



## Berichte aus dem TFZ

# Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II





# **Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II**





# **Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II**

Peter Emberger  
Dr. Klaus Thuneke  
Dr. Edgar Remmele

**Berichte aus dem TFZ 31**

**Straubing, September 2012**

**Titel:** Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II

**Autoren:** Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke, Dr. Edgar Remmele  
**Projektleiter:** Dr. Edgar Remmele  
**Bearbeiter:** Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke, Thomas Gassner, Sebastian Kirner, Thomas Kießlinger, Dr. Edgar Remmele

**in Kooperation mit:** Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)  
Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum  
für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen K/08/19 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2013  
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 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.

**ISSN:** 1614-1008

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

**E-Mail:** [poststelle@tfz.bayern.de](mailto:poststelle@tfz.bayern.de)  
**Internet:** [www.tfz.bayern.de](http://www.tfz.bayern.de)

**Redaktion:** Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke, Ulrich Eidenschink  
**Verlag:** Eigenverlag  
**Erscheinungsort:** Straubing  
**Erscheinungsjahr:** 2013  
**Gestaltung:** Peter Emberger, Ulrich Eidenschink

**Fotonachweis:** Emberger (Abbildung 16 bis 25)

## **Vorwort**

Wir bedanken uns beim Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, für die Finanzierung des Vorhabens. Insbesondere bei Herrn Ltd. MR Dr. Rupert Schäfer möchten wir uns für die gute Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

Großer Dank gebührt dem Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung (LVFZ) Kringell der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) für die Bereitstellung der Traktoren und die aktive Unterstützung des Vorhabens. Ein ganz herzliches Dankeschön geht an Herrn Wolfgang Löw für die hervorragende Zusammenarbeit. Durch sein tatkräftiges und fachkundiges Mitwirken trug er maßgeblich zum Gelingen dieses Vorhabens bei.

Bedanken möchten wir uns auch bei Herrn Thomas Kaiser (Institut für Energie- und Umwelttechnik, München) und Herrn Stefan Innerhofer (regineering GmbH, Denkendorf) für die Hilfe bei verschiedenen Fragestellungen, insbesondere der Motorbefundung.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Zielstellung</b> .....	<b>15</b>
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 Traktoren</b> .....	<b>17</b>
3.1.1 Fendt Farmer Vario 412.....	17
3.1.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160.....	17
<b>3.2 Betriebsstoffe</b> .....	<b>18</b>
3.2.1 Motoröl.....	18
3.2.2 Rapsölkraftstoff.....	19
3.2.3 Dieselkraftstoff .....	20
<b>3.3 Prüfstand</b> .....	<b>20</b>
3.3.1 Bestimmung von Motorleistung, Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch .....	21
3.3.2 Gasanalyse.....	22
3.3.3 Partikelmassebestimmung.....	23
<b>3.4 Prüfzyklus</b> .....	<b>24</b>
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1 Betriebsstoffe</b> .....	<b>27</b>
4.1.1 Rapsölkraftstoff.....	27
4.1.2 Motorölqualität .....	28
<b>4.2 Betriebsverhalten</b> .....	<b>30</b>
4.2.1 Leistung und Kraftstoffverbrauch .....	30
4.2.1.1 Fendt Farmer Vario 412.....	30
4.2.1.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160.....	32
<b>4.3 Emissionsverhalten</b> .....	<b>34</b>
4.3.1 Fendt Farmer Vario 412.....	34
4.3.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160.....	38
<b>4.4 Motorbefundung</b> .....	<b>42</b>
4.4.1 Fendt Farmer Vario 412.....	42
4.4.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160.....	48
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>53</b>
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>55</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstandes.....	21
Abbildung 2:	Pflanzenölgehalt im Motoröl des Fendt Farmer Vario 412 in Abhängigkeit von den Motorölbetriebsstunden.....	29
Abbildung 3:	Pflanzenölgehalt im Motoröl des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 in Abhängigkeit von den Motorölbetriebsstunden.....	29
Abbildung 4:	Mittelwerte und Spannweiten der Messung von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch nach OECD Code 2 des Fendt Farmer Vario 412 im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach ca. 4900 Bh und im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei 2662 Bh (n = Anzahl der Messungen) .....	31
Abbildung 5:	Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch nach OECD Code 2 des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach ca. 3320 Bh und im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei 897 Bh (n = Anzahl der Messungen).....	33
Abbildung 6:	Mittelwerte und Spannweiten der NO <sub>x</sub> -Emissionen des Fendt Farmer Vario 412 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen).....	35
Abbildung 7:	Mittelwerte und Spannweiten der CO-Emissionen des Fendt Farmer Vario 412 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen) .....	36
Abbildung 8:	Mittelwerte und Spannweiten der HC-Emissionen des Fendt Farmer Vario 412 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen) .....	36
Abbildung 9:	Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse-Emissionen (PM) des Fendt Farmer Vario 412 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen).....	37
Abbildung 10:	Mittelwerte und Spannweiten der Formaldehyd-Emissionen bezogen auf das feuchte Abgas des Fendt Farmer Vario 412 bei den Emissionsmessungen (n = Anzahl der Messungen).....	38
Abbildung 11:	Mittelwerte und Spannweiten der NO <sub>x</sub> -Emissionen des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen).....	39
Abbildung 12:	Mittelwerte und Spannweiten der CO-Emissionen des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen).....	40
Abbildung 13:	Mittelwerte und Spannweiten der HC-Emissionen des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen).....	40

Abbildung 14: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse-Emissionen des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen) ..... 41

Abbildung 15: Mittelwerte und Spannweiten der Formaldehyd-Emissionen bezogen auf das feuchte Abgas des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 bei den Emissionsmessungen (n = Anzahl der Messungen) ..... 42

Abbildung 16: Geöffnetes Kipphebelgehäuse und Zylinderkopf des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ..... 43

Abbildung 17: Einspritzdüsen des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 2250 Bh im Feldeinsatz ..... 44

Abbildung 18: Zylinderbuchsen mit Honriefen des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ..... 44

Abbildung 19: Kolben des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ..... 45

Abbildung 20: Zylinderkopfboden des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ..... 46

Abbildung 21: Ventilteller und unterer Bereich des Ventilkopfes der Auslassventile (AV) und Einlassventile (EV) des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ..... 48

Abbildung 22: Turbinen- (links) und Verdichterrad (rechts) des Abgasturboladers des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 ..... 49

Abbildung 23: Rückstände in der Zylinderkopfbohrung zur Aufnahme der Einspritzdüse von Zylinder 3 beim Ausbau der Einspritzdüse ..... 50

Abbildung 24: Einspritzdüsen des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 nach ca. 2500 Bh im Feldeinsatz ..... 50

Abbildung 25: Aufnahmen der Zylinderbuchsen mit Honriefen des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 nach ca. 3300 Bh mittels Endoskop ..... 52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Technische Daten des Fendt Farmer Vario 412 Traktors.....	17
Tabelle 2:	Technische Daten des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 Traktors.....	18
Tabelle 3:	Qualität des für die Emissions- und Leistungsmessungen verwendeten Rapsölkraftstoffes und Anforderungen nach DIN 51605.....	19
Tabelle 4:	Ausgewählte Anforderungen an Prüfkraftstoffe für Stufe IIIB und IV Motoren nach 97/68/EG und Qualität des verwendeten Referenzdieselmotors.....	20
Tabelle 5:	Technische Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile.....	23
Tabelle 6:	C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4.....	24
Tabelle 7:	Eingestellte Drehzahlen, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren.....	25
Tabelle 8:	Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoffverbrauch sowie Rapsölkraftstoffanteil am Gesamtverbrauch der beiden Traktoren während des Untersuchungszeitraums (Januar 2009 bis September 2011).....	27
Tabelle 9:	Qualität des in den Traktoren verwendeten Rapsölkraftstoffes (ausgewählte Eigenschaften der DIN 51605).....	28
Tabelle 10:	Ergebnisse der Kompressionsdruckprüfung.....	51



# 1 Einleitung

Die Verwendung von Rapsölkraftstoff in Traktoren fördert die regionale Landwirtschaft und kann bereits heute einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Um weitreichende Folgen der Klimaerwärmung abzuwenden, sind Maßnahmen, die zur Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes führen, möglichst umgehend zu ergreifen. Rapsölkraftstoff-Technologien zeichnen sich bereits heute durch einen hohen Entwicklungsstand bei sehr geringen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten aus. Die stets gekoppelte Erzeugung von Rapsöl und Futtermittel dient in gleichem Maße zur Verbesserung der Versorgungssicherheit sowohl mit hochwertigen Nahrungsmitteln als auch mit Energieträgern. Im Positionspapier „Biokraftstoffe - Fragen und Antworten“ werden die vielfältigen Aspekte der Biokraftstoffnutzung umfassend diskutiert [13].

Zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren wurden in den letzten Jahren einige Erfahrungen gesammelt. Untersuchungen wie das „100-Traktoren-Programm“ [4] in Deutschland, das „35-Rapsöl-Traktoren-Programm“ [6] in Österreich oder die Untersuchung zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren [10] in Bayern stellten unter Beweis, dass Rapsölkraftstoff unter bestimmten Voraussetzungen erfolgreich in Traktoren eingesetzt werden kann. Bei allen Untersuchungen wurde auch das Emissionsverhalten erfasst. Die Ergebnisse beruhen zumeist auf Traktoren der Abgasstufen I und II, die im Rahmen der Projekte jedoch selten mehr als 3000 Bh mit Rapsölkraftstoff absolvierten. Um weitere Informationen über das Langzeitverhalten von Rapsöltraktoren zu erhalten, führte die Universität Rostock nachfolgend zum „100-Traktoren-Programm“ eine Untersuchung zur Dauerhaltbarkeit der Motoren durch [8]. Hierzu wurde der Großteil der im „100-Traktoren-Programm“ beteiligten Traktoren aufgesucht, die Erfahrungen der Betreiber dokumentiert und zum Teil wurden Motorinspektionen mittels Endoskopie vorgenommen. Etwa ein Drittel der Traktoren wiesen zu dem Zeitpunkt bereits mehr als 5000 Bh auf, einzelne mehr als 7000 Bh. Es kann festgehalten werden, dass Motoren für Landmaschinen der Abgasstufe I prinzipiell mit Rapsölkraftstoff betrieben werden können.

Die Traktoren aus der Untersuchung zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren [10] aus Bayern wurden nach Projektende weiter mit Rapsölkraftstoff betrieben. Neben der Dokumentation des Betriebsverhaltens liegen für diese Traktoren zudem auch umfangreiche Ergebnisse zum Abgasemissionsverhalten vor, die in den Jahren 2005 bis 2008 gewonnen wurden [10][9]. Da die Schadstoffemissionen eine immer größere Bedeutung gewinnen, interessiert neben dem Betriebsverhalten auch die Frage, wie sich das Emissionsverhalten im Langzeitbetrieb gestaltet.





## 2 Zielstellung

Ziel des Untersuchungsvorhabens ist es daher, mit den rapsölkraftstoffbetriebenen Traktoren aus der Untersuchung von THUNEKE et al. (2008) [10], einen Beitrag zur Klärung des Betriebs- und Emissionsverhaltens im Langzeiteinsatz zu liefern.

Hierzu sollen im Rahmen der Arbeiten folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

- Überprüfung der eingesetzten Rapsölkraftstoffqualität
- Stichprobenartige Überprüfung der Qualität des Motoröls
- Dokumentation von Störungen, Wartungs- und Reparaturarbeiten
- Messung von Leistung und Kraftstoffverbrauch
- Messung des Abgasemissionsverhaltens
- Befundung der Motoren

Mit Hilfe dieser Maßnahmen soll ein Beitrag zur Klärung offener Fragestellungen hinsichtlich des Langzeiteinsatzes von Rapsöltraktoren geliefert werden, um die oftmals kontroverse öffentliche Diskussion anhand von Messdaten zu versachlichen.



### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Traktoren

##### 3.1.1 Fendt Farmer Vario 412

Der Fendt Farmer Vario 412 war bereits im Rahmen des abgeschlossenen Vorhabens „Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell“ (Forschungsvorhaben N/05/05) Versuchsträger (siehe THUNEKE et al. (2009) [10]). Der Traktor erfüllt die Anforderungen der Abgasstufe I und ist mit einem Deutz-Motor des Typs BF4M2013C mit einem Pumpe-Leitung-Düse Hochdruckeinspritzsystem ausgestattet. Die technischen Daten des Fendt Farmer Vario 412 sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Der Traktor wurde mit einem Ein-Tank-System der Firma Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP), Allersberg auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Die Umrüstung basiert im Wesentlichen auf folgenden Maßnahmen:

- Austausch der Einspritzdüsen
- temperatur- und viskositätsabhängige Rückführung des Kraftstoffrücklaufs über den Kraftstoffkühler in den Vorlauf durch Anbringung einer Drossel
- Einbau eines Kühlwasservorwärmesystems (elektrisch 230 V)
- Einbau einer Handpumpe zum Entlüften des Kraftstoffsystems

*Tabelle 1: Technische Daten des Fendt Farmer Vario 412 Traktors*

Traktortyp	Fendt Farmer Vario 412
Motortyp	Deutz BF4M2013C
Anzahl der Zylinder / Hubraum in ccm	4 / 3802
Nennleistung in kW / PS	94 / 125
Einspritzsystem	Pumpe-Leitung-Düse Hochdruckeinspritzsystem
Baujahr	2003
Abgasstufe	I
Getriebe	stufenlos

##### 3.1.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160

Der Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 war ebenfalls Versuchsträger im vorangegangenen Vorhaben. Der Traktor erfüllt die Anforderungen der Abgasstufe II und ist ausgestattet mit einem Deutz Motor der Baureihe BF6M1013EC mit einem Pumpe-Leitung-Düse-Hochdruckeinspritzsystem (PLD). Die technischen Daten des Deutz-Fahr Traktors sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Technische Daten des Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 Traktors

Traktortyp	Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160
Motortyp	Deutz BF6M1013EC
Anzahl der Zylinder / Hubraum in ccm	6 / 7146
Nennleistung in kW / PS	119 / 162
Einspritzsystem	Pumpe-Leitung-Düse Hochdruckeinspritzsystem
Baujahr	2005
Abgasstufe	II
Getriebe	stufenlos

Der Traktor wurde nach ca. 256 Bh mit einem Ein-Tank-System durch die Firma Hausmann, Wülfershausen auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Die Umrüstung des Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 basiert im Wesentlichen auf folgenden durchgeführten Maßnahmen:

- Einbau eines Kraftstoffvorwärmersystems am Kraftstofffilter
- Veränderungen des Kraftstoffsystems im Niederdruckbereich
- Austausch der Einspritzdüsen
- Erhöhung des Düsennadelöffnungsdrucks
- Elektrische Beheizung der Düsenstöcke (zweistufig: bis 70 °C beide Stufen ein, bis 100 °C eine Stufe aus, über 100 °C beide Stufen aus)
- Einbau eines Kühlwasservorwärmersystems (elektrisch 230 V)
- Einbau eines Akkuladegerätes
- Einbau eines Nebenstrom-Motorölfilters
- Einbau einer Handpumpe mit Kraftstoffvorfilter zum Entlüften des Kraftstoffsystems

## 3.2 Betriebsstoffe

### 3.2.1 Motoröl

In beiden Traktoren wird das esterbasische Motoröl Plantomot 5W-40 des Herstellers Fuchs Europe Schmierstoffe GmbH eingesetzt. Mit Ausnahme der ersten Motorölfüllung wird dieses Motoröl seit Anschaffung der Traktoren am LVFZ Kringell verwendet. Nach den ausführlichen Untersuchungen der Motorölqualität der beiden Traktoren von THUNKE et al. (2009) [10] wurden im Beobachtungszeitraum stichprobenartig Proben jeweils zum Motorölwechsel gezogen und von der Firma Oelcheck GmbH analysiert. Um den Pflanzenölgehalt im esterbasischen Motoröl zu bestimmen, wurde ein spezielles gaschromatographisches Verfahren angewendet. Ein solches Verfahren wurde auch im

Rahmen des vorhergehenden Projektes angewandt, jedoch erfolgten die Untersuchungen beim Schmierstoffhersteller direkt.

### 3.2.2 Rapsölkraftstoff

Der Rapsölkraftstoff für die Traktoren wurde von einer dezentralen Ölmühle im näheren Umkreis von Kringell bezogen. Bei jeder Kraftstofflieferung wurden Rückstellproben gezogen und eingelagert, die stichprobenweise hinsichtlich ausgewählter Parameter analysiert wurden. Die Betankung der beiden Traktoren erfolgte aus der betriebseigenen Hof-tankstelle.

Für die Emissions- und Leistungsmessungen im Winter 2010/2011 wurde eine andere Rapsölkraftstoffcharge verwendet. Die Anforderungen nach DIN 51605 [1], sowie die Eigenschaften des verwendeten Rapsölkraftstoffes sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die zum Vergleich herangezogenen Ergebnisse aus den Jahren 2006 bis 2008 wurden unter Verwendung von verschiedenen Chargen von kaltgepresstem Rapsölkraftstoff erzielt, detaillierte Eigenschaften dieser Rapsölkraftstoffe sind in THUNEKE et al. (2009) [10] ausführlich dokumentiert. Insgesamt erfüllten alle am Prüfstand verwendeten Rapsölkraftstoffe die Anforderungen der zum Zeitpunkt gültigen Rapsölkraftstoffnorm DIN 51605 bzw. DIN V 51605.

*Tabelle 3: Qualität des für die Emissions- und Leistungsmessungen verwendeten Rapsölkraftstoffes und Anforderungen nach DIN 51605*

Kenngröße	Einheit	Anforderung DIN 51605	Analyse- ergebnis
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	910 bis 925	920
Flammpunkt (Pensky-Martens)	°C	min. 101	267
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm <sup>2</sup> /s	max. 36,0	35,5
Heizwert	MJ/kg	min. 36,0	37,1
Zündwilligkeit (Abgeleitete Cetanzahl)	-	min. 40	44
Iodzahl	g Iod/100g	max. 125	109
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	21
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	0,03
Oxidationsstabilität	h	min. 6	10,1
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	158
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	3
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 12 <sup>1)</sup>	<0,5
Summengehalt Calcium und Magnesium	mg/kg	max. 20 <sup>1)</sup>	<0,5

<sup>1)</sup>Grenzwerte mit Gültigkeit bis 31. Dezember 2011

### 3.2.3 Dieselkraftstoff

Für die Emissionsmessungen wurde Dieselkraftstoff der Qualität CEC RF 06-03 verwendet. Der Kraftstoff erfüllt die Anforderungen nach Richtlinie 97/68/EG als Prüfkraftstoff für Typgenehmigungen von Motoren der Abgasstufe III B und IV. Tabelle 4 zeigt eine Auswahl an Anforderungen an den Prüfkraftstoff nach Richtlinie 97/68/EG und die Qualität des verwendeten Referenzdieselmotors.

*Tabelle 4: Ausgewählte Anforderungen an Prüfkraftstoffe für Stufe IIIB und IV Motoren nach 97/68/EG und Qualität des verwendeten Referenzdieselmotors*

Kenngroße	Prüfverfahren	Einheit	Anforderung nach 97/68/EG	Analyseergebnis
Dichte	DIN EN ISO 3675	kg/m <sup>3</sup>	833-837	837
Flammpunkt	DIN EN ISO 2719	°C	min. 55	65
Cetanzahl	DIN EN ISO 5165	-	52,0-54,0	52,1
Kinematische Viskosität (40 °C)	DIN EN ISO 3104	mm <sup>2</sup> /s	2,30-3,30	2,50
Koksrückstand	DIN EN ISO 10370	Masse-%	max. 0,20	<0,1
Cold Filter Plugging Point	DIN EN 116	°C	max. -5	-30
Schwefelgehalt	ASTM D 5453	mg/kg	max. 10	8,5
Oxidationsstabilität	DIN EN ISO 12205	mg/ml	max. 0,025	0,012
Schmierfähigkeit (HFFR)	CEC F-06-A-96	µm	max. 400	379
PAK <sup>1)</sup>	IP 391	Masse-%	3,0-6,0	3,2
Aschegehalt	DIN EN ISO 6245	Masse-%	0,01	<0,001
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	Masse-%	0,0200	0,0030
Fettsäuremethylestergehalt	-	-	unzulässig	OK

<sup>1)</sup> PAK: Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

### 3.3 Prüfstand

Die Abgasemissionsmessungen werden am Abgasprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) durchgeführt. Der Prüfstand ist konzipiert für die Messung von gasförmigen Abgaskomponenten und Partikel-Emissionen von Traktormotoren im eingebauten Zustand. Die Emissionsmessungen am Prüfstand erfolgen in Anlehnung an ISO 8178. Der Aufbau des Prüfstandes und die technischen Merkmale von Prüfstandsbestandteilen entsprechen bei den durchgeführten Emissionsmessungen im Wesentlichen denen des Vorgängerprojekts und sind ausführlich beschrieben in THUNEKE et al. (2009) [1]. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht des Prüfstandes.

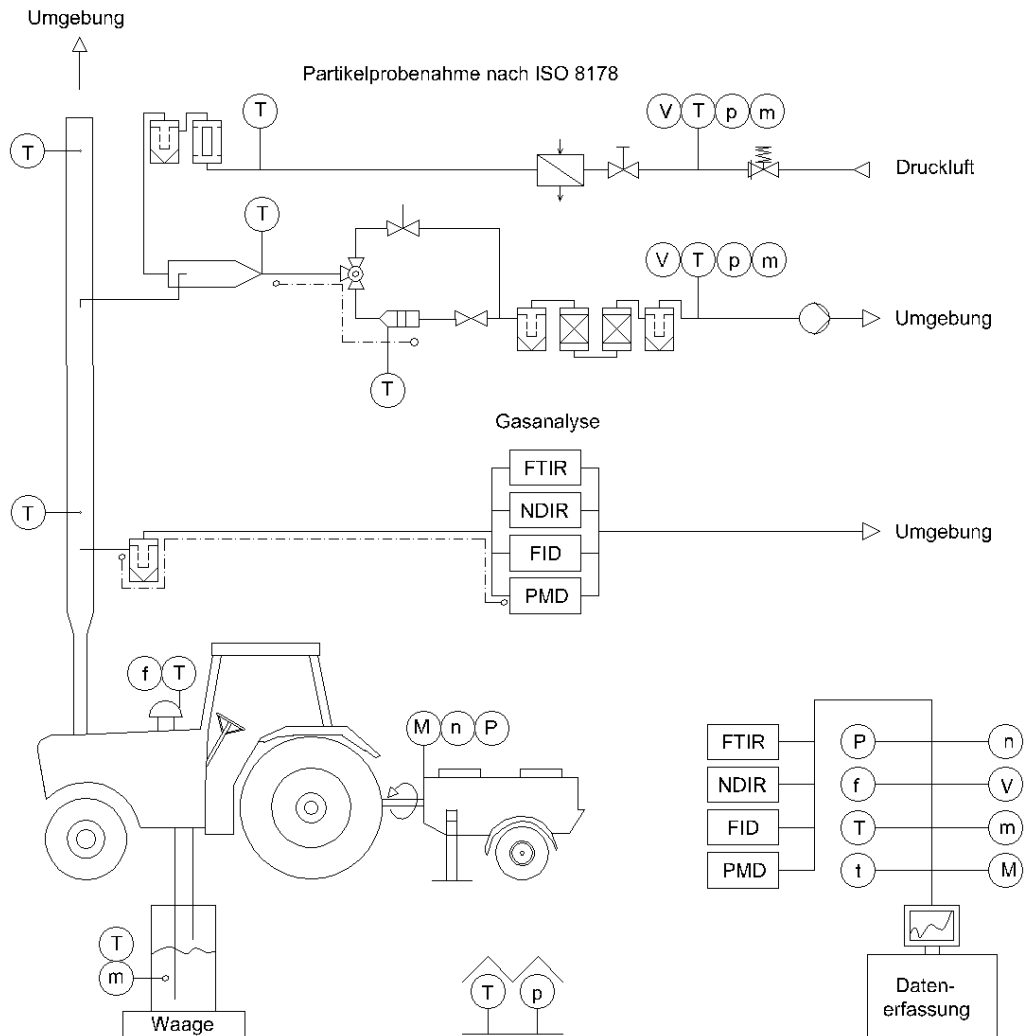


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstandes

### 3.3.1 Bestimmung von Motorleistung, Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch

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 vor allem die Abgasemissionen von Traktormotoren, die in der Praxis in Betrieb sind, getestet werden sollen, ist eine Bestimmung der Motorleistung im ausgebauten Zustand nicht beabsichtigt. Daher sind Abweichungen zum Typprüfungsverfahren erforderlich. Am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums wird die Zapfwellenleistung nach OECD Code 2 bestimmt. Nach dieser Richtlinie soll die Zapfwellenleistung nicht hinsichtlich Atmosphärendruck und Umgebungstemperatur korrigiert werden. Auch nach Richtlinie 2000/25/EG bzw. ISO 8178 ist die unkorrigierte Motorleistung 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:

$$f_a = \frac{99}{p_s}^{0,7} \cdot \frac{T_a}{298}^{1,2}$$

$p_s$ : 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 Projektes bewegten sich in diesem Gültigkeitsbereich.

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

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

### 3.3.2 Gasanalyse

Im Vergleich zu den früheren Messungen an den beiden Traktoren wurde bei den Emissionsmessungen ein Gasanalyzesystem des Herstellers AVL verwendet. Das Gerät besteht aus einem Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop (FTIR) und einem Flammenionisationsdetektor (FID). Der Einsatz des FTIR bietet den Vorteil, dass nicht nur die gesetzlich limitierten Abgaskomponenten erfasst werden, sondern auch gesetzlich nicht limitierte Emissionen, wie z. B. Formaldehyd und Acetaldehyd.

Eine Übersicht über die technischen Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile gibt Tabelle 5. Alle Messwerte werden kontinuierlich in einem Abstand von 1 Sekunde erfasst und mit Hilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW™) aufgezeichnet.



Tabelle 5: Technische Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/Messverfahren
$C_nH_m$ <sup>2)</sup>	FID 4000hh Fa. AVL	Flammenionisation (FID)
CO <sub>2</sub> CO NO <sub>x</sub> <sup>1)</sup> NO NO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O NH <sub>3</sub> Formaldehyd Acetaldehyd	SESAM 4 Fa. AVL	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop (FTIR)

<sup>1)</sup> NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>

<sup>2)</sup> Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messungen im heißen Abgas

### 3.3.3 Partikelmassebestimmung

Am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums werden die Partikel-Emissionen diskontinuierlich nach den Vorgaben der Richtlinie 97/68/EG bzw. ISO 8178 im verdünnten Abgas erfasst.

Bei der Messung nach Richtlinie 97/68/EG, welche im Wesentlichen auf der ISO 8178 beruht, wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasstrom entnommen. Der Teilgasstrom wird 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 regelt. 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 über 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™ 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 werden kontinuierlich mit Hilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW™) aufgezeichnet.

### 3.4 Prüfzyklus

Als Prüfzyklus wurde der C1-Zyklus nach ISO 8178-4 angewendet. Dabei sind acht Prüfphasen in einer bestimmten Reihenfolge einzustellen. Für die Ermittlung der spezifischen Emissionen sind Wichtungsfaktoren für jede einzelne Prüfphase vorgesehen. Tabelle 6 gibt einen Überblick zu den Vorgaben des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178.

Tabelle 6: 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	Leer- lauf
Last	100 %	75 %	50 %	10 %	100 %	75 %	50 %	0 %
Wichtungs- faktor	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15

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 immer aus, um ein stabiles Emissionsbild zu erreichen [2]. Aus diesem Grund wurden bei Durchführung der Messungen für beide Traktoren konkrete Verweilzeiten auf den einzelnen Prüfphasen definiert, bevor mit der Partikelprobenahme begonnen wurde. In Tabelle 7 sind für die beiden Traktoren und jede Prüfphase die angefahrenen Drehzahlen sowie die Verweilzeiten 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 7: Eingestellte Drehzahlen, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren*

Prüfphase	Eingestellte Drehzahl in $\text{min}^{-1}$		Verweildauer vor Partikelprobenahme in min	Partikelprobe- nahmedauer in min
	Deutz	Fendt		
1	2100	1950	30	5
2	2100	1950	6	5
3	2100	1950	6	5
4	2100	1950	10	5
5	1450	1350	15	5
6	1450	1350	10	5
7	1450	1350	10	5
8	850	800	10	5



## 4 Ergebnisse

### 4.1 Betriebsstoffe

#### 4.1.1 Rapsölkraftstoff

Insgesamt absolvierten die beiden Traktoren im Vorhabenszeitraum jeweils ca. 1350 Betriebsstunden und verbrauchten hierbei insgesamt ca. 16.000 l Rapsölkraftstoff sowie ca. 6000 l Dieselloskraftstoff. Aufgrund eines weiteren pflanzenölbetriebenen Traktors der im gleichen Zeitraum am LVFZ betrieben wurde, ist der absolute Kraftstoffverbrauch dieser beiden Traktoren geringer als 2009. Tabelle 8 gibt einen Überblick zu den im Projektzeitraum durch die Traktoren verbrauchten Kraftstoffe. Da die Traktoren aufgrund von niedrigeren Temperaturen zwischen November und März mit Diesellokraftstoff betankt werden, wurden insgesamt auch größere Mengen davon verbraucht. Deutlich wird dies insbesondere beim Fendt Traktor, der in dieser Zeit häufiger als der Deutz-Fahr Traktor zum Einsatz kam.

*Tabelle 8: Rapsöl- und Diesellokraftstoffverbrauch sowie Rapsölkraftstoffanteil am Gesamtverbrauch der beiden Traktoren während des Untersuchungszeitraums (Januar 2009 bis September 2011)*

Jahr	Fendt Farmer Vario 412			Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160		
	Rapsöl	Diesel	Rapsölanteil	Rapsöl	Diesel	Rapsölanteil
2009	1629 l	680 l	71 %	3461 l	160 l	96 %
2010	2318 l	1430 l	62 %	4770 l	2200 l	68 %
2011 <sup>1)</sup>	1127 l	793 l	59 %	2725 l	762 l	78 %

<sup>1)</sup> Daten beziehen sich auf die Monate Januar bis September

Alle Analysen des eingesetzten Rapsölkraftstoffes im Jahr 2009 waren unauffällig, die Grenzwerte der zu dieser Zeit gültigen DIN V 51605 wurden eingehalten. Im Jahr 2010 wurden bei der letzten Beprobung Überschreitungen der Grenzwerte von Phosphor und Summehalt Calcium und Magnesium festgestellt. Auch im Jahr 2011 kam es zu einer Überschreitung des Summehaltes von Calcium und Magnesium. Grund für die Grenzwertüberschreitungen sind vermutlich ungenügende Rapsaatqualitäten aufgrund der in einigen Regionen ungünstigen Erntebedingungen für Raps im Jahr 2010. Dies wird durch Erfahrungen mehrerer Ölmöhlen mit ähnlichen Qualitätsproblemen in diesem Zeitraum bestätigt. Weitere Abweichungen von der Norm waren nicht festzustellen. Insbesondere die durch Filtrationstechnik beeinflussbare Größe Gesamtverschmutzung, welche die Ölmöhlenbetreiber in früheren Jahren oftmals vor Probleme stellte, wurde sicher eingehalten. Durch entsprechende Anlagentechnik besteht auch die Möglichkeit die Gehalte an Phosphor, Calcium und Magnesium zu minimieren [14]. Tabelle 9 gibt einen Überblick zu den Ergebnissen der Beprobungen des in Kringell eingesetzten Rapsölkraftstoffes.

Tabelle 9: Qualität des in den Traktoren verwendeten Rapsölkraftstoffes (ausgewählte Eigenschaften der DIN 51605)

Kenngröße	Einheit	Grenzwert	2009 Charge		2010 Charge		2011 Charge
			1	2	1	2	1
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	3	8	12	13	<1
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	1,0	1,1	1,4	2,0	1,7
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	6,9	6,6	6,8	6,5	7,2
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	527	451	494	634	424
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	3	2	3	5	2
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 12 <sup>1)</sup>	9	7	10	14	12
Summengehalt Calcium und Magnesium	mg/kg	max. 20 <sup>1)</sup>	19	14	19	26	24

<sup>1)</sup>Grenzwerte mit Gültigkeit bis 31. Dezember 2011

#### 4.1.2 Motorölqualität

Nach den ausführlichen Untersuchungsreihen zur Motorölqualität im Vorgängerprojekt wurden im Beobachtungszeitraum nur stichprobenartig Analysen des Motoröls beim Ölwechsel durchgeführt, um mögliche Veränderungen festzustellen. Bei beiden Traktoren kam das Motoröl Plantomot 5W-40 zum Einsatz. Beim Fendt Farmer Vario 412 wurden bei 4241, 4460 und 5031 Bh Motorölproben analysiert, beim Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 bei 2659, 2743, 2999, 3145 und 3245 Bh. Prinzipiell bestätigen sich die Ergebnisse von THUNEKE et al. [18] zum Verschleiß des Motoröles in den beiden Traktoren. Insbesondere hinsichtlich des Eintrages von Pflanzenöl in das Motoröl konnten mit den Stichproben die Ergebnisse aus den Jahren 2005 bis 2008 bestätigt werden. In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind die ermittelten Ergebnisse zum Pflanzenölgehalt in Abhängigkeit von den Motorölbetriebsstunden im Vergleich zu den Messdaten aus den Jahren 2005 bis 2008 gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass im Mittel der Anstieg des Pflanzenölgehaltes über die Motoröleinsatzzeit in etwa konstant ist. Die Unterschiede bzw. Streuungen zwischen den einzelnen Messpunkten lassen sich durch die nicht immer gleichen Betriebsbedingungen der Traktoren in der Praxis erklären. Insgesamt ist über die derzeitige Betriebsdauer bei beiden Traktoren keine Verschlechterung festzustellen und die empfohlenen Motorölwechselintervalle von ca. 200 Bh sind nach wie vor für einen zuverlässigen Betrieb dieser Traktoren ausreichend.

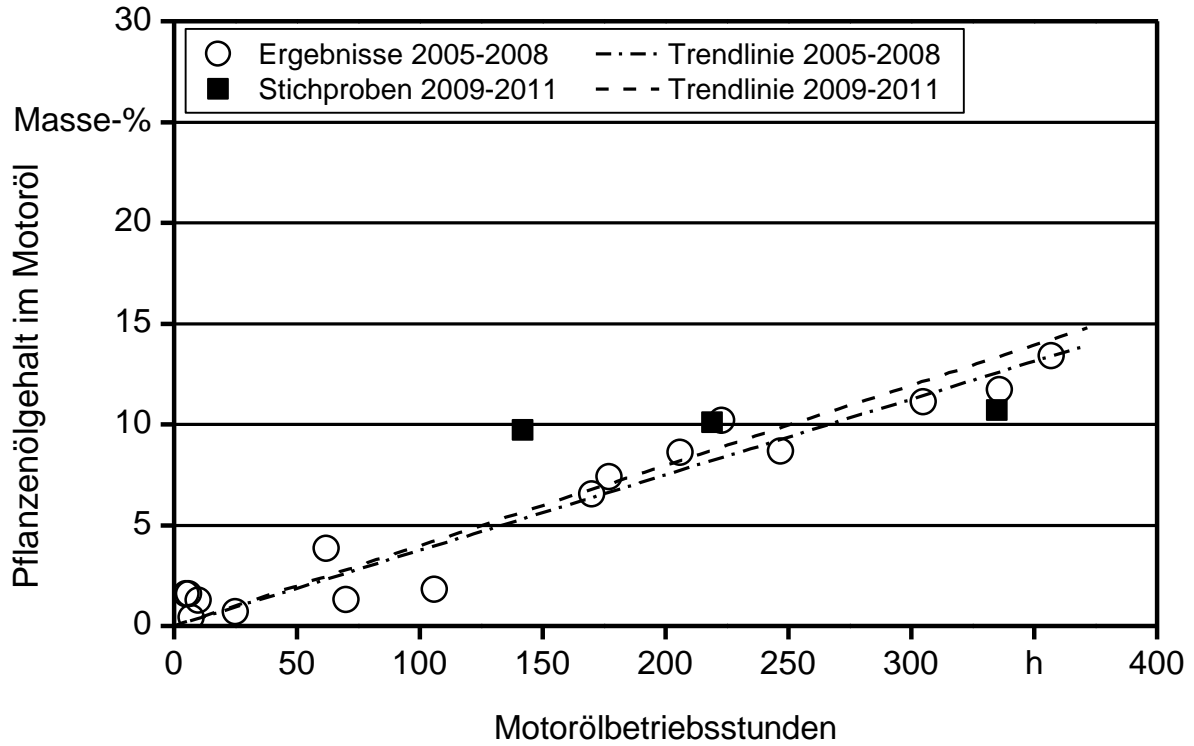


Abbildung 2: Pflanzenölgehalt im Motoröl des Fendt Farmer Vario 412 in Abhängigkeit von den Motorölbetriebsstunden

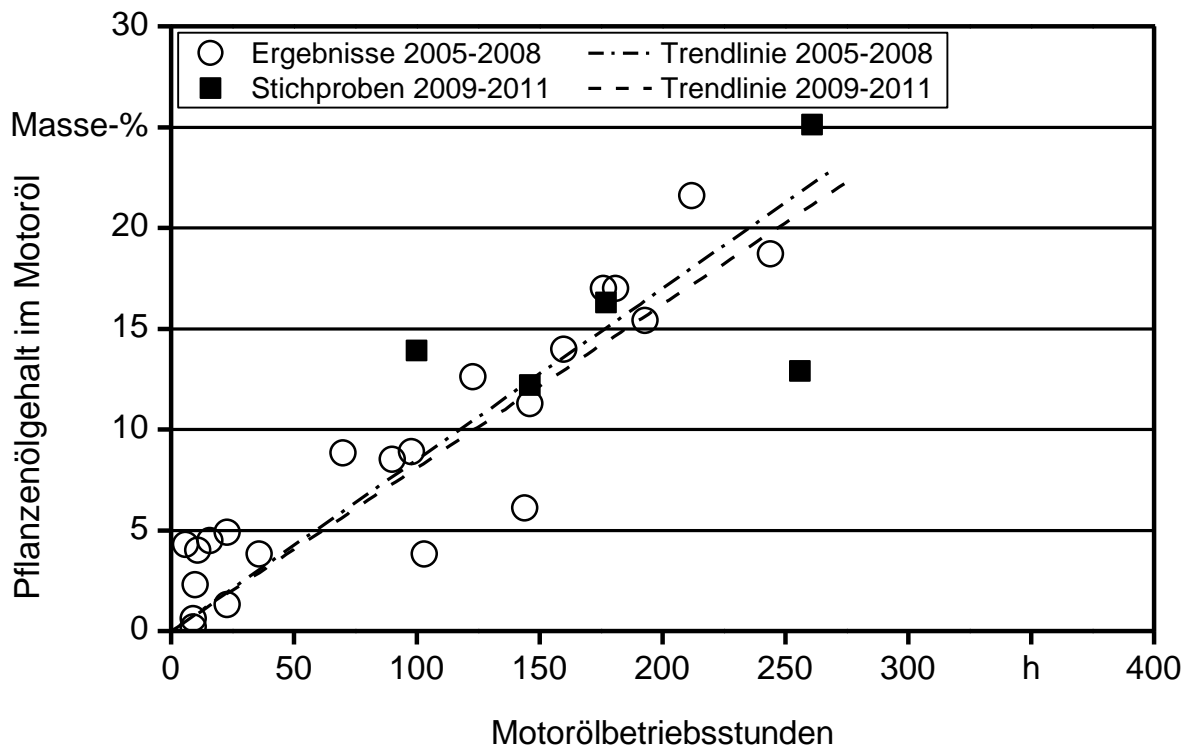


Abbildung 3: Pflanzenölgehalt im Motoröl des Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 in Abhängigkeit von den Motorölbetriebsstunden

## **4.2 Betriebsverhalten**

### **4.2.1 Leistung und Kraftstoffverbrauch**

#### **4.2.1.1 Fendt Farmer Vario 412**

Die Zapfwellenleistung, das äquivalente Motordrehmoment und der spezifische Kraftstoffverbrauch im Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurden vor und nach der Zylinderkopfdemontage zur Motorbefundung ermittelt. Zwischen den Messungen sind kaum Unterschiede zu verzeichnen. Im Drehzahlbereich zwischen 1400 und 1950  $\text{min}^{-1}$  wurde nach der Zylinderkopfdemontage eine um ca. 2 kW höhere Leistung erzielt als vorher. Hinsichtlich des spezifischen Kraftstoffverbrauchs konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Im Vergleich zur Messung mit Dieselmotorkraftstoff wurde mit Rapsölkraftstoff für alle Drehzahlen über 1200  $\text{min}^{-1}$  immer eine deutlich höhere Leistung an der Zapfwelle erzielt. Dieses Verhalten wurde auch bereits bei den früheren Messungen von THUNEKE et al. (2009) [10] beobachtet. Hinsichtlich des gravimetrischen spezifischen Kraftstoffverbrauchs wurden mit Dieselmotorkraftstoff ca. 11 % geringere Werte bestimmt als mit Rapsölkraftstoff. Wird jedoch die Dichte des Kraftstoffs mit in die Berechnung einbezogen und der spezifische volumetrische Kraftstoffverbrauch zum Vergleich herangezogen, so verringert sich der Unterschied zwischen Dieselmotorkraftstoff und Rapsölkraftstoff auf ca. 2 %.

Ein Vergleich der Messung bei 2662 Bh mit der Messung bei 4910 Bh nach der Zylinderkopfdemontage und dem Austausch der Kraftstoffförderpumpe zeigt zumeist Unterschiede bis 2 %. Vor dem Hintergrund des langen Zeitraumes zwischen den Messungen und der wechselnden Umgebungsbedingungen wie Atmosphärendruck und Umgebungstemperatur, konnte somit über die Betriebszeit kein Leistungsverlust festgestellt werden. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4 dargestellt.



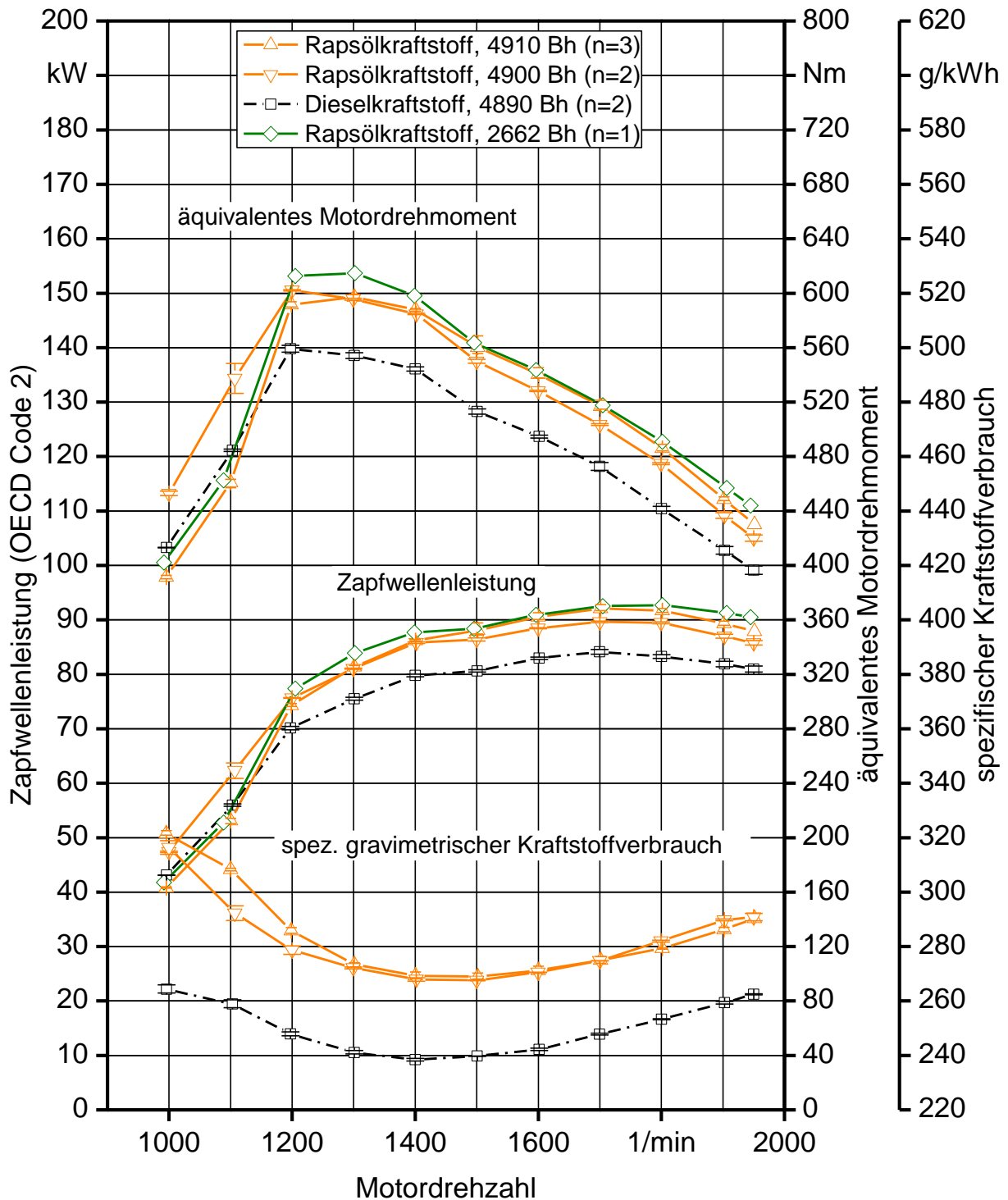


Abbildung 4: Mittelwerte und Spannweiten der Messung von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch nach OECD Code 2 des Fendt Farmer Vario 412 im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach ca. 4900 Bh und im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei 2662 Bh ( $n$  = Anzahl der Messungen)

#### **4.2.1.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160**

Die Ermittlung der Zapfwellenleistung, des äquivalenten Motordrehmomentes und des spezifischen Kraftstoffverbrauchs erfolgte bei ca. 3300 Bh nach der Motorbegutachtung mittels Endoskop. Hinsichtlich Zapfwellenleistung und Drehmoment war zwischen dem Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff kaum ein Unterschied festzustellen. Der spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch lag im Betrieb mit Dieselkraftstoff um ca. 12 % niedriger als mit Rapsölkraftstoff, bei einem volumetrischen Vergleich beträgt der Unterschied noch ca. 3 %.

Ein Vergleich mit der Messung bei 879 Bh zeigt, dass es über die Betriebsdauer zu keinem Leistungsverlust gekommen ist.

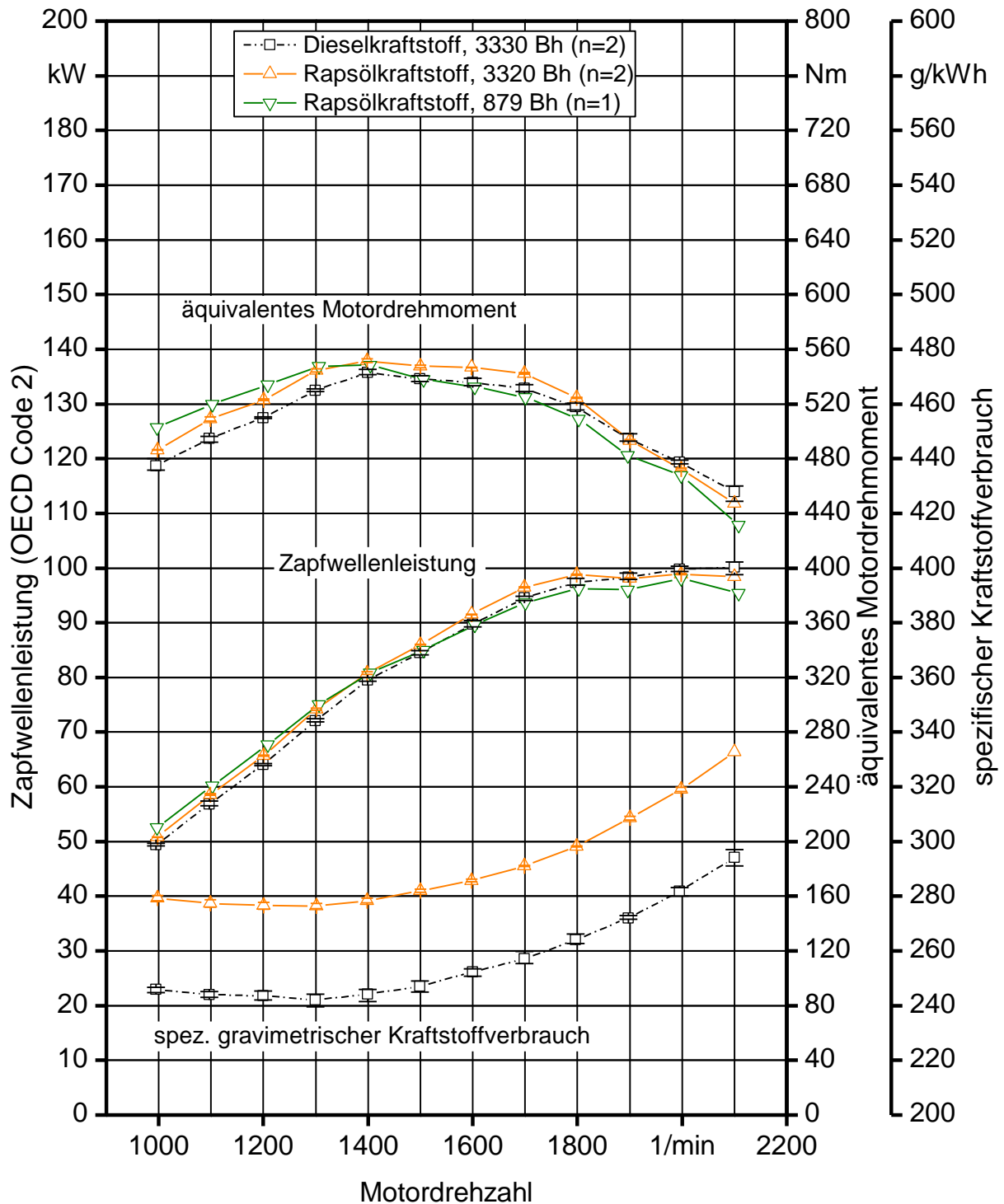


Abbildung 5: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch nach OECD Code 2 des Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff nach ca. 3320 Bh und im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei 879 Bh ( $n$  = Anzahl der Messungen)

### 4.3 Emissionsverhalten

Das Emissionsverhalten wurde bei beiden Traktoren gegen Ende des Projektzeitraumes ermittelt. Um längerfristige Veränderungen des Emissionsverhaltens mitbewerten zu können, wurden auch die Ergebnisse von THUNEKE et al. (2009) [10] mit in die Ergebnisdarstellung einbezogen. Bei der Interpretation der Ergebnisse bleibt zu berücksichtigen, dass die prinzipielle Vorgehensweise im Rahmen des Projektes die gleiche wie bei THUNEKE et al. (2009) [10] war. Im Detail sind jedoch Unterschiede anzuführen, wie z. B. die Verwendung anderer Messgeräte zur Ermittlung der Emissionen.

#### 4.3.1 Fendt Farmer Vario 412

Der Fendt Traktor hatte zum Zeitpunkt der Messungen insgesamt knapp 5000 Bh absolviert. Da seit einem Betriebsstundenstand von ca. 2000 Bh Emissionsmessungen durchgeführt wurden, ergibt sich für den Traktor ein Beobachtungszeitraum von ca. 3000 Bh. Die Emissionsmessungen im Rahmen des Projektes erfolgten vor und nach der Motorbegutachtung. Im Rahmen der Motorbegutachtung wurde die Einspritzdüse von Zylinder 2 und die Kraftstoffförderpumpe erneuert.

In Abbildung 6 sind die spezifischen  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass sich der  $\text{NO}_x$  Ausstoß kaum verändert hat. Für jeden Kraftstoff lagen die Ergebnisse in einem Bereich von  $\pm 5\%$  um den Mittelwert des Gesamtzeitraums. Mit Rapsölkraftstoff wurden 6 bis 17 % höhere  $\text{NO}_x$ -Emissionen als mit Dieselmotorkraftstoff festgestellt.

Die CO-Emissionen sind in Abbildung 7 dargestellt. Im Rahmen der vorangegangenen Untersuchung wurde die Einspritzmenge erhöht und in einem weiteren Schritt alle Einspritzdüsen gewechselt, um den Einfluss auf das Emissionsverhalten zu prüfen. Beide Maßnahmen führten zu niedrigeren CO-Emissionen. Seit dem Tausch der Einspritzdüsen bei ca. 2650 Bh bis zur Motorbegutachtung war sowohl im Betrieb mit Rapsöl- als auch mit Dieselmotorkraftstoff kein größerer Anstieg der CO-Emissionen festzustellen. Bei der Messung mit Rapsölkraftstoff nach der Motorbegutachtung wurden im Vergleich zu vorher im Mittel ca. 20 % höhere CO-Emissionen ermittelt. Im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff zeigte sich jedoch das Gegenteil. Beim Vergleich der CO-Emissionen der beiden Kraftstoffe wurden mit Rapsölkraftstoff immer geringere Werte beobachtet als mit Dieselmotorkraftstoff.

Bei den HC-Emissionen (Abbildung 8) waren im Betrieb mit beiden Kraftstoffen keine Veränderungen feststellbar. Mit Rapsölkraftstoff wurden immer um ca. 70 bis 80 % geringere HC-Emissionen ermittelt als mit Dieselmotorkraftstoff. Bei der Partikelmasse (PM) wurden bei ca. 4890 Bh deutlich höhere Emissionen festgestellt als bei den vorherigen Messungen (Abbildung 9), auch wenn die Grenzwerte von Abgasstufe I nach wie vor sicher eingehalten werden können. Bei den Messungen bei ca. 4900 Bh wurde mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff im Vergleich zu den Messungen nach dem Tausch der Einspritzdüsen eine Verdreifachung ermittelt. Die PM-Emissionen mit Rapsölkraftstoff waren bei 4900 Bh wieder auf dem Niveau wie vor dem Tausch der Einspritzdüsen, im Betrieb mit

Dieselmotoren waren sie etwas höher. Mit Rapsölkraftstoff wurden immer um ca. 45 bis 60 % geringere PM-Emissionen als mit Dieselmotoren gemessen.

Insgesamt zeigte der Traktor mit Ausnahme der Partikelmasse-Emissionen ein konstantes Emissionsbild über den beobachteten Zeitraum von 3000 Bh. Bei den PM-Emissionen war ein Anstieg zu verzeichnen. Ob dieser Anstieg auf Verschleiß oder Ablagerungen an den Einspritzdüsen zurückzuführen ist oder eine andere Ursache hat, kann nicht festgestellt werden. Der Wechsel einer vermutlich schadhaften Einspritzdüse (siehe hierzu auch Kapitel 4.4.1) brachte allerdings keine Verbesserung.

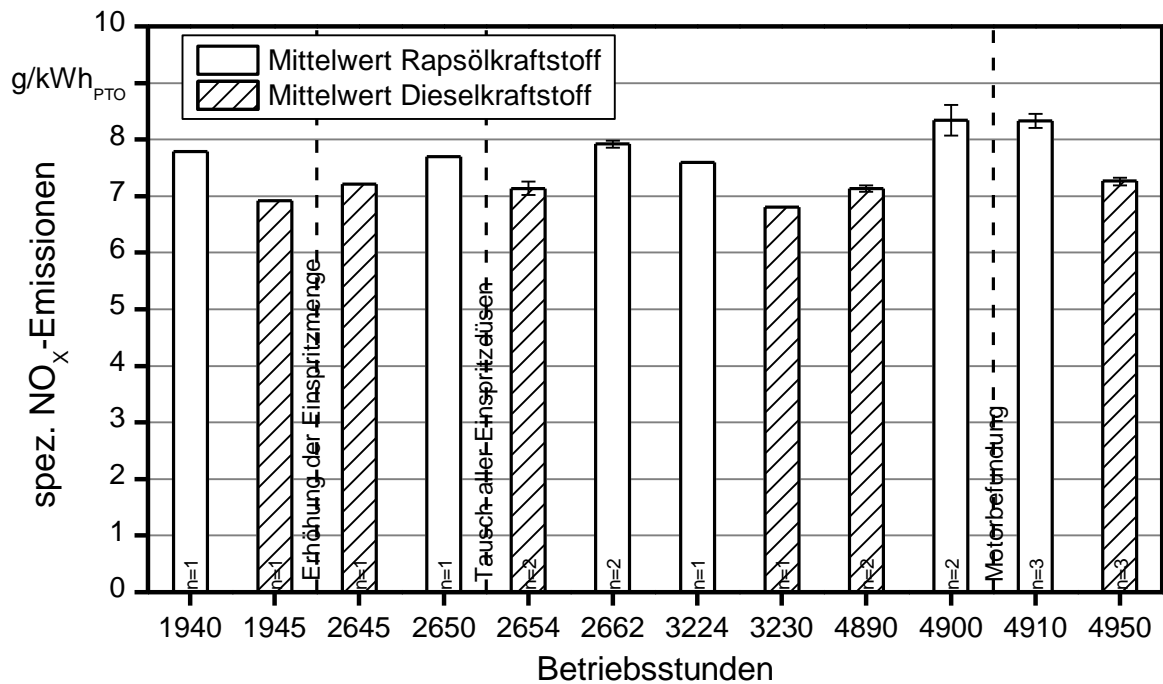


Abbildung 6: Mittelwerte und Spannweiten der  $NO_x$ -Emissionen des Fendt Farmer Vario 412 mit Rapsöl- und Dieselmotoren über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh ( $n$  = Anzahl der Messungen)

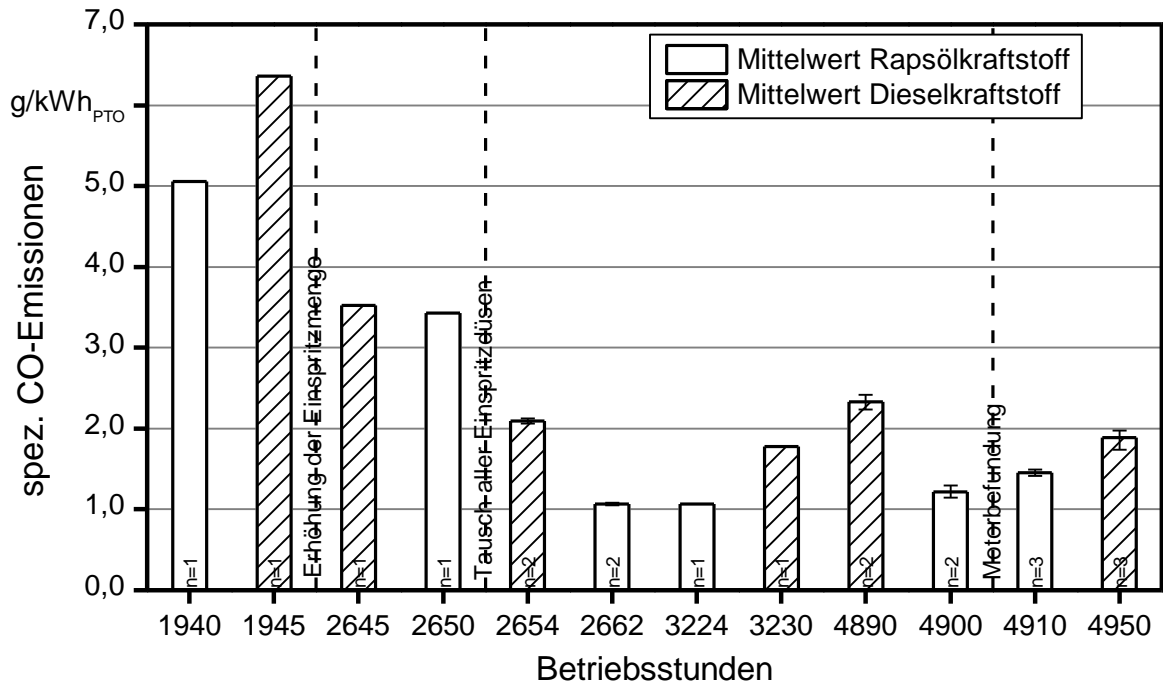


Abbildung 7: Mittelwerte und Spannweiten der CO-Emissionen des Fendt Farmer Vario 412 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen)

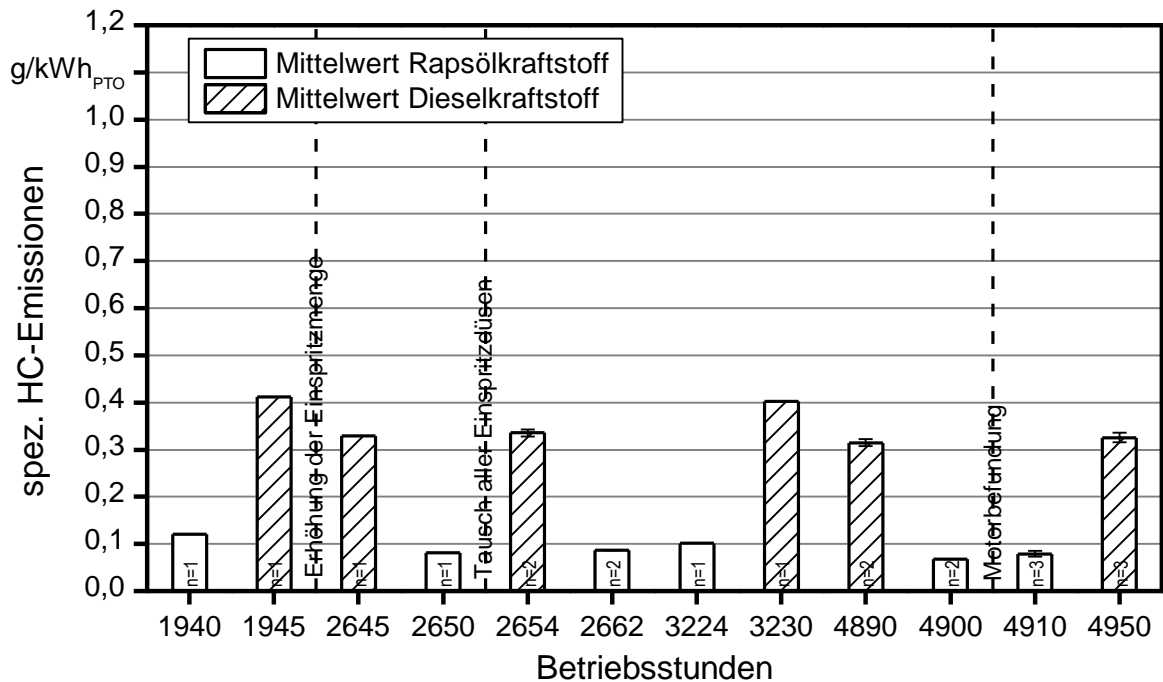


Abbildung 8: Mittelwerte und Spannweiten der HC-Emissionen des Fendt Farmer Vario 412 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen)

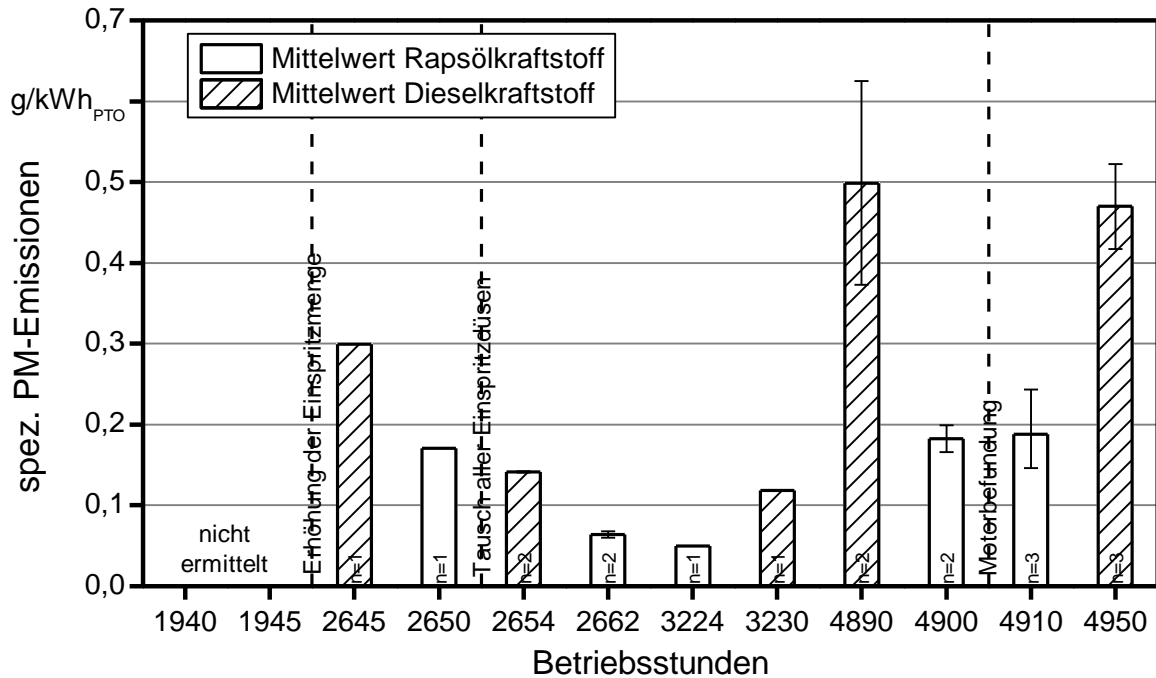


Abbildung 9: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse-Emissionen (PM) des Fendt Farmer Vario 412 mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh ( $n$  = Anzahl der Messungen)

Neben den gesetzlich limitierten Schadstoffkomponenten wurden im Rahmen der Untersuchung auch die dem FTIR ermittelten nicht limitierten Abgaskomponenten Formaldehyd und Acetaldehyd ermittelt. Die Acetaldehyd-Emissionen lagen jedoch immer unterhalb der Nachweisgrenze des Gerätes.

Die Ergebnisse zu den Formaldehyd-Emissionen sind in Abbildung 10 dargestellt. Mit Ausnahme der Messung mit Rapsölkraftstoff im Leerlauf (Prüfphase 8), waren die Messungen vor und nach der Motorbefundung auf gleichem Niveau. Im Leerlauf mit Rapsölkraftstoff waren nach der Zylinderkopfdemontage und dem Wechsel der Kraftstoffförderpumpe ca. 70 % höhere Formaldehyd-Emissionen feststellbar.

Die Formaldehyd-Emissionen von Dieselmotorkraftstoff bewegten sich über alle Prüfphasen im Bereich von ca. 4 bis 8 ppm. Mit Rapsölkraftstoff lagen die Emissionen mit Ausnahme des Leerlaufs immer unter ca. 5 ppm. Im Leerlauf jedoch waren bis zu 18 ppm feststellbar. Formaldehyde entstehen durch unvollständige Verbrennung von Kohlenwasserstoffen. Der Energiebedarf zur Gemischaufbereitung ist mit Rapsölkraftstoff höher als mit Dieselmotorkraftstoff, was sich insbesondere im Schwachlastbetrieb und Leerlauf ungünstig auswirkt [12]. Dies spiegelt sich auch bei den Formaldehyd-Emissionen im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff wider. Bei allen anderen Lastpunkten waren mit Rapsölkraftstoff geringere Formaldehyd-Emissionen als mit Dieselmotorkraftstoff feststellbar. Durch Einsatz eines Oxidationskatalysators könnten die Formaldehyd-Emissionen deutlich reduziert werden.

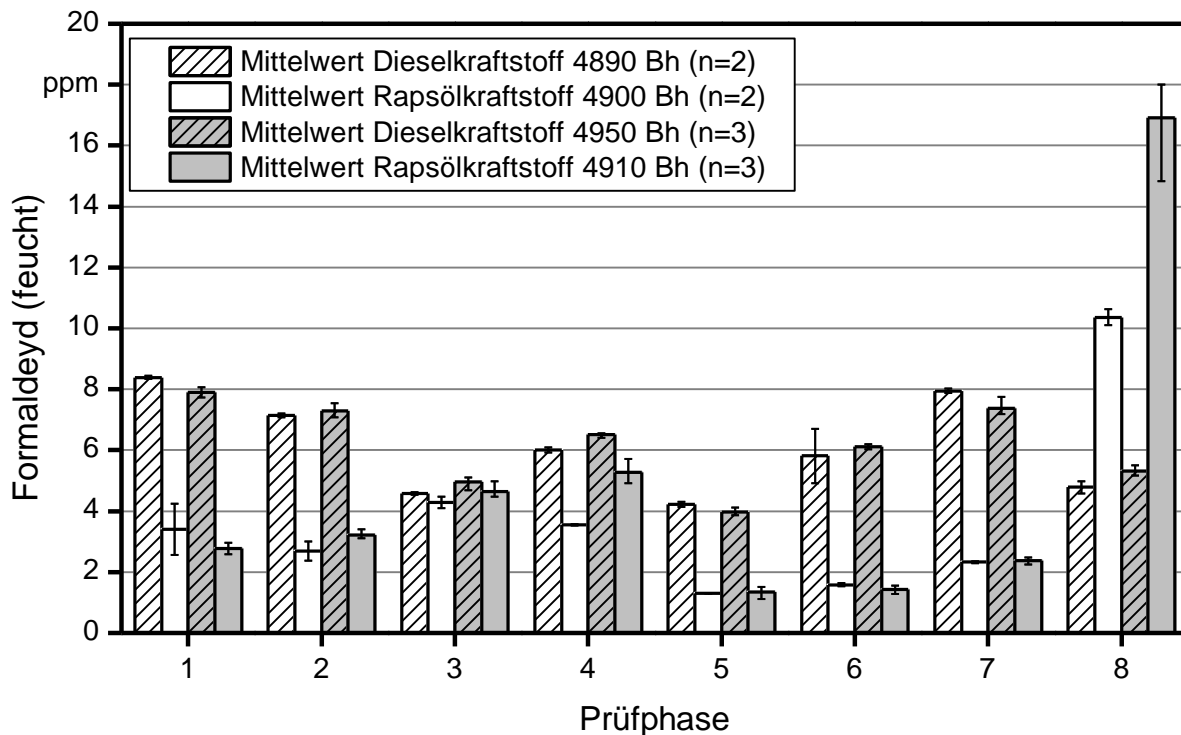


Abbildung 10: Mittelwerte und Spannweiten der Formaldehyd-Emissionen bezogen auf das feuchte Abgas des Fendt Farmer Vario 412 bei den Emissionsmessungen ( $n$  = Anzahl der Messungen)

#### 4.3.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160

Die Emissionsmessungen erfolgten bei dem Traktor bei ca. 3320 Bh. Die ersten Emissionsmessungen an dem Traktor wurden bereits bei ca. 245 Bh vor der Umrüstung auf Rapsölmotorkraftstoff durchgeführt. Es stand somit ein Zeitraum von ca. 3000 Bh zur Beurteilung des Langzeitemissionsverhaltens zur Verfügung. Die Emissionsmessungen am Traktor erfolgten nach der Motorbegutachtung mittels Endoskop. Es wurden hierbei keine relevanten Bauteile wie z. B. die Einspritzdüsen erneuert.

Die spezifischen  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind in Abbildung 11, die spezifischen CO-Emissionen in Abbildung 12, die HC-Emissionen in Abbildung 13 und die Partikelmasse-Emissionen in Abbildung 14 dargestellt. Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen schwankten sowohl für Rapsöl- als auch für Dieselmotorkraftstoff um max.  $\pm 5\%$  um den Gesamtmittelwert, der für Rapsölmotorkraftstoff  $7,6 \text{ g/kWh}_{\text{PTO}}$  und für Dieselmotorkraftstoff  $7,0 \text{ g/kWh}_{\text{PTO}}$  betrug. Insbesondere bei den jüngsten Messungen bei ca. 3320 Bh lagen für beide Kraftstoffe die ermittelten Werte sehr nah am Gesamtmittelwert, so dass keine Veränderung über die Betriebsdauer festgestellt werden. Mit Rapsölmotorkraftstoff wurden um 2 bis 13 % höhere  $\text{NO}_x$ -Emissionen als mit Dieselmotorkraftstoff ermittelt. Die CO-Emissionen variierten bei den Messungen um ca.  $\pm 20\%$  um die Gesamtmittelwerte. Für Rapsölmotorkraftstoff wurden im Mittel über alle Messungen  $1,2 \text{ g/kWh}_{\text{PTO}}$  und für Dieselmotorkraftstoff  $1,4 \text{ g/kWh}_{\text{PTO}}$  ermittelt. Die HC-Emissionen bewegten sich für Rapsölmotorkraftstoff um +28 bis  $-17\%$  um den Gesamtmittelwert von  $0,31 \text{ g/kWh}_{\text{PTO}}$  und für Dieselmotorkraftstoff um +15 bis  $-28\%$  um  $0,95 \text{ g/kWh}_{\text{PTO}}$ . Bei den



Partikelmasse-Emissionen wurden für Rapsölkraftstoff Schwankungen von +15 bis -26 % um den Gesamtmittelwert von 0,18 g/kWh<sub>PTO</sub> und für Dieseldieselkraftstoff von +16 bis -6 % um 0,24 g/kWh<sub>PTO</sub> festgestellt.

Bei allen untersuchten limitierten Schadstoffkomponenten ist somit kein Trend hin zu einem Anstieg der Emissionen über die Betriebsdauer zu erkennen. Auf einen beginnenden Verschleiß z. B. der Einspritzdüsen, welche knapp 2500 Bh bei den letzten Emissionsmessungen aufwiesen, lässt sich anhand des Emissionsbildes nicht schließen. Beim Vergleich der Gesamtmittelwerte der limitierten Schadstoffkomponenten über die Betriebsdauer des Traktors wurden mit Dieseldieselkraftstoff ca. 8 % geringere NO<sub>x</sub>, 16 % höhere CO, 200 % höhere HC und 33 % höhere PM-Emissionen ermittelt.

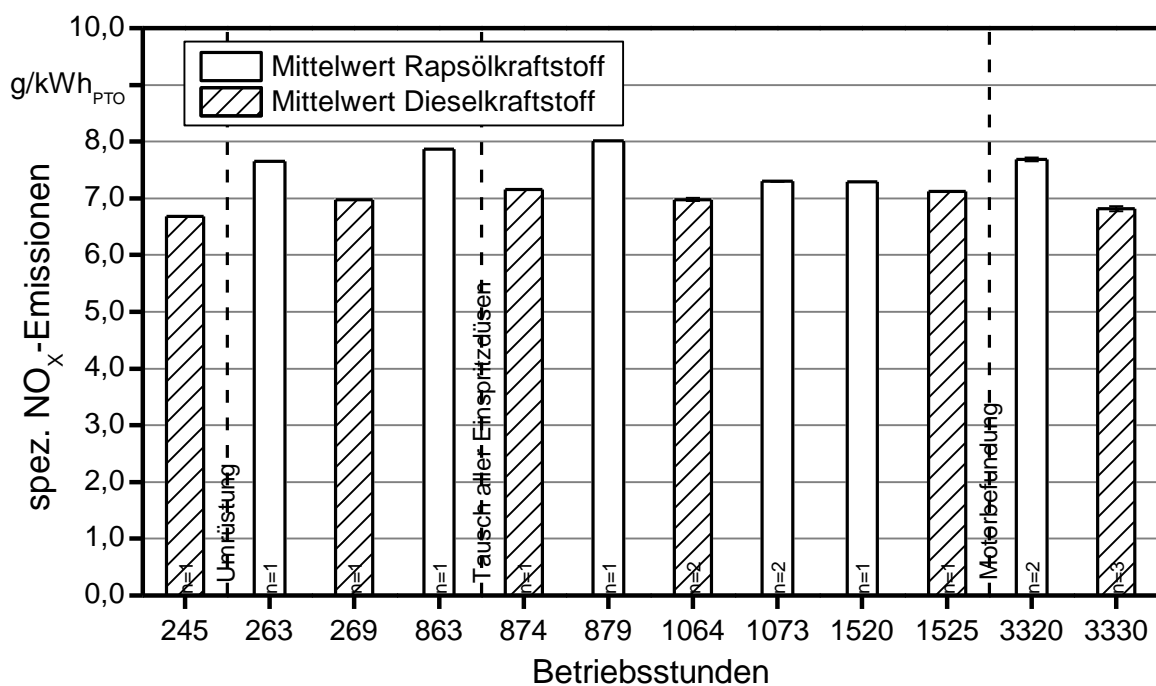


Abbildung 11: Mittelwerte und Spannweiten der NO<sub>x</sub>-Emissionen des Deutz-Fahr Agtron TTV 1160 mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen)

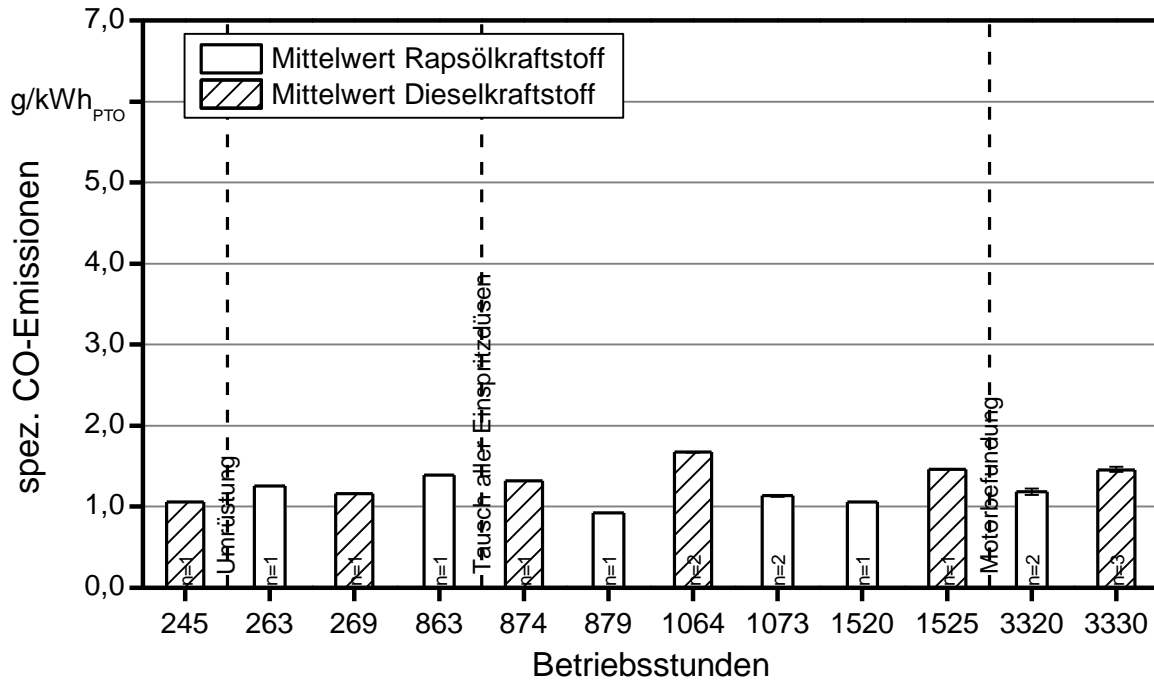


Abbildung 12: Mittelwerte und Spannweiten der CO-Emissionen des Deutz-Fahr Agtron TTV 1160 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen)

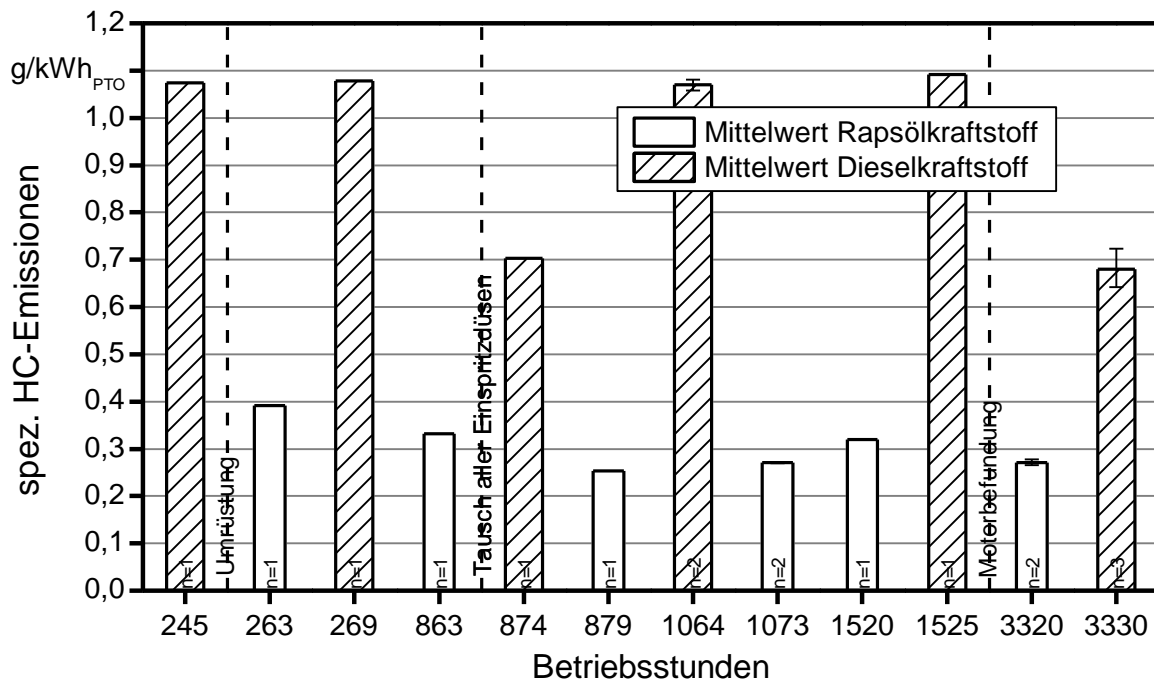


Abbildung 13: Mittelwerte und Spannweiten der HC-Emissionen des Deutz-Fahr Agtron TTV 1160 mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh (n = Anzahl der Messungen)

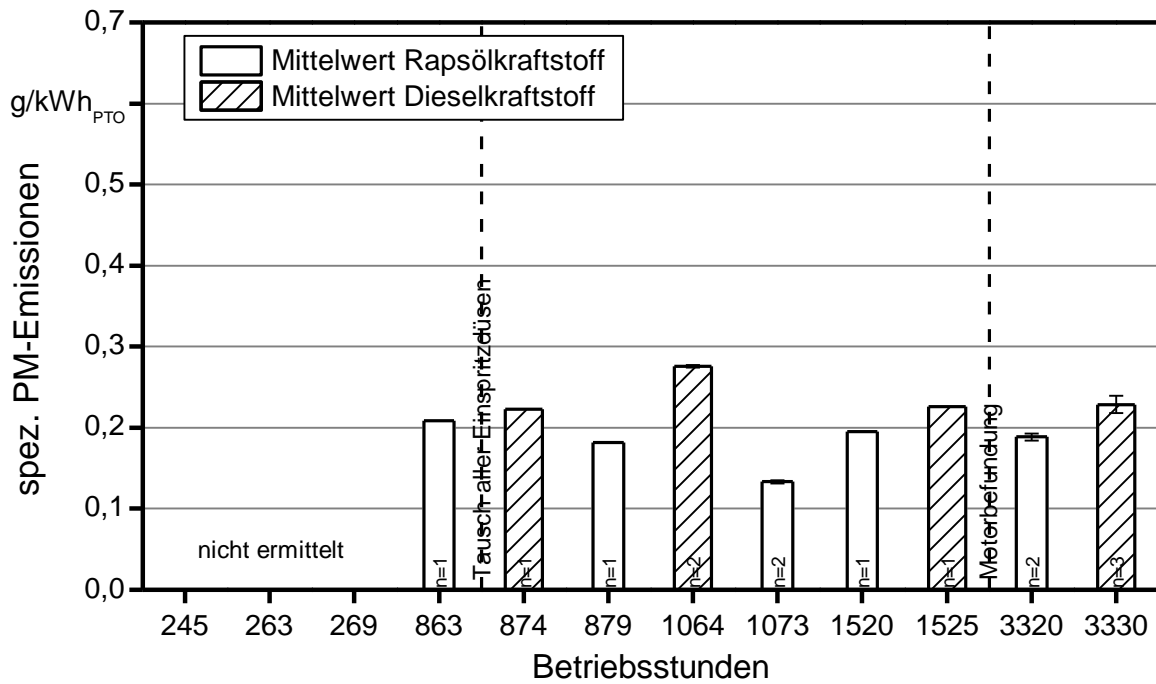


Abbildung 14: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse-Emissionen des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff über einen Zeitraum von ca. 3000 Bh ( $n$  = Anzahl der Messungen)

In Abbildung 15 sind die Formaldehyd-Emissionen des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 dargestellt. Wie auch beim Fendt Traktor waren die höchsten Formaldehyd-Emissionen mit Rapsölkraftstoff im Leerlauf festzustellen. Bei den Prüfphasen mit mindestens 75 % Last ergaben sich mit Rapsölkraftstoff wiederum deutlich geringere Formaldehyd-Emissionen als mit Dieseldieselkraftstoff. Die Auswirkungen der schlechteren Gemischaufbereitung im Teillast- und Leerlaufbetrieb bestätigen die mit dem Fendt Traktor erzielten Ergebnisse. Von den beiden eingesetzten Kraftstoffen weist Rapsölkraftstoff Vorteile in hohen Lastpunkten auf, während Dieseldieselkraftstoff im Leerlauf geringere Emissionen verursacht.

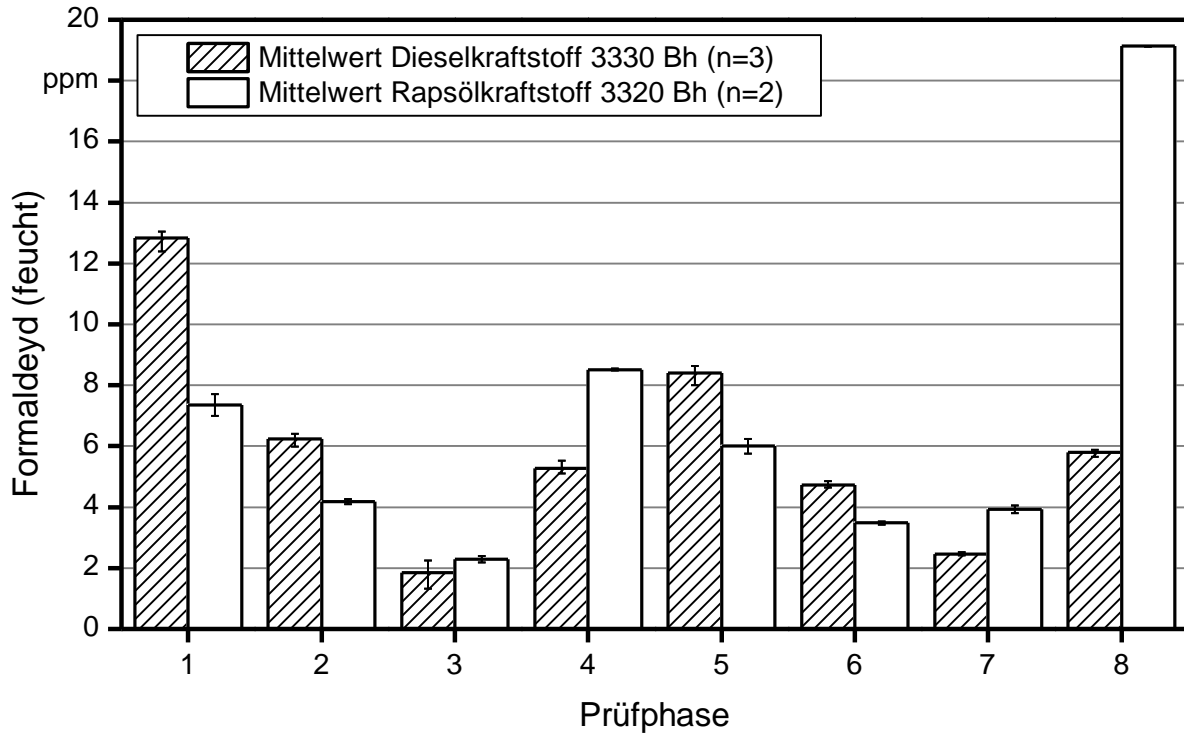


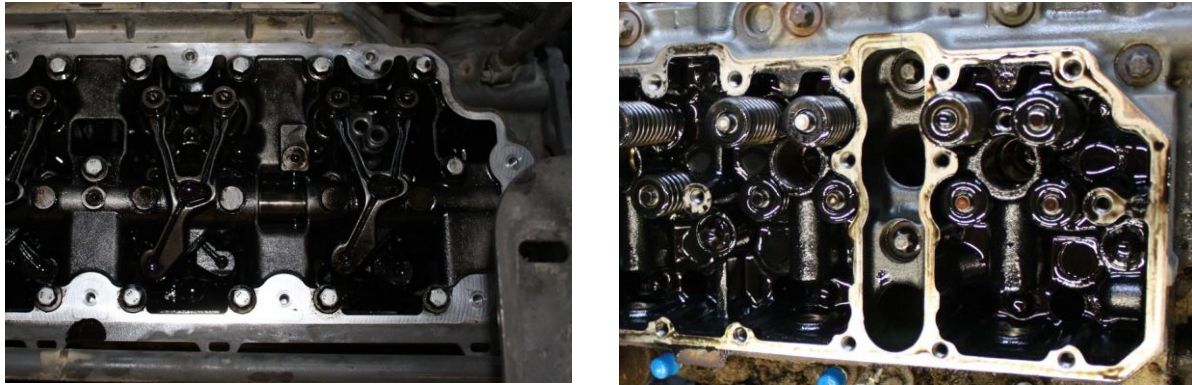
Abbildung 15: Mittelwerte und Spannweiten der Formaldehyd-Emissionen bezogen auf das feuchte Abgas des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 bei den Emissionsmessungen ( $n$  = Anzahl der Messungen)

#### 4.4 Motorbefundung

##### 4.4.1 Fendt Farmer Vario 412

Die Befundung des Traktormotors erfolgte bei ca. 4900 Bh im März 2011. Bei der Anlieferung des Traktors wurden auf der rechten Seite unter der Motorhaube massive Verschmutzungen gummiartiger Konsistenz festgestellt. Eine genaue Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden. Es handelte sich dabei vermutlich um Rapsöl- oder Hydrauliköl, welches auf heißen Motorenbauteilen polymerisierte und in Verbindung mit Staub schwer zu entfernende Verschmutzungen ergab. Die Funktion des Motors war dadurch nicht beeinträchtigt.

Bei der Demontage des Ventildeckels und des Kipphebelgehäuses konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Alle Bereiche waren mit einem leichten Ölfilm bedeckt, frei von Ablagerungen und zeigten keine Anzeichen von polymerisierten Rückständen (siehe Abbildung 16).



*Abbildung 16: Geöffnetes Kipphebelgehäuse und Zylinderkopf des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff*

Die Einspritzdüsen wurden ausgebaut und begutachtet. Der Traktor absolvierte mit den Einspritzdüsen ca. 2250 Bh. Alle Einspritzdüsen wiesen im Bereich der Düsenkuppe leichte Ablagerungen auf, die Einspritzlöcher waren frei (siehe Abbildung 17). Die Einspritzdüsen wurden bereits im Rahmen des Vorgängerprojektes bei einem Betriebsstundenstand von 665 Bh ausgebaut und begutachtet [10]. Im Vergleich dazu konnten keine wesentlichen Änderungen der Menge an Ablagerungen festgestellt werden. Die Einspritzdüsen wurden zusätzlich hinsichtlich Ihres Öffnungsdruckes und Spritzbildes untersucht. Der Öffnungsdruck war im Vergleich zu serienmäßigen Einspritzdüsen erhöht und bei allen vier Düsen gleich hoch. Da die Einspritzdüse von Zylinder 2 im Einspritzdüsen-Prüfgerät ein unsymmetrisches Spritzbild aufwies, wurde diese durch eine neue Einspritzdüse ersetzt. Alle anderen Einspritzdüsen waren in Ordnung und wurden wieder in den Motor eingebaut.

In Abbildung 18 sind die Zylinderbuchsen der einzelnen Zylinder dargestellt. Die Honriefen waren gut erhalten und es waren keine axialen Riefen bzw. keine Spiegelbildung zu erkennen. Die Kompressionsdruckmessung an 3 Zylindern ergab, dass der Kompressionsdruck im vom Hersteller empfohlenen Bereich lag. An Zylinder 4 war keine korrekte Kompressionsdruckmessung aufgrund eines Defektes des Messgerätes möglich. Es ergaben sich somit keine Anzeichen für einen übermäßigen Verschleiß.

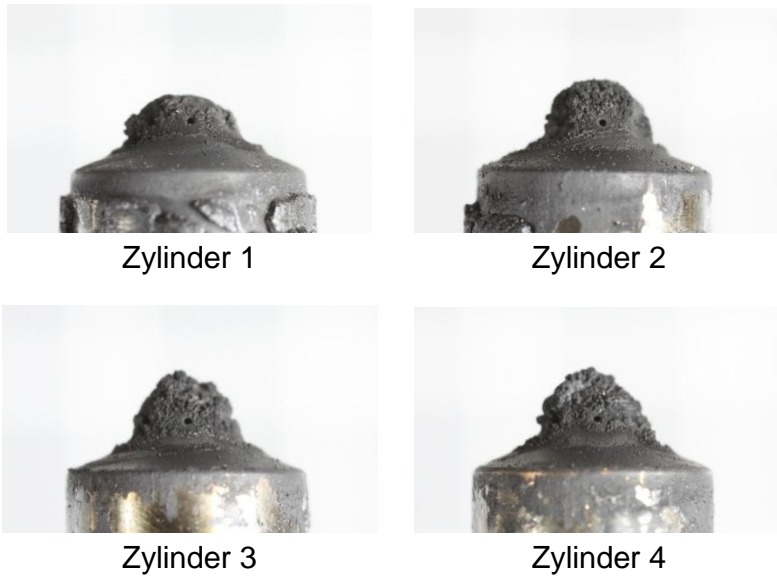


Abbildung 17: Einspritzdüsen des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 2250 Bh im Feldeinsatz

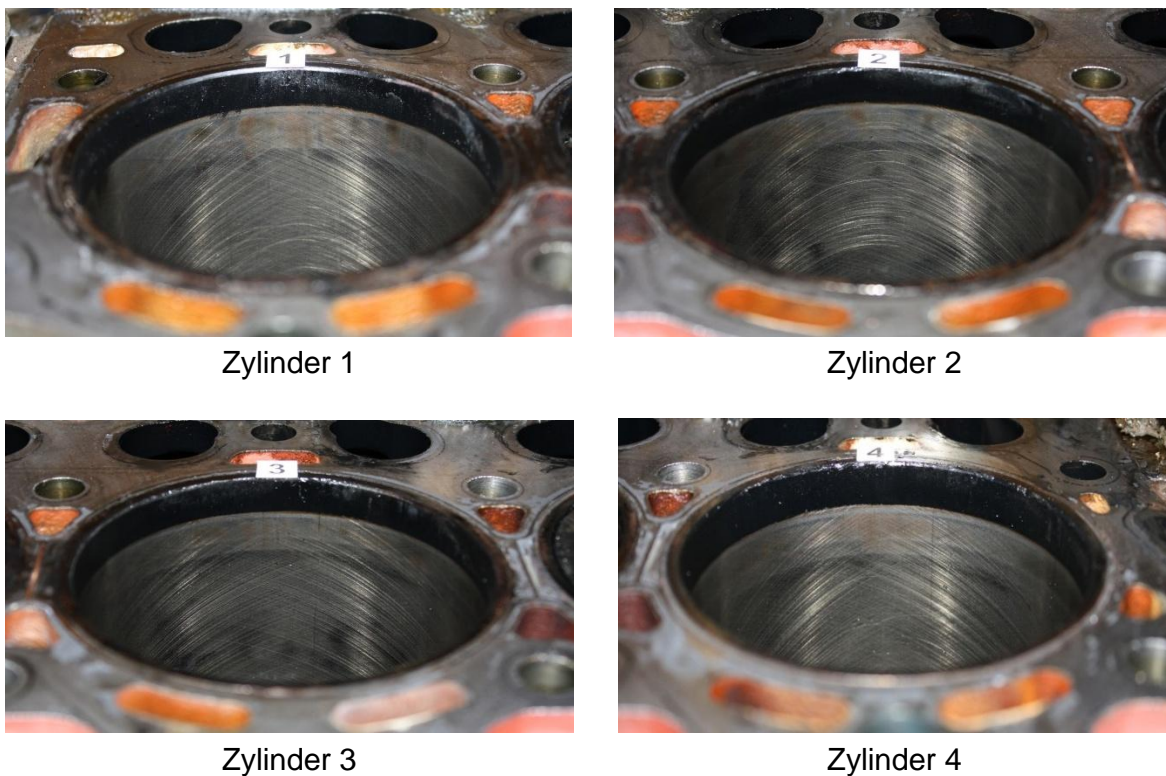


Abbildung 18: Zylinderbuchsen mit Honoriefen des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Abbildung 19 zeigt die Kolben des Traktors. Deutlich zu erkennen sind die Verfärbungen im Bereich der auftreffenden Einspritzstrahlen. Anhand dessen lässt sich feststellen, dass bei allen Zylindern ein symmetrisches Strahlbild vorliegt und keine Hinweise auf

abgelenkte defekte Einspritzdüsen (z.B. Strahlableitung durch Ablagerungen) vorliegen. Die Kolben von Zylinder 1 bis 3 weisen keine Ablagerungen auf und sind sauber. Am Kolben von Zylinder 4 waren am Kolbenrand und in der Kolbenmitte Ablagerungen weißer bzw. hellgrauer Färbung und in der Kolbenmulde um den Bereich des auftreffenden Einspritzstrahles rote Ablagerungen festzustellen. Die Schichtdicke lag bei weniger als 0,2 mm.

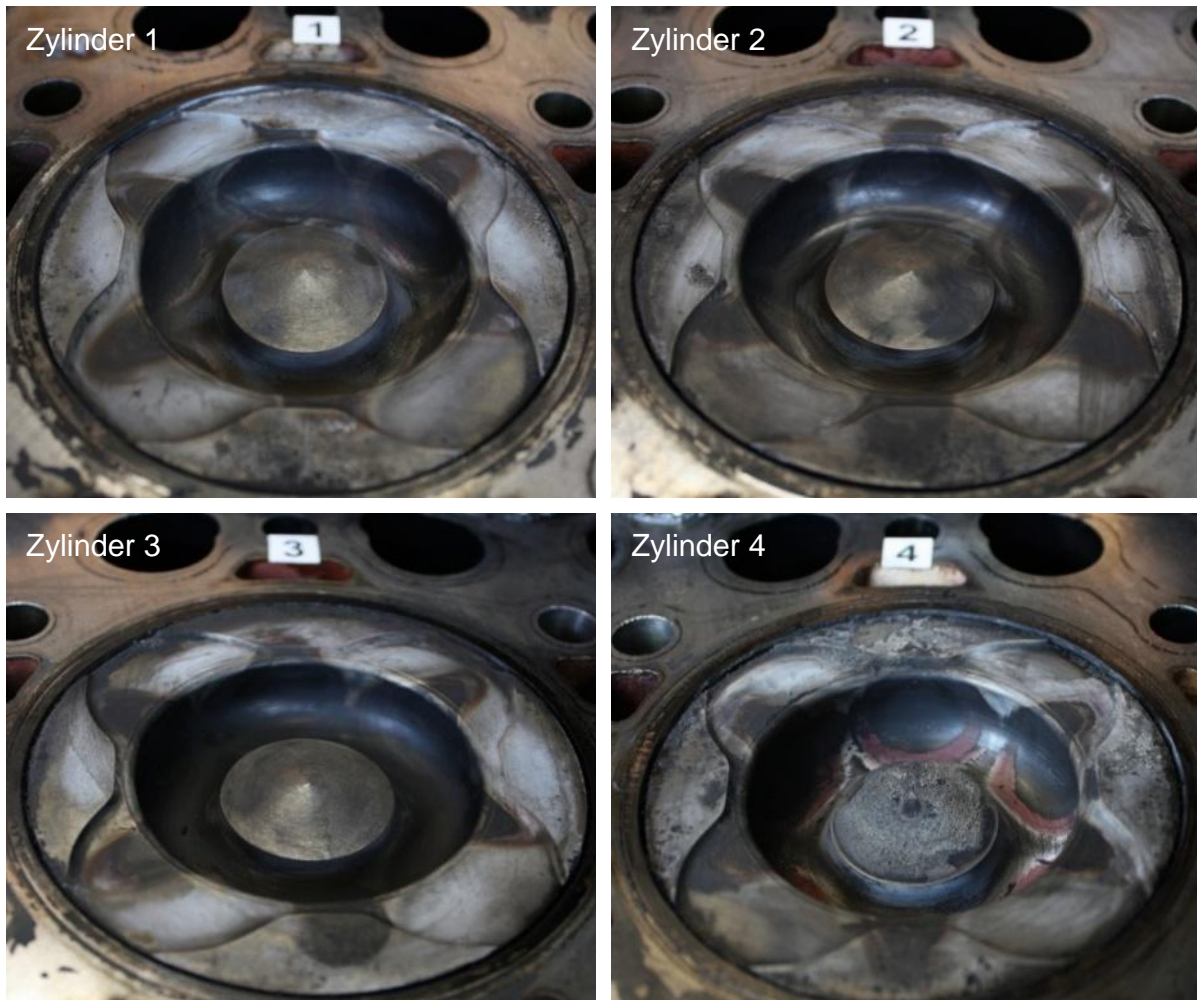


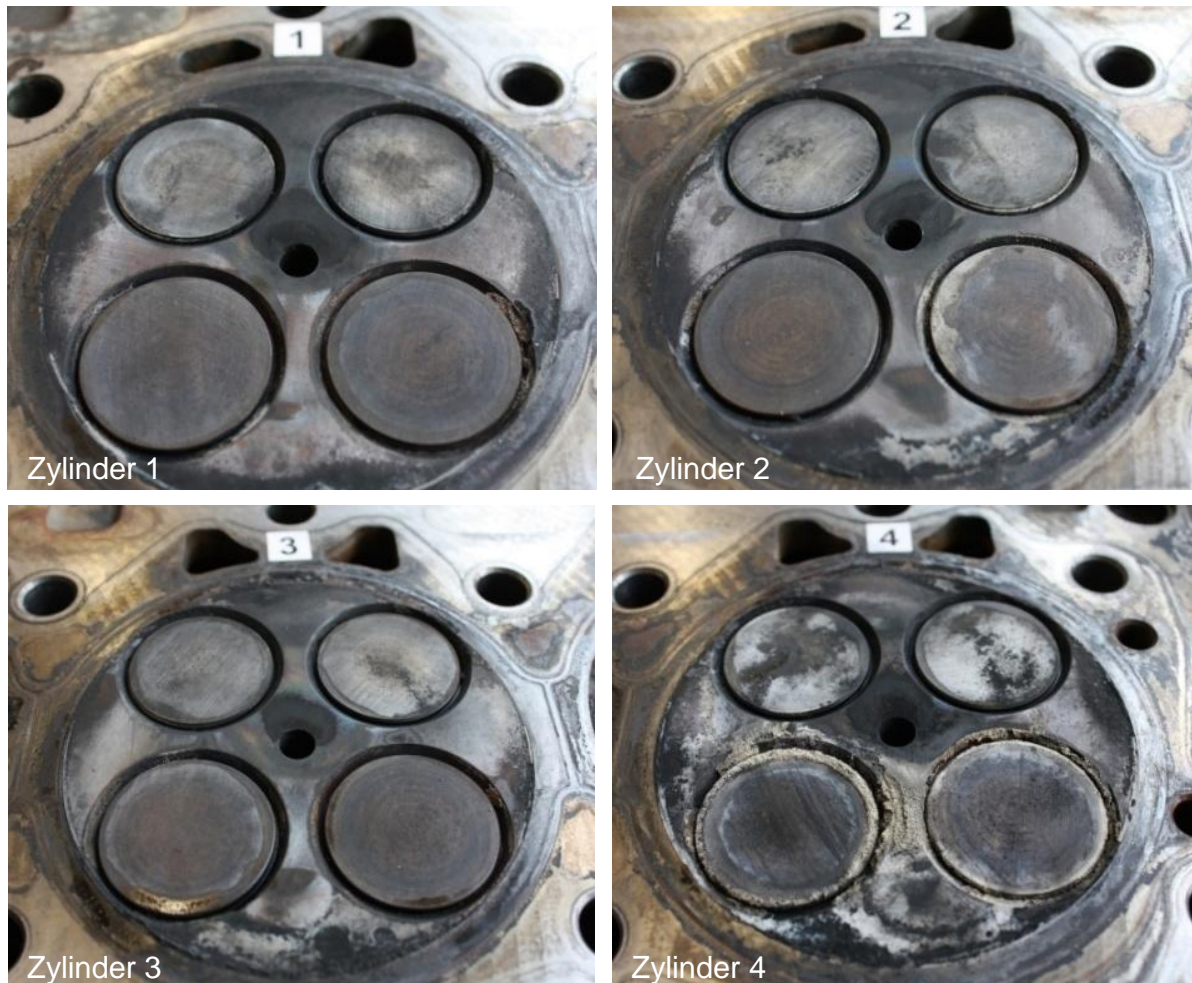
Abbildung 19: Kolben des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

In Abbildung 20 ist der Zylinderkopfboden dargestellt. Auch hier sind im Bereich der Zylinder 1 bis 3 keine Ablagerungen zu erkennen. An Zylinder 4 sind im Bereich der Einlassventile hellgraue Verkrustungen ersichtlich, der Bereich der Auslassventile ist hingegen sauber. Die Verkrustungen waren vor allem im Bereich des Ventiltellerrandes zu finden. Der Ventilsitz der Einlassventile war jedoch sauber.

Sowohl die Ablagerungen in der Kolbenmulde, als auch die Ablagerungen in der Kolbenmitte und am Zylinderkopf wurden mit einem Skalpell abgeschabt und hinsichtlich

ihrer Zusammensetzung analysiert. Hauptbestandteil war dabei in allen Fällen Kohlenstoff. Weitere Bestandteile, welche nachgewiesen werden konnten sind Aluminium, Calcium, Kalium, Magnesium, Natrium, Phosphor, Kupfer und Zink<sup>1</sup>.

Der Betrieb des Motors wurde durch die Ablagerungen nicht beeinflusst, worauf anhand der Ergebnisse zu den Leistungs- und Emissionsmessungen vor und nach dem Entfernen der Ablagerungen geschlossen werden kann.



*Abbildung 20: Zylinderkopfboden des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff*

Es bleibt somit festzustellen, dass Ablagerungen im Brennraum des Motors an einem der vier Zylinder zu finden waren. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Ursache für die Bildung der Ablagerungen speziell auf Zylinder 4 beschränkt. Da die verbrannte Qualität des Rapsölkraftstoffes in allen Zylindern die gleiche war, kann davon ausgeschlossen

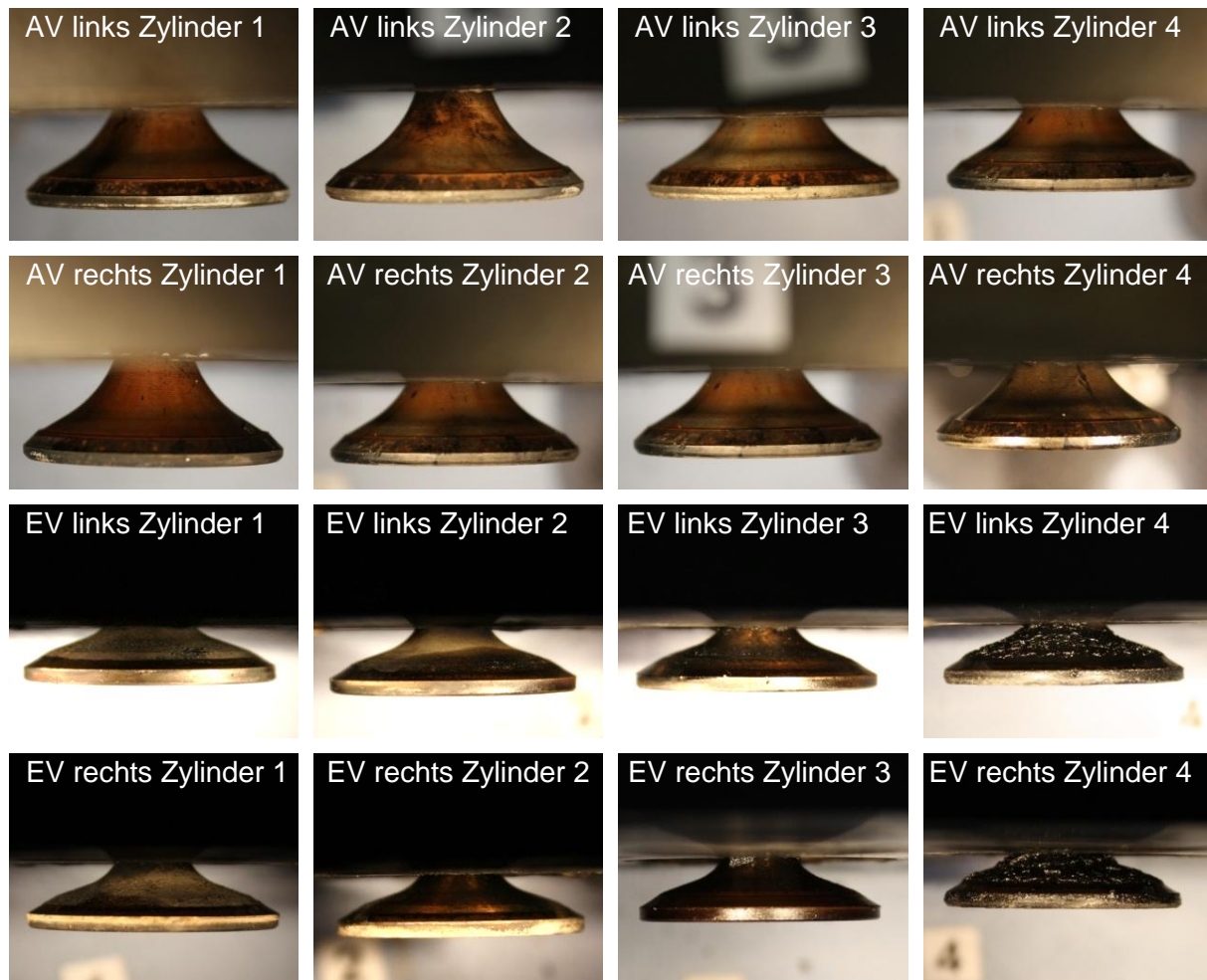
<sup>1</sup> Ermittelt nach Mikrowellenaufschluss mittels ICP-OES (Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma)



werden, dass ein primärer Zusammenhang mit der Rapsölkraftstoffqualität und der Bildung der vorhandenen Ablagerungen in Zylinder 4 besteht.

Die Auslassventile waren bei allen Zylindern sauber und an den Ventilsitzen waren optisch keine Auffälligkeiten feststellbar (siehe Abbildung 21). Bei den Einlassventilen von Zylinder 4 zeigten sich im unteren Bereich des Ventilkopfes leichte Ölkohleablagerungen, bei den anderen Einlassventilen waren dort keine Ablagerungen zu erkennen. Im oberen Bereich des Ventilkopfes der Einlassventile waren bei allen Zylindern Ölkohleablagerungen zu finden. Ölkohleablagerungen können nach längeren Laufzeiten durch Schmieröl verursacht werden, welches über den Turbolader oder aber durch die Ventileführungen in die Ansaugluft und damit auf die Außenseite der Einlassventile gelangt [3]. Die Ablagerungen können jedoch auch durch rückströmende unverbrannte Abgaskomponenten entstehen, die im Ansaugkanal kondensieren, vor allem wenn der Motor im Teillastbetrieb arbeitet. In diesen Betriebsbereichen liegt eine geringere Abgasturboaufladung vor, so dass im Zeitraum der Ventilüberschneidung kein positives Spülgefälle vorherrscht und Abgas in den Ansaugkanal gelangt. Dort kondensieren unverbrannte Abgaskomponenten an kälteren Bauteilen und führen zum Aufbau von Ablagerungen [11].

In Verbindung mit der Analyse der Ablagerungen im Brennraum von Zylinder 4, wo viele der Bestandteile auch im Motoröl zu finden sind, liegt der Verdacht nahe, dass sowohl die Ablagerungen im Brennraum, als auch die am Ventilkopf durch Motoröl verursacht werden. Es konnten jedoch keine auffälligen Undichtigkeiten im Bereich der Ventilschäfte festgestellt werden. Eine eindeutige Klärung der Ursache für die Bildung der Ablagerungen war im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht möglich.



*Abbildung 21: Ventilteller und unterer Bereich des Ventilkopfes der Auslassventile (AV) und Einlassventile (EV) des Fendt Farmer Vario 412 nach ca. 4900 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff*

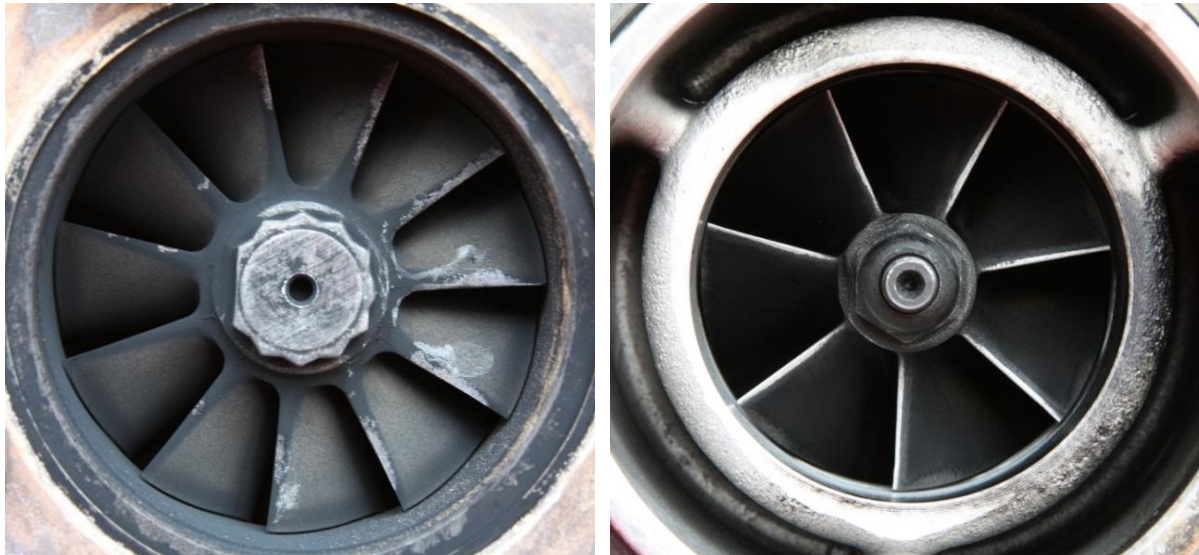
Insgesamt zeigte sich der Motor für die absolvierten 4900 Bh mit Rapsölkraftstoff in einem guten Zustand. Beim Zusammenbau wurden mit Ausnahme der Dichtungen, der Einspritzleitungen, der Einspritzdüse von Zylinder 2 und der Kraftstoffförderpumpe keine weiteren Bauteile ersetzt. Die Kraftstoffförderpumpe wurde getauscht, da bei den vorherigen Emissions- und Leistungsmessungen Undichtigkeiten festgestellt wurden. Über die gesamte Laufzeit des Traktors wurde die Kraftstoffförderpumpe bereits zweimal gewechselt. Auch in der Untersuchung von RATHBAUER et al. (2008) [6] wurde bei einigen Maschinen mit diesem Motortyp von einem notwendigen Wechsel der Kraftstoffförderpumpe berichtet.

#### **4.4.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160**

Am 18.02.2011 wurde der Traktor bei einem Betriebsstundenstand von 3300 Bh einer Inspektion unterzogen. Hierzu wurden die Einspritzleitungen, der Ventildeckel und die Einspritzdüsen ausgebaut und der Brennraum mittels eines Endoskops begutachtet.

Weiterhin wurde eine Kompressionsdruckprüfung durchgeführt. Eine vorangegangene Begutachtung des Traktors erfolgte am 29.04.2008 bei ca. 1770 Bh.

Der Abgasturbolader (Abbildung 22) zeigte vor dem Hintergrund der bereits absolvierten Betriebsstunden keine besonderen Auffälligkeiten. Das Turbinenrad war mit einer dünnen, trockenen und leicht zu entfernenden Rußschicht belegt, das Verdichterrad war ebenfalls trocken.



*Abbildung 22: Turbinen- (links) und Verdichterrad (rechts) des Abgasturboladers des Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160*

Bei der Demontage des Ventildeckels und der Einspritzleitungen konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Die Einspritzdüsen ließen sich zum Teil schwer lösen. Grund hierfür waren Ölkohleablagerungen die sich zwischen dem Schaft der Einspritzdüse und der Aufnahmebohrung aufgebaut hatten. Bei Zylinder 3 und 5 verblieb ein Teil dieser Ablagerungen in der Einspritzdüsenaufnahme, wie Abbildung 23 verdeutlicht.

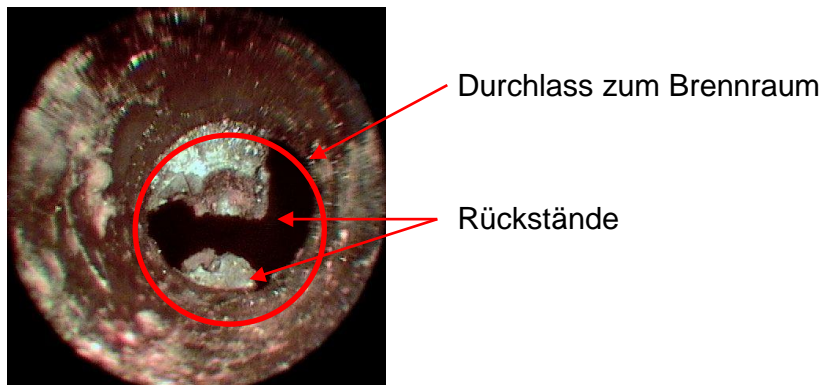


Abbildung 23: Rückstände in der Zylinderkopfbohrung zur Aufnahme der Einspritzdüse von Zylinder 3 beim Ausbau der Einspritzdüse

In Abbildung 24 sind die Einspritzdüsen der Zylinder dargestellt. Alle Einspritzdüsen wiesen Ablagerungen auf, an den Einspritzdüsen von Zylinder 2 und 4 waren im Vergleich zu den anderen Einspritzdüsen deutlich weniger Ablagerungen festzustellen. Die Düsenlöcher waren jedoch bei allen Einspritzdüsen frei, die Ablagerungen ließen sich einfach entfernen. Im Rahmen der Inspektion bei 1770 Bh (siehe THUNEKE et al. (2009) [10]) waren ähnliche Ablagerungen festzustellen. KLAISSLE et al. (2008) [5] beschreiben, dass die Ablagerungsbildung kein stetig ablaufender Prozess ist. In unregelmäßigen Abständen kommt es zu einem Abplatzen der Ablagerungen an der Einspritzdüse. Dies könnte auch der Grund sein, warum die Einspritzdüsen von Zylinder 2 und 4 deutlich weniger Ablagerungen aufwiesen.



Abbildung 24: Einspritzdüsen des Deutz-Fahr Agrotion TTV 1160 nach ca. 2500 Bh im Feldeinsatz

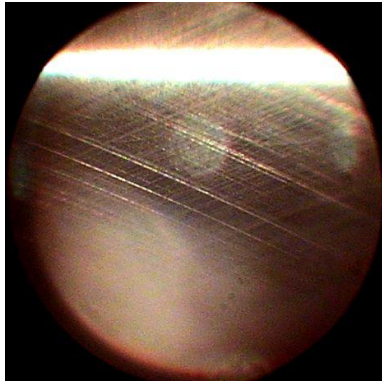
Die Ergebnisse der Kompressionsdruckprüfung sind in Tabelle 1 dargestellt. Bei Zylinder 1, 5 und 6 wurden gleiche Kompressionsdrücke ermittelt wie bei der Inspektion bei 1770 Bh. Zylinder 2, 3 und 4 wiesen einen geringfügigen Abfall des Kompressionsdruckes auf, bewegten sich jedoch insgesamt in dem vom Hersteller angegebenen Sollbereich.

*Tabelle 10: Ergebnisse der Kompressionsdruckprüfung*

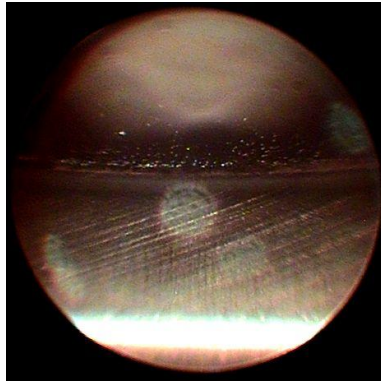
Betriebsstunden	Kompressionsdruck Zylinder 1	Kompressionsdruck Zylinder 2	Kompressionsdruck Zylinder 3	Kompressionsdruck Zylinder 4	Kompressionsdruck Zylinder 5	Kompressionsdruck Zylinder 6
1770	38 bar	38 bar	39 bar	38 bar	38 bar	38 bar
3300	38 bar	37 bar	36 bar	37 bar	38 bar	38 bar

Die Begutachtung des Brennraumes wurde mittels eines Endoskops durchgeführt. Der Bereich des Feuersteges war bei allen Zylindern klar abgegrenzt und mit einem schwarzen Belag versehen. Die zum Teil einsehbaren Ventilsitze von Einlass- und Auslassventil waren sauber. Auf der Oberseite der Ventilteller der Einlassventile ließen sich leichte Ölkohlaufbauten erkennen. In Abbildung 25 sind Aufnahmen der einzelnen Zylinderbuchsen dargestellt. Die Honriefen waren bei allen Zylindern gut zu erkennen und ließen auf keinen übermäßigen Verschleiß schließen. An den Zylinderbuchsen von Zylinder 2, 3 und 6 war eine leichte, jedoch nicht bedenkliche axiale Riefenbildung zu erkennen. Gründe für die Riefenbildung können z. B. Fremdpartikel aus der Verbrennungsluft sowie Verschleiß- und Abriebpartikel sein [3]. Auch abgeplatzte Verkokungen könnten zu einer Riefenbildung beitragen haben.

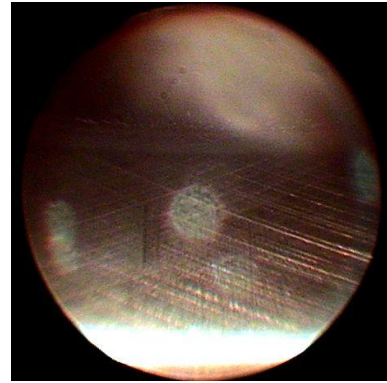
Beim Zusammenbau des Traktors wurden die Dichtringe an den Einspritzdüsen erneuert und die Einspritzdüsen oberflächlich gereinigt. Insgesamt zeigte auch dieser Traktor in Anbetracht seiner Betriebsstunden einen guten Zustand.



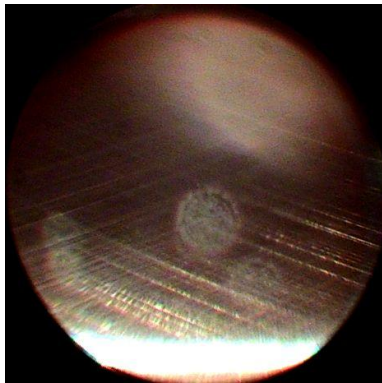
Zylinder 1



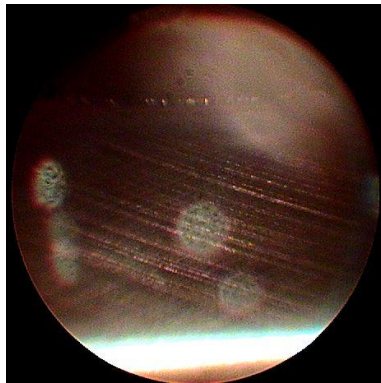
Zylinder 2



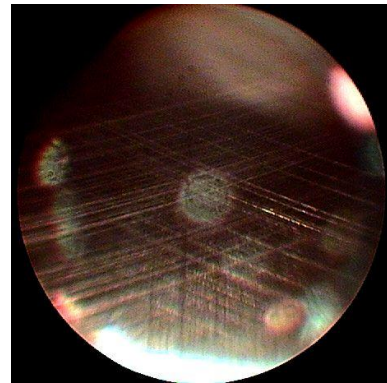
Zylinder 3



Zylinder 4



Zylinder 5



Zylinder 6

*Abbildung 25: Aufnahmen der Zylinderbuchsen mit Honriefen des Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 nach ca. 3300 Bh mittels Endoskop*

## Zusammenfassung

Die Nutzung von Rapsölkraftstoff in Traktoren kann einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz liefern. Bei der Produktion von Rapsölkraftstoff in dezentralen Anlagen wird zudem die Wertschöpfung im ländlichen Raum gesteigert und regionale Produktions- und Nutzungskreisläufe geschlossen werden.

Bisherige Erfahrungen mit rapsölkraftstoffbetriebenen Traktoren zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Maschinen zuverlässig betrieben werden können. Wenige Informationen sind jedoch verfügbar, wie sich das Emissionsverhalten über einen längeren Zeitraum entwickelt.

Aufgrund dessen war das Ziel der vorliegenden Untersuchung, einen Beitrag zur Klärung des Emissionsverhaltens von Rapsöltraktoren im Langzeitbetrieb zu leisten. Hierzu sollten zwei Traktoren dienen, die bereits Teil der Untersuchungen von THUNEKE et al. (2009) [10] waren und für die auch umfangreiche Ergebnisse zum Emissionsverhalten vorliegen. Dies sind ein Fendt Farmer Vario 412 der Abgasstufe I und ein Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 der Abgasstufe II. Die Traktoren werden im Feldeinsatz am LVFZ Kringell untersucht. Beide Traktoren wurden, mit Ausnahme der Wintermonate, mit Rapsölkraftstoff betrieben. Zur Dokumentation der Qualität der Betriebsstoffe wurden die angelieferten Rapsölkraftstoffchargen hinsichtlich kraftstoffrelevanter Eigenschaften analysiert sowie der Zustand des Motoröls stichprobenartig überprüft. Darüber hinaus wurden die Traktoren auch hinsichtlich der Veränderung des Leistungsverhaltens untersucht. Um den Zustand der Traktoren besser beurteilen zu können, wurde zudem eine Motorbefundung durchgeführt. Der Fendt Traktor wies zum Zeitpunkt der Messungen und der Motorbefundung knapp 5000 Bh auf, der Deutz-Fahr Traktor ca. 3300 Bh.

Mit den beiden Traktoren wurden am LVFZ Kringell insgesamt 16.030 l Rapsölkraftstoff eingesetzt und damit CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von etwa 30.457 kg CO<sub>2,eq</sub><sup>2</sup> vermieden. Der eingesetzte Rapsölkraftstoff wurde von einer lokalen Ölmühle bezogen und war von einer weitgehend guten Qualität. Bei zwei angelieferten Rapsölchargen wurden im Vergleich zur DIN 51605 leicht erhöhte Gehalte an Phosphor, Calcium und Magnesium festgestellt. Die stichprobenartigen Motoröluntersuchungen zum Ölwechsel bestätigen zum einen die Notwendigkeit eines verkürzten Motorölwechselintervalls aufgrund des Eintrags von Rapsöl in das Motoröl, zeigen zum anderen aber auch, dass die Maschinen dann zuverlässig betrieben werden können.

Hinsichtlich des Leistungsverhaltens war bei beiden Traktoren im Betrieb mit Rapsölkraftstoff keine signifikante Veränderung erkennbar. In Übereinstimmung mit früheren Ergebnissen konnten im Vergleich zu Dieselmotoren mit dem Fendt Traktor geringfügig höhere Leistungen erzielt werden. Beim Deutz-Fahr Traktor waren keine Unterschiede zwischen Diesel- auf Rapsölkraftstoff feststellbar.

---

<sup>2</sup> CO<sub>2,eq</sub>: CO<sub>2</sub>-Equivalent berechnet nach SCHMITZ et al. (2009) [7]

Das Emissionsverhalten von Stickstoffoxiden, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffen zeigte sich bei beiden Traktoren über den Untersuchungszeitraum als stabil. Dies war für den Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 auch für die Partikelmasse-Emissionen festzustellen. Beim Fendt Farmer Vario 412 zeigte sich jedoch ein Anstieg des Partikel-Ausstoßes, wenngleich dieser im Betrieb mit Rapsölkraftstoff immer noch auf einem für einen Abgasstufe I Traktor niedrigen Niveau von ca. 0,19 g/kWh<sub>PTO</sub> lag. Eine eindeutige Erklärung für den Anstieg konnte im Rahmen der Untersuchung nicht festgestellt werden. Neben den gesetzlich limitierten Schadstoffkomponenten wurden auch die Formaldehyd-Emissionen im Rahmen der Untersuchung erfasst. Die Formaldehyd-Konzentrationen im Abgas lagen bei beiden Traktoren unabhängig vom Kraftstoff unter 20 ppm. In den einzelnen Prüfphasen zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede. Während in Betriebspunkten bei hoher Leistung die Formaldehyd-Emissionen mit Rapsölkraftstoff deutlich unter denen von Dieselmotorkraftstoff lagen, kehrte sich das Verhältnis im Schwachlastbetrieb bzw. Leerlauf um. Grund für dieses Verhalten ist die schlechtere Gemischaufbereitung von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff, die zu einer unvollständigen Verbrennung in diesen Prüfphasen führt.

Im Rahmen der Motorbefundung konnte bei beiden Traktoren ein für die Laufzeit insgesamt guter Zustand festgestellt werden. Beim Fendt Farmer Vario 412 wurden an einem Zylinder leichte Ablagerungen festgestellt, deren Ursache nicht vollständig geklärt werden konnte. Die Ablagerungen beeinflussten jedoch weder das Leistungs- noch Emissionsverhalten.

Für beide Traktoren konnte somit über die Betriebsdauer von ca. 5000 bzw. 3300 Bh die volle Funktionalität nachgewiesen werden. Die Nutzungszeit von Traktoren beträgt jedoch weit mehr als 5000 Bh. Deshalb sollen in weiteren Untersuchungen an den beiden Traktoren weitere Ergebnisse gesammelt werden, um mehr Erfahrungen zur Dauerhaltbarkeit gewinnen zu können.



## Quellenverzeichnis

- [1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2010): DIN 51605 - Kraftstoffe für pflanzenölaugliche Motoren - Rapsölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. September 2010. Berlin: Beuth Verlag, 16 Seiten
- [2] EMBERGER, P.; LANDIS, M.; KRAMMER, K.; PRANKL, H.; SCHAUFLE, 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
- [3] GREUTER, E.; ZIMA, S.; HOFFMANN, W. (2006): Motorschäden. Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen. 3. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 571 Seiten
- [4] HASSEL, E.; PRESCHER, K.; BERNDT, S.; FLÜGGE, E.; GOLISCH, J.; HARKNER, W.; SCHÜMANN, U.; SY, G.; WICHMANN, V. (2005): Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsölauglichen Traktoren. Abschlussbericht über die Begleitforschung zum Demonstrationsvorhaben, Aktenzeichen: 00 NR 200. Rostock: Universität Rostock, 221 Seiten
- [5] KLAISSLE, M.; SCHREINER, K.; FAULSTICH, M. (2008): Standardisation of 1st generation biofuels. Investigating the effect of ash-forming fuel elements of rape seed oil in combustion chamber and exhaust aftertreatment system. In: SCHMID, J.; GRIMM, H.-P.; HELM, P.; GRASSI, A. (Hrsg.): 16<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition - from research to industry and markets. Proceedings of the International Conference held in Valencia, Spain, 2-6 June 2008. Florence, Italy: ETA-Florence Renewable Energies, S. 2031-2034
- [6] RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; KRIECHBAUM, T.; PRANKL, H.; BREINESBERGER, J. (2008): Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft. BMLFUW-LE. 1.3.2/0037-II/1/2006. Wieselburg, St. Pölten: HBLFA Francisco Josephinum; BLT Biomass-Logistic-Technology; AGRAR PLUS GmbH, 1078 Seiten
- [7] SCHMITZ, N.; HENKE, J.; KLEPPER, G. (2009): Biokraftstoffe. Eine vergleichende Analyse. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 165 Seiten
- [8] SY, G.; FLÜGGE, E.; WICHMANN, V.; KLAABEN, G. (2009): Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz. Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben. Aktenzeichen: 22021107 (07NR211). Rostock: Universität Rostock, 106 Seiten
- [9] THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; GASSNER, T.; REMMELE, E.; WIDMANN, B.; FISCHER, H.; KRIST, H.-J.; SCHNELLE-KREIS, J.; HOPPENHEIDT, K. (2007): Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors. Berichte aus dem TFZ, Nr. 14. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 97 Seiten, ISSN 1614-1008
- [10] 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. Berichte aus dem TFZ, Nr. 17. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 177 Seiten, ISSN 1614-1008

- [11] WICHMANN, V. (2008): Konzepte und Betriebsstrategien für die Nutzung von Rapsölen in Verbrennungsmotoren für den Einsatz in Landmaschinen. Dissertation. Rostock: Universität Rostock, Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik, 132 Seiten
- [12] WICHMANN, V. (2009): Motortechnik. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (Hrsg.): Pflanzenöl als Kraftstoff in landwirtschaftlichen Maschinen. KTBL-Schrift, Nr. 478. Darmstadt: KTBL, S. 42-55
- [13] WIDMANN, B.; REMMELE, E. (2008): Biokraftstoffe. Fragen und Antworten. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 16 Seiten
- [14] WITZELSPERGER, J.; REMMELE, E. (2009): Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff. Berichte aus dem TFZ, Nr. 20. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 270 Seiten, ISSN 1614-1008





## 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 Holzzentralheizungsanlagen 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 Motoröl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung 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 Kleinfeuerungen - Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte –
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren 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 – Marktbetrachtungen, 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 Abgasstufe I und II



