kWh) und zeigen kaum Veränderungen über die Einsatzzeit des Traktors.

Der Grenzwert für  $\text{NO}_x$ -Emissionen der Abgasstufe IV beträgt 0,4 g/kWh bezogen auf die Kurbelwellenarbeit. Da am Traktorenprüfstand nur die Zapfwellenarbeit gemessen werden kann, musste die Kurbelwellenarbeit berechnet werden. Dazu wurden die Verluste durch den Antriebsstrang und durch direkt an den Motor gekoppelte Verbraucher wie Lüfter, Lichtmaschine, Kompressor etc. berücksichtigt. Durch Vergleich der Betriebswerte am Motorenprüfstand und am Traktorenprüfstand wurde ein mittlerer Verlust von 20 % angenommen, sodass dem Grenzwert von 0,4 g/kWh an der Kurbelwelle ein Grenzwert von 0,5 g/kWh an der Zapfwelle entspricht.

Bei der ersten Messung wurden Stickstoffoxidemissionen von 0,43 g/kWh bezogen auf die Zapfwellenarbeit gemessen, der Grenzwert bezogen auf die Kurbelwellenarbeit wird hier eingehalten. Bei den beiden folgenden Messungen wurden mit 0,53 bzw. 0,55 g/kWh bezogen auf die Zapfwellenarbeit höhere Werte festgestellt. Der Grenzwert bezogen auf die Kurbelwellenarbeit wird hier nicht mehr eingehalten. Ursache dafür kann eine schlechtere  $\text{NO}_x$ -Konvertierung durch Alterung des SCR-Katalysators sein. Nach

dessen Austausch durch eine neue, verbesserte Version wurden im April 2014 die geringsten Stickstoffoxidemissionen mit nur 0,38 g/kWh bezogen auf die Zapfwellenarbeit ermittelt. Bei der abschließenden Messung wurde wieder eine Verschlechterung der  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsrate festgestellt, jedoch in einem im Vergleich zum Vorjahr geringeren Umfang bezogen auf die Einsatzdauer. Der Grenzwert bezogen auf die Kurbelwellenarbeit wurde dabei immer noch eingehalten, der Messwert betrug 0,46 g/kWh bezogen auf die Zapfwellenarbeit.

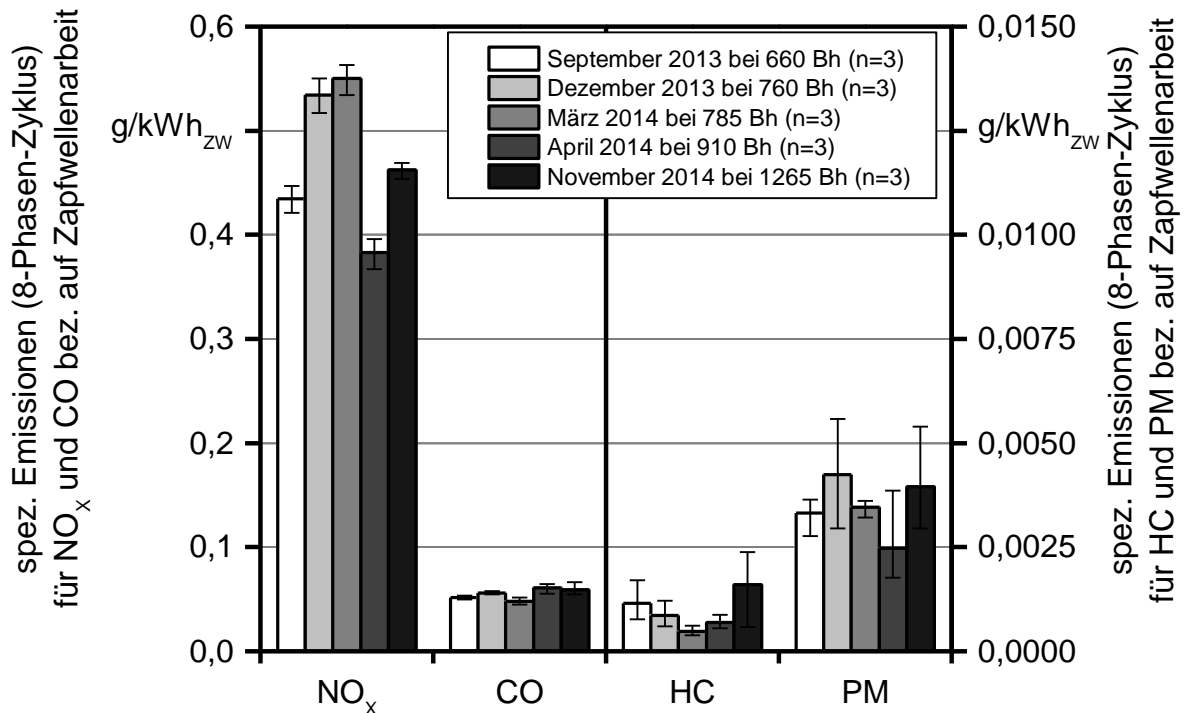


Abbildung 23: Spezifische Stickstoffoxid- ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxid- (CO), Kohlenwasserstoff- (HC) und Partikelmasseemissionen (PM) des Abgasstufe-IV-Traktors beim stationären 8-Phasen-Zyklus (NRSC) im Betrieb mit Rapsöl (Quelle: TFZ)

Bei allen Prüfstandsläufen zur Bestimmung des Emissionsverhaltens des Traktors wurden zusätzlich auch Leistungs- und Verbrauchsmessungen unter Volllast nach OECD Code 2 mit Rapsölkraftstoff durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt.

Die höchste Leistung wurde bei der ersten Messung festgestellt, die geringste – mit etwa 5 % niedrigeren Werten – bei der abschließenden Messung. Bei allen anderen Messungen lagen die Messwerte weitgehend zwischen diesen beiden Kurven, wobei jedoch keine eindeutig fallende Tendenz erkennbar ist. Die spezifischen Kraftstoffverbräuche unterscheiden sich ebenfalls kaum. Es traten Abweichungen in einer Bandbreite von lediglich etwa 3 % auf.

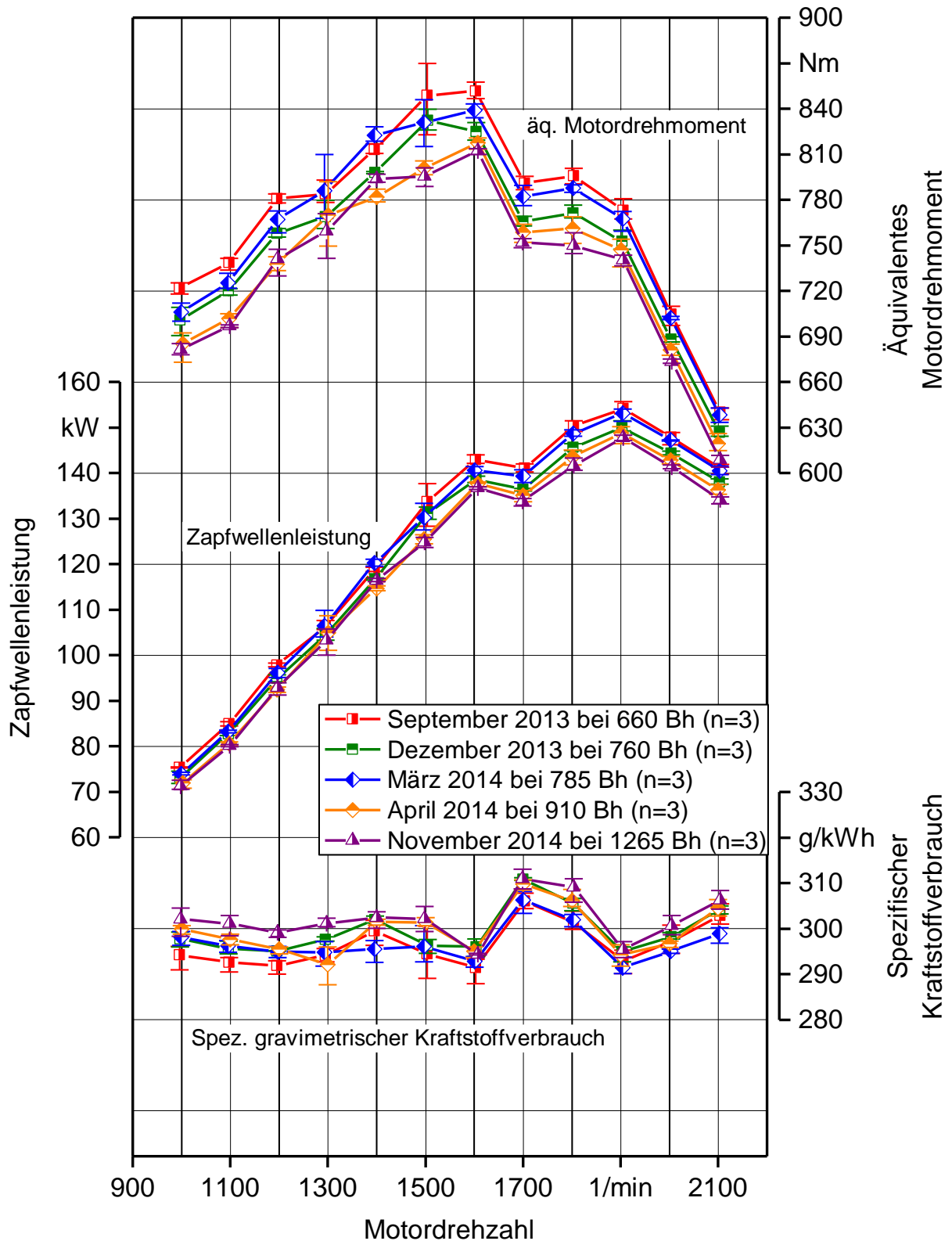


Abbildung 24: Volllastkennlinien des Abgasstufe-IV-Traktors beim Betrieb mit Rapsöl (Quelle: TFZ)

Neben den Emissions-, Leistungs- und Verbrauchsmessungen mit Rapsöl wurden im März bzw. April 2014 auch Messungen mit Sonnenblumenöl, Sojaöl, HO-Sonnenblumen-

öl, Leindotteröl und Baumwollsaatöl durchgeführt. Die Ergebnisse der Emissionsmessungen in Anlehnung an ISO 8178 C1 sind in Abbildung 25 dargestellt und die Ergebnisse der Leistungs- und Verbrauchsmessungen unter Volllast nach OECD Code 2 in Abbildung 26.

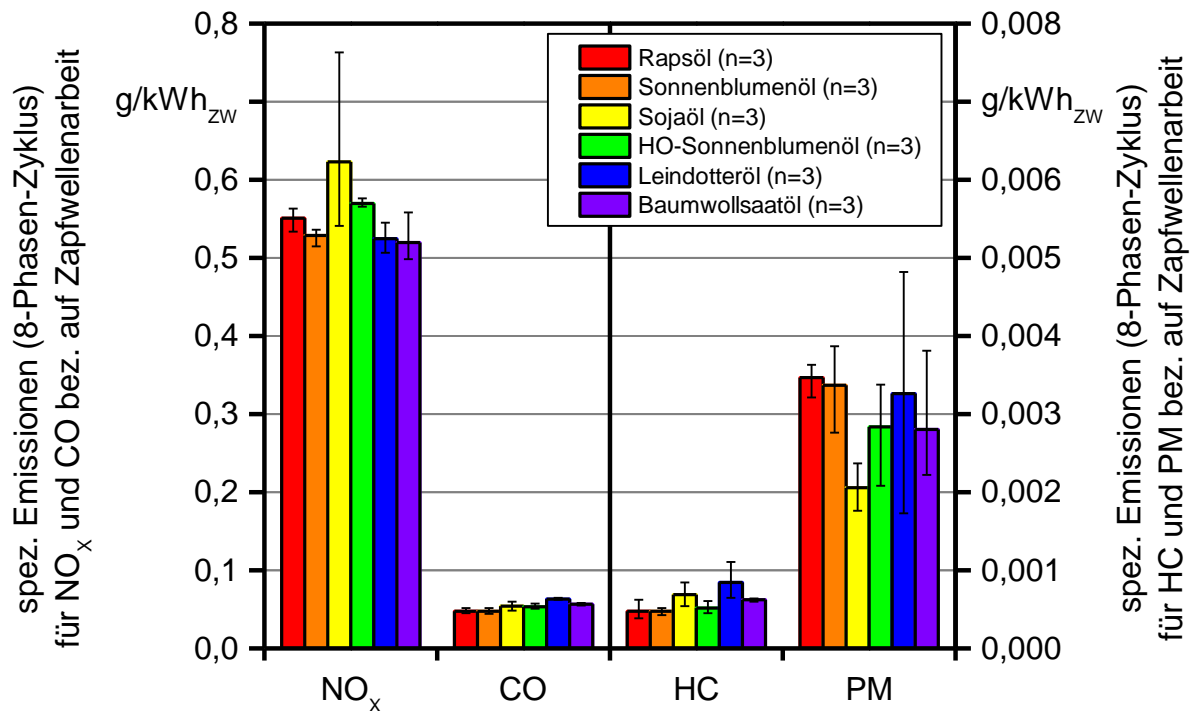


Abbildung 25: Spezifische Stickstoffoxid- ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxid- ( $\text{CO}$ ), Kohlenwasserstoff- ( $\text{HC}$ ) und Partikelmasseemissionen ( $\text{PM}$ ) des Abgasstufe-IV-Traktors zum Entwicklungsstand März 2014 beim stationären 8-Phasen-Zyklus (NRSC) im Betrieb mit unterschiedlichen Pflanzenölen (Quelle: TFZ)

Die Emissionen nach der Abgasnachbehandlung unterscheiden sich für die verschiedenen Kraftstoffe kaum. Lediglich bei den Stickstoffoxiden wurden im Betrieb mit Sojaöl etwas höhere Emissionen verzeichnet. Dies ist jedoch nicht auf den Kraftstoff zurückzuführen, sondern auf eine deutlich geringere Abgasrückführrate während der Prüfphase 5 bei einer Messung. Die Grenzwerte der Abgasstufe IV konnten hinsichtlich der Stickstoffoxidemissionen bei den Messungen mit keinem der verwendeten Pflanzenöle eingehalten werden. Danach wurde jedoch die zweite Stufe des Abgasnachbehandlungssystems ausgetauscht und deutlich bessere Emissionswerte mit Rapsöl erreicht (siehe Abbildung 23). Die Messungen mit anderen Pflanzenölen wurden mit dem angepassten Abgasnachbehandlungssystem nicht wiederholt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit diesem auch alle anderen verwendeten Kraftstoffe die  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte der Abgasstufe IV einhalten können. Die Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Partikelmasseemissionen liegen für alle verwendeten Pflanzenölkraftstoffe weit unterhalb der Grenzwerte der Abgasstufe IV und unterscheiden sich kaum von Pflanzenöl zu Pflanzenöl. Die Streuung der gemessenen Partikelmasse bei verschiedenen Messungen ist

auf das sehr geringe Niveau dieser Emissionen und die geringere Wiederholbarkeit des verwendeten gravimetrischen Messverfahrens im beobachteten Bereich zurückzuführen.

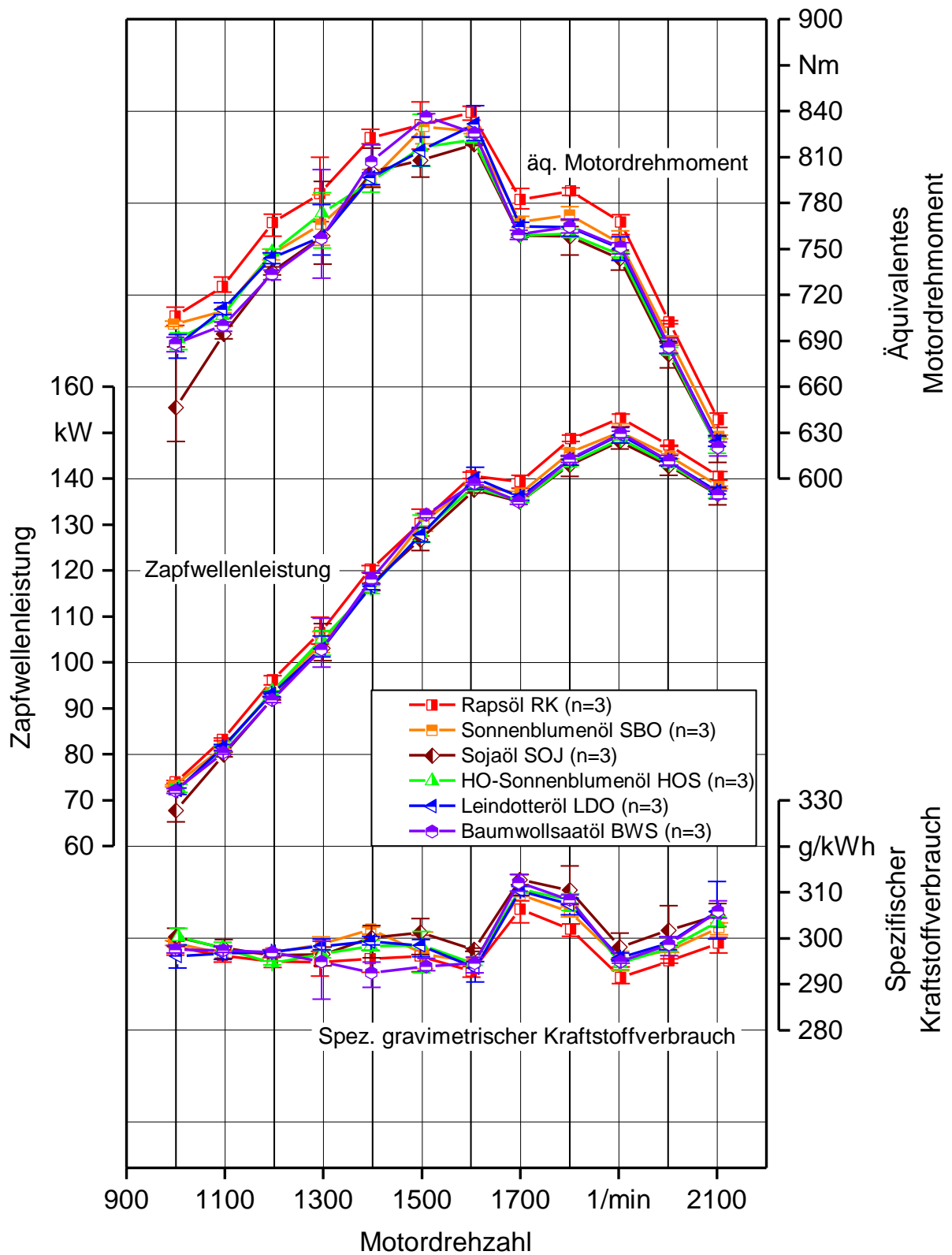


Abbildung 26: Vollastkennlinien des Abgasstufe-IV-Traktors zum Entwicklungsstand März 2014 beim Einsatz unterschiedlicher Pflanzenöle (Quelle: TFZ)

Die Unterschiede im maximalen Drehmoment (bei Drehzahl  $1.600 \text{ min}^{-1}$ ) für verschiedene Pflanzenölkraftstoffe sind sehr gering. Der größte Unterschied liegt zwischen Rapsöl und Sojaöl und beträgt weniger als 2 %. Auch beim spezifischen Verbrauch sind keine Unterschiede erkennbar, die auf die Art des Kraftstoffs zurückzuführen sind. Größere Abweichungen zwischen einzelnen Wiederholungsmessungen sind auf Kennfeldwechsel des Motorsteuergeräts zurückzuführen, vor allem im Drehzahlbereich unterhalb von  $1.500 \text{ min}^{-1}$ .

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Auswirkungen der Art des Pflanzenöls auf die motorische Verbrennung bei dem untersuchten Traktor, wenn überhaupt, nur von untergeordneter Bedeutung sind. Somit kommt unter den Gesichtspunkten Einhaltung von Emissionsgrenzwerten und Motorleistung grundsätzlich eine Vielzahl an Pflanzenölen als Kraftstoff für den Einsatz in Traktoren infrage. Allerdings unterscheidet sich die Praxistauglichkeit verschiedener Pflanzenöle deutlich in Bezug auf Lagerfähigkeit/-stabilität und Umgebungstemperatur.

## 5.8 Feldtest der Traktoren

### 5.8.1 Erfahrungen mit Dieselpartikelfiltern im Pflanzenölbetrieb

Um möglichst viele Praxiserfahrungen mit Traktoren der neuesten Generation im Betrieb mit Rapsölkraftstoff sammeln zu können, wurde im Rahmen dieses Projekts nicht nur ein Traktor der Abgasstufe IV (John Deere 6210R) mit einem Prototyp-Abgasnachbehandlungssystem im Feldtest begleitet, sondern auch ein Traktor der Abgasstufe IIIB (John Deere 6210R) mit einem aktuellen Serienabgasnachbehandlungssystem (DOC + DPF). Bei diesem Traktor wurde besonders das Beladungsverhalten des Dieselpartikelfilters näher beleuchtet. Zum einen wurde ein Differenzdrucksensor installiert und dessen Messwerte aufgezeichnet, um den Zustand kontinuierlich zu überwachen. Zum anderen wurde der DPF auch wiederkehrend demontiert und mittels spezieller Prozedur gewogen, um die tatsächliche Beladungszunahme festzustellen.

In Abbildung 27 ist der Differenzdruck des Dieselpartikelfilters des Abgasstufe-IIIB-Traktors über der Betriebszeit dargestellt. Dabei wurden Lastpunkte herausgefiltert, bei denen die Drehzahl zwischen  $1.700$  und  $2.100 \text{ min}^{-1}$  und die Motorlast zwischen 70 und 100 % liegt, um die Lastabhängigkeit des Abgasvolumenstroms und damit des Differenzdrucks weitgehend einzuschränken. Es ist erkennbar, dass der Differenzdruck innerhalb des beobachteten Zeitraums mehrfach leicht ansteigt, jedoch auch immer wieder auf das ursprüngliche Niveau absinkt. Dies bedeutet, dass die rein passive Partikelfilterregeneration sehr gut funktioniert und sich je nach Betriebsprofil des Traktors und damit einhergehenden Abgastemperaturen ein Gleichgewichtszustand zwischen Phasen der Rußakkumulation und Rußoxidation einstellt. Durch eine kontinuierliche Ascheablagerung im Partikelfilter ist langfristig tendenziell eine Zunahme des Differenzdrucks zu erwarten.

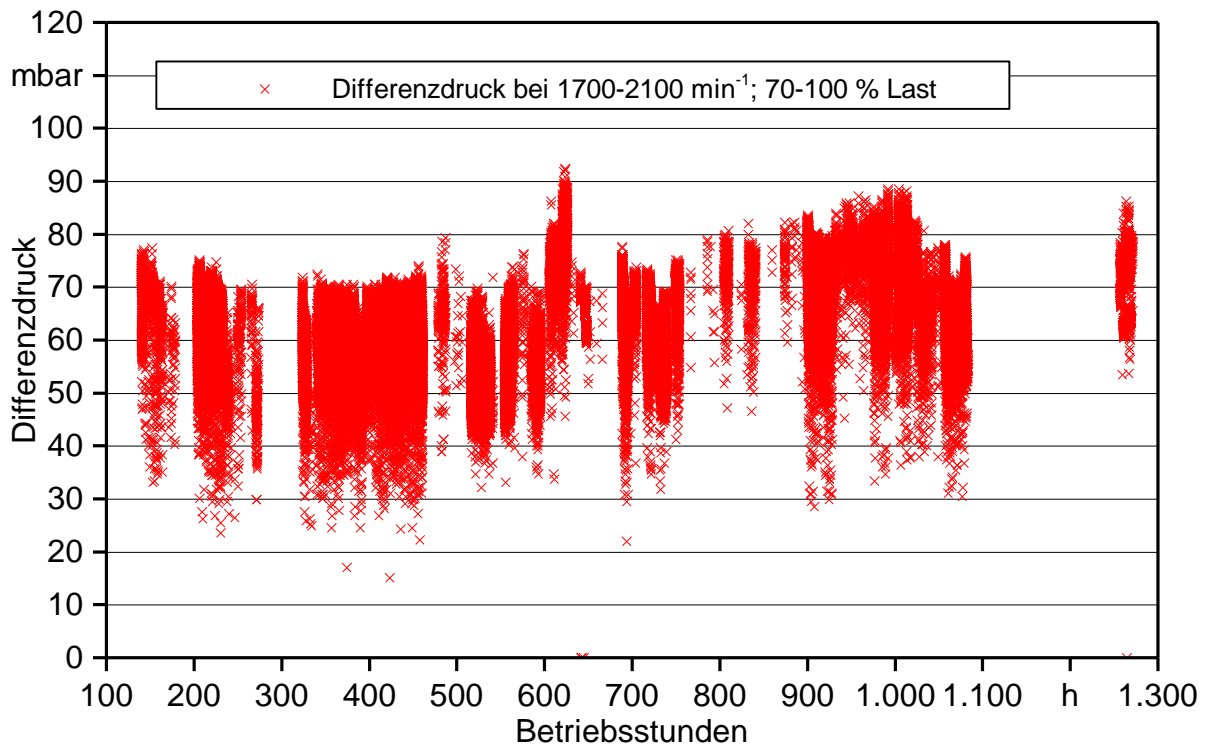


Abbildung 27: Differenzdruck des Dieselpartikelfilters des Abgasstufe-IIIB-Traktors im Lastbereich von 70 bis 100 % und Drehzahlbereich von 1.700 bis 2.100 min<sup>-1</sup> über der Betriebszeit (Quelle: TFZ)

Über die gesamte Beobachtungsdauer von etwa 1.200 Betriebsstunden wurde nicht nur der Differenzdruck des Partikelfilters kontinuierlich überwacht, sondern dieser auch regelmäßig ausgebaut und nach der Prozedur wie unter 4.4 beschrieben verwogen, um die tatsächliche Beladung zu ermitteln. Dabei wurde über die gesamte Projektlaufzeit eine Beladungszunahme von etwa 170 g ermittelt. Um die Zusammensetzung der im DPF abgeschiedenen Partikel zu bestimmen, wurde bei der letzten Wägung Material aus dem Filter entnommen und ein RFA-Screening nach DIN 51729-10 [9] sowie eine Kohlenstoffanalyse nach DIN 51732 [10] durchgeführt.

Die Zusammensetzung der Probe ist in Abbildung 28 dargestellt. In der nach ca. 1.200 Betriebsstunden aus dem Dieselpartikelfilter des Abgasstufe-IIIB-Traktors entnommenen Asche wurde ein Kohlenstoffanteil von nur 1,8 % (m/m) festgestellt. Das bedeutet, dass die rein passive Regeneration im Pflanzenölbetrieb sehr gut funktioniert und bei einem entsprechenden Betriebsprofil des Motors auch längerfristig keine aktive Regeneration notwendig ist. Die Hauptbestandteile der entnommenen Partikel aus dem DPF sind Oxide von Schwefel, Calcium, Zink und Phosphor. Mit Ausnahme von Zink kommen diese Elemente sowohl in sehr hohen Konzentrationen im Schmieröl als auch in geringen Konzentrationen im Rapsölkraftstoff vor.

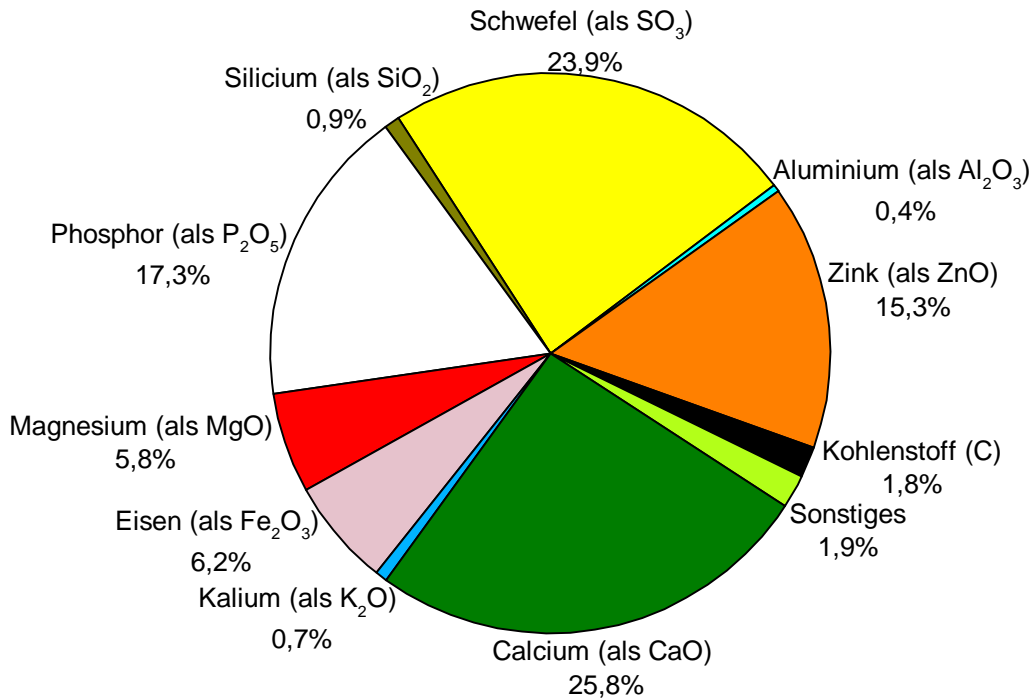


Abbildung 28: Zusammensetzung der Asche aus dem Dieselpartikelfilter in Masseanteilen (Quelle: TFZ)

Eine genaue Zuordnung, welche Anteile der Oxide welcher Quelle entstammen, ist deshalb nicht möglich. Durch eine zusätzliche REM/EDX-Untersuchung der Asche wurden die Zusammensetzung der Asche und der hohe Anteil an Zinkoxid bestätigt. Zink und Eisen können nur aus dem Schmieröl stammen, da sie nicht im Kraftstoff enthalten sind. Auch im Dieselpartikelfilter bestehen Partikelfilteraschen hauptsächlich aus anorganischen Bestandteilen von Motoröladitiven (Ca, P, Zn, S) [14]. DITTLER [14] beschreibt außerdem einen linearen Zusammenhang zwischen dem Sulfataschegehalt des Schmieröls und der spezifischen Aschemasse im Partikelfilter. Bei einem Sulfataschegehalt von 1,0 % (m/m) des Schmieröls, wie es auch bei dem in den Versuchstraktoren verwendeten Schmieröl der Fall ist, ist die mittlere Aschemassezunahme im Partikelfilter im Durchschnitt aller untersuchten Dieselmotoren 6,6 g pro Liter verbrauchten Schmieröls. Während des gesamten Untersuchungszeitraums des Abgasstufe-IIIB-Traktors wurden laut Betriebstagebuch ca. 20,5 l Schmieröl nachgefüllt, ca. 4 l Ölproben entnommen und 3 l Kraftstoff in das Schmieröl eingetragen. Dadurch ergibt sich eine theoretische Aschemassezunahme im DPF von 129 g. Diese sehr grobe Schätzung liegt in der gleichen Größenordnung wie die tatsächlich gemessene Massezunahme (170 g – 1,8 % (m/m) C = 167 g) des Partikelfilters. Die Ascheakkumulation im Pflanzenölbetrieb ist also bei der Verwendung normkonformen Rapsölkraftstoffs bei der untersuchten Maschine mit empirischen Werten im Dieselpartikelfilter vergleichbar.



### 5.8.2 Ergebnisse der Motorölanalysen während des Feldtests

Sowohl beim Abgasstufe-IIIB-Traktor als auch beim Abgasstufe-IV-Traktor wurden in einem Intervall von ca. 50 Betriebsstunden Motorölproben entnommen und analysiert. In Abbildung 29 ist der Pflanzenölgehalt in Abhängigkeit von der Laufzeit des Öls nach dem jeweiligen Ölwechsel dargestellt. Insgesamt wurden fünf Ölwechselintervalle untersucht. Dabei betrug der mittlere Pflanzenöleintrag beim Abgasstufe-IIIB-Traktor 1,1 % (m/m) Pflanzenöl je 100 Betriebsstunden und beim Abgasstufe-IV-Traktor 0,4 % (m/m) Pflanzenöl je 100 Betriebsstunden, sodass sich ein Mittelwert beider Traktoren von ca. 0,8 % (m/m) Pflanzenöl je 100 Betriebsstunden ergibt. Die Unterschiede beim Eintrag von Rapsölkraftstoff zwischen beiden Traktoren sind u. a. auf unterschiedliche Betriebsbedingungen zurückzuführen. Beim Abgasstufe-IIIB-Traktor wurden im beobachteten Zeitraum Kaltstartversuche durchgeführt und auch ein höherer Leerlaufanteil festgestellt, beides führt zu einem erhöhten Kraftstoffeintrag. Alle weiteren Motorölparameter waren bei allen Analysen stets unauffällig. Das Standardölwechselintervall von 500 Betriebsstunden bei Dieselmotorbetrieb kann auch bei Pflanzenölbetrieb eingehalten werden.

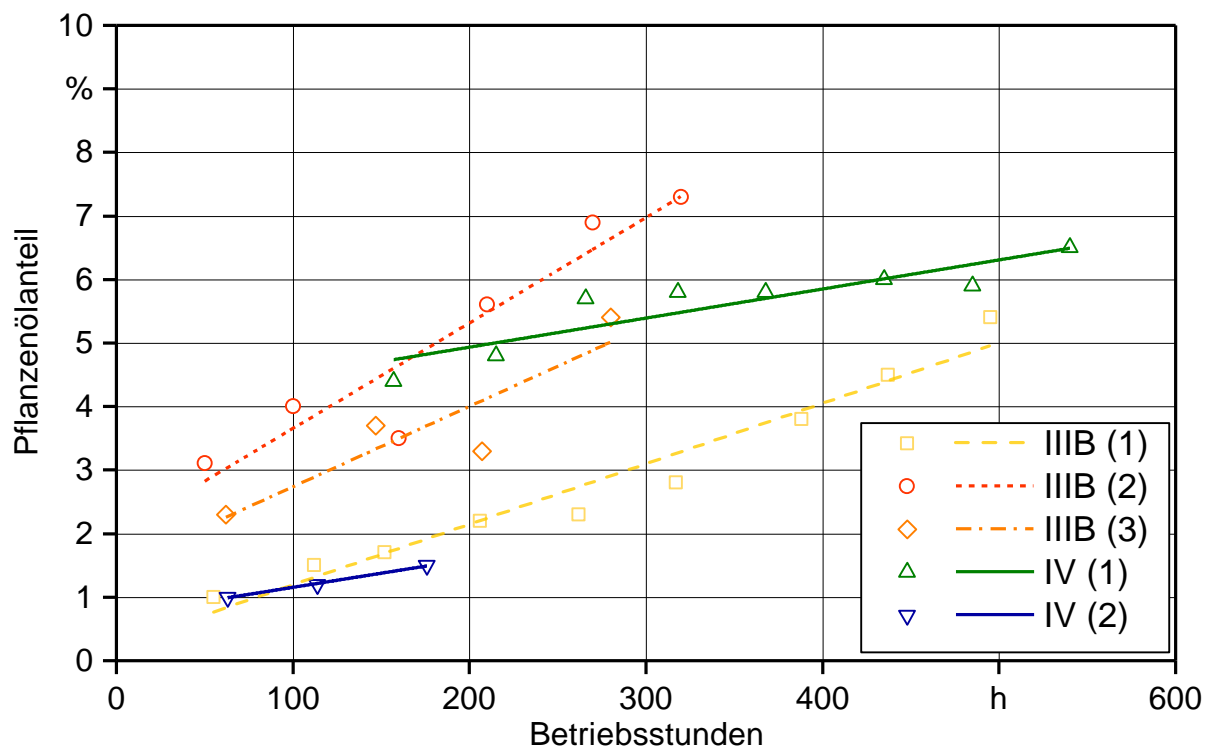


Abbildung 29: Pflanzenölgehalt im Motoröl in Abhängigkeit der Laufzeit des Öls nach dem Ölwechsel (Quelle: TFZ)

### 5.8.3 Verhalten der Kraftstofffilter im Pflanzenölbetrieb

Das Standardserviceintervall der Kraftstofffilter beträgt ebenfalls 500 Betriebsstunden. Dies wurde beim Abgasstufe-IIIB-Traktor ohne Fehlermeldungen erreicht und sogar bei Weitem übertroffen. Der Austausch erfolgte erst nach ca. 1.000 Stunden. Der Kraftstoff-

filter des Abgasstufe-IV-Traktors musste aufgrund zu geringen Kraftstoffvordrucks bereits nach 410 bzw. 255 Betriebsstunden gewechselt werden. Hier wurden jedoch auch nicht normkonforme Pflanzenöle als Kraftstoffe für Prüfstandstests verwendet (siehe Tabelle 12). Wird also stets hochwertiger normkonformer Rapsölkraftstoff eingesetzt, können aus heutiger Sicht auch die üblichen Dieselserviceintervalle für die Kraftstofffilter erreicht werden.

#### **5.8.4 Kaltstartverhalten der Traktoren**

Aufgrund des schlechten Startverhaltens der Traktoren im Pflanzenölbetrieb bei niedrigen Umgebungstemperaturen wurden die Motoren beider Feldtesttraktoren mit einer elektrischen Motorblockvorerwärmung ausgerüstet. Bei ausreichender Vorwärmzeit wurde stets ein gutes Startverhalten erreicht. Beim Kaltstart besteht jedoch Optimierungspotenzial.

#### **5.8.5 Sonstige Probleme im Feldtest**

Während des Feldtests trat bei den Traktoren gelegentlich, vor allem bei heißen Umgebungstemperaturen, die Fehlermeldung „Kraftstofftemperatur zu hoch“ auf. Dies ist auf die für den Pflanzenölbetrieb notwendigen Änderungen im Niederdruckkraftstoffsystem zurückzuführen. Aufgrund der auch bei höheren Temperaturen guten Schmierfähigkeit von Pflanzenöl wurde der Alarmgrenzwert durch den Traktorenhersteller erhöht.

#### **5.8.6 Abschließender Motorbefund**

Am Abgasstufe-IIIB-Traktor wurden in Zusammenarbeit mit der regineering GmbH auch ein Motorbefund und eine Injektorprüfung durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben vorbehaltlich nicht untersuchter Stellen keine betriebsgefährdenden Beanstandungen hinsichtlich des Motors und der Injektoren. Bis auf kleinere Leckagen an Verbindungsstellen und normale Ablagerungserscheinungen an den betrachteten Orten im Brennraum wurden keine Auffälligkeiten festgestellt. Die durchgeführten Motortests liefen erwartungsgemäß gut. In Bezug auf den Einsatz von Rapsölkraftstoff konnten keine Schäden, die nicht auch mit Diesel auftreten könnten, festgestellt werden.

Alle Injektoren wurden demontiert und mittels Durchflussmessungen untersucht. Der ermittelte Durchfluss aller Injektoren fiel für den Volllastpunkt bezogen auf einen neuen baugleichen Referenzinjektor bereits nach 1.257 Betriebsstunden um 9 bis 11 % geringer aus. Dies kann mittels Mengenkennfelder auf Ablagerungen im Düsenbereich zurückgeführt werden. Der geringere Durchfluss durch die Injektoren äußerte sich in einer gegenüber dem Auslieferungszustand um ca. 12 % geringeren maximalen Leistung.

In Abbildung 30 sind die demontierten Injektoren dargestellt. Die von außen erkennbaren Ablagerungen waren vornehmlich auf der Düsenkuppe, aber auch im Montagespalt der Düse im Zylinderkopf angesiedelt. Es zeigten sich normale krustenartige Schichten tief-schwarzer Kohlenstoffreste aus Ruß oder nicht verbranntem Kraftstoff. Die unmittelbaren

Bereiche um die Einspritzlöcher herum wiesen keine äußerlichen Ablagerungen auf. Bis auf diese üblichen Ablagerungen am Düsenkörper zeigte keiner der Injektoren Leckagen an Montagestellen oder Verschraubungen.

Zylinder 1:



Zylinder 2:



Zylinder 3:



Zylinder 4:



Zylinder 5:



Zylinder 6:



Abbildung 30: Injektorspitzen des Abgasstufe-III B-Traktors nach ca. 1.200 Betriebsstunden mit Rapsölkraftstoff

## 5.9 Folgenabschätzung

Im Rahmen einer Folgenabschätzung der B.A.U.M. Consult GmbH wurde die Frage untersucht, welche regional-ökonomischen Effekte erzielt werden, wenn in einer Region die Hälfte des für den Antrieb der regionalen Traktoren benötigten Dieselmotorkraftstoffs durch Pflanzenölkraftstoff ersetzt und in adäquat angepassten Traktoren eingesetzt wird. Dazu wurde eine Modellregion von der durchschnittlichen Größe der deutschen Landkreise definiert, die Deutschland im Verhältnis 1:308,45 hinsichtlich aller relevanten Parameter abbildet.

Es wurde verifiziert, dass der in dieser Modellregion produzierte Raps ausreicht, um in einer dezentralen Ölgewinnungsanlage die Menge an Rapsöl zu erzeugen, die benötigt wird, um die Hälfte des Traktorkraftstoffs zu ersetzen. Angenommen wurde, dass die dafür erforderliche Menge an Raps nicht mehr an eine zentrale, außerhalb der Region gelegene Ölgewinnungsanlage geliefert, sondern dezentral verarbeitet wird. Dadurch

sinken die Menge des von außerhalb der Region bezogenen Dieselkraftstoffs und der entsprechende Geldabfluss aus der Region um die Hälfte. Zugleich sinkt der Geldzufluss in die Region im Zusammenhang mit dem Verkauf von Rapssaat an die zentrale Ölgewinnungsanlage.

Es wurde weiter verifiziert, dass in der Modellregion mehr Rapsextraktionsschrot als Futtermittel verbraucht, als in dem untersuchten Szenario in der dezentralen Ölgewinnungsanlage Rapspresskuchen erzeugt wird. Folglich kann angenommen werden, dass dieser den Import der gleichen Menge an Rapsextraktionsschrot von außerhalb der Region ersetzt. Damit sinken entsprechend die Geldabflüsse aus der Region für den Bezug von Rapsextraktionsschrot. Nach Berücksichtigung des verringerten Geldzuflusses aus dem Verkauf von Rapssaat und der Geldabflüsse im Zusammenhang mit der dezentralen Öl- und Ölkuchengewinnung verbleibt netto eine Steigerung der regionalen Wertschöpfung von 0,9 Millionen Euro. Das sind 960 Euro je landwirtschaftlicher Betrieb. Im betrachteten Szenario wird jedoch lediglich bei der Ölgewinnungsanlage eine zusätzliche Teilzeitstelle im Umfang von etwa 1,5 Stunden pro Tag, beziehungsweise 8,25 Stunden pro Woche geschaffen.

Es wurde weiter untersucht, ob eine Umstellung des Getreideanbaus in der Modellregion auf Mischfruchtanbau mit Leindotter erlaubt, die Menge an Leindotteröl zu erzeugen, mit der die Hälfte des Traktorkraftstoffs der Region ersetzt werden kann. Das ist nicht der Fall. Es wurde weiterhin untersucht, ob alternativ der Anbau einer Leindotterreinkultur als späte Zweitfrucht nach Getreide dies erlaubt. Dem ist so. Unterstellt wurde nun, dass Leindotteröl mindestens mit einem Anteil von 50 % an einer Traktorkraftstoffmischung und Leindotterpresskuchen als Futtermittel anstelle von Rapsextraktionsschrot zugelassen ist. Dann sinken die Geldabflüsse aus der Region für Dieselkraftstoff und Rapsextraktionsschrot wie im Fall der 50%-Traktorkraftstoffbereitstellung aus Rapsöl. Veränderungen der Geldzuflüsse gibt es keine. Hinzu kommen jedoch neue Geldabflüsse im Zusammenhang mit der Leindotterölproduktion sowie der Öl- und Ölkuchengewinnung. Netto steigt jedoch die regionale Wertschöpfung um 2,8 Millionen Euro, das sind 3.000 Euro je landwirtschaftlicher Betrieb. Dabei wird Beschäftigung im Umfang von etwa 31 Vollzeitstellen geschaffen.

Die Ergebnisse zu Leindotter setzen voraus, dass keine andere Zweitfrucht nach Getreide verdrängt wird. Geschieht dies, sind die regional-ökonomischen Nettoeffekte weniger ausgeprägt. Die Ergebnisse zu Leindotter hängen auch von den sonstigen, vergleichsweise unsicheren Annahmen ab, wenn auch nicht sehr sensibel. Hier ist eine Neubewertung erforderlich, sobald fundierte Daten zu Leindotterreinkulturen vorliegen, beziehungsweise sich diese durch eine Weiterentwicklung der Kultivierung von Leindotter signifikant ändern.

Es ist folglich möglich, die Hälfte des Traktorkraftstoffs eines durchschnittlichen deutschen Landkreises oder einer vergleichbaren Region durch Raps- oder Leindotterölkraftstoff zu ersetzen. Im Fall von Raps steigt die Nettowertschöpfung in der Region um etwa eine Million Euro, im Fall von Leindotter um fast drei Millionen und steht landwirtschaftli-

chen Betrieben für andere Ausgaben zur Verfügung. Zusätzliche Beschäftigung entsteht vor allem bei der Nutzung von Leindotterölkraftstoff aus der Region.

Möglich und besonders interessant ist die Option, dass der gesamte Traktorkraftstoff der Region durch eine 50:50-Mischung aus Raps- und Leindotterölkraftstoff gedeckt wird. In diesem Fall addieren sich die regional-ökonomischen Effekte der beiden Szenarien.

## 5.10 Erreichte Nebenergebnisse

Im Rahmen einer eng im Zusammenhang mit dem PraxTrak-Projekt erstellten Doktorarbeit [15] wurden auch Versuche zur Mischung von Diesel beziehungsweise Rapsöl mit Methan (CNG) am oben beschriebenen Motorprüfstand durchgeführt, der dazu zusätzlich mit Methantanks, Düsen im Motoransaugbereich für Methanzugabe und Dosiereinrichtungen für Methan ausgerüstet wurde.

DÜSSELDORF (2014) [15] beschreibt, dass durch die Zugabe von CNG die Stickstoffoxidemissionen deutlich reduziert werden. Bei beiden Kraftstoffmischungen nehmen die Stickoxidemissionen mit einer Regression von 98 % linear ab. Im Betrieb mit Rapsöl werden über die Zugabe von CNG geringfügig höhere Reduktionsraten von 0,14 g/kWh pro energetischen Anteil CNG erreicht. Dieser Wert liegt im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff bei 0,13 g/kWh. Die Partikelemissionen lagen bei beiden Versuchsreihen von Beginn an auf dem sehr niedrigem Niveau von 0,005 g/kWh. Der gesetzliche Grenzwert für die Abgasstufe IV liegt bei 0,025 g/kWh. Mit Zunahme des energetischen CNG-Anteils bleiben die Partikelemissionen nahezu unverändert. Aufgrund der niedrigen Ausgangsbasis im Reinkraftstoffbetrieb hat das CNG nicht den erwarteten Einfluss auf die Partikelemissionen.

Während die CO- und HC-Emissionen im reinen Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoffbetrieb auf sehr niedrigem Niveau liegen, werden bei Zugabe von CNG bereits ab einem energetischen Anteil von 10 % die Grenzwerte für die gültigen Abgasemissionsgrenzwerte überschritten.

Durch das bessere Kohlenstoff- zu Wasserstoffverhältnis des CNG, sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit Zugabe von CNG. Diese liegen im reinen Rapsölbetrieb auf einem Niveau von rund 1,1 kg/kWh, bei Diesel sind die Werte vergleichbar. Durch die Zugabe von CNG können die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 0,96 kg/kWh reduziert werden. Angesichts der vierfach höheren Klimaschädlichkeit von Methan wird die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen jedoch durch den Methananteil der HC-Emissionen (Methan-Schlupf) um 80 g/kWh reduziert, also weitgehend zunichte gemacht. Es konnte aber gezeigt werden, dass durch die Reduktion der Luftmasse im Zylinder und die dadurch resultierende Absenkung des Verbrennungsluftverhältnisses der Methan-Schlupf deutlich reduziert werden kann. Mit Steigerung der Abgasrückführungsrate (AGR-Rate) sinken die Stickoxidemissionen, während die Partikelemissionen steigen. Der Methan-Schlupf sinkt.



## Zusammenfassung

### Eignung verschiedener Pflanzenöle für den Einsatz als motorische Kraftstoffe

Untersuchungen von Proben von Rapsöl, Leindotteröl, Sojaöl, Sonnenblumenöl, HO-Sonnenblumenöl und Baumwollsaatöl hinsichtlich ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften und der Erfüllung der Norm DIN 51605 für Rapsölkraftstoff sowie der Vornorm DIN SPEC 51623 für allgemeine Pflanzenölkraftstoffe ergaben, dass diese Öle grundsätzlich, wenngleich nicht in allen Fällen ohne Mischung und Additivierung, für den Einsatz als Kraftstoffe geeignet sind. Ein grundsätzliches Problem von Pflanzenölkraftstoffen ist der allen Ölen gemeinsame starke Anstieg der Viskosität bei niedrigen Temperaturen. Hier gibt es jedoch nur geringe Abweichungen zwischen den einzelnen Ölen, so dass die für Rapsölkraftstoff entwickelten Lösungen im Wesentlichen auf andere Pflanzenölkraftstoffe übertragen werden können.

Die untersuchten Proben von Sojaöl, HO-Sonnenblumenöl und Rapsöl hielten alle Grenzwerte der jeweils gültigen Norm ein. Für die anderen Öle war zum gegebenen Zeitpunkt keine normkonforme Qualität auf dem Markt verfügbar. Baumwollsaatöl wich lediglich bei der visuellen Begutachtung von der Normspezifikation aufgrund einer sichtbaren Trübung ab. Für seine praktische Verwendung ist ferner von Nachteil, dass es bereits bei  $-10\text{ °C}$  fest wird. Sonnenblumenöl hielt die Vorgaben zur Oxidationsstabilität nicht ein. Die meisten Abweichungen von der Norm wies Leindotteröl auf. Auch bei diesem Öl war eine Trübung sichtbar, die Iodzahl, der Linolensäuregehalt, die Oxidationsstabilität und der Wassergehalt wurden teils deutlich überschritten. Alle untersuchten Pflanzenöle hatten Gehalte aschebildender Elemente unterhalb der Nachweisgrenze, ausgenommen eine Probe von Sojaöl, die  $1,2\text{ mg/kg}$  Phosphor enthielt, was jedoch auch noch innerhalb des Normgrenzwerts liegt. Es sind daher nur sehr geringe Belastungen des Motors, des Motoröls und des Abgasnachbehandlungssystems mit Aschen zu erwarten.

Die durchgeführten Untersuchungen zu simulierter Destillation und zur Temperaturabhängigkeit von Dichte und Viskosität von Pflanzenölkraftstoffen liefern wichtige Erkenntnisse zur Herstellung der Praxistauglichkeit von Pflanzenöltraktoren der neuesten Generation.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht hinsichtlich des Einflusses der im Rahmen des Projekts ermittelten Werte für die spezifische Wärmekapazität und die Oberflächenspannung verschiedener Pflanzenöle auf das Zerstäubungsverhalten und die motorische Verbrennung.

### Modifikation des Motors und der Abgasnachbehandlung

Die Anpassung des Motors an den jeweiligen Kraftstoff muss vor allem die unterschiedlichen Heizwerte der Kraftstoffe berücksichtigen. Nach der Anpassung konnte im Rapsöl wie im Dieselmotor dieselbe Leistungsfähigkeit des Motors nachgewiesen werden.

Zur Einhaltung der Grenzwerte für Partikelemissionen sind in der Abgasstufe IV Partikelfilter erforderlich. Die darin zurückgehaltenen Partikel müssen regelmäßig verbrannt, d. h. der Partikelfilter regeneriert werden. Strategien zur aktiven Regeneration des Partikelfilters mittels Nacheinspritzung von Kraftstoff in den Motorbrennraum oder Einbringen mittels einer externen Dosiereinheit in den Abgastrakt erwiesen sich für Pflanzenölkraftstoffe als ungeeignet. Dagegen zeigten die Partikelfilterbeladungsuntersuchungen und die im Pflanzenölbetrieb festgestellten geringen Partikelemissionen, dass ein passiv regeneriertes Partikelfiltersystem für die Anwendung mit Pflanzenöl geeignet ist. Allerdings entstehen dann im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoffbetrieb höhere Stickstoffoxidemissionen.

Als geeignet zur Reduktion der Partikel und der Stickstoffoxide im Pflanzenölbetrieb erwies sich die Kombination eines Oxidationskatalysators (DOC) mit einer angepassten zweiten Stufe des Abgasnachbehandlungssystems, die im Wesentlichen die Komponenten zur Partikelfilterung und die selektive katalytische Reduktion umfasst. Mit diesem konnten alle Grenzwerte der Abgasstufe IV eingehalten werden. Das Abgasnachbehandlungssystem nutzt zur Regenerierung den CRT-Effekt (Continuous Regeneration Trap). Dabei werden die abgeschiedenen Rußpartikel durch das im vorgeschalteten Dieseloxidationskatalysator gebildete  $\text{NO}_2$  in einem Temperaturbereich von ca. 200 bis 450 °C bei ausreichender  $\text{NO}_2$ -Konzentration im Abgas oxidiert. Eine Beschichtung des Filters mit Vanadiumoxid und die Zugabe von Ammoniak erlauben ferner eine umfassende Reduktion der Stickstoffoxide.

Mit der angepassten zweiten Stufe des Abgasnachbehandlungssystems wurde ein sehr kompakter Motoraufbau ermöglicht. Die kurze Mischungslänge zwischen DOC und der angepassten zweiten Stufe des Abgasnachbehandlungssystems stellt allerdings erhöhte Anforderungen an die Aufbereitung des Reduktionsmittels AdBlue<sup>®</sup>. Darum wurde das Abgasnachbehandlungssystem nachoptimiert, um diesen Anforderungen zu entsprechen. Das für den optimalen Betrieb erforderliche NO-zu- $\text{NO}_2$ -Verhältnis von 1:1 wird durch den vorgeschalteten DOC weitgehend eingestellt. Dieser hat dieselbe Funktion wie in der Serienkonfiguration: Er oxidiert Kohlenmonoxid (CO) sowie Kohlenwasserstoffe (HC) und stellt die Abgastemperatur auf den für das Abgasnachbehandlungssystem erforderlichen Temperaturbereich ein.

### **Prüfstandsuntersuchungen am Abgasstufe-IV-Traktor und Feldtests**

Die an einem John-Deere-Serientraktor mit modifiziertem Abgasnachbehandlungssystem durchgeführten Messungen und die Traktorenfeldtests haben die Praxistauglichkeit von Traktoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Rapsöl bewiesen. Neben den Emissions-, Leistungs- und Verbrauchsmessungen mit Rapsöl wurden auch Messungen mit Sonnenblumenöl, Sojaöl, HO-Sonnenblumenöl, Leindotteröl und Baumwollsaatöl durchgeführt. Die Emissionen nach der Abgasnachbehandlung unterscheiden sich für die verschiedenen Kraftstoffe kaum und die Grenzwerte der Abgasstufe IV können auch im Pflanzenölbetrieb eingehalten werden.



Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Auswirkungen der Art des Pflanzenöls auf die motorische Verbrennung bei dem untersuchten Traktor, wenn überhaupt, nur von untergeordneter Bedeutung sind. Somit kommt unter den Gesichtspunkten Einhaltung von Emissionsgrenzwerten und Motorleistung grundsätzlich eine Vielzahl an Pflanzenölen als Kraftstoff für den Einsatz in Traktoren infrage. Allerdings unterscheidet sich die Praxistauglichkeit verschiedener Pflanzenöle deutlich hinsichtlich Lagerfähigkeit/-stabilität und Umgebungstemperatur.

Während des Beobachtungszeitraums wurden im Feldtest mit pflanzenölbetriebenen Traktoren keine Nachteile bei Motorölwechselintervallen, Kraftstofffilterstandzeiten und Partikelfilterdifferenzdruck gegenüber dem Dieselbetrieb festgestellt. Lediglich beim Kaltstartverhalten besteht noch Optimierungspotenzial.

### **Regional-ökonomische Folgen**

Es ist möglich, die Hälfte des Traktorkraftstoffs eines durchschnittlichen deutschen Landkreises oder einer vergleichbaren Region durch Raps- oder Leindotterölkraftstoff zu ersetzen. Im Fall von Raps steigt die Nettowertschöpfung in der Region um etwa eine Million Euro pro Jahr, im Fall von Leindotter um fast drei Millionen und steht landwirtschaftlichen Betrieben für andere Ausgaben zur Verfügung. Zusätzliche Beschäftigung entsteht vor allem bei der Nutzung von Leindotterölkraftstoff aus der Region. Die Ergebnisse zu Leindotter setzen voraus, dass keine andere Zweitfrucht nach Getreide verdrängt wird. Geschieht dies, sind die regional-ökonomischen Nettoeffekte weniger ausgeprägt. Möglich und besonders interessant ist die Option, dass der gesamte Traktorkraftstoff der Region durch eine 50:50-Mischung aus Raps- und Leindotterölkraftstoff gedeckt wird. In diesem Fall addieren sich die regional-ökonomischen Effekte der beiden Szenarien.



## Abstract

The target of the project PraxTrak was the manufacturing and demonstration of the practical feasibility of tractors with Tier 4 engines in operation with vegetable oil fuel. For this purpose detailed research and development was conducted at the engine test bench. The focus was primarily on the after-treatment of exhaust gas consisting of DOC (Diesel oxidation catalyst), DPF (Diesel particulate filter) and SCR (selective catalytic reduction). Technologies, developed in the scope of these activities were verified in a field test. For this purpose a tractor was investigated before and after the field test on a test bench. Additionally to fuel consumption and performance, particularly the exhaust emissions of the test object had priority. In the following long-term experiment the customer-oriented practicability of this technology was demonstrated.

In detail transient engine testings were performed at the Technical University of Kaiserslautern. Main objective was the development of a fully functional and practical Tier 4 tractor running on pure plant oils. First of all the effects of the use of various plant oils on engine performance and emissions were investigated. Following, the engine control parameters were adapted to achieve the same engine performance as in diesel mode. Based on the emission measurements a new exhaust gas after-treatment system was developed and integrated into the test bench engine to make sure that the limited emissions of Tier 4 are fulfilled. This verification was achieved by performing and evaluating the test cycles "Non road stationary cycle (NRSC)" and "Non road transient cycle (NRTC)". Furthermore rapeseed oil, sunflower oil, high-oleic (HO) sunflower oil, soybean oil, camelina oil and cottonseed oil were examined according to the fuel quality standards DIN 51605 and DIN SPEC 51623 by the Technology and Support Centre (TFZ). Additionally further important and fuel relevant parameters of these vegetable oils have been investigated. Recurring stationary emission and performance measurements of the field test tractor have been conducted on the tractor test bed of the TFZ with all mentioned vegetable oils as fuel. Field trials of the tractors were carried out on Bavarian state farms under supervision of TFZ. This included fuel and utility supply, fuel and engine oil analysis, evaluation of the operations diary, installation of a logger for operating data and additional sensors on the test tractors, evaluation of operating data as well as malfunction documentation and analysis.

The results of the engine test bench trials showed that the use of plant oils caused a minimization of the engine out particulate emissions but higher nitrogen oxides emissions. Due to the lower heating value of the plant oil the fuel injection mass has been increased by 15 % to get the same engine torque and power curves as in diesel mode. The higher viscosity and vaporization temperature of plant oils compared to diesel fuel would cause problems performing an active regeneration of a particulate filter. Because of this a newly designed exhaust gas after-treatment system was installed close to the engine, which is optimized for the differing boundary conditions. The results of the test cycles NRSC and NRTC proved that the emission standards could be fulfilled.

Rapeseed oil, camelina oil, soybean oil, sunflower oil, HO sunflower oil and cottonseed oil were examined regarding their suitability as fuel and used as test fuels on the tractor test bed. All oils except for camelina oil have shown very good fuel properties. Camelina oil however does not comply with several parameters of the fuel standard DIN SPEC 51623, due to its high content of polyunsaturated linoleic acid.

During the field test, the tractor was operated only with rapeseed oil fuel according to DIN 51605 and was examined recurrently at the tractor test bed for its performance and exhaust emissions. The emissions of the regulated pollutants carbon monoxide, hydrocarbons and particulate matter were always found to be far below the limits and also the nitrogen oxides emissions met the target after improvements of the exhaust after-treatment system. No loss of power output of the tractor due to the vegetable oil operation could be detected even after several hundred hours of operation. Furthermore, there were no significant differences in performance and emissions during operation with other pure vegetable oils as a fuel. By evaluating the operating data obtained from the field test, following key findings were identified. Long-term operation of an adapted diesel engine equipped with a particulate filter is also possible with vegetable oil fuel and - in contrary to diesel - even without active DPF regeneration. The accumulation of vegetable oil fuel in the lubricating oil amounts to only approximately 1 % per 100 hours of operation and therefore service intervals can be kept equal to diesel operation. The fuel filter can also achieve the same service life as in diesel mode. Only the cold start behavior was found to be necessary to be improved for vegetable oil fuel operation.

In conclusion the developed technology was able to comply with test cycles for type approvals on the engine test bench with different vegetable oils. Especially the particle filter, respectively the active regeneration was a challenge due to the specific physical properties of the vegetable oils. This handicap was compensated through the higher passive regeneration activity of vegetable oil born soot. During a test period of 1.5 years the field test machine was able to demonstrate its suitability for practice use. Measurements at the tractor test bench also proved this matter. Finally the acceptance of the vegetable oil compatible final stage 4 John Deere tractor was given by the tractor operating staff.

## Quellenverzeichnis

- [1] BASSHUYSEN, R. v.; SCHÄFER, F. (Hrsg.) (2004): Lexikon Motorentchnik – Der Verbrennungsmotor von A bis Z. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 1078 Seiten, ISBN 978-3-528-0390-3
- [2] BROLL, P.; SCHRAML, S. (2009): Zukünftige Abgasnachbehandlungssysteme für Off-Road-Anwendungen. In: FÖRDERKREIS ABGASNACHBEHANDLUNGSTECHNOLOGIEN E. V. (FAD) (Hrsg.): Der Dieselmotor im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Schadstoffemission. 8. Dresdner Motorenkolloquium, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden, Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik, 17. u. 18. Juni 2009, Hilton Dresden Hotel. Hrsg.-Mitarbeiter: ZIKORIDSE, G. Tagungsband. Dresden: Hochschule für Technik und Wirtschaft, S. 220–244
- [3] CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION (1999): Report of the sixteenth session of the Codex Committee on Fats and Oils. ALINORM 99/17. London, 8.–12. März 1999. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), World Health Organization (WHO), 67 Seiten
- [4] DEERE & COMPANY (2014): John Deere. Emissions Information. Understanding Emission Regulations. URL: [http://www.deere.com/wps/dcom/en\\_US/services\\_and\\_support/emissions\\_information/understanding\\_emission\\_regulations/regulation\\_spag](http://www.deere.com/wps/dcom/en_US/services_and_support/emissions_information/understanding_emission_regulations/regulation_spag) (Stand: 05.06.2014)
- [5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. DIN (1996): DIN EN ISO 8178-4 Hubkolben-Verbrennungsmotoren, Abgasmessung. Teil 4: Prüfzyklen für verschiedene Motorverwendungen. Berlin: Beuth Verlag, 14 Seiten
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2007): DIN EN 15195: Flüssige Mineralölerzeugnisse – Bestimmung des Zündverzugs und der abgeleiteten Cetanzahl (ACZ) von Kraftstoffen aus Mitteldestillaten in einer Verbrennungskammer mit konstantem Volumen. Berlin: Beuth-Verlag, 24 Seiten
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2010): DIN 51605: Kraftstoffe für pflanzenölaugliche Motoren – Rapsölkraftstoff. Berlin: Beuth-Verlag, 16 Seiten
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2012): DIN SPEC 51623: Kraftstoffe für pflanzenölaugliche Motoren - Pflanzenölkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren. Juni 2012. Berlin: Beuth-Verlag, 17 Seiten
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2001): DIN 51729-10: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Brennstoffasche – Teil 10: Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA). Berlin: Beuth-Verlag
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN 51732: Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff - Instrumentelle Methoden. Berlin: Beuth-Verlag
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2005): DIN 70070: Dieselmotoren – NO<sub>x</sub>-Reduktionsmittel AUS 32 – Qualitätsanforderungen. Berlin: Beuth-Verlag, 11 Seiten
- [12] DICKERSON, R. E.; GEIS, I. (1986): Chemie – eine lebendige und anschauliche Einführung. Übers. von Barbara Schröder u. Joachim Rudolph. 1. Aufl., 2. berichtigter Nachdruck. Weinheim: Verlag Chemie, 688 Seiten, ISBN 3-527-25867-1

- [13] DIERINGER, S. (2012): Der Flexfuel Traktor: Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten von Pflanzenölkraftstoffen und zur Unterscheidbarkeit fossiler und biogener Kraftstoffe. Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2012. Berichte aus der Agrarwissenschaft. Aachen: Shaker Verlag, 160 Seiten, ISBN 978-3-8440-1010-7
- [14] DITTLER, A. (2014): Abgasnachbehandlung mit Partikelfiltersystemen in Nutzfahrzeugen. Zugl.: Wuppertal, Univ., Habil.-Schr., 2014. Unter Mitarbeit von E. SCHMIDT, U. JANOSKE u. T. KOCH. Aachen: Shaker Verlag. Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit, ISBN 978-3-8440-3010-5
- [15] DÜSSELDORF, C. (2014): Experimentelle Untersuchungen zur inner- und außermotorischen Partikelreduktion an einen Nutzfahrzeugdieselmotor zur Erfüllung der Abgasstufe IV im Betrieb mit biogenen Kraftstoffen. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2014. VKM-Schriftenreihe, Nr. 15. Kaiserslautern: Techn. Univ., Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, ISBN 978-3-943995-86-2
- [16] EMBERGER, P.; LANDIS, M.; KRAMMER, K.; PRANKL, H.; SCHAUFLER, H.; SCHIESS, I.; THUNEKE, K. (2011): Emissionsmessungen an einem Traktor – Ringversuch von ART, FJ-BLT und TFZ. Landtechnik, Jg. 66, Nr. 1, S. 56–59
- [17] EMBERGER, P. (2013): Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhalten verschiedener Pflanzenöle. Dissertation. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Zentrum für Ingenieurwissenschaften, 158 Seiten, ISBN 978-3-84391105-4
- [18] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA. Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 32, 125 Seiten, ISSN 1614-1008
- [19] ENGELMANN, K.; STRIMITZER, L.; REMMELE, E. (2014): Environmental effects of decentralized rapeseed oil production in Bavaria – A life cycle assessment (LCA) case study. In: AGROSCOPE; EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE ZÜRICH; EUROPEAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (EurAgEng) (Hrsg.): Engineering for improving resource efficiency. Proceedings. AgEng 2014 Zurich – International Conference of Agricultural Engineering. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 6.–10. Juli. Zürich: Agroscope; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), S. 1–8
- [20] ESTEBAN, B.; RIBA, J.-R.; BAQUERO, G.; PUIG, R.; RIUS, A. (2012): Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines. Fuel, Jg. 102, S. 231–238
- [21] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (1997): Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. ABl. Nr. L 59 vom 27.02.1998, zuletzt geändert durch Richtlinie 2006/96/EG (ABl. Nr. L 86 vom 01.04.2010) des Europäischen Parlaments und des Rates

- [22] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2000): Richtlinie 2000/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Motoren, die für den Antrieb von land- und forstwirtschaftlichen Zugmaschinen bestimmt sind, und zur Änderung der Richtlinie 74/150/EWG. ABl. Nr. L 173 vom 12.07.2000, zuletzt geändert durch Richtlinie 2005/13/EG (ABl. Nr. L 55 v. 01.03.2005) der Kommission
- [23] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, vom 25.09.2014. Text von Bedeutung für den EWR. 2014/0268 (COD). Europäische Kommission (Hrsg.). Brüssel, 62 Seiten
- [24] HEYWOOD, J. B. (1988): Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill series in mechanical engineering. New York: McGraw-Hill, 930 Seiten, ISBN 0-07-028637-X
- [25] HOFMANN, U.; REINHARDT, P.; EVTIMOVA, M. (2006): Untersuchungen zum Einsatz eines Partikelfiltersystems beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsmethylester und Rapsöl. Chemie Ingenieur Technik, Jg. 78, Nr. 6, S. 709–714
- [26] HOPP, M. (2005): Untersuchung des Einspritzverhaltens und des thermischen Motorprozesses bei Verwendung von Rapsöl und Rapsmethylester in einem Common-Rail-Dieselmotor. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock. Rostock: Universität Rostock, 133 Seiten
- [27] STATISTA GMBH (2014) Erntemenge der wichtigsten Ölsaaten weltweit in den Erntejahren 2011/12 bis 2015/16 (in Millionen Tonnen) URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/153057/umfrage/erntemenge-von-oelsaaten-nach-art-weltweit-seit-2008/> (Zugriff am 15.04.2014)
- [28] MOLLENHAUER, K. (2002) (Hrsg.): Handbuch Dieselmotoren. 2., korr. und neu bearb. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1069 Seiten, ISBN 3-540-41239-5
- [29] MOLLENHAUER, K.; TSCHÖKE, H. (2007): Handbuch Dieselmotoren. 3., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 702 Seiten, ISBN 978-3-540-72164-2
- [30] PICKEL, P.; DIERINGER, S.; LANG, M.; RÜTZ, D.; INNERHOFER, S. (2009): Demonstration of 2<sup>nd</sup> Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage 5 Engine Demonstration. Deliverable No. 5.8. Publishable summary. Version 3. S. 19. URL: <http://www.2ndvegoil.eu> (Stand: 11.06.2014)
- [31] PICKEL, P.; DIERINGER, S.; LANG, M.; RÜTZ, G. (2009): Survey on state-of-the-art technologies and impact of plant oil fuels. Deliverable N<sup>o</sup> 2.1. Version: 2.8. In: THE 2NDVEGOIL CONSORTIUM (Hrsg.): Demonstration of 2<sup>nd</sup> Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Final conclusions. Work package WP2 Engine development. München, Mannheim, S. 1–17. URL: <http://www.2ndvegoil.eu> (Stand: 12.06.2014)
- [32] REIF, K. (2012): Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung. 5. Aufl. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 501 Seiten, ISBN 978-3-8348-1715-0

- [33] REMMELE, E. (2002): Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff – Untersuchungen zu Kenngrößen, Prüfverfahren und Grenzwerten. Dissertation. München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Landtechnik, Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, 194 Seiten, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG); 400 Seiten
- [34] ROBERT BOSCH GMBH. UNTERNEHMENSBEREICH AUTOMOTIVE AFTERMARKET. ABTEILUNG PRODUKTMARKETING DIAGNOSTICS & TEST EQUIPMENT (2004): Dieselmotor-Management. Systeme und Komponenten. 4., erw. u. überarb. Aufl. Kraftfahrzeug – Studium und Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 501 Seiten, ISBN 3-528-23873-9
- [35] THE 2<sup>ND</sup>VEGOIL CONSORTIUM (2012): 2<sup>nd</sup> Generation Pure Plant Oil – Demonstration of 2<sup>nd</sup> Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines (2ndVegOil). TREN/FP7EN/219004/"2ndVegOil". Publishable Final Project Report. Unter Mitarbeit von P. Pickel, G. Gruber, G. Wachtmeister, S. Peal, H. Blauensteiner, D. Jacques et al. Agrartechnische Berichte aus Sachsen-Anhalt, Nr. 6. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institutsbereich Agrartechnik. Halle-Wittenberg, 60 Seiten
- [36] THUNEKE, K.; GASSNER, T.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2009): Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 17, ISSN 1614-1008
- [37] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E. V. (VDMA), MOTOREN UND SYSTEME (2010): Abgasgesetzgebung Diesel- und Gasmotoren. URL: <http://www.vdma.org/> (Stand: 19.01.2015)



## Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzcentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmkraftstoff betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell

18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II
32	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantensorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat

38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets – Europaweites Holzpelletscreening mit Fokus auf den deutschen Pelletmarkt
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl







ISSN 1614-1008