

60

Berichte aus dem TFZ

Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV

Projektpartner:



Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV



Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV

**Abgasemissionen, Effizienz und Betriebssicherheit
pflanzenöлтаuglicher Traktoren auf den bayerischen
staatlichen Versuchsbetrieben**

Johannes Ettl
Dr. Klaus Thuneke
Dr.-Ing. Peter Emberger
Dr. Edgar Remmele

Kooperationspartner:



Berichte aus dem TFZ 60

Straubing, Januar 2019

Titel: Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV

Autoren: Johannes Ettl, Dr.-Ing. Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke,
Dr. Edgar Remmele

Projektleiter: Dr. Edgar Remmele

Bearbeiter: Johannes Ettl, Roland Fleischmann

in Kooperation mit: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
John Deere GmbH & Co. KG
BayWa AG
AGCO Fendt GmbH

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie unter dem Förderkennzeichen BE/15/02 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2019
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werks 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

Redaktion: Johannes Ettl, Dr. Klaus Thuneke, Dr.-Ing. Peter Emberger, Ulrike Ammer

Verlag: Eigenverlag

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2019

Gestaltung: Johannes Ettl

Fotonachweis: Johannes Ettl, Dr.-Ing. Peter Emberger, Sebastian Kirner, Georg Huber,
Ulrich Eidenschink

Danksagung

Beim Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie bedanken wir uns für die Finanzierung des Vorhabens. Insbesondere bei Herrn Dr. Klaus Keisel, Herrn Dr. Christoph Härle und Herrn Florens Dittrich möchten wir uns für die stets sehr gute Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

Großer Dank gebührt den staatlichen Versuchsbetrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) unter Leitung von Herrn Dr. Hermann Lindermayer für die Bereitstellung von Traktoren und die aktive Unterstützung des Vorhabens. Das tatkräftige und fachkundige Mitwirken insbesondere folgender Mitarbeiter trug maßgeblich zum Gelingen dieses Vorhabens bei:

- Herr Klaus Lettenmeyer und Herr Sven Böttcher von der Versuchsstation Grub,
- Herr Georg Hammerl und Herr Michael Scheidler vom Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Milchvieh- und Rinderhaltung in Achselschwang,
- Herr Helmut Konrad, Herr Andreas Kiener und Herr Wolfgang Stahl vom Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Milchviehhaltung in Almesbach,
- Herr Johann Blöchinger, Herr Sebastian Krenn und Herr Wolfgang Löw vom Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau in Kringell,
- Herr Reiner Hein und Herr Hermann Layer von den Versuchsstationen Osterseeon und Baumannshof,
- Herr Rudolf Beck und Herr Thomas Seiler von den Versuchsstationen Straßmoos und Neuhof,
- Herr Anton Deutinger von der Versuchsstation Karolinenfeld,
- Herr Ulrich Dörfel, Herr Eberhard Heiles und Herr Andreas Keil von der Versuchsstation Puch,
- Herr Günter Putz vom Gutsbetrieb Mainkofen und Herr Christian Beckmann von der Landmaschinenschule Landshut-Schönbrunn des Bezirks Niederbayern.

Bedanken möchten wir uns weiterhin beim John Deere European Technology Innovation Center (ETIC) und bei der John Deere GmbH & Co. KG, insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel und Herrn Dr.-Ing. Axel Kunz für die vorbildliche Zusammenarbeit und die Bereitstellung mehrerer Pflanzenöltraktoren für Versuche.

Ein herzlicher Dank gilt der BayWa AG, besonders Herrn Daniel Steffl und Herrn Hermann Schwankner, sowie der AGCO Fendt GmbH, insbesondere Herrn Walter Wagner, für die Unterstützung des Forschungsvorhabens durch Bereitstellung eines Pflanzenöltraktors und die stets sehr gute Kooperation. Herrn Franz Eisenhofer von der Alternative Technology Group GmbH (ATG) danken wir für den sehr guten Erfahrungsaustausch. Ein herzliches Dankeschön gebührt zudem der Deutz AG, insbesondere Herrn Markus Winkler, Herrn Dr.-Ing. Georg Töpfer und Herrn Sebastian Burk, für die sehr gute Zusammenarbeit bei der Befundung von Motor- und Abgasnachbehandlungskomponenten.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	15
Abkürzungsverzeichnis	17
1 Einleitung	19
2 Stand des Wissens.....	21
2.1 Abgasgesetzgebung und Prüfmethoden	21
2.2 Pflanzenöltechnik in Traktoren	24
3 Problemstellung	27
4 Zielstellung	31
5 Material und Methoden	33
5.1 Pflanzenöltraktoren und Versuchsstandorte.....	33
5.1.1 Traktoren der Abgasstufen I und II.....	38
5.1.2 Traktoren der Abgasstufe IIIA.....	39
5.1.2.1 Fendt 820 Vario ^{greentec} (FE-A, FE-AI), Deutz-Fahr Agrottron M 650 (DE-N)	39
5.1.2.2 John Deere 6630, 6930 und 7830 (JD-B, JD-O, JD-G, JD-K, JD7-G)	40
5.1.2.3 John Deere 5080R (JD5-O).....	42
5.1.3 Traktoren der Abgasstufe IIIB.....	43
5.1.3.1 Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka).....	43
5.1.3.2 John Deere 6115R, 6100RC, 6125R und 6210R (JD6R-B, JD-Pu, JD-N, JD-Ka und JD-P)	45
5.1.4 Traktoren der Abgasstufe IV.....	48
5.1.4.1 John Deere 6210R (JD-P4)	48
5.1.4.2 Fendt Vario 724 S4 (FE-S)	50
5.1.4.3 John Deere 6215R (JD-S)	51
5.2 Feldtest	53
5.2.1 Betriebsdaten.....	53
5.2.1.1 Betriebstagebuch.....	53
5.2.1.2 Motorsteuerungsdaten.....	55
5.2.2 Motorölqualität	56
5.2.3 Kraftstoffqualität.....	57
5.3 Traktorenprüfstand	57
5.3.1 Motorleistungs-, Motordrehzahl- und Kraftstoffverbrauchsmessung.....	59
5.3.2 Bestimmung gasförmiger Emissionen	60
5.3.3 Partikelmassebestimmung (PM).....	60
5.3.4 Partikelanzahlbestimmung (PN)	61
5.3.5 Stationäre Emissionsmessung	61
5.3.6 Transiente Emissionsmessung.....	64
5.3.7 Betriebsstoffe	66

5.4	Portable Emissionsmessung	67
5.4.1	Portables Emissionsmesssystem (PEMS).....	67
5.4.2	Durchgeführte Arbeiten und Datenauswertung.....	69
5.5	Leistungs- und Verbrauchsmessung auf den Versuchsbetrieben	73
6	Ergebnisse und Diskussion	75
6.1	Feldtest	75
6.1.1	Einsatzbedingungen.....	75
6.1.1.1	Betriebsstunden	75
6.1.1.2	Betriebsstoffeinsatz	76
6.1.1.3	Startverhalten	80
6.1.1.4	Einsatzprofil und Arbeiten	83
6.1.1.5	Funktion der Abgasnachbehandlung	85
6.1.2	Kraftstoffqualität	91
6.1.3	Motorölqualität.....	94
6.1.4	Reparaturen und Störungen	98
6.1.5	Umweltwirkung des Pflanzenöleinsatzes.....	103
6.2	Leistungs- und Verbrauchsmessung auf den Versuchsbetrieben	104
6.2.1	Abgasstufe IIIA: John Deere 6630 (JD-B und JD-O)	104
6.2.2	Abgasstufe IIIA: John Deere 5080R (JD5-O).....	106
6.2.3	Abgasstufe IIIA: Deutz-Fahr Agrottron 650 M (DE-N).....	107
6.2.4	Abgasstufe IIIA: Fendt 820 Vario ^{greentec} (FE-AI).....	108
6.2.5	Abgasstufe IIIB: John Deere 6125R (JD-N).....	110
6.3	Leistungs- und Emissionsmessungen	112
6.3.1	Abgasstufe IIIA: John Deere 6930 Premium (JD-K)	112
6.3.2	Abgasstufe IIIB: Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka).....	115
6.3.3	Abgasstufe IV: Fendt Vario 724 S4 (FE-S)	128
6.3.4	Abgasstufe IV: John Deere 6215R (JD-S)	147
6.4	Motorenbegutachtung	152
6.4.1	Fendt Farmer Vario 412 (FE-K)	152
6.4.2	Fendt Vario 724 S4 (FE-S)	160
	Zusammenfassung	169
	Abstract	175
	Literaturverzeichnis	177
	Anhang	185

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Konzepte zur Emissionsminderung entsprechend der Abgasstufe der untersuchten Pflanzenöltraktoren (DOC = Diesel Oxidation Catalyst, Oxidationskatalysator; SCR = Selective Catalytic Reduction, selektive katalytische Reduktion; DPF = Dieselpartikelfilter)	37
Abbildung 2:	Fendt Farmer Vario 412 (FE-K, links) und Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K, rechts) am LVFZ Kringell	38
Abbildung 3:	Fendt 820 Vario ^{greentec} am LVFZ Achselschwang (FE-A, links) und am LVFZ Almesbach (FE-AI, Mitte) sowie Deutz-Fahr Agrottron M 650 Natural Power auf der Versuchsstation Neuhof (DE-N, rechts)	40
Abbildung 4:	John Deere 7830 (JD7-G) und John Deere 6930 (JD-G) auf der Versuchsstation Grub sowie John Deere 6930 am LVFZ Kringell (JD-K).....	41
Abbildung 5:	John Deere 5080R (JD5-O) auf der Versuchsstation Osterseeon	42
Abbildung 6:	Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) der Abgasstufe IIIB	44
Abbildung 7:	Nachgerüsteter Kraftstoffumschalter (links oben) und Füllanzeige für den Dieseltank, zusätzliche Zahnradpumpen für das Pflanzenölkraftstoffsystem (links und rechts unten) sowie Umschaltseinheit inkl. Gegenstromwärmetauscher (rechts oben)	45
Abbildung 8:	John Deere 6210R (JD-P) am LVFZ Achselschwang und John Deere 6125R (JD-N) auf der Versuchsstation Neuhof	46
Abbildung 9:	John Deere 6115R (JD-B) auf der Versuchsstation Baumannshof	47
Abbildung 10:	John Deere 6210R (JD-P4) auf der Versuchsstation Grub	49
Abbildung 11:	Fendt Vario 724 S4 am TFZ Straubing (FE-S)	50
Abbildung 12:	John Deere 6215R (JD-S) mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) im Heckanbau.....	52
Abbildung 13:	Auszug aus dem Betriebstagebuch der Pflanzenöltraktoren.....	54
Abbildung 14:	Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstands mit Wirbelstrombremse (1), Gasanalysatoren (2), Kraftstoffverbrauchsmessung (3) und Partikelprobenahme (4).....	58
Abbildung 15:	Traktorenprüfstand des TFZ	58
Abbildung 16:	Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 (NRSC)	63
Abbildung 17:	Exemplarischer Verlauf der Soll- und Ist-Werte im NRTC nach ISO 8178 ohne Mittelung (oben) und im 10sNRTC (unten) mit 10-s-Mittelwerten.....	66
Abbildung 18:	Portables Emissionsmesssystem im geöffneten Schutzgehäuse am Frontkraftheber eines Traktors montiert	68

Abbildung 19:	Portable Emissionsmessung am Traktor FE-S mit einem Pflug	70
Abbildung 20:	Portable Emissionsmessung am Traktor FE-S mit einem Grubber	70
Abbildung 21:	Portable Emissionsmessung am Traktor FE-S mit einer Kreiselegge	71
Abbildung 22:	Portable Emissionsmessung am Traktor FE-S bei der Straßenfahrt	71
Abbildung 23:	Portable Emissionsmessung am Traktor JD-S bei der Straßenfahrt	72
Abbildung 24:	Prüfaufbau der Leistungs- und Verbrauchsmessung an den Traktoren JD-N und DE-N an der Versuchsstation Straßmoos	74
Abbildung 25:	Betriebsstunden der Rapsöltraktoren der Abgasstufen I bis IV in den Feldtestjahren 2015 bis 2017 sowie Gesamtlaufzeit der Traktoren	76
Abbildung 26:	Startverhalten der Pflanzenöltraktoren im Feldtestjahr 2015	80
Abbildung 27:	Startverhalten der Pflanzenöltraktoren im Feldtestjahr 2016	81
Abbildung 28:	Startverhalten der Pflanzenöltraktoren im Feldtestjahr 2017	81
Abbildung 29:	Bewertung des Startverhaltens des Pflanzenöltraktors JD-P in den Feldtestjahren 2014 bis 2017	83
Abbildung 30:	Einsatzhäufigkeit der Rapsöltraktoren für Bodenbearbeitung und Bodenbestellung, Transport, Futterbereitstellung, Pflege und Sonstiges in den Jahren 2015 bis 2017	84
Abbildung 31:	Durchgeführte Arbeiten, absoluter und relativer Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch des Traktors FE-Ka	87
Abbildung 32:	Durchgeführte Arbeiten, absoluter und relativer Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch des Traktors FE-S	88
Abbildung 33:	Durchgeführte Arbeiten, absoluter und relativer Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch des Traktors JD-P4	89
Abbildung 34:	Differenzdruck des Dieselpartikelfilters des Traktors JD-P bei 70– 100 % Last und einem Drehzahlbereich 1.700–2.100 min ⁻¹ über 1.500 Bh	90
Abbildung 35:	Pflanzenölanteil im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls in Pflanzenöltraktoren der Abgasstufen I und II	95
Abbildung 36:	Pflanzenölanteil im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls in Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIA	96
Abbildung 37:	Pflanzenölanteil im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls in Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIB	96
Abbildung 38:	Pflanzenölanteil im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls in Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IV	97
Abbildung 39:	Schaden am Ladeluftschlauch des Traktors FE-S (links, vergrößert) ..	103
Abbildung 40:	Beispielrechnung zu den Stoffströmen aus dem Rapsanbau zur Gewinnung von Rapsölkraftstoff für die Rapsöltraktoren der	

bayerischen staatlichen Versuchsgüter im Zeitraum von 2003 bis 2018	104
Abbildung 41: Äquivalentes Motordrehmoment, Leistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle der Traktoren JD-O und JD-B mit Rapsölkraftstoff.....	105
Abbildung 42: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle des Traktors JD5-O	107
Abbildung 43: Äquivalentes Motordrehmoment und Leistung an der Zapfwelle des Traktors DE-N bei 1.412 Bh mit Rapsölkraftstoff.....	108
Abbildung 44: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle der Traktoren FE-AI und FE-A	109
Abbildung 45: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle und Abgasgegendruck des Traktors JD-N.....	111
Abbildung 46: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des John Deere 6930 (JD-K) im Betrieb mit Rapsöl- und Sojaölkraftstoff bei verschiedenen Betriebsstunden	113
Abbildung 47: Limitierte Abgasemissionen im NRSC in Anlehnung an ISO 8178 für Rapsöl-, Sojaöl- und Dieselmkraftstoff über die Betriebsdauer	114
Abbildung 48: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und Harnstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmkraftstoff	116
Abbildung 49: Mittelwerte und Spannweiten der Stickstoffoxid-Emissionen des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen NRSC-Prüfphasen für Rapsöl- und Dieselmkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (Reinabgas)	118
Abbildung 50: Mittelwerte und Spannweiten des Verbrauchs an Harnstofflösung des SCR-Systems in den NRSC-Prüfphasen des Versuchstraktors Fendt 718 SCR	119
Abbildung 51: Ammoniak-Emissionen (NH ₃) des Traktors FE-Ka nach dem SCR-System über die einzelnen Prüfphasen des Fendt 718 SCR im NRSC	120
Abbildung 52: HC-Emissionen des Traktors FE-Ka für Rapsöl- und Dieselmkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (Reinabgas) im NRSC	121
Abbildung 53: CO-Emissionen des Traktors FE-Ka für Rapsöl- und Dieselmkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (Reinabgas) im NRSC	121

Abbildung 54:	Partikelmasse-Emissionen des Traktors FE-Ka für Rapsöl- und Diesel nach der Abgasnachbehandlung (Reinabgas) im NRSC.....	122
Abbildung 55:	Partikelanzahl-Emissionen (PN) des Traktor FE-Ka in den einzelnen NRSC-Prüfphasen für RK (700 Bh) und DK (680 Bh) im Roh- und Reinabgas	123
Abbildung 56:	Partikelgrößenspektrum des FE-Ka der NRSC in den Prüfphasen 1 bis 8 für RK (700 Bh) und DK (680 Bh) im Rohabgas und Reinabgas mit Bereich des Fehlerrauschens des Messgeräts (n = 3)	124
Abbildung 57:	Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 (NRSC) nach der Abgasnachbehandlung (im Reinabgas) für Rapsöl- und Dieseldkraftstoff	126
Abbildung 58:	Limitierte Abgasemissionen im NRSC und 10sNRTC in Anlehnung an ISO 8178 vor (im Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (im Reinabgas) für Rapsöl- und Dieseldkraftstoff bei 700 und 680 Bh	127
Abbildung 59:	Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und des Harnstoffverbrauchs sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle des Fendt Vario 724 S4 (FE-S) im Betrieb mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff.....	130
Abbildung 60:	NO _x -Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)	132
Abbildung 61:	Abgasrückführtrate des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff	132
Abbildung 62:	NO _x -Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN)	133
Abbildung 63:	NO _x -Umsatzrate der Abgasnachbehandlung des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff.....	134
Abbildung 64:	CO-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)	135
Abbildung 65:	CO-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN)	135
Abbildung 66:	CO-Umsatzrate der Abgasnachbehandlung des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff.....	136
Abbildung 67:	HC-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)	136

Abbildung 68:	HC-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotortreibstoff im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN).....	137
Abbildung 69:	HC-Umsatzrate der Abgasnachbehandlung des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotortreibstoff	137
Abbildung 70:	PM-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotortreibstoff im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN).....	138
Abbildung 71:	NO _x -Emissionen des Traktors FE-S im NRSC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselmotortreibstoff (DK).....	139
Abbildung 72:	CO-Emissionen des Traktors FE-S im NRSC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselmotortreibstoff (DK).....	140
Abbildung 73:	HC-Emissionen des Traktors FE-S im NRSC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselmotortreibstoff (DK).....	140
Abbildung 74:	PM-Emissionen des Traktors FE-S im NRSC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselmotortreibstoff (DK).....	141
Abbildung 75:	Partikelanzahl-Emissionen (PN) im NRSC und 10sNRTC vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselmotortreibstoff (DK).....	142
Abbildung 76:	Kumulierte Häufigkeit der NO _x -Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors FE-S im Betrieb mit Rapsölmotortreibstoff	144
Abbildung 77:	NO _x -Emissionen sowie Kühlmittel- und Abgastemperaturen beim Pflügen.....	145
Abbildung 78:	Kumulierte Häufigkeit der CO-Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors FE-S im Betrieb mit Rapsölmotortreibstoff	146
Abbildung 79:	Kumulierte Häufigkeit der HC-Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors FE-S im Betrieb mit Rapsölmotortreibstoff	146
Abbildung 80:	Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und des Harnstoffverbrauchs sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle des John Deere 6215R (JD-S) im Betrieb mit Rapsölmotortreibstoff	148
Abbildung 81:	Limitierte Abgasemissionen des Traktors JD-S im NRSC, 1sNRTC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung im Betrieb mit Rapsölmotortreibstoff	149
Abbildung 82:	Kumulierte Häufigkeit der NO _x -Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors JD-S im Betrieb mit Rapsölmotortreibstoff.....	151

Abbildung 83:	Kumulierte Häufigkeit der CO-Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors JD-S im Betrieb mit Rapsölkraftstoff	151
Abbildung 84:	Kumulierte Häufigkeit der HC-Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors JD-S im Betrieb mit Rapsölkraftstoff	152
Abbildung 85:	Hochdruckeinspritzpumpen und Regelstange des Traktors FE-K	154
Abbildung 86:	Einspritzdüsen des Traktors FE-K	155
Abbildung 87:	Zustand der Ventilstege des Zylinderkopfs des Traktors FE-K bei ca. 7.050 Bh (rote Pfeile zeigen Haarrisse)	156
Abbildung 88:	Ventilstegriss des Zylinders 2 (links) des Traktors FE-K bei ca. 7.050 Bh	157
Abbildung 89:	Zustand der Ventilstege des Zylinderkopfs bei den Zylindern 2 und 3 des Traktors FE-K bei ca. 4.900 Bh (rote Pfeile zeigen Haarrisse) ...	158
Abbildung 90:	Kolbenböden des Traktors FE-K bei ca. 7.050 Bh.....	159
Abbildung 91:	Zylinderlaufflächen und Honriefen des Traktors FE-K bei ca. 7.050 Bh	160
Abbildung 92:	Injektor (links) und Injektoraufnahme (rechts) für die Dosierung der Harnstofflösung am Traktor FE-S	161
Abbildung 93:	Ablagerungen am Mischer nach der Harnstofflösungsdosierung bei 1.010 Bh (links oben), gereinigt bei 1.010 Bh (rechts oben), bei 1.270 Bh (links unten) und bei 1.480 Bh (rechts unten).....	162
Abbildung 94:	Harnstoffablagerungen aus der Mischdüse nach der Dosiereinheit bei 1.010 Bh des Traktors FE-S	163
Abbildung 95:	Unbehandelte Harnstoffablagerung (links) und Harnstoffablagerung nach der Behandlung im Muffelofen für 2 h bei 400 °C (mittig) und für 2 h bei 500 °C (rechts)	164
Abbildung 96:	Abgaseinlass- (links) und -auslassseite (rechts) des SCR-Katalysators.....	164
Abbildung 97:	Bildausschnitt von der Oberfläche der Einlassseite des Abgaspartikelfilters beim Traktor Fendt Vario 724 S4 (FE-S)	165
Abbildung 98:	Einlass- (links) und Auslasskanäle (rechts) des AGR-Kühlers des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S)	166
Abbildung 99:	AGR-Ventil (links geschlossen und rechts geöffnet) des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S).....	167

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Emissionsgrenzwerte der Richtlinie 97/68/EG und Verordnung 2016/1628 [29] für Dieselmotoren in Arbeitsmaschinen (Abgasstufen I–V)	23
Tabelle 2:	Literaturübersicht über Flottenversuche mit Pflanzenöltraktoren	24
Tabelle 3:	Standort, Kurzbezeichnung und Abgasstufe der Pflanzenöltraktoren	34
Tabelle 4:	Wesentliche zusätzliche Installationen und Maßnahmen zur Realisierung pflanzenöltauglicher Traktoren im Vergleich zu vergleichbaren konventionellen Modellen für Dieseldieselkraftstoff	35
Tabelle 5:	Technische Daten des Fendt Farmer Vario 412 Traktors und des Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 Traktors	39
Tabelle 6:	Technische Daten der Traktoren Fendt 820 Vario ^{greentec} (FE-A, FE-AI) und des Traktors Deutz-Fahr Agrottron M 650 Natural Power (DE-N)	40
Tabelle 7:	Technische Daten der Prototyp-Traktoren John Deere 6930 Premium (JD-G, JD-K), des John Deere 6630 Premium (JD-B, JD-O) und des John Deere 7830 (JD7-G)	41
Tabelle 8:	Technische Daten des John Deere 5080R (JD5-O)	43
Tabelle 9:	Technische Daten des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka)	44
Tabelle 10:	Technische Daten der John-Deere-Pflanzenöltraktoren John Deere 6125R (JD-N und JD-Pu), 6115R (JD6R-B) und 6210R (JD-P)	48
Tabelle 11:	Technische Daten des John Deere 6210R (JD-P4)	49
Tabelle 12:	Technische Daten des Fendt Vario 724 S4 (FE-S)	51
Tabelle 13:	Technische Daten des John Deere 6215R (JD-S)	52
Tabelle 14:	Parameter im Betriebstagebuch zur Dokumentation des Praxiseinsatzes auf den LfL-Versuchsgütern	55
Tabelle 15:	Verwendete Motoröle in den Pflanzenöltraktoren und deren Probenahmeintervalle in Betriebsstunden (Bh)	56
Tabelle 16:	Ausgewählte Untersuchungsparameter zur Beurteilung der Motorölqualität und verwendete Analyseverfahren	57
Tabelle 17:	Technische Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile bei den Emissionsmessungen an den Messstellen zwischen Motor und Abgasnachbehandlung (vor AGN) und nach der Abgasnachbehandlung (nach AGN)	60
Tabelle 18:	C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 (NRSC)	62
Tabelle 19:	Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren nach der Mehrfachfiltermethode	63

Tabelle 20:	Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren nach der Einfachfachfiltermethode.....	64
Tabelle 21:	Prüfphasen nach ISO 8178 und EU-Richtlinie 97/68/EG.....	65
Tabelle 22:	Eigenschaften des am Traktorenprüfstand verwendeten Rapsölkraftstoffs.....	67
Tabelle 23:	Analysatoren des portablen Emissionsmesssystems (PEMS) zur Erfassung der Abgasbestandteile an der Messstelle nach der Abgasnachbehandlung im Reinabgas (nach AGN)	68
Tabelle 24:	Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen und THG-Einsparung in CO ₂ -Äquivalenten (CO ₂ -Äq) im Feldtestjahr 2015	77
Tabelle 25:	Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen und THG-Einsparung in CO ₂ -Äquivalenten (CO ₂ -Äq) im Feldtestjahr 2016	78
Tabelle 26:	Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen und THG-Einsparung in CO ₂ -Äquivalenten (CO ₂ -Äq) im Feldtestjahr 2017	79
Tabelle 27:	Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen von LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2015 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)	92
Tabelle 28:	Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen von LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2016 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)	93
Tabelle 29:	Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen von LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2017 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)	94
Tabelle 30:	Übersicht zu den Bauteilen und Komponenten mit Störungen im Berichtszeitraum.....	99
Tabelle 31:	Parameter aus der Auswertung mit EMROAD des Traktors FE-S	143
Tabelle 32:	Parameter aus der Auswertung mit EMROAD des Traktors JD-S.....	150

Abkürzungsverzeichnis

AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
Bh	Betriebsstunden
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CR	Common-Rail
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DK	Dieselmotorkraftstoff
DOC	Diesel Oxidation Catalyst (Oxidationskatalysator)
DPF	Dieselpartikelfilter
ECU	Electronic Control Unit (Motorsteuergerät)
ETIC	John Deere European Technology and Innovation Center
HC	Kohlenwasserstoffe
ISO	International Organization for Standardization
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide (NO + NO ₂)
NRSC	Non-Road-Steady-Cycle
NRTC	Non-Road-Transient-Cycle
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PLD	Pumpe-Leitung-Düse
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
RK	Rapsölmotorkraftstoff
SCR	Selective Catalyst Reduction (selektive katalytische Reduktion)
TFZ	Technologie- und Förderzentrum

1 Einleitung

Das im Jahr 2015 in Paris getroffene Übereinkommen der Vereinten Nationen zum Klimaschutz hat das Ziel, die Erderwärmung auf unter 2 °C und auf möglichst 1,5 °C gegenüber dem Niveau im vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen [5]. Die dafür notwendige und deshalb eingeleitete Energiewende erfordert eine drastische Reduzierung von Treibhausgasemissionen, eine effiziente, möglichst dezentrale Rohstoffnutzung und die Abkehr von fossilen sowie Hinwendung zu erneuerbaren Energiequellen. In der Landwirtschaft werden in Deutschland derzeit rund 1,65 Mio. t fossiler Diesel benötigt [48]. Regenerative Antriebskonzepte bieten hierfür eine umwelt- und klimafreundliche Alternative. Für landwirtschaftliche mobile Antriebe sind gas- oder strombasierte Energieträger aufgrund der vergleichsweise geringen Reichweiten und der kaum vorhandenen Infrastruktur nur eingeschränkt geeignet. Der Einsatz flüssiger Biokraftstoffe in modernen Verbrennungsmotoren bleibt hingegen nach derzeitigem Kenntnisstand zur nachhaltigen Flächenbewirtschaftung für die meisten mobilen landwirtschaftlichen Anwendungen unerlässlich. Biodiesel- und pflanzenöltaugliche Traktoren sind derzeit die Alternative zu herkömmlichen, mit fossilem Diesel betriebenen Traktoren, die den höchsten technischen Reifegrad aufweisen und am Markt verfügbar sind [51].

Über die Vorzüglichkeit der regionalen Herstellung und Nutzung von Rapsölkraftstoff in der Landwirtschaft herrscht politisch wie gesellschaftlich weitgehend Konsens. Der Einsatz kann den kraftstoffbedingten Treibhausgasausstoß landwirtschaftlicher Produktionsverfahren um 57 bis 91 % reduzieren [14]. Genormter Rapsölkraftstoff nach DIN 51605:2016 [7] und Pflanzenölkraftstoff nach DIN 51623:2015 [8] eignen sich auch für den Einsatz in modernen Motoren mit Abgasnachbehandlungssystemen, sind bereits am Markt verfügbar und können dezentral hergestellt werden. Dabei fördert die regionale Erzeugung von Pflanzenölen in heimischen Ölmühlen die Wertschöpfung im ländlichen Raum und trägt bei geringem Transportaufkommen zur Versorgung mit wertvollen Speiseölen, Eiweißfuttermitteln, Rohstoffen und Energieträgern bei. Ferner ist Rapsölkraftstoff biologisch schnell abbaubar und kann daher einen wesentlichen Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz leisten [62].

Seit Jahren bestimmt die Fortschreibung der Abgasgesetzgebung die Entwicklung neuer Motoren- und Abgasnachbehandlungsgenerationen. Aufgrund bisher niedriger Marktanreize für pflanzenöltaugliche Traktoren werden diese entweder in Kleinserien gefertigt oder befinden sich überwiegend im Prototypenstadium. Der Einfluss der verschärften Abgasemissionsvorschriften auf die Umwelt wird durch Folgenabschätzungen anhand von Emissionsmodellen bewertet [34] [35] [45] [53] [59], jedoch existiert für Pflanzenöltraktoren keine Datenbasis.

Die staatlichen landwirtschaftlichen Betriebe in Bayern erfüllen eine Vorbildfunktion beim Einsatz und Test moderner Technologien mit weitreichenden Vorteilen für die heimische Wirtschaft sowie den Boden-, Gewässer- und Klimaschutz.

Das Forschungsprojekt „Langzeitmonitoring von Abgasemissionen, Effizienz und Betriebssicherheit pflanzenöltauglicher Traktoren auf den bayerischen staatlichen Ver-

suchsbetrieben“ (MoniTrak) setzt inhaltlich auf drei vorangegangenen Vorhaben auf, welche die Grundlage für die Entwicklung und derzeitige Markteinführung pflanzenöltauglicher Traktoren bilden:

- Forschungsvorhaben N/05/05: „Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell“ (Kringell) [56],
- Forschungsvorhaben K/08/19: „Emissions- und Betriebsverhalten pflanzenöltauglicher Traktoren – Prüfstanduntersuchungen und Felderprobungen“ (EmBeTrak) [17] [18],
- Forschungsvorhaben EW/12/20: „Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöltauglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern“ (BayTrak) [22].

2 Stand des Wissens

Das folgende Kapitel umfasst den aktuellen Stand der Abgasgesetzgebung sowie der Pflanzenöltechnik in Traktoren.

2.1 Abgasgesetzgebung und Prüfmethoden

Die Entwicklung neuer Motorgenerationen für Traktoren wurde in den letzten Jahren maßgeblich durch die Minderung der Abgasemissionen bei gleichzeitigem Erhalt der Effizienz und Betriebssicherheit geprägt. Die Typgenehmigung land- und forstwirtschaftlicher Maschinen erfolgt nach der EU-Verordnung 167/2013. Dabei wird bei der Regulierung der Schadstoffemissionen für Motoren bis zur Abgasstufe IV auf die EU-Richtlinie 97/68/EG [28] verwiesen, die aufgrund der Einführung der Abgasstufe V durch die EU-Verordnung 2016/1628 [29] ersetzt wurde.

Tabelle 1 zeigt die Grenzwerte der darin limitierten Emissionskomponenten Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN). Insbesondere für die NO_x - und Partikelmasse-Emissionen wurden die gesetzlichen Vorgaben in den letzten Jahren erheblich verschärft.

Die EU-Verordnung 2016/1628 beinhaltet zudem die Rahmenbedingungen der Abgasstufe V, die ab 2019 für die ersten Motorenklassen angewandt wird. Neben einer Ausweitung auf leistungsschwächere und -stärkere Motorenklassen umfasst der Entwurf unter anderem die zusätzliche Limitierung der ausgestoßenen Partikelanzahl (PN) und eine weitere Verschärfung der Partikelmasse-Emissionen im Vergleich zur Abgasstufe IV.

In der EU-Verordnung 2016/1628 sind zudem geltende Prüfzyklen zur Bestimmung der Abgasemissionen im stationären und transienten Betrieb beschrieben. Der stationäre Prüfzyklus NRSC (*Non-Road Steady Cycle*) ist für alle Abgasstufen durchzuführen und besteht aus acht Prüfphasen im Motorkennfeld, die in einer festgelegten Reihenfolge eingestellt und gewichtet werden. Ab der Abgasstufe IIIB ist zusätzlich der transiente Zyklus NRTC (*Non-Road Transient Cycle*) mit sekundlich wechselnden Drehzahl- und Drehmomentvorgaben im Kalt- und Warmstart vorgeschrieben.

Abseits der gesetzlichen Prüfung am Motorenprüfstand können die Emissionen mobiler Arbeitsmaschinen im tatsächlichen Betrieb erheblich variieren [23] [25] [30] [3] [44]: Unterschiedliche Umweltbedingungen (z. B. Luftdruck und -temperatur), Verschleißprozesse, Betriebsprofile des Motors im Alltagsbetrieb und der Einfluss zusätzlicher Nebenaggregate sowie fahrzeugspezifische Getriebeverluste können hierfür ursächlich sein. Der Gesetzgeber erwägt die Limitierung der Emissionen, die im realen Fahrzeugbetrieb (*Real Driving Emissions*, RDE) entstehen und mit portabler Emissionsmesstechnik (*Portable Emissions Measurement System*, PEMS) erfasst werden. Mit der delegierten EU-Verordnung 2017/655 [27] wird die Abgasgesetzgebung um die Vorschriften für Emissionsmessungen im realen Betrieb ergänzt. Der Gesetzgeber verlangt daher durch das

sogenannte In-Service-Monitoring ab der Abgasstufe V vom Hersteller einen Bericht der Emissionsergebnisse im realen Fahrzeugbetrieb. Verpflichtende Emissionsgrenzwerte sind jedoch nach wie vor nur für die Messungen im NRSC und NRTC am Motorenprüfstand definiert.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte der Richtlinie 97/68/EG und Verordnung 2016/1628 [29] für Dieselmotoren in Arbeitsmaschinen (Abgasstufen I–V)

Nennleistung P _N in kW	NO _x g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	Partikel- masse g/kWh	Partikel- anzahl #/kWh	Inkraft- treten/ Datum
Stufe I						
37 ≤ P _N < 75	9,2	1,3	6,5	0,85	–	Apr. 1999
75 ≤ P _N < 130	9,2	1,3	5,0	0,70	–	1999
130 ≤ P _N ≤ 560	9,2	1,3	5,0	0,54	–	1999
Stufe II						
18 ≤ P _N < 37	8,0	1,5	5,5	0,8	–	2001
37 ≤ P _N < 75	7,0	1,3	5,0	0,4	–	2004
75 ≤ P _N <130	6,0	1,0	5,0	0,3	–	2003
130 ≤ P _N ≤ 560	6,0	1,0	3,5	0,2	–	2002
Stufe IIIA						
19 ≤ P _N < 37	7,5 (NO _x + HC)		5,5	0,6	-	2007
37 ≤ P _N <75	4,7 (NO _x + HC)		5,0	0,4	-	2008
75 ≤ P _N < 130	4,0 (NO _x + HC)		5,0	0,3	-	2007
130 ≤ P _N ≤ 560	4,0 (NO _x + HC)		3,5	0,2	-	2006
Stufe IIIB						
37 ≤ P _N <56	4,7 (NO _x + HC)		5,0	0,025	-	2013
56 ≤ P _N <75	3,3	0,19	5,0	0,025	–	2012
75 ≤ P _N < 130	3,3	0,19	5,0	0,025	–	2012
130 ≤ P _N ≤ 560	2,0	0,19	3,5	0,025	–	2011
Stufe IV						
56 ≤ P _N < 130	0,4	0,19	5,0	0,025	–	Okt. 2014
130 ≤ P _N ≤ 560	0,4	0,19	3,5	0,025	–	2014
Stufe V						
0 < P _N < 8	7,5 (NO _x + HC)		8,0	0,4	–	2019
8 ≤ P _N < 19	7,5 (NO _x + HC)		6,6	0,4	–	2019
19 ≤ P _N < 37	4,7 (NO _x + HC)		5,0	0,015	1·10 ¹²	2019
37 ≤ P _N < 56	4,7 (NO _x + HC)		5,0	0,015	1·10 ¹²	2019
56 ≤ P _N < 130	0,4	0,19	5,0	0,015	1·10 ¹²	2020
130 ≤ P _N ≤ 560	0,4	0,19	3,5	0,015	1·10 ¹²	2019
P _N > 560	3,5	0,19	3,5	0,045	–	2019

2.2 Pflanzenöltechnik in Traktoren

Das Betriebsverhalten von Pflanzenöltraktoren wurde bisher primär für die Abgasstufen I, II und IIIA untersucht. In der nachfolgenden Tabelle sind Vorhaben aufgelistet, die sich mit Forschung und Demonstration von Pflanzenöl als Kraftstoff in Traktoren beschäftigen.

Tabelle 2: Literaturübersicht über Flottenversuche mit Pflanzenöltraktoren

Autoren und Erscheinungsjahr	Titel der Vorhaben
APFELBECK et al. (1992) [1]	Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht – Teil II: Untersuchung der Abgaszusammensetzung von Dieselmotoren beim Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester sowie deren Mischungen
Höck et al. (1994)	Betriebserfahrungen mit pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren (Natur- und Biodiesel)
HASSEL et al. (2005) [33]	Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöltauglichen Traktoren
DÖNGES et al. (2006) [12]	Felderprobung Rapsöl pur
RATHBAUER et al. (2008) [49]	Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft
SY et al. (2009) [54]	Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz
THUNEKE et al. (2009) [56]	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
THE 2 nd VEGOIL CONSORTIUM (2011) [55]	Demonstration of 2 nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines
EMBERGER et al. (2013) [17]	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
EMBERGER et al. (2013) [18]	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA
HUBER et al. (2015) [37]	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe Tier 4/EU Stufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
ETTL et al. (2016) [22]	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöлтаuglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern

Ein einwandfreies Betriebsverhalten wurde bei einzelnen Traktoren mit Pflanzenöltechnik bis ca. 7.000 Betriebsstunden (Bh) dokumentiert. Das Emissionsverhalten von Rapsöltraktoren nach 5.000 Bh im Feldeinsatz ist hingegen kaum erforscht. Begleitende Untersuchungen an Pflanzenöltraktoren bis zur theoretischen Abnutzungsgrenze von 10.000 Bh [42] sind noch nicht erfolgt.

Ein Technologiesprung ereignete sich mit der Einführung der Common-Rail-Einspritzung (CR) ab der Abgasstufe IIIA. Die Entwicklung von einer mechanischen Steuerung der Einspritzung (z. B. Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem, kurz PLD) hin zur elektronisch angesteuerten Einspritzung erhöhte die Freiheitsgrade bei der Applikation des Motors für neue Kraftstoffvarianten. Bei PLD-Einspritzsystemen kommt es durch die Viskositäts- und Kompressibilitätsunterschiede von Pflanzenölen im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff zu einer früheren Düsenöffnung und höheren Einspritzmenge, was vielfach eine höhere Leistung an der Zapfwelle zur Folge hat [56]. Bei Common-Rail-Motoren ist hingegen bei gleichen Motoreinstellungen mit Pflanzenölkraftstoff häufig eine geringere Motorleistung als mit Dieselmotorkraftstoff festzustellen. Grund dafür ist, dass bei einem Common-Rail-System der Kraftstoff nach definierten Vorgaben, unabhängig von der Motordrehzahl und der Kurbelwellenposition injiziert wird. Die Einspritzmenge wird primär durch die Bestromungsdauer des Injektoröffnungsventils bestimmt [50]. Im Pflanzenölbetrieb kann der Durchfluss im Injektor geringer sein als mit Dieselmotorkraftstoff, was einen insgesamt geringeren Masseneintrag in den Brennraum verursacht. Der zusätzlich geringere volumetrische Energiegehalt von Rapsölkraftstoff führt zu einer Minderleistung von bis zu 20 % [58] [18], die allerdings durch Anpassungen in der Motorsteuersoftware ohne mechanische Eingriffe ausgeglichen werden kann.

Flottenversuche mit Common-Rail-Motoren der Abgasstufe IIIA zeigten die Zuverlässigkeit dieser Einspritztechnologie mit Pflanzenölkraftstoff in Traktoren [55] [18] [22]. Dies wurde über eine kumulierte Gesamtlaufzeit von mehr als 20.000 Bh im Feldeinsatz mit wissenschaftlicher Begleitung nachgewiesen [55]. Die meisten Erfahrungen pro Traktoreinheit beliefen sich auf bis zu ca. 3.000 Bh Einsatzzeit.

Ab der Abgasstufe IIIB führte die zunehmende Absenkung der Grenzwerte von Partikelmasse (PM) und Stickstoffoxiden (NO_x) zur Notwendigkeit, neue Motorgenerationen mit komplexer Abgasnachbehandlung (AGN) einzuführen. Innermotorische Maßnahmen wie die Optimierung der Einspritzung sowie der Einsatz einer gekühlten Abgasrückführung (AGR) genügten allein nicht mehr, um die Grenzwerte der Abgasstufe IIIB zu erfüllen. Die Kohlenwasserstoff- (HC) und Kohlenmonoxid-Emissionen (CO) konnten größtenteils durch den Einsatz von Oxidationskatalysatoren, unabhängig vom Kraftstoff, mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand reduziert werden. Die Erfüllung der Abgasstufe IIIB für NO_x und PM wurde im Wesentlichen mit zwei unterschiedlichen Strategien zur Emissionsminderung ermöglicht:

Einige Landmaschinenhersteller führten eine Motoroptimierung für eine vorwiegend partikelarme Verbrennung durch, was jedoch die Entstehung von NO_x -Emissionen begünstigt. Die NO_x -Konzentration wird nachgelagert im Abgasstrang mittels der selektiven katalytischen Reduktion in einem Katalysator mit hinzudosierter wässriger Harnstofflösung (SCR-System) gemindert. Der Katalysator arbeitet erst ab Betriebstemperaturen deutlich über 200 °C optimal, sodass er z. B. beim Kaltstart kaum zu einer Reduktion von NO_x führt. Im Langzeitbetrieb können thermische Alterung, Verschmutzung oder Katalysatorgifte die reaktive Schicht und somit die Umsatzrate beeinträchtigen. Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIB mit einem SCR-System zeigen auch nach mehreren

Hundert Betriebsstunden eine effektive Senkung der NO_x -Konzentration im Abgas und somit noch keine Beeinträchtigung der Funktion [22].

Eine andere Strategie zur Umsetzung der Abgasstufe IIIB ist der Einsatz einer gekühlten Abgasrückführung (AGR) in Kombination mit einem Partikelfilter (DPF). Je nach Betriebspunkt kann die Abgasrückführung die NO_x -Emissionen durch Absenkung des Sauerstoffanteils und der Verbrennungstemperatur im Brennraum reduzieren. Der dadurch begünstigte höhere Anteil an Verbrennungsgaspartikeln wird durch den Partikelfilter reduziert. Dieser muss, je nach Beladungszustand, kontinuierlich oder in Intervallen regeneriert werden, indem angesamelter Ruß abgebrannt wird. Dadurch wird ein unzulässig hoher Druckverlust durch den Filter verhindert, der den sicheren Motorenbetrieb gefährden könnte. Üblicherweise erfolgt diese Reinigung thermisch bei hohen Abgastemperaturen von 550 bis 650 °C, die im täglichen Fahrzeugbetrieb nur mit einer zusätzlich in den Brennraum oder in den Abgasstrang dosierten Dieselmotorkraftstoffmenge erreicht werden können. Pflanzenölkraftstoff ist aufgrund der physikalischen Eigenschaften nur bedingt zur Kraftstoffnacheinspritzung in den Brennraum nutzbar. Pflanzenölrückstand kann aber im Gegensatz zu Dieselmotorkraftstoff bereits ab Abgastemperaturen von 315 °C oxidieren und einem zunehmenden Druckverlust im Filter entgegenwirken [36], was eine passive Regeneration ohne aktive Temperaturerhöhung ermöglicht. Dabei soll ein Fließgleichgewicht von abgeschiedener und oxidierender Pflanzenölrückstandsmenge im Partikelfilter erreicht werden. Ein dem Partikelfilter vorgeschalteter Oxidationskatalysator (DOC) wandelt einen Teil des Stickstoffmonoxids (NO) im Abgas zu Stickstoffdioxid (NO_2) um, was die Oxidation des Pflanzenölrückstandes zusätzlich begünstigt. Das Prinzip der passiven Regeneration kommt bereits bei Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIB mit Partikelfilter zum Einsatz. Untersuchungen von DÜSSELDORF (2015) [13] und erste Feldtests zeigen eine gute Funktion des Konzepts [22].

Für die meisten Traktoren der Abgasstufe V wird nach derzeitigem Kenntnisstand der Einsatz sowohl eines SCR-Systems als auch eines Partikelfilters notwendig, um die gesetzlichen Grenzwerte erfüllen zu können.

Der Landmaschinenhersteller John Deere entwickelte einen pflanzenölkompabilen Traktor der Abgasstufe IV. Geltende Emissionsgrenzwerte konnten bei wiederkehrenden Messungen am Motoren- und Traktorenprüfstand eingehalten und teils deutlich unterschritten werden. Der Einsatz unterschiedlicher Pflanzenöle zeigte auch im Feldtest eine gute Kompatibilität mit verschiedenen Abgasnachbehandlungskonzepten und dem Hoch- und Niederdruckkraftstoffsystem sowie dem Schmierstoffsystem moderner Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IV [37].

Seit dem Jahr 2015 sind Pflanzenöltraktoren verschiedener Leistungsklassen der Hersteller John Deere und AGCO Fendt, je nach Modell bis zur Abgasstufe IV, über die Vertragshändler in Bayern erhältlich.

3 Problemstellung

Im Rahmen vorangegangener Vorhaben wurde das Betriebs- und Emissionsverhalten pflanzenöлтаuglicher Traktoren aus dem bis dato vorhandenen Maschinenbestand untersucht. Die Ergebnisse zeigen bisher einen zuverlässigen, effizienten und emissionsarmen Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff. Pflanzenöлтаugliche Traktoren haben bereits einen hohen Stand technischer Reife erreicht. Dennoch gibt es Fragestellungen in Bezug auf die Langlebigkeit neuerer Abgas- und Pflanzenöltechnik.

- Wie verändern sich die Abgasemissionen sowie die Effizienz des Pflanzenölmotors bei zunehmender Nutzungsdauer und fortschreitendem Materialverschleiß des Gesamtfahrzeugs?
- Wie beeinflusst der dauerhafte Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff die Funktion von Abgasnachbehandlungssystemen?
- Ist die Betriebssicherheit verschiedener Pflanzenöltraktoren bei zunehmender Lebensdauer gewährleistet und welche Störungen können auftreten?
- Wie unterscheiden sich Partikelanzahl und -größenverteilung im Abgas der Traktormotoren im Pflanzenölbetrieb mit und ohne Partikelfilter oder im Vergleich zum Dieselmotorbetrieb?
- Welchen Einfluss hat der transiente Motorbetrieb mit Pflanzenöl auf die Abgasemissionen im Kalt- und Warmstart?
- Wie hoch sind die Emissionen während des realen Feldeinsatzes mit Rapsölkraftstoff?

Langlebigkeit und AGN-Funktion

In Bezug auf eine betriebswirtschaftliche Nutzungsdauer von 10.000 Bh [42] haben die bisher in vorangegangenen Forschungsvorhaben am TFZ untersuchten Pflanzenöltraktoren bis zu 62 % ihrer theoretischen Lebensdauer erreicht [22]. Trotz der hohen technischen Reife und Einsatzsicherheit kann aber, insbesondere bei den moderneren Pflanzenöltraktoren, keine eindeutige Aussage über die Langlebigkeit getroffen werden. Ab der Abgasstufe IIIB sind Abgasnachbehandlungssysteme (AGN) in Traktoren auch im Pflanzenölbetrieb zur Erfüllung der gesetzlichen Emissionsvorgaben unerlässlich. Erste Feldtesterfahrungen und Prüfstandtests zeigen eine gute Kompatibilität von Abgasnachbehandlungssystemen mit pflanzenölbetriebenen Motoren. Im Laufe der Nutzungsdauer können jedoch thermische Alterung, Ablagerungen oder Katalysatorgifte die Wirkung der AGN mindern. Ein frühzeitiger Austausch vor dem Ende der üblichen Nutzungsdauer ist vom Hersteller nicht vorgesehen und wäre mit hohen zusätzlichen Kosten verbunden, was die Wirtschaftlichkeit des Traktoreinsatzes deutlich schmälern würde. Die Auswirkungen auf die katalytische Beschichtung von SCR-Systemen und Oxidationskatalysatoren und damit deren Umsatzraten im dauerhaften Pflanzenölbetrieb sind unbekannt. Rußpartikelfilter konnten im Pflanzenölbetrieb bisher auch ohne aktive Regeneration al-

lein durch passive Regeneration (mithilfe von NO_2 aus dem Abgas) betrieben werden. Unklar ist jedoch, ob im Langzeitbetrieb oder durch ungünstige Rahmenbedingungen mit erhöhten Leerlauf- oder Teillastphasen eine aktive Filter-Regeneration notwendig sein wird. Dies kann zum Beispiel durch Nacheinspritzung von Kraftstoff in den Abgasstrang im Betrieb mit Dieselkraftstoff erfolgen.

4-Zylinder-Pflanzenöltraktoren

Besonders gute Erfahrungen liegen für den Einsatz von Pflanzenölkraftstoff in 6-Zylinder-Traktormotoren vor, die bei hoher Last betrieben werden. Zum Betriebsverhalten von Pflanzenöltraktoren mit 4-Zylinder-Motoren und Common-Rail-Einspritzung, die häufig für Hof- und Frontladerarbeiten unter Teillast und auch im Winter eingesetzt werden, ist wenig bekannt. Zwei Traktoren dieses Typs werden erst seit Kurzem auf den bayerischen staatlichen Versuchsgütern eingesetzt. Wichtige Parameter, wie beispielsweise das Kaltstartverhalten, der Kraftstoffeintrag ins Motoröl oder die Effizienz der Abgasnachbehandlungssysteme sind noch zu überprüfen.

Partikelanzahl

Die Diskussionen über erhöhte Feinstaubkonzentrationen in der Atemluft durch Dieselmotoren sowie das damit verbundene gesundheitliche Risiko haben an Bedeutung gewonnen. Aus diesem Grund wird eine Limitierung der Partikelanzahl zusätzlich zur Partikelmasse für leichte Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge gefordert. Auch Traktormotoren unterliegen ab 2019 mit Einführung der Abgasstufe V [29] eine Reglementierung in ähnlicher Form. Wie sich der Einsatz von Pflanzenöl in Traktoren auf Anzahl und Verteilung der Partikelemissionen auswirkt, ist bisher weitgehend unbekannt.

Transiente Emissionsmessung (NRTC)

Ab Abgasstufe IIIB ist bei der Typengenehmigungsprüfung, die am ausgebauten Motor stattfindet, ein transienter Testzyklus (NRTC) zusätzlich zum stationären 8-Phasen-Test (NRSC) gefordert. Zur wiederkehrenden Bestimmung von Emissionen hat sich bei Forschungsarbeiten ergänzend die stationäre Emissionsmessung am eingebauten Traktormotor mittels Zapfwellenbremse vielfach bewährt [16]. Der NRTC basiert in großen Teilen auf hochtransienten Baumaschinenarbeiten und kann mit dem im Traktor eingebauten Motor mit Leistungsabnahme über die Zapfwelle nur mit Anpassungen durchgeführt werden. Hohe Trägheitsmomente durch das Getriebe sowie die Hilfs- und Nebenaggregate mindern die Dynamik durchführbarer Drehzahl- und Lastwechsel am Traktorenprüfstand im Vergleich zum Motorenprüfstand. LANDIS 2012 [43] und ETTL et al. 2014 [24] beschreiben eine angepasste Variante des NRTC (10sNRTC), die auch am Traktorenprüfstand mit Leistungsabnahme an der Zapfwelle angewandt werden kann. Die Anspringtemperatur (*Light-off Temperature*) von Katalysatoren, die Regelung der Harnstoffdosierung von SCR-Systemen und die Auslegung und Parametrierung des Einspritzsystems und der Abgasrückführung haben wesentlichen Einfluss auf die Emissionen moderner Traktoren im transienten Betrieb und sind für den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff weitgehend unbekannt oder nicht darauf abgestimmt. Durch den 10sNRTC ist es möglich, das transiente Emissionsverhalten moderner Traktoren im Kalt- und Warmstart unter wiederholbaren Bedingungen zu bewerten.

Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb

Die derzeitige Emissionsprüfung erfolgt aufgrund der sehr guten Vergleichbarkeit durch exakt definierte Prüfzyklen am Motorenprüfstand. Diese Prüfzyklen decken jedoch nur einen geringen Teil möglicher Betriebszustände und Einflussparameter ab. Ferner ist es dem Hersteller möglich, den Motor speziell auf die Anforderungen des Prüfzyklus abzustimmen. Dies kann am Ziel des Gesetzgebers, die tatsächlichen Emissionen während des Praxisbetriebs zu senken, vorbeiführen. Bisher gibt es noch keine Erfahrungen, wie sich Pflanzenöltraktoren im realen Betrieb hinsichtlich Emissionen (*Real Driving Emissions*, RDE) und Verbrauch verhalten. Ferner ist unklar, ob für die Auswertung essenzielle Daten (wie z. B. Kraftstoffverbrauch oder Leistung) auch bei alternativen Kraftstoffen von der Motorsteuerungssoftware des Traktors zu verwerten sind. Entsprechende Prüfmethoden für RDE müssen entwickelt und erarbeitet werden.

Demonstration im Feld

Häufig wird die Praxistauglichkeit insbesondere moderner Traktoren infrage gestellt. Mangels wirtschaftlichen Anreizes sind kaum pflanzenöltaugliche Traktoren der jüngsten Abgasstufen IIIB und IV im Feldeinsatz. Lediglich auf den bayerischen staatlichen Versuchsgütern wird eine Flotte pflanzenöltauglicher Traktoren aller Entwicklungsstufen (Stufen I–IV) an verschiedenen Standorten in Bayern wissenschaftlich begleitet und die Praxistauglichkeit der Technologie einer breiten Öffentlichkeit demonstriert. Die Erfahrungen und Ergebnisse sollen zur objektiven Meinungsbildung über die Möglichkeiten und Risiken eines Einsatzes von Biokraftstoffen beitragen.

4 Zielstellung

Hauptziel des Vorhabens ist es, moderne pflanzenöltaugliche Traktoren mit Abgasnachbehandlungssystemen auf Funktionalität, Effizienz und Umweltwirkung im Feldeinsatz und am Traktorenprüfstand zu untersuchen. Wiederkehrende Leistungsprüfungen sowie stationäre Emissionsmessungen über die Nutzungsdauer sollen die Auswirkungen von eventuell entstehenden Ablagerungen und Verschleiß auf das Emissions- und Leistungsverhalten aufzeigen. Neben den bisher hauptsächlich verfügbaren 6-Zylinder-Motoren sollen auch Traktoren niedrigerer Leistungsklassen mit 4-Zylinder-Motoren in die Untersuchungen einbezogen werden.

Zusätzlich zur Betrachtung der stationären Betriebszustände soll auch mithilfe transien-ter Test-Zyklen im Kalt- und Warmstart am Gesamtfahrzeug unter kontrollierbaren Umgebungstemperaturen geprüft werden, wie sich schnelle Drehzahl- und Lastvariationen auf die Regelgüte von Motor- und Abgasnachbehandlungssteuerung sowie auf das Emissionsverhalten auswirken. Die unter erschwerten Betriebsbedingungen (Kaltstart, Lastwechsel) ermittelten Ergebnisse am Prüfstand sollen mit den Erfahrungen im Feld abgeglichen werden und dadurch neue Impulse für die weitere Entwicklung und Optimierung der Pflanzenöltechnik liefern.

Weiteres Ziel ist es, mit neuen portablen Messsystemen und neuen Prüfmethoden die realen Emissionen (*Real Driving Emissions*, RDE) am Fahrzeug bzw. am Traktor für verschiedene Arbeiten zu ermitteln. Emissionskomponenten, die bislang noch nicht gesetzlich limitiert sind, denen aber eine große gesundheitliche Bedeutung beigemessen wird, wie z. B. die Partikelanzahl, sollen erfasst werden, um den Stand der Technik und den weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich kommender Reglementierungen aufzuzeigen.

5 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden zunächst die technischen Daten der Pflanzenöltraktoren und die Versuchsstandorte beschrieben. Anschließend wird auf den Feldtestbetrieb eingegangen und gezeigt, wie Betriebsdaten erhoben und die Motoröl- und Kraftstoffqualität überprüft werden. Das Vorgehen bei Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand sowie die Durchführung mobiler Leistungs- und Verbrauchserfassung sind Thema im letzten Teil des Kapitels.

5.1 Pflanzenöltraktoren und Versuchsstandorte

Im Rahmen des Vorhabens werden 20 pflanzenöлтаugliche Traktoren wissenschaftlich begleitet und auf insgesamt acht Versuchsgütern der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) sowie am TFZ Straubing betrieben. Die Bezeichnung und Standorte der einzelnen Traktoren können Tabelle 3 entnommen werden.

Neun der 20 Traktoren erfüllen die Abgasstufe IIIA und sieben Traktoren die Abgasstufen IIIB und IV. Die Traktoren ab Abgasstufe IIIB sind mit Abgasnachbehandlungssystemen ausgestattet. Zu einigen Pflanzenöltraktoren liegen bereits Erfahrungen aus vorangegangenen Forschungsprojekten vor [56] [17] [18] [22]. Diese Ergebnisse werden teilweise in die Auswertung miteinbezogen, um das Langzeitbetriebsverhalten der Traktoren abbilden zu können. Die Feldtest- und Prüfstanduntersuchungen beginnen in diesem Vorhaben bei den Traktoren FE-K ab 6.487 Bh, DE-K ab 5.066 Bh, DE-N ab 1.683 Bh, FE-A ab 4.112 Bh, FE-AI ab 3.374 Bh, JD7-G ab 1.561 Bh, JD-B ab 733 Bh, JD-O ab 1.776, JD-G ab 2.837 Bh, JD-K ab 3.371 Bh, JD-N ab 1.135 Bh, JD-P ab 1.272 Bh und FE-Ka ab 516 Bh. Die Traktoren JD5-O, JD6R-B, JD-Pu, JD-P4, FE-S und JD-S wurden neu in den Flottenversuch aufgenommen.

Die Traktoren unterscheiden sich in den technischen Konzepten, nach denen die Motoren mit Pflanzenölkraftstoff betrieben werden. In Tabelle 4 sind wesentliche Maßnahmen zur Herstellung der Pflanzenöлтаuglichkeit der einzelnen Traktoren aufgeführt. Die häufigsten mechanischen Eingriffe erfolgen dabei im Niederdruckkraftstoffsystem. Die meisten Traktoren sind auf den alleinigen Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet (Ein-Tank-System bzw. Ein-Kraftstoff-System). Vier Traktoren sind mit einem Zwei-Tank-System bzw. Zwei-Kraftstoff-System ausgestattet, bei dem der Kaltstart sowie zum Teil der Schwachlastbetrieb mit Dieselmotorkraftstoff erfolgen.

Tabelle 3: Standort, Kurzbezeichnung und Abgasstufe der Pflanzenöltraktoren

Pflanzenöltraktor	Kurz- bezeichnung	Abgas- stufe	Standort
Fendt Farmer Vario 412	FE-K	I	LVFZ Kringell
Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160	DE-K	II	LVFZ Kringell
Deutz-Fahr Agrottron 650 M	DE-N	IIIA	Versuchsstation Neuhof
Fendt 820 Vario ^{greentec}	FE-A	IIIA	LVFZ Achselschwang
Fendt 820 Vario ^{greentec}	FE-AI	IIIA	LVFZ Almesbach
John Deere 7830 Premium	JD7-G	IIIA	Versuchsstation Grub
John Deere 6630 Premium	JD-B	IIIA	Versuchsstation Baumannshof
John Deere 6930 Premium	JD-G	IIIA	Versuchsstation Grub
John Deere 6930 Premium	JD-K	IIIA	LVFZ Kringell
John Deere 6630 Premium	JD-O	IIIA	Versuchsstation Osterseeon
John Deere 5080R	JD5-O	IIIA	Versuchsstation Osterseeon
John Deere 6125R	JD-Ka	IIIB	Versuchsstation Karolinenfeld
Fendt Vario 718 SCR	FE-Ka	IIIB	Versuchsstation Karolinenfeld
John Deere 6115R ¹⁾	JD6R-B	IIIB	Versuchsstation Baumannshof
John Deere 6100RC ²⁾	JD-Pu	IIIB	Versuchsstation Puch
John Deere 6125R	JD-N	IIIB	Versuchsstation Neuhof und Versuchsstation Straßmoos
John Deere 6210R	JD-P	IIIB	LVFZ Achselschwang
John Deere 6210R	JD-P4	IV	Versuchsstation Grub
Fendt Vario 724 S4 ¹⁾	FE-S	IV	TFZ Straubing
John Deere 6215R	JD-S	IV	TFZ Straubing (nur für Emissionsmessungen)

¹⁾ ab Juli 2015 ²⁾ ab Juni 2016

Beim Zwei-Tank-System wird ein komplettes Niederdruckkraftstoffsystem inklusive Tank, Leitungen, Filter und Pumpe ergänzt. Das zentrale Element ist dabei die Kraftstoffumschaltung, die auf unterschiedliche Weise ausgeführt sein kann. Halbautomatische Umschalteneinrichtungen aktivieren den Pflanzenölbetrieb, wenn das Motoröl, das Kühlwasser oder der Kraftstoff die vorgegebene Betriebstemperatur erreicht. Der Pflanzenölmodus bleibt aktiv, bis der Bediener einschreitet.

Tabelle 4: Wesentliche zusätzliche Installationen und Maßnahmen zur Realisierung pflanzenöлтаuglicher Traktoren im Vergleich zu vergleichbaren konventionellen Modellen für Dieselkraftstoff

Abgasstufe/Traktorkurzbezeichnung	I	II	IIIA	IIIA	IIIB/IV	IIIB/IV
Maßnahme	FE-K	DE-K	FE-A	JD-G	FE-Ka	JD-N
■ = zutreffend			FE-AI	JD-K	FE-S	JD6R-B
□ = nicht zutreffend			DE-N	JD7-G		JD-P
				JD-O		JD-P4
				JD-B		JD-Pu
				JD5-O		JD-S
Maßnahmen am Niederdruckkraftstoffsystem						
zweites Kraftstoffsystem	□	□	■	□	■	□
zusätzliche Kraftstoffpumpen (Anzahl)	□	□	■ (1)	□	■ (2)	□
halbautomatische/automatische Umschaltung zwischen Rapsöl und Diesel	□/□	□/□	■/■	□/□	■/□	□/□
angepasste Leitungsquerschnitte	□	□	□	□	■	■
Zusatzentlüftung im Kraftstoffsystem	■	■	□	□	□	□
verändertes Thermomanagement	■	■	■	■	■	■
elektrische Kraftstoffvorwärmung	□	□	□	□	■	□
angepasste Kraftstofffilterung	□	□	■	■	■	■
Maßnahmen am Kühlwasser- und Motorölkreislauf						
Kühlwasservorwärmung (230 V)	■	■	□	■	□	■
Nebenstrom-Motorölfilter	□	■	□	□	□	□
Maßnahmen am Motor und an der Abgasnachbehandlung						
Erhöhung des Düsenadelöffnungsdrucks	□	■	□	□	□	□
Austausch der Einspritzdüsen/Injektoren	■	■	□	□	□	□
Änderung der Ein- und Auslassventile	□	■	□	□	□	□
Düsenstock- oder Injektorvorwärmung	□	■	□	■	□	■
angepasste Einspritzparameter in der Motorsteuerungssoftware	□	□	□	■	□	■
angepasste Abgasrückführrate	□	□	□	■	□	■
ausschließlich passive Partikelfilterregeneration (falls DPF vorhanden)	□	□	□	□	■	■

Eine automatische Umschaltung ermöglicht hingegen den temperatur- und lastabhängigen Wechsel zwischen Diesel- und Pflanzenölbetrieb ohne Eingriff des Fahrers. Die manuelle Umschaltung zwischen den Kraftstoffen durch den Fahrer ist bei beiden Varianten möglich. Beim Ein-Tank-System wird das bereits vorhandene Dieselkraftstoffsystem für das Pflanzenöl genutzt. Dabei werden Anpassungen, z. B. an den Leitungsquerschnitten, den Kraftstoffpumpen oder dem Kraftstofffilter, durchgeführt. Ferner haben Trakto-

ren mit einem Ein-Tank-System üblicherweise ein Kühlwasservorwärmesystem installiert, das an die Netzsteckdose (ggf. mit Zeitschaltuhr) angeschlossen werden kann, sodass ein besseres Kaltstartverhalten möglich ist.

Alle Traktoren besitzen ein angepasstes Thermomanagement im Kraftstoffsystem, d. h. die Kraftstofftemperatur wird mittels Wärmetauscher oder elektrischer Heizelemente geregelt. Während die Hersteller bzw. Umrüster bei Traktoren der Abgasstufen I, II und (teilweise) IIIA die Pflanzenöltauglichkeit mit Änderungen am Kraftstoffsystem und mechanischen Maßnahmen am Motor herstellen konnten, gewinnt gerade bei neueren Common-Rail-Motoren der Eingriff in das Motormanagement immer mehr an Bedeutung.

Die Traktoren werden zunehmend auch mit komplexer Abgasnachbehandlung ausgestattet. Abbildung 1 zeigt die innermotorischen und nachgelagerten Maßnahmen zur Schadstoffminderung im Abgas der untersuchten Rapsöltraktoren in Abhängigkeit von der Abgasstufe.

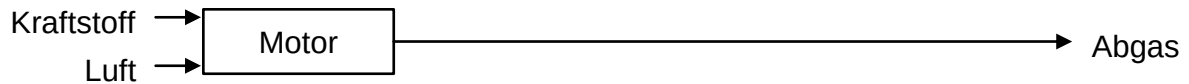
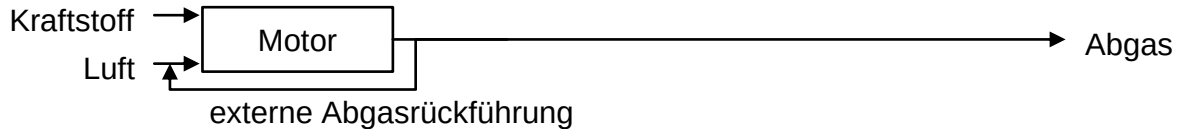
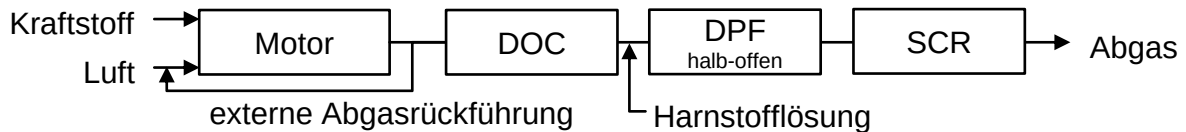
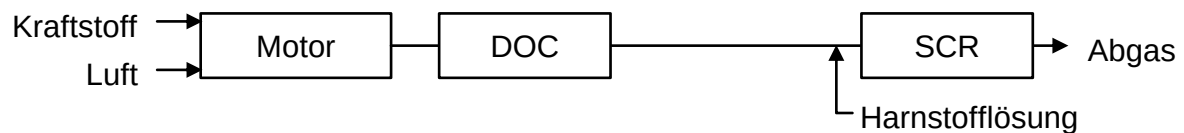
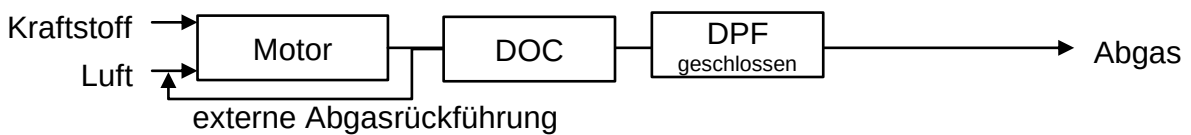
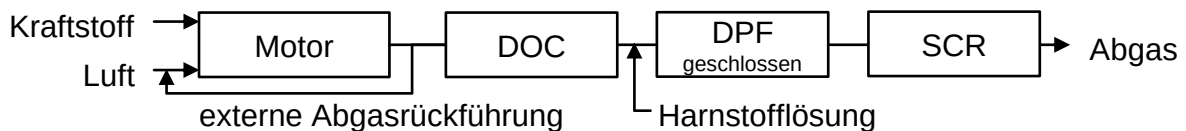
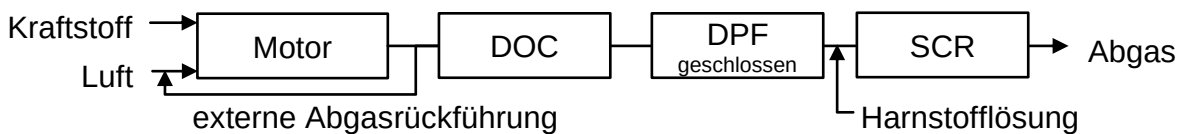
Abgasstufen I, II und IIIA (FE-K, DE-K, JD5-O)**Abgasstufe IIIA** (DE-N, FE-AI, FE-A, JD7-G, JD-B, JD-O, JD-K, JD-G)**Abgasstufe IIIA** (JD-K bis 3454 Bh und JD-G bis 2821 Bh mit Prototyp-AGN)**Abgasstufe IIIB** (FE-Ka)**Abgasstufe IIIB** (JD6R-B, JD-Pu, JD-N, JD-P)**Abgasstufe IV** (JD-P4)**Abgasstufe IV** (FE-S, JD-S)

Abbildung 1: Konzepte zur Emissionsminderung entsprechend der Abgasstufe der untersuchten Pflanzenöltraktoren (DOC = Diesel Oxidation Catalyst, Oxidationskatalysator; SCR = Selective Catalytic Reduction, selektive katalytische Reduktion; DPF = Dieselpartikelfilter)

5.1.1 Traktoren der Abgasstufen I und II

Fendt Farmer Vario 412 (FE-K) und Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K)

Der Fendt Farmer Vario 412 (FE-K) und der Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K) waren bereits Bestandteil vorangegangener Untersuchungen [56][17]. Die technischen Daten der beiden in Abbildung 2 dargestellten Traktoren sind in Tabelle 5 zusammengefasst.



Abbildung 2: Fendt Farmer Vario 412 (FE-K, links) und Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K, rechts) am LVFZ Kringell

Der Traktor FE-K erfüllt die Anforderungen der Abgasstufe I und ist mit einem Deutz-Motor des Typs BF4M2013C mit einem Pumpe-Leitung-Düse-Hochdruckeinspritzsystem ausgestattet. Der Traktor wurde mit einem Ein-Tank-System der Firma Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP), Allersberg auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet.

Der Traktor DE-K erfüllt die Anforderungen der Abgasstufe II und ist ausgestattet mit einem Deutz-Motor der Baureihe BF6M1013EC mit einem Pumpe-Leitung-Düse-Hochdruckeinspritzsystem (PLD). Der Traktor wurde nach ca. 256 Bh mit einem Ein-Tank-System durch die Firma Hausmann, Wülfershausen auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet.

Tabelle 5: Technische Daten des Fendt Farmer Vario 412 Traktors und des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 Traktors

Traktortyp	Fendt Farmer Vario 412	Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160
Abgasstufe	I	II
Motortyp	Deutz BF4M2013C	Deutz BF6M1013EC
Anzahl der Zylinder/ Hubraum in l	4/3,8	6/7,1
Nennleistung in kW/PS	94/125	119/162
Einspritzsystem	Pumpe-Leitung-Düse Hochdruckeinspritzsystem	Pumpe-Leitung-Düse- Hochdruckeinspritzsystem
Baujahr	2003	2005
Getriebe	stufenlos, Vario-Getriebe	stufenlos, ZF Eccom
Kraftstoff-System	Ein-Tank-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	innermotorische Maßnahmen	innermotorische Maßnahmen

5.1.2 Traktoren der Abgasstufe IIIA

5.1.2.1 Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-A, FE-AI), Deutz-Fahr Agrotron M 650 (DE-N)

Bei den Traktoren Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-A, FE-AI) und Deutz-Fahr Agrotron M 650 Natural Power (DE-N) handelt es sich um Serienfahrzeuge, die nach der Markteinführung 2008 von den Herstellern Fendt AGCO GmbH und Same Deutz-Fahr GmbH für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff nach der damals gültigen DIN V 51605 freigegeben sind. Die Versuchstraktoren sind in Abbildung 3 zu sehen.

Die Traktoren erfüllen die Abgasstufe IIIA und sind mit einem Common-Rail-Einspritzsystem und einer gekühlten, externen Abgasrückführung ausgestattet. An den Fahrzeugen ist ein Tank für Dieselkraftstoff mit einem Fassungsvermögen von 100 l und ein Tank für Rapsölkraftstoff mit 340 l installiert.

In Abhängigkeit von Rapsölkraftstofftemperatur und Motordrehmoment/-drehzahl schaltet das integrierte Kraftstoffmanagementsystem zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoffbetrieb um. Für besondere Betriebssituationen, z. B. bei leerem Diesel- oder Rapsöltank, besteht die Möglichkeit, das Kraftstoffmanagementsystem zu deaktivieren und unabhängig vom Motorbetriebszustand mit Rapsölkraftstoff oder Dieselkraftstoff zu fahren. Tabelle 6 zeigt die wichtigsten technischen Daten der Traktoren.



Abbildung 3: Fendt 820 Vario^{greentec} am LVFZ Achselschwang (FE-A, links) und am LVFZ Almesbach (FE-AI, Mitte) sowie Deutz-Fahr Agrottron M 650 Natural Power auf der Versuchsstation Neuhof (DE-N, rechts)

Tabelle 6: Technische Daten der Traktoren Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-A, FE-AI) und des Traktors Deutz-Fahr Agrottron M 650 Natural Power (DE-N)

Traktortyp	Fendt 820 Vario ^{greentec}	Deutz-Fahr Agrottron M 650 Natural Power
Motortyp	Deutz Natural Fuel Engine	Deutz Natural Fuel Engine
Anzahl der Zylinder/ Hubraum in l	6/6,1	6/6,1
Nennleistung in kW/PS	152/207	135/184
Einspritzsystem	Common-Rail- Hochdruckeinspritzung	Common-Rail- Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2008 bzw. 2009	2010
Abgasstufe	IIIA	IIIA
Getriebe	stufenlos, Vario-Getriebe	stufenlos, ZF Ecom
Kraftstoff-System	Zwei-Tank-System	Zwei-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)

5.1.2.2 John Deere 6630, 6930 und 7830 (JD-B, JD-O, JD-G, JD-K, JD7-G)

Die John-Deere-Traktoren, zu sehen in Abbildung 4, sind mit einem PowerTech-PLUS-Motor mit Common-Rail-Einspritzsystem und einer gekühlten, externen Abgasrückführung ausgestattet. Gemäß der Typgenehmigungsprüfung ist der Motor mit der Abgasstufe IIIA klassifiziert. Die technischen Daten sind in Tabelle 7 aufgelistet.



Abbildung 4: John Deere 7830 (JD7-G) und John Deere 6930 (JD-G) auf der Versuchsstation Grub sowie John Deere 6930 am LVFZ Kringell (JD-K)

Tabelle 7: Technische Daten der Prototyp-Traktoren John Deere 6930 Premium (JD-G, JD-K), des John Deere 6630 Premium (JD-B, JD-O) und des John Deere 7830 (JD7-G)

Traktortyp	John Deere 6930 Premium	John Deere 6630 Premium	John Deere 7830
Abgasstufe	IIIA	IIIA	IIIA
Motortyp	PowerTech PLUS	PowerTech PLUS	PowerTech PLUS
Anzahl der Zylinder/ Hubraum in l	6/6,8	6/6,8	6/6,8
Nennleistung in kW/PS	134/182	114/155	173/235
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruck-einspritzung	Common-Rail-Hochdruck-einspritzung	Common-Rail-Hochdruck-einspritzung
Baujahr	2008 bzw. 2009	2010 bzw. 2011	2008
Getriebe	Lastschaltgetriebe AutoQuad Plus	Lastschaltgetriebe	Lastschaltgetriebe AutoQuad Plus
Kraftstoff-System	Ein-Tank-System	Ein-Tank-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)

Die John-Deere-6930-Premium-Traktoren (JD-K, JD-G) sind Prototypen, welche direkt vom Hersteller auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst wurden. Diese Prototypen wurden zusätzlich mit einem Prototyp-Abgasnachbehandlungssystem (AGN) betrieben [22]. Die Traktoren dienten als Versuchsträger im EU-Projekt 2nd VegOil [55] und wurden im Anschluss daran ab 2009 zum Feldtest den Versuchsbetrieben zur Verfügung gestellt und seither wissenschaftlich begleitet [18] [22].

Bei den Traktoren John Deere 6630 und 7830 (JD-B, JD-O, JD7-G) sind vergleichbare Umrüstmaßnahmen wie bei den Traktoren JD-K und JD-G umgesetzt worden. Die Umrüstung erfolgte direkt nach der Herstellung und Auslieferung der Traktoren.

5.1.2.3 John Deere 5080R (JD5-O)

Der John Deere 5080R (Abbildung 5) ist mit einem PowerTech-E-Motor mit Common-Rail-Einspritzsystem und 2-Ventil-Technik ausgestattet. Der 4-Zylinder-Motor ist mit Abgasstufe IIIA klassifiziert und hat mit 59 kW die geringste Nennleistung in der Pflanzenöltraktorenflotte (Tabelle 8). Die Aufrüstung zum Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff ist bei der Herstellung durch John Deere erfolgt.



Abbildung 5: John Deere 5080R (JD5-O) auf der Versuchsstation Osterseeon

Tabelle 8: Technische Daten des John Deere 5080R (JD5-O)

Traktortyp	John Deere 5080R (JD5-O)
Motortyp	John Deere PowerTech E
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	4/4,5
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS) ohne IPM	59/80
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2013
Abgasstufe	IIIA
Getriebe	Lastschaltgetriebe
Kraftstoff-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	innermotorische Maßnahmen

5.1.3 Traktoren der Abgasstufe IIIB

5.1.3.1 Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka)

Ausgestattet mit einem 6-Zylinder-Common-Rail-Deutz-Motor erreicht der Fendt Vario 718 SCR, dargestellt in Abbildung 6, eine Nennleistung von 133 kW. Das Motorabgas wird mit einem Oxidationskatalysator und einem SCR-System nachbehandelt, das von einem 38 Liter fassenden Tank mit wässriger Harnstofflösung versorgt wird.

Die technischen Daten des Fendt Vario 718 SCR sind in Tabelle 9 aufgelistet. Der Traktor wurde von der BayWa AG für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Hierzu wurde ein Zwei-Tank-System eingebaut. Dabei wird Dieselkraftstoff während der Start- und Spülphase aus einem 90-l-Zusatztank entnommen. Der vorhandene Tank mit 400 l Fassungsvermögen, der vor der Umrüstung als Dieseltank diente, wird für den Rapsölkraftstoff verwendet. Ferner befindet sich in der Kabine ein Bedienteil, mithilfe dessen der Fahrer zwischen Diesel- und Rapsölbetrieb wählen kann.



Abbildung 6: Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) der Abgasstufe IIIB

Tabelle 9: Technische Daten des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka)

Traktortyp	Fendt Vario 718 SCR
Motortyp	Deutz TCD 6.1 L6
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/6,1
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS)	133/181
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2012
Abgasstufe	IIIB
Getriebe	stufenloses Vario-Getriebe ML 180
Kraftstoff-System	Zwei-Tank-System
Abgasnachbehandlung/Emissionsminderung	Oxidationskatalysator, SCR-System

Im Rapsölkraftstoffsystem sind zwei nachgerüstete Kraftstoffpumpen verbaut. Die Förderleistung der Pumpen wurde bei der Umrüstung so angepasst, dass im Rapsölkreislauf das gleiche Druckniveau herrscht wie im konventionellen Dieselbetrieb. Damit soll eine ausreichende Kraftstoffversorgung des Hochdruckeinspritzsystems gewährleistet

werden. Ein Gegenstromwärmetauscher zwischen Rapsölkraftstoff-Niederdrucksystem und Kühlwasserkreislauf erhöht die Kraftstofftemperatur durch Nutzung der Motorabwärme und mindert somit die Viskosität des Rapsölkraftstoffs. Ein Thermoschalter im Kühlwasserkreislauf sorgt für die automatische Umstellung in den Rapsölbetrieb ab einer Kühlmitteltemperatur von 70 °C. Das Diesel-Therm[®]-Heizelement (elektrischer Durchlauferhitzer) erwärmt das Rapsöl, wenn dessen Temperatur unter 45 °C sinkt. Steigt die Temperatur des Rapsölkraftstoffs über 55 °C, wird der Durchlauferhitzer ausgeschaltet, um eine übermäßige thermische Belastung des Rapsöls zu vermeiden. Die Umrüstung erfolgt ohne Eingriff ins Management des Einspritzsystems und die Motorsteuerungssoftware wird im Werkszustand belassen. In Abbildung 7 sind einige Bauteile des Umrüstsystems dargestellt.



Abbildung 7: Nachgerüsteter Kraftstoffumschalter (links oben) und Füllanzeige für den Dieseltank, zusätzliche Zahnradpumpen für das Pflanzenölkraftstoffsystem (links und rechts unten) sowie Umschalteinheit inkl. Gegenstromwärmetauscher (rechts oben)

5.1.3.2 John Deere 6115R, 6100RC, 6125R und 6210R (JD6R-B, JD-Pu, JD-N, JD-Ka und JD-P)

Der Traktor John Deere 6210R (JD-P) ist ein Prototyp, welcher direkt vom Hersteller auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst wurde. Mit einem Oxidationskatalysator und

geschlossenem, beschichtetem Dieselpartikelfilter erfüllt der Traktor gemäß der Typgenehmigungsprüfung die Abgasstufe IIIB. Der Traktor diente zunächst als Versuchsträger im Forschungsprojekt „Herstellung der Praxistauglichkeit eines Tier-4-Pflanzenölmotors/-traktors (PraxTrak)“, gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) [37], und wurde 2014 nach Abschluss des Projekts zum Feldtest auf den LfL-Versuchsbetrieben zur Verfügung gestellt.

Die 4-Zylinder-Pflanzenöltraktoren John Deere 6125R (JD-N) sowie John Deere 6115R (JD6R-B) sind ebenso wie der Traktor JD-P mit einem Oxidationskatalysator und geschlossenem Dieselpartikelfilter ausgestattet. Die Anpassungen für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurden beim Traktor JD-N vom Landmaschinenhersteller bei etwa 840 Betriebsstunden durchgeführt. Anschließend wurde der Prototyptraktor mit in die Begleitforschung aufgenommen.

Die Traktoren John Deere 6115R (JD6R-B), John Deere 6125R (JD-Ka) und John Deere 6100RC (JD-Pu) wurden später auf den Betrieb mit Pflanzenöl optimiert als der Traktor JD-N. Die Traktoren JD6R-B und JD-Pu wurden in dieser Konfiguration überwiegend in den Jahren 2014 und 2015 im Handel ab Werk in Bayern zum Verkauf angeboten. Im Vergleich zu den Traktoren JD-N und JD-P verfügten die Traktoren JD6R-B und JD-Pu über eine neuere Generation von Niederdruckkraftstoffsystem, Motorsteuerungssoftware und Vorwärmeinrichtung. Die Traktoren sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 zu sehen.



Abbildung 8: John Deere 6210R (JD-P) am LVFZ Achselschwang und John Deere 6125R (JD-N) auf der Versuchsstation Neuhof



Abbildung 9: John Deere 6115R (JD-B) auf der Versuchsstation Baumannshof

Der Dieselpartikelfilter der Pflanzenöltraktoren JD6R-B, JD-Pu, JD-N, JD-Ka und JD-P wird ausschließlich passiv regeneriert. Die Nacheinspritzung von Kraftstoff in den Abgasstrang zur thermischen Regeneration des Filters wurde vom Landmaschinenhersteller deaktiviert. Bei der passiven Regeneration soll ein Fließgleichgewicht von abgeschiedener und oxidierender Pflanzenölrußmenge im DPF erreicht werden, was in Untersuchungen von DÜSSELDORF (2015) [13] und HOFMANN et al. (2006) [36] am Motorenprüfstand für die verbauten beschichteten DPF nachgewiesen wurde.

Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Technische Daten der John-Deere-Pflanzenöltraktoren John Deere 6125R (JD-N und JD-Pu), 6115R (JD6R-B) und 6210R (JD-P)

Traktortyp	John Deere 6125R (JD-N) John Deere 6115R (JD6R-B) John Deere 6125R (JD-Pu) John Deere 6125R (JD-Ka)	John Deere 6210R (JD-P)
Motortyp	John Deere PowerTech PVX	John Deere PowerTech PVX
Anzahl der Zylinder/ Hubraum in l	4/4,5	6/6,8
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS) ohne IPM	92/125 (JD-N, JD-Ka) 85/115 (JD6R-B) 74/100 (JD-Pu)	154/210
Einspritzsystem	Common-Rail- Hochdruckeinspritzung	Common-Rail- Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2013 (JD-N) 2014 (JD6R-B) 2015 (JD-Pu) 2016 (JD-Ka)	2012
Abgasstufe	IIIB	IIIB
Getriebe	AutoPowr	AutoQuad Plus
Kraftstoff-System	Ein-Tank-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrück- führung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter	gekühlte, externe Abgasrück- führung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter

5.1.4 Traktoren der Abgasstufe IV

5.1.4.1 John Deere 6210R (JD-P4)

Der Pflanzenöltraktor John Deere 6210R (JD-P4) war ein weiterer Versuchsträger des Forschungsprojekts „Herstellung der Praxistauglichkeit eines Tier-4-Pflanzenölmotors/-traktors (PraxTrak)“, gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) [37]. Dieser wurde 2015 für den Feldtest im Rahmen dieses Vorhabens den LfL-Versuchsbetrieben zur Verfügung gestellt. Abbildung 10 zeigt den Traktor JD-P4 und die technischen Daten sind in Tabelle 7 aufgelistet.



Abbildung 10: John Deere 6210R (JD-P4) auf der Versuchsstation Grub

Tabelle 11: Technische Daten des John Deere 6210R (JD-P4)

Traktortyp	John Deere 6210R (JD-P4)
Motortyp	John Deere PowerTech PVX
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/6,8
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS) ohne IPM	154/210
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2012
Abgasstufe	IV
Getriebe	AutoPowr
Kraftstoff-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter SCR-System

Der Traktor JD-P4 basiert auf einem Serien-Traktor der Abgasstufe IIIB mit installierter Pflanzenöltechnologie. Die Anforderungen der Abgasstufe IV wurden durch den Austausch des Serien- durch ein Prototyp-Abgasnachbehandlungssystems bei ca. 640 Bh erreicht. Die nachgerüstete Prototyp-AGN beinhaltet einen Dieseloxydationskatalysator (DOC), einen Dieselpartikelfilter (DPF) mit passiver Regeneration und ein System zur selektiven katalytischen Reduktion von Stickstoffoxiden (SCR). In HUBER et al. (2015) [37] werden der Aufbau und die Funktion der AGN im Detail erläutert.

5.1.4.2 Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Der Fendt Vario 724 S4 (FE-S) in Abbildung 11 besitzt einen 6-Zylinder-Common-Rail-Deutz-Motor der Abgasstufe IV mit 174 kW Nennleistung.



Abbildung 11: Fendt Vario 724 S4 am TFZ Straubing (FE-S)

Das Abgas wird mit einem katalytisch beschichteten Partikelfilter und einem SCR-System nachbehandelt. Der Partikelfilter regeneriert sich passiv, wodurch eine zusätzliche Kraftstoffeinspritzung für die Regenerierung entfällt. Der Tank des SCR-Systems mit wässriger Harnstofflösung umfasst 38 Liter.

Die technischen Daten des FE-S sind in Tabelle 12 aufgelistet. Der Traktor wurde von der BayWa AG für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Diese Umrüslösung wurde vom Hersteller zertifiziert. Es kommt dabei ein zum Traktor FE-Ka fast baugleiches Rapsölkraftstoffsystem zum Einsatz (siehe Abschnitt 5.1.3.1). Die Motorsteuerungssoftware ist unverändert und bleibt somit auf den Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff optimiert.

Tabelle 12: Technische Daten des Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Traktortyp	Fendt Vario 724 S4
Motortyp	Deutz TCD 6.1 L6
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/6,1
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS)	174/237
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2014
Abgasstufe	IV
Getriebe	stufenloses Vario-Getriebe ML 180
Kraftstoff-System	Zwei-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR), katalytisch beschichteter Dieselpartikelfilter, SCR-System

5.1.4.3 John Deere 6215R (JD-S)

Der Pflanzenöltraktor John Deere 6215R (JD-S) ist ein Vorserienfahrzeug der aktuellen Abgasstufe IV mit 158 kW Nennleistung. Der Traktor wurde direkt vom Hersteller auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet und ausschließlich für Messungen am Traktorenprüfstand und mit portabler Emissionsmesstechnik zur Verfügung gestellt. Vor den Emissionsmessungen kam der Traktor nach Aussage des Herstellers für ca. 1.300 Bh im Feldtest mit Rapsölkraftstoff zum Einsatz. Abbildung 12 zeigt den Traktor JD-S und die technischen Daten sind in Tabelle 13 aufgelistet.



Abbildung 12: John Deere 6215R (JD-S) mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) im Heckanbau

Tabelle 13: Technische Daten des John Deere 6215R (JD-S)

Traktortyp	John Deere 6215R (JD-S)
Motortyp	John Deere PowerTech PVX
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/6,8
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS) ohne IPM	158/215
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2015
Abgasstufe	IV
Getriebe	AutoPowr
Kraftstoff-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter SCR-System

5.2 Feldtest

Der Einsatz der Pflanzenöltraktoren im Feldtest wird durch die Auswertung von Betriebsdaten sowie Motoröl- und Kraftstoffanalysen dokumentiert und bewertet.

5.2.1 Betriebsdaten

Die Betriebsdaten werden mithilfe von Betriebstagebüchern und Datenloggern erfasst.

5.2.1.1 Betriebstagebuch

Regelmäßige Aufzeichnungen in Betriebstagebüchern erfolgen, um Einsatzbedingungen, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie gegebenenfalls Störungen zu dokumentieren. Anhand von Gesprächen mit den Betreibern sollen die Erfahrungen aus dem täglichen Einsatz ermittelt werden, um eine praxisgerechte Beurteilung der Zuverlässigkeit und möglicher technischer Schwachstellen der Traktoren vornehmen zu können. Daneben können die Aufzeichnungen dazu beitragen Störungen bzw. Schäden frühzeitig zu erkennen. Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt aus dem Betriebstagebuch und in Tabelle 14 werden die Dokumentationsvorgaben näher erläutert.

 Betriebstagebuch 2018										Traktor:	John Deere 6125R	Ort:	Versuchsstation Karolinenfeld
Vor der Benutzung		Betrieb		Ereignisse und Besonderheiten									
Datum	Betriebsstunden	Olstand mm über MIN	Arbeitsvorgang (Nr. eintragen)	Startverhalten	Motoröl (Liter)	Partikelfilterregeneration	Getankte Menge (Liter) Diesel	Harnstoff	Fehlercodes / Wartungsarbeiten Reparaturen/ Sonstiges	Fahrer Unterschrift			
01.01 (Mo)	h	mm	a:..... b:..... c:.....	☐ gut ☐ mittel ☐ schlecht ☐ kein Start	☐ gewechselt ☐ aufgefüllt.....l	☐ ja	l	l	.....	.....			
02.01 (Di)	h	mm	a:..... b:..... c:.....	☐ gut ☐ mittel ☐ schlecht ☐ kein Start	☐ gewechselt ☐ aufgefüllt.....l	☐ ja	l	l	.....	.....			
03.01 (Mi)	h	mm	a:..... b:..... c:.....	☐ gut ☐ mittel ☐ schlecht ☐ kein Start	☐ gewechselt ☐ aufgefüllt.....l	☐ ja	l	l	.....	.....			
04.01 (Do)	h	mm	a:..... b:..... c:.....	☐ gut ☐ mittel ☐ schlecht ☐ kein Start	☐ gewechselt ☐ aufgefüllt.....l	☐ ja	l	l	.....	.....			
05.01 (Fr)	h	mm	a:..... b:..... c:.....	☐ gut ☐ mittel ☐ schlecht ☐ kein Start	☐ gewechselt ☐ aufgefüllt.....l	☐ ja	l	l	.....	.....			
06.01 (Sa)	h	mm	a:..... b:..... c:.....	☐ gut ☐ mittel ☐ schlecht ☐ kein Start	☐ gewechselt ☐ aufgefüllt.....l	☐ ja	l	l	.....	.....			
07.01 (So)	h	mm	a:..... b:..... c:.....	☐ gut ☐ mittel ☐ schlecht ☐ kein Start	☐ gewechselt ☐ aufgefüllt.....l	☐ ja	l	l	.....	.....			

1. Arbeitsvorgänge:							
1 Pflüg	2 Grubber	3 Scheibenege	4 Straßentransport	5 Düngerstreuer	6 Feldaufspritze	7 Kreiselege	8 Sämaschine
9 Ballenpresse	10 Mähwerk	11 Schwader/Wender	12 Ladowagen	13 Güllewagen	14 Miststreuer	15 Frontlader	16

Abbildung 13: Auszug aus dem Betriebstagebuch der Pflanzenöltraktoren

Tabelle 14: Parameter im Betriebstagebuch zur Dokumentation des Praxiseinsatzes auf den LfL-Versuchsgütern

Parameter	Erläuterung
Betriebsstunden	Zu Beginn eines Arbeitstags wird der Stand des Betriebsstundenzählers eingetragen, um die Verteilung der Arbeitszeit zu ermitteln.
Motorölstand	Der Motorölstand wird bei der täglichen Inbetriebnahme von der unteren Einkerbung des Ölmesstabs bis zum Ölstand ermittelt. Dadurch soll ggf. ein ungewöhnlich hoher Motorölverlust oder Kraftstoffeintrag entdeckt werden.
Arbeitsvorgänge	Für insgesamt 15 gängige landwirtschaftliche Arbeitsvorgänge sind Nummern zum Eintragen vordefiniert. Zudem können sonstige Arbeitsvorgänge ergänzt werden. Bei unterschiedlichen Arbeitsvorgängen an einem Tag werden die drei überwiegenden Tätigkeiten eingetragen und zu gleichen Teilen auf die Arbeitszeit angerechnet.
Startverhalten	Das Startverhalten des Motors wird in vier Kategorien bewertet: Gut = Der Start erfolgte zügig mit einem Versuch. Mittel = Stark verzögerter Start oder zwei Versuche erforderlich. Schlecht = Es werden mehr als zwei Versuche benötigt. Kein Start = Es war kein Start möglich.
Betriebsstoffe	Die getankten Mengen an Pflanzenöl, Dieselkraftstoff und Harnstofflösung dokumentieren den Betriebsstoffverbrauch des Traktors oder geben bei vorhandenem SCR-System Aufschluss über dessen Funktion.
Fehlermeldungen Wartungsarbeiten Reparaturen Sonstiges	Auffälligkeiten, Reparaturen, Fehlermeldungen und Wartungsarbeiten werden dokumentiert. Diese Aufzeichnungen dienen hauptsächlich zur Ursachenforschung bei Störungen.

5.2.1.2 Motorsteuerungsdaten

Die Dokumentation des Betriebsverhaltens erfolgt auch durch kontinuierliche Online-Aufzeichnung an den Traktoren FE-Ka und FE-S mit einer Frequenz von einem Hertz (ein Messwert pro Sekunde). Dabei werden die CAN-Signale des Traktors mithilfe des Protokolls SAE J1939 von einem Datenlogger (Vector GL1010) aufgezeichnet. Datenaufbereitung und -auswertung erfolgen mit den Programmen CANgraph der Firma Vector und Microsoft Excel mit VBA (Visual Basic for Applications).

Dabei wurden die Motorsteuerungssignale aus dem CAN-BUS, wie z. B. Motordrehzahl, Motorlast, Motordrehmoment und Kraftstoffdruck, ausgewertet. Der Parameter Kraftstoffverbrauch in l/Bh ist auf die Verwendung von Dieselkraftstoff kalibriert und wird daher nicht einbezogen. Insbesondere die Qualität des Signals für die Höhe des Rapsölverbrauchs ist unbekannt. Rückschlüsse auf die Auslastung des Motors sollen die Drehmoment- und Lastsignale gewähren, die in Prozentpunkten ausgegeben werden.

5.2.2 Motorölqualität

Die Motorölqualität wird wiederkehrend untersucht, um Aussagen zum Motorölzustand treffen zu können. Darüber hinaus können anhand der Analysen Rückschlüsse auf übermäßigen Verschleiß gezogen werden. Wie in Tabelle 15 ersichtlich, werden die Traktoren mit unterschiedlichen Motorölsorten, Wartungs- und Probenahmeintervallen betrieben.

Bei den Traktoren, die in einem Intervall von 50 Bh beprobt werden, erfolgt der Motorölwechsel nach Bedarf. Ist das Motoröl laut Analyse nicht mehr in einem betriebstauglichen Zustand oder beträgt die Laufzeit des Motoröls über 500 Bh, wird es gewechselt. Ein Motorölwechsel mit Probenahme wird bei den restlichen Traktoren alle 200 oder 250 Bh durchgeführt.

Eine Auswahl der untersuchten Parameter und die dabei verwendeten Analysemethoden sind in Tabelle 16 dargestellt. Die Probenahme erfolgt über die Öffnung des Ölstandmessstabs oder des Motoröleinfüllstutzens mit einer Handpumpe und einem Schlauch.

Tabelle 15: Verwendete Motoröle in den Pflanzenöltraktoren und deren Probenahmeintervalle in Betriebsstunden (Bh)

Pflanzenöltraktor	Motoröl-Bezeichnung (SAE-Klassifizierung)	Probenahmeintervall
FE-K	Fuchs Plantomot (5W-40)	250 Bh
DE-K	Fuchs Plantomot (5W-40)	200 Bh
DE-N	Deutz-Fahr Extra Engine Oil (10W-40)	50 Bh
FE-A	Tectrol Super Truck 1040 (10W-40)	250 Bh
FE-AI	Tectrol Super Multisyn Plus (10W-40)	50 Bh
JD7-G	Liqui Moly Traktoröl (10W-30)	250 Bh
JD-B, JD-O, JD5-O	John Deere Torq-Gard (5W-30)	250 Bh
JD-G	bis 1615 Bh: Lubrizol ACEA E7/E9 (15W-40) ab 1615 Bh: John Deere Plus 50-II (15W-40)	50 Bh
JD-K	bis 1841 Bh: Lubrizol ACEA E7 (15W-40) ab 1841 Bh: John Deere Plus 50-II (15W-40)	50 Bh
FE-Ka, FE-S	Tectrol Super Truck 1040 (10W-40)	50 Bh
JD6R-B, JD-N, JD-Pu, JD-P, JD-P4	John Deere Plus 50-II (15W-40)	50 Bh

Tabelle 16: 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

5.2.3 Kraftstoffqualität

Die Kraftstofflieferungen an die Versuchsbetriebe werden hinsichtlich Gesamtverschmutzung, Säurezahl, Oxidationsstabilität, Wasser-, Schwefel-, Phosphor-, Calcium- und Magnesiumgehalt gemäß DIN 51605:2016 [7] untersucht. Die Proben werden nach der Anlieferung an die Versuchsbetriebe aus den Lagertanks entnommen.

Die Motor- bzw. Traktorhersteller empfehlen in bestimmten Fällen die Zugabe von Funktionsadditiven zum Kraftstoff. Bei den John-Deere-Traktoren JD-G, JD-K, JD7-G JD-B JD5-O und JD-O werden deshalb 1.000 ppm John-Deere-Biodiesel Protect 100 dem Pflanzenölkraftstoff hinzudosiert. Das Additiv dient hauptsächlich zur Vermeidung bzw. Minderung von Ablagerungen im Motor. Bei den John-Deere-Traktoren der Abgasstufen IIIB sowie IV (JD-N ab 1.152 Bh, JD6R-B, JD-Pu, JD-Ka, JD-P und JD-P4) wird das Additiv John Deere Fuel Protect [4] mit einer Konzentration von 1.000 ppm verwendet.

In den Kraftstoff für die Traktoren mit der Deutz Natural Fuel Engine (DE-N, FE-A, FE-AI) und für den Traktor FE-Ka (ab 520 Bh) werden 2.500 ppm Deutz Clean-Diesel InSyPro [9] zugegeben. Das Additiv enthält eine Reinigungskomponente und einen Oxidationsstabilisator.

Bei den pflanzenöltauglichen Traktoren FE-K, DE-K, JD-S und FE-S werden keine Additive im Kraftstoff eingesetzt.

5.3 Traktorenprüfstand

Die Abgasemissionsmessungen werden am Abgasprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) durchgeführt. Der Prüfstand ist konzipiert für die Messung von gasförmigen Abgaskomponenten und Partikelmasse-Emissionen von Traktormotoren im eingebauten Zustand. Die Emissionsmessungen am Prüfstand erfolgen in Anlehnung an die Richtlinie ISO 8178. Der Aufbau des Prüfstands und die technischen Merkmale der Prüfstandsbestandteile entsprechen bei den durchgeführten Emissionsmessungen in vielen Punkten denen der Vorgängerprojekte.

Die Versuchsaufbauten sind ausführlich beschrieben in THUNEKE et al. (2009) [56], EMBERGER et al. (2013) [17] und ETTL et al. (2016) [22]. Abbildung 14 und Abbildung 15 veranschaulichen den Aufbau des Prüfstands.

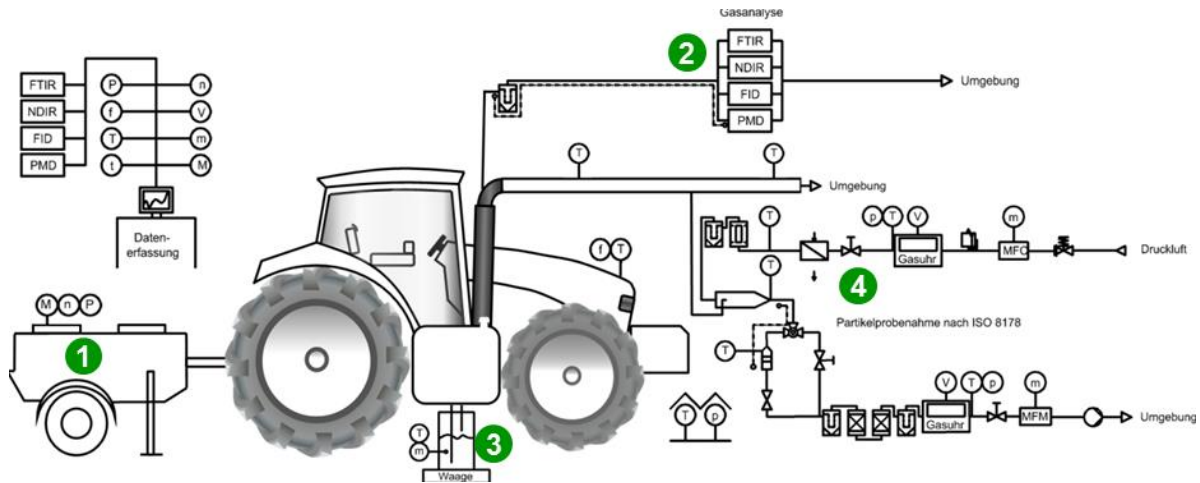


Abbildung 14: Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstands mit Wirbelstrombremse (1), Gasanalysatoren (2), Kraftstoffverbrauchsmessung (3) und Partikelprobenahme (4)



Abbildung 15: Traktorenprüfstand des TFZ

5.3.1 Motorleistungs-, Motordrehzahl- und Kraftstoffverbrauchsmessung

Die Bestimmung der Motorleistung und Motordrehzahl nach ISO 8178 [38] 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 weder praktikabel noch 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 des Atmosphärendrucks und der Umgebungstemperatur korrigiert werden. Auch nach ISO 8178 ist die nicht korrigierte 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 wie folgt definiert:

$$f_a = \left(\frac{99}{p_s}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{T_a}{298}\right)^{1,2} \quad (5.1)$$

Wobei:

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} 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 Masse über die Waage kontinuierlich erfasst wird.

Der Verbrauch wässriger Harnstofflösung des SCR-Systems wird ebenfalls gravimetrisch bestimmt. Dazu wird ein externer Harnstofftank auf einer Tischwaage (METTLER TOLEDO KA32s, max. 32 kg) platziert und mit dem SCR-System des Traktors verbunden. Beeinträchtigungen der Wägung durch Luftbewegungen werden durch eine Einhausung minimiert.

5.3.2 Bestimmung gasförmiger Emissionen

Für die Bestimmung der gasförmigen Emissionen wurde ein System aus einer Kombination von Analysatoren verwendet. Eine Übersicht über die technischen Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile gibt Tabelle 17. Alle Messwerte werden kontinuierlich mit einer Frequenz von einem Hertz erfasst und mithilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW™) aufgezeichnet.

Tabelle 17: Technische Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile bei den Emissionsmessungen an den Messstellen zwischen Motor und Abgasnachbehandlung (vor AGN) und nach der Abgasnachbehandlung (nach AGN)

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messverfahren
Messstelle vor der AGN im Rohabgas		
CO ₂	AO 2020 Fa. ABB	Nicht dispersives Infrarot-Spektroskop (NDIR)
CO	AO 2020 Fa. ABB	Nicht dispersives Infrarot-Spektroskop (NDIR)
NO _x ¹⁾	AO 2020 Fa. ABB	Nicht dispersiver Ultra-Violett-Analysator (NDUV)
O ₂	PMA 100 Fa. M & C	Paramagnetischer Detektor (PMD)
HC ²⁾	ThermoFID Fa. M & A GmbH	Flammenionisations-Detektor (FID)
Messstelle nach der AGN oder ohne AGN – gereinigtes Abgas (Reinabgas)		
CO ₂ , CO, NO, NO ₂ , N ₂ O, NH ₃ , Formaldehyd,	SESAM 4 Fa. AVL	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop (FTIR)
HC ²⁾	SESAM 4 Fa. AVL	Flammenionisations-Detektor (FID)
O ₂	SESAM 4 Fa. AVL	Paramagnetischer Detektor (PMD)
Messstelle am Ansaugtrakt des Motors zur Bestimmung der AGR-Rate		
CO ₂	AO 2020 Fa. ABB	Nicht dispersives Infrarot-Spektroskop (NDIR)

¹⁾ NO_x = NO + NO₂

²⁾ Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas

5.3.3 Partikelmassebestimmung (PM)

Am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums werden die Partikelemissionen diskontinuierlich nach den Vorgaben der EU-Verordnung 2016/1628 bzw. ISO 8178 im verdünnten Abgas erfasst. Bei der Messung nach EU-Richtlinie 97/68/EG, die im Wesentli-

chen 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 und 52 °C konditioniert. 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 geregelt. Die zugeführte Verdünnungsluft wird über einen Wärmetauscher auf Temperaturen zwischen 20 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, EmfabTM Filters, TX40HI20WW, 47 mm Durchmesser) mit einem Abscheidegrad von 99,9 % Dioctylphtalat (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 mithilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEWTM) aufgezeichnet.

5.3.4 Partikelanzahlbestimmung (PN)

Das verwendete Messgerät zur Bestimmung der Partikelanzahl und -größenverteilung ist ein DMS 500 (*Differential Mobility Spectrometer*) der Firma Cambustion. Dabei handelt es sich um einen differenziellen Mobilitätsanalysator (DMA) mit einem Partikelmessbereich von ca. 5 bis 1000 nm Durchmesser. Das bei einer Messung über 22 Elektrodenringe analysierte und anschließend berechnete kontinuierliche Partikelgrößenspektrum wird in 38 Größenklassen unterteilt. In diesen wird die Partikelkonzentration punktuell über einem Durchmesserspektrum berechnet und in $\text{dN}/\text{dlog}(D_p)$ angegeben.

Die untere Nachweisgrenze messbarer Partikelanzahlen sinkt entsprechend dem zunehmenden Durchmesser von $1 \times 10^4 \text{ dN}/\text{dlog}(D_p)$ bis $1 \times 10^2 \text{ dN}/\text{dlog}(D_p)$, jeweils bezogen auf das Abgasvolumen in cm^3 . Die maximal erreichbare Messgeschwindigkeit liegt bei 10 Hz.

Das DMS 500 ist mit einer Messstellenumschaltung DSA (*Dual Sampling Accessory*) ausgestattet. Dadurch ist es möglich, sowohl vor als auch nach dem AGN-System die Partikelgrößenverteilung zu bestimmen.

5.3.5 Stationäre Emissionsmessung

Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Messungen in Anlehnung an ISO 8178 [38] unter Verwendung des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 durchgeführt. Das Prozedere

re ist identisch mit dem *Non-Road Steady Cycle* (NRSC) nach der EU-Verordnung 2016/1628. Dieser stationäre Prüfzyklus wird vom Gesetzgeber unter anderem auch für die Prüfung von Motoren landwirtschaftlicher Zugmaschinen über alle Abgasstufen vorgeschrieben. Ab der Abgasstufe IIIB ist ein zusätzlicher transienter Test nach ISO 8178-11 [39] zu absolvieren, welcher dem *Non-Road Transient Cycle* (NRTC) gemäß der EU-Verordnung 2016/1628 [29] entspricht. Die Grenzwerte gelten für beide Zyklen gleichermaßen.

Der NRSC 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 Prüfphasen unterschiedlicher Leistung wird eine Zwischendrehzahl angefahren, die dort festgelegt wird, wo der Motor sein höchstes Drehmoment besitzt. Liegt das höchste Drehmoment jedoch bei unter 60 % der Nenndrehzahl, so wird die Zwischendrehzahl bei 60 % der Nenndrehzahl festgelegt, liegt es bei mehr als 75 %, werden 75 % der Nenndrehzahl als Zwischendrehzahl definiert. Die letzte Prüfphase des Prüfzyklus ist der Leerlaufbetriebspunkt.

Bei der Berechnung der spezifischen Emissionen über einen Prüfzyklus fließen die Messwerte aus den einzelnen Prüfphasen mit unterschiedlicher Gewichtung in das Endergebnis ein. Tabelle 18 gibt einen Überblick zu den Vorgaben des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178, in Abbildung 16 sind die Prüfphasen schematisch im Motorenkennfeld eingezeichnet.

Tabelle 18: C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 (NRSC)

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 %
Gewichtungsfaktor	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15

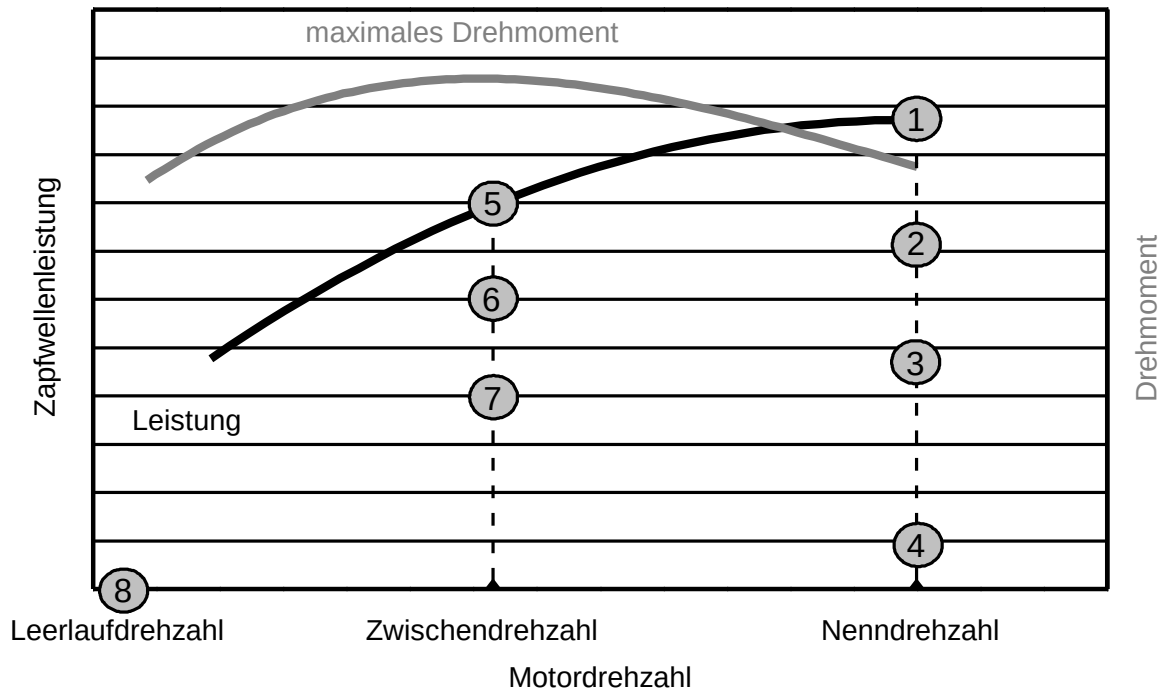


Abbildung 16: Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 (NRSC)

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. Aus diesem Grund wird bei der Durchführung der Messung eine einheitliche Verweildauer der einzelnen Prüfphasen definiert, bevor mit der Partikelprobenahme für jede Prüfphase begonnen wird. Die Partikel werden über einen Zeitraum von zehn Minuten pro Prüfphase auf ein Filterpaar pro Prüfphase gesammelt.

In Tabelle 19 sind für jede Prüfphase die angefahrenen Drehzahlen sowie die Verweildauer auf den einzelnen Prüfphasen vor den Partikelprobenahmen und die Partikelprobenahmedauer aufgeführt. Zur Auswertung der gasförmigen Abgasbestandteile werden gemäß den Vorgaben der ISO 8178 die Messwerte der letzten drei Minuten der jeweiligen Prüfphase herangezogen.

Tabelle 19: Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren nach der Mehrfachfiltermethode

Prüfphase	Verweildauer vor Partikelprobenahme in min	Partikelprobenahmedauer in min
1	30	10
2	6	10

3	6	10
4	10	10
5	15	10
6	10	10
7	10	10
8	10	10

Bei den Messungen bei den Abgasstufe-IV-Traktoren FE-S (ab 1.460 Bh) und JD-S wurde die Einfachfiltermethode statt der Mehrfachfiltermethode angewandt. Bei der Einfachfiltermethode wird über alle acht Prüfphasen nur ein Filterpaar beladen. Die Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Prüfphasen sind durch unterschiedlich lange Partikelprobenahmezeiten berücksichtigt, die in Tabelle 20 aufgelistet sind. Ziel der Umstellung auf die Einfachfiltermethode ist es, die Beladungsmasse pro Filterpaar zu erhöhen und dadurch bei niedrigen Partikelmassekonzentrationen im Abgas eine bessere Wiederholbarkeit zu erreichen.

Tabelle 20: Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren nach der Einfachfachfiltermethode

Prüfphase	Verweildauer vor Partikelprobenahme in min	Partikelprobenahmedauer in min
1	30	6
2	6	6
3	6	6
4	6	4
5	6	4
6	6	4
7	6	4
8	6	6

5.3.6 Transiente Emissionsmessung

Beim *Non-Road Transient Cycle* (NRTC) ändern sich Drehzahl- und Drehmomentverhältnisse des Motors sekundlich in unterschiedlicher Höhe. Der Prüfzyklus besteht aus einer Kaltstart- und Warmstartphase inkl. einer dazwischenliegenden Abkühlungsphase. Eine Abfolge dieser zwei Phasen entspricht einer Wiederholung. Die einzelnen Phasen dauern 20 Minuten und werden in der Auswertung unterschiedlich gewichtet, wie in Tabelle 21 ersichtlich ist.

Tabelle 21: Prüfphasen nach ISO 8178 und EU-Richtlinie 97/68/EG

Zyklusabschnitt	1. Kaltstart	2. Abkühlung	3. Warmstart
Dauer	20 min	20 min	20 min
Gewichtungsfaktor	0,1	–	0,9

Bevor ein Kaltstart durchgeführt werden darf, muss der Traktor richtig konditioniert sein. Die Temperatur des Motoröls, Kühlmittels und der Abgasnachbehandlung muss für fünfzehn Minuten konstant zwischen 20 und 30 °C betragen. Wird der Motor gestartet, beginnt eine ca. zwanzig Minuten andauernde, definierte Abfolge von Drehzahl- und Drehmomentwechseln mit gleichzeitiger Emissionsmessung am Traktor. Unmittelbar nach dem Zyklus wird der Motor abgestellt und die Emissionsmessung beendet. Der Traktor kühlt 20 Minuten bei Umgebungsbedingungen (ohne zusätzliche Kühlmaßnahmen) ab. Unmittelbar im Anschluss an die Abkühlphase erfolgt der Warmstart mit identischer Drehzahl- und Drehmomentabfolge wie beim Kaltstart.

In der Berechnung des Endergebnisses werden die Emissionen im Kaltstart zu 10 % und im Warmstart zu 90 % gewertet. Das gewichtete Ergebnis der limitierten Abgaskomponenten kann wie beim NRSC aus der EU-Verordnung 2016/1628 mit den gesetzlichen Grenzwerten verglichen werden.

Die Typgenehmigungsprüfung erfolgt üblicherweise am ausgebauten Motor am Motorenprüfstand. Der NRTC basiert in vielen Abschnitten auf hochtransienten Baumaschinenarbeiten und ist für den im Traktor eingebauten Motor ohne Anpassung nicht anwendbar. Dies bedeutet damit auch, dass der Prüfzyklus zur Typenzulassung von Traktormotoren zumindest phasenweise nicht das tatsächliche Einsatzprofil widerspiegelt. Die größte Herausforderung stellen hohe Trägheitsmomente dar, die bei schnellen Drehmoment- oder Drehzahlvariationen an der Zapfwelle überwunden werden müssen. Diese Trägheitsmomente werden durch die Nebenaggregate und das Getriebe sowie je nach Bauart auch von der Wirbelstrombremse verursacht. Aus diesem Grund ist eine Anpassung nötig, um den Zyklus auch an Traktoren anwenden zu können. LANDIS (2012) [43] beschreibt eine Methode, die einen Betrieb am Traktorenprüfstand ermöglicht. Dabei werden die Drehzahl- und Drehmomentvorgaben des NRTC in Zeitabschnitte von zehn Sekunden unterteilt und in jedem Zeitabschnitt wird der Mittelwert gebildet. Dadurch erfolgen Drehzahl- und Drehmomentwechsel erst alle zehn Sekunden. Durch dieses Vorgehen bleibt die mittlere Zyklusarbeit unverändert, jedoch wird die Dynamik reduziert. In Abbildung 17 werden der Verlauf der Soll- und Ist-Werte des NRTC und die modifizierte Version (10sNRTC) in einem Durchlauf am Traktorenprüfstand dargestellt. Die weitere Durchführung und Auswertung erfolgt gemäß der Richtlinie ISO 8178 bzw. EU-Richtlinie 97/68/EG.

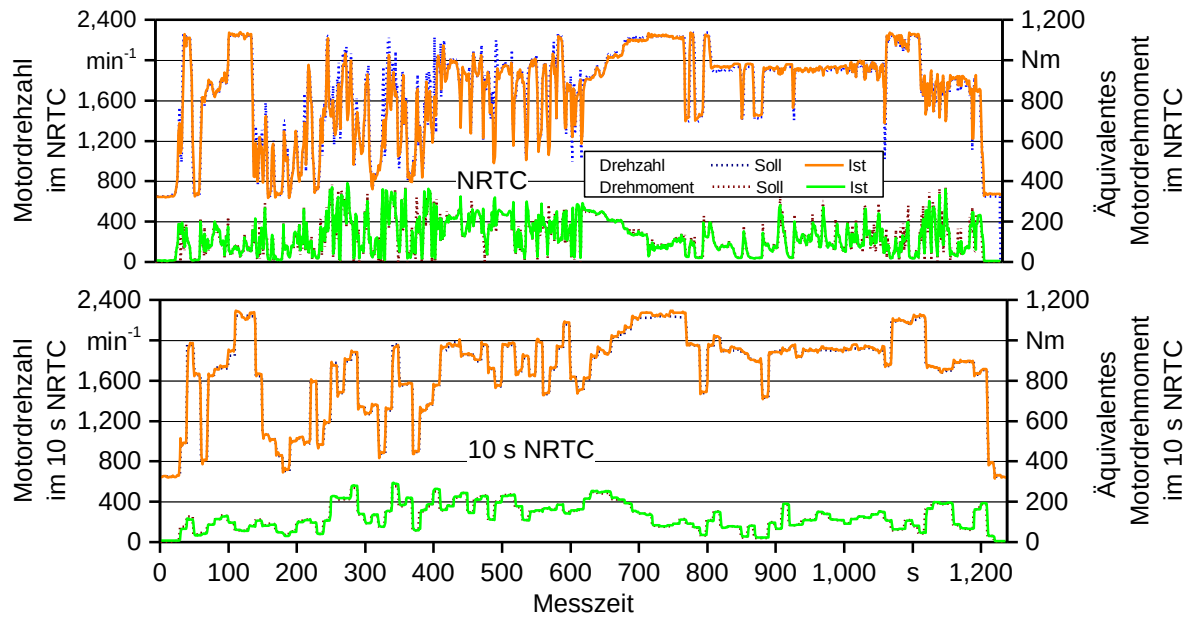


Abbildung 17: Exemplarischer Verlauf der Soll- und Ist-Werte im NRTC nach ISO 8178 ohne Mittelung (oben) und im 10sNRTC (unten) mit 10-s-Mittelwerten

Die Änderungen der Gaspedalstellung erfolgt mithilfe eines elektrischen Stellzylinders und das Drehmoment wird durch die Vorgabe des Erregerstroms der Wirbelstrombremse bestimmt. Beide Stellgrößen werden von der Prüfstandssoftware sekundlich vorgegeben. Damit können die zehn Sekunden andauernden Betriebspunkte schneller und präziser angesteuert werden [24].

Beim Traktor John Deere 6215R (JD-S) wird der NRTC zudem ohne zusätzliche Mittelwertbildung der Drehzahl- und Drehmomentvorgaben absolviert (1sNRTC).

5.3.7 Betriebsstoffe

Am Traktorenprüfstand werden im Rahmen des Vorhabens Rapsölkraftstoff und Dieselmotorkraftstoff sowie wässrige Harnstofflösung eingesetzt.

Die Eigenschaften des verwendeten Rapsölkraftstoffs (ohne Additive) bei den Leistungs- und Emissionsmessungen sind in Tabelle 22 aufgelistet. Die Qualitätskriterien der DIN 51605:2016 [7] werden erfüllt. Die Kraftstoffcharge RK-P-I kam bei den Emissionsmessungen der Traktoren JD-K, FE-Ka und FE-S (bis 1.020 Bh) und die Lieferung RK-P-II bei den Messungen der Traktoren FE-S (ab 1.021 Bh) und JD-S zum Einsatz.

Tabelle 22: *Eigenschaften des am Traktorenprüfstand verwendeten Rapsölkraftstoffs*

Kenngroße	Methode	RK-P-I	RK-P-II	Einheit
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	919,9	920,0	kg/m ³
Flammpunkt (Pensky-Martens)	DIN EN ISO 2719	> 101	> 101	°C
Kinematische Viskosität (40 °C)	DIN EN ISO 3104	34,8	34,6	mm ² /s
Heizwert	DIN 51 900-2	37,3	36,8	MJ/kg
Zündwilligkeit (Abgeleitete Cetanzahl)	DIN EN 15195	42,4	47,5	–
Iodzahl	DIN EN 14111	114	113	g Iod/100g
Gesamtver- schmutzung	DIN EN 12662	5	4	mg/kg
Säurezahl	DIN EN 14104	0,637	1,54	mg KOH/g
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112	17,8	6,8	h
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	587	550	mg/kg
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	1,3	1,6	mg/kg
Phosphorgehalt	DIN 51627-6	< 3	< 3	mg/kg
Calciumgehalt	DIN 51627-6	< 1	< 1	mg/kg
Magnesiumgehalt	DIN 51627-6	< 1	< 1	mg/kg

Der verwendete Referenzdiesel mit der Qualität CEC RF 06 03 genügt den Anforderungen für Typgenehmigungen für Motoren der Abgasstufen IIIB und IV. Das SCR-System der Traktoren der Abgasstufen IIIB und IV wurde mit wässriger Harnstofflösung nach DIN 70070 bzw. ISO 22241 versorgt.

5.4 Portable Emissionsmessung

Bei den Traktoren Fendt Vario 724 S4 (FE-S) und John Deere 6215R (JD-S) werden die Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb (*Real Driving Emissions*, RDE) bei landwirtschaftlichen Arbeiten mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) erfasst.

5.4.1 Portables Emissionsmesssystem (PEMS)

Die Emissionen der Traktoren bei landwirtschaftlichen Arbeiten im Pflanzenölbetrieb werden mit einem Semtech Ecostar PEMS der Firma Sensors Inc. erfasst. Das in einem staub- und wassergeschützten Gehäuse an Frontkraft- oder Heckkraftheber des Traktors montierte PEMS ist in Abbildung 18 dargestellt. Die Stromversorgung des Messgeräts erfolgt unabhängig vom Fahrzeug wahlweise über einen Generator oder eine Batterie.



Abbildung 18: Portables Emissionsmesssystem im geöffneten Schutzgehäuse am Frontkraftheber eines Traktors montiert

Tabelle 23 zeigt die Messgrößen und -verfahren des PEMS zur Analyse der Abgasbestandteile an der Messstelle nach der Abgasnachbehandlung.

Tabelle 23: Analysatoren des portablen Emissionsmesssystems (PEMS) zur Erfassung der Abgasbestandteile an der Messstelle nach der Abgasnachbehandlung im Reinabgas (nach AGN)

Messgröße	Messgerät	Messverfahren
CO, CO ₂ , Abgasmassenstrom	Fuel Economy Meter (FEM)	Kombination aus Nicht dispersivem Infrarot-Spektroskop (NDIR) und Differenzdruck-Durchflussmesser
NO, NO ₂	NO _x -Modul	Nicht dispersiver Ultra-Violett-Analysator (NDUV)
HC	FID-Modul	Flammenionisations-Detektor (FID)
PM	Micro-Proportional Sample System (MPS), Continuous Particulate Module (CPM), Particulate Filter System (PFS)	Kombination aus Abgasverdünnung, Elektrometer und Partikelmassenabscheidung

5.4.2 Durchgeführte Arbeiten und Datenauswertung

Die RDE-Messungen erfolgen am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) bei ca. 372 Bh mit einem Fünfscharpflug Pöttinger Servo 45 Plus (Abbildung 19), bei ca. 377 Bh mit dem 5 m breiten Grubber Lemken Smaragd 9 (Abbildung 20), bei ca. 1.136 Bh mit einer 3 m breiten Rabe-Kreiselegge (Abbildung 21) sowie bei ca. 1.130 Bh bei Straßentransportfahrten ohne zusätzliche Anhängelast (Abbildung 22). Abbildung 23 zeigt den Prüfaufbau der RDE-Messungen am John Deere 6215R (JD-S) bei Straßentransportfahrten ohne Anhängelast und einer Traktorgesamtlaufzeit von ca. 1.353 Bh. Insbesondere Straßentransportfahrten können durch die vergleichsweise geringe Last mit niedrigen Betriebstemperaturen eine Herausforderung für die Abgasnachbehandlung darstellen.



Abbildung 19: Portable Emissionsmessung am Traktor FE-S mit einem Pflug



Abbildung 20: Portable Emissionsmessung am Traktor FE-S mit einem Grubber



Abbildung 21: Portable Emissionsmessung am Traktor FE-S mit einer Kreiselegge



Abbildung 22: Portable Emissionsmessung am Traktor FE-S bei der Straßenfahrt



Abbildung 23: Portable Emissionsmessung am Traktor JD-S bei der Straßenfahrt

Beide Traktoren wurden über die gesamte Messdauer mit Rapsölkraftstoff betrieben. Die werkseitigen Einstellungen des Zwei-Tank-Systems am Fendt Vario 724 S4, nach denen der Betrieb bis zu einer Kühlmitteltemperatur von 60 °C mit Dieselmkraftstoff erfolgt, wurden dazu deaktiviert.

Die RDE-Messungen werden nach der Methode der gleitenden Mittelungsfenster (*Moving Averaging Window*, MAW) nach EU-Verordnung 2016/1628 [29] sowie der delegierten EU-Verordnung 2017/655 [27] ausgewertet. Die gesetzeskonformen Berechnungen erfolgen mit der Software EMROAD 5.96 Build 3, die von der gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (*Joint Research Centre*, JRC) hierfür veröffentlicht wurde.

Die Auswertungsprozedur beginnt, wenn die Kühlmitteltemperatur zum ersten Mal 70 °C nach dem Motorstart erreicht hat, aber nicht früher als zwanzig Minuten nach dem Motorstart. Bei der MAW-Methode werden die Messdaten danach in sekundlich beginnende Mittelungsfenster unterteilt. Jedes Fenster umfasst dieselbe CO₂-Masse (oder optional dieselbe mittlere Arbeit), wie sie im NRTC erreicht wird. Als Referenz wird bei dieser Untersuchung die CO₂-Masse im 10sNRTC am Traktorenprüfstand mit Rapsölkraftstoff von 19,0 kg CO₂ beim Traktor JD-S und von 17,1 kg CO₂ beim Traktor FE-S verwendet.

Für alle Fenster werden Übereinstimmungsfaktoren (*Conformity Factors*, CF) gebildet, die sich aus dem Verhältnis der mittleren Emissionen jedes Fensters (in g/kWh) zu den gültigen Emissionsgrenzwerten für die Messungen im NRSC bzw. NRTC am Prüfstand errechnen. Beispielsweise entspricht ein CF von 1 für NO_x bei einem Abgasstufe-IV-

Traktor einem Emissionswert von 0,4 g NO_x/kWh. Für die Berechnung der spezifischen Emissionen in g/kWh ist nach der Gesetzgebung die Leistung an der Kurbelwelle aus Messungen am Motorenprüfstand heranzuziehen. Da diese Daten für den Rapsölkraftstoffbetrieb nicht vorliegen, wurde die Leistung an der Zapfwelle unter Volllast nach OECD Code 2 herangezogen. Aufgrund mechanischer Verluste und zusätzlicher Nebenaggregate im Antriebsstrang ist die Leistung, gemessen an der Zapfwelle, um etwa 20 % geringer und damit auch die spezifischen Emissionen entsprechend höher als an der Kurbelwelle [37]. Dieser Unterschied wird nicht korrigiert, d. h., bei den CF beziehen sich die Grenzwerte auf die Kurbelwellenarbeit und die Messwerte auf die Zapfwellenarbeit.

Ein Grenzwert für die RDE ist aktuell in der Gesetzgebung nicht definiert. Derzeit ist in der Diskussion, ob der Grenzwert aus der Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge (*Heavy-Duty Vehicles*, HDV) nach EU-Verordnungen 582/2011 bzw. 64/2012 auch in die Gesetzgebung für Non-Road-Fahrzeuge übernommen wird. In der HDV-Gesetzgebung gelten die Anforderungen für eine RDE-Messung als erfüllt, wenn 90 % der aus den Fenstern berechneten Übereinstimmungsfaktoren niedriger als CF = 1,5 sind.

Für jede Messung wird eine definierte Prüfdauer (PD) in der EU-Verordnung 2017/655 gefordert, wonach die Messung das Fünf- bis Siebenfache der CO₂-Referenzmasse aus dem NRTC enthalten muss. Zudem werden Messdaten mit sogenannten „Nicht-Betriebsereignissen“ (*Non-Working Events*) ausgeschlossen. Insbesondere länger andauernde Zeitabschnitte mit einer Motorleistung von weniger als 10 % der maximalen Nutzleistung des Motors werden als ungültig gekennzeichnet und bei der Auswertung nicht berücksichtigt. In der Software EMROAD 5.96 Build 3 wird daher für die Auswertung der Ausschluss von „Nicht-Betriebsereignissen“ aktiviert.

5.5 Leistungs- und Verbrauchsmessung auf den Versuchsbetrieben

Ergänzend zu den Prüfstanduntersuchungen am Technologie- und Förderzentrum werden die Zapfwellenleistung nach OECD Code 2 und der gravimetrische Kraftstoffverbrauch auf den Versuchsbetrieben vor Ort erhoben. Abbildung 24 zeigt exemplarisch den Aufbau der mobilen Leistungs- und Verbrauchsmessungen.

Die Zapfwellenleistung wird über eine Wirbelstrombremse (EGGERS PT 301 MES, max. 340 kW, Auflösung 0,1 kW) und der Kraftstoffverbrauch gravimetrisch bestimmt (siehe Kapitel 5.3.1). Diese Kenngrößen werden zusammen mit den traktorspezifisch verfügbaren CAN-BUS-Daten nach SAE J1939 in einer mobilen Datenerfassung verarbeitet.



Abbildung 24: Prüfaufbau der Leistungs- und Verbrauchsmessung an den Traktoren JD-N und DE-N an der Versuchsstation Straßmoos

6 Ergebnisse und Diskussion

Die Pflanzenöltraktoren wurden im Feldbetrieb auf den Versuchsgütern und am Traktorenprüfstand untersucht. Die erzielten Ergebnisse sind im Folgenden aufgeführt.

6.1 Feldtest

In den folgenden Unterkapiteln werden die Einsatzbedingungen und die Qualität sowie der Verbrauch von Betriebsstoffen der Traktoren aufgezeigt. Weiterhin werden Störungen und Reparaturen der Pflanzenöltraktoren aufgeführt.

6.1.1 Einsatzbedingungen

6.1.1.1 Betriebsstunden

Abbildung 25 zeigt die geleisteten Betriebsstunden der Traktoren in den Jahren 2015, 2016 und 2017 sowie die Gesamtlaufzeit.

Unter Annahme einer theoretischen Betriebsdauer von ca. 10.000 Bh [42] haben die Pflanzenöltraktoren der Abgasstufen I und II 76 % bzw. 60 %, die der Abgasstufe IIIA zwischen 9 % und 64 %, die der Abgasstufe IIIB 5 % bis 23 % und die Traktoren der Abgasstufe IV 15 % bzw. 24 % ihrer theoretischen Lebensdauer erreicht.

Im Mittel absolvierten die Traktoren 411 Bh pro Feldtestjahr. Die Spannweite der Einsatzdauer der einzelnen Traktoren ist mit rund 115 bis 814 Bh im Jahr 2015, 130 bis 768 Bh im Jahr 2016 und 81 bis 754 Bh im Jahr 2017 groß. Im Juli 2015 wurden die Traktoren JD6R-B und FE-S, im Juni 2016 der Traktor JD-Pu und im Juli 2017 der Traktor JD-Ka in das Projekt aufgenommen. Diese Traktoren weisen daher entsprechend weniger Betriebsstunden auf.

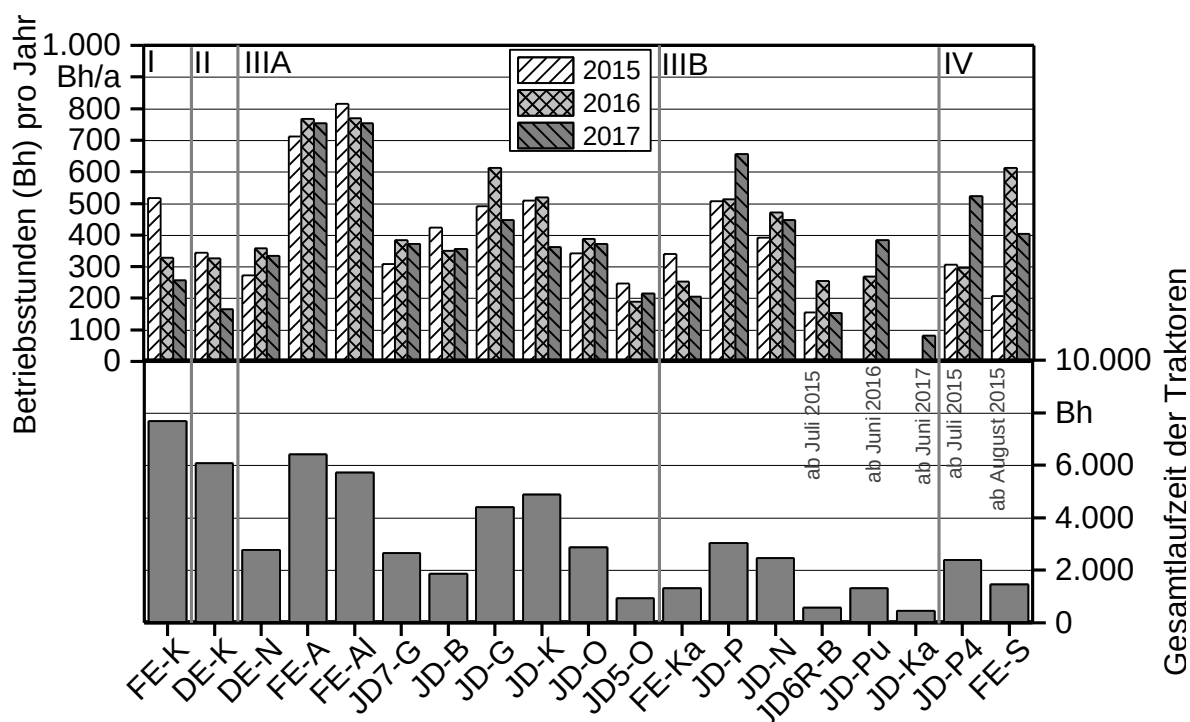


Abbildung 25: Betriebsstunden der Rapsöltraktoren der Abgasstufen I bis IV in den Feldtestjahren 2015 bis 2017 sowie Gesamtlaufzeit der Traktoren

6.1.1.2 Betriebsstoffeinsatz

In Tabelle 24, Tabelle 25 und Tabelle 26 ist der Einsatz von Betriebsmitteln in den Feldtestjahren 2015, 2016 und 2017 dargestellt. Der Durchschnittskraftstoffverbrauch über alle Traktoren in den drei Jahren lag bei ca. 13,3 l/h bei einem mittleren Pflanzenölanteil von 83 %.

Die Traktoren JD-B, JD-O, JD5-O JD-G, JD7-G, JD-N, JD6R-B, JD-P, JD-Pu, JD-Ka und JD-P4 mit einem Ein-Tank-System wurden ausschließlich mit Pflanzenöl betrieben. Die mit einem Zwei-Tank-System ausgestatteten Traktoren (FE-Al, FE-A, FE-Ka, FE-S) wiesen im Mittel einen Dieselmkraftstoffanteil am Gesamtverbrauch von 20 % (2015), 23 % (2016) und 26 % (2017) auf. RATHBAUER et al. (2008) [49] stellten im Mittel einen Dieselmanteil von 19 % bei einer Spannweite von 8 bis 33 % bei Zwei-Tank-Systemen fest.

Der in 2015 leicht erhöhte Dieselmanteil des Traktors FE-Ka von 24 % im Vergleich zum Jahr 2016 und 2017 mit 13 % bzw. 11 % wurde durch Messungen am Traktorenprüfstand mit Dieselmkraftstoff verursacht (siehe Abschnitt 6.3.2).

Beim Traktor FE-Al gab es im Juni 2016 bei 4.388 Bh Störungen im Niederdruckkraftstoffsystem, wodurch nur ein Betrieb mit Dieselmkraftstoff möglich war (siehe Abschnitt 6.1.4). Im Juni 2016 sank aufgrund des Defekts der Rapsölkraftstoffanteil auf 40 % des Kraftstoffeinsatzes. In den Folgemonaten nach der Reparatur stieg der Rapsölkraftstoffanteil wieder auf ein Niveau von 78 bis 91 % am Gesamtverbrauch an.

Tabelle 24: *Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen und THG-Einsparung in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äq) im Feldtestjahr 2015*

Traktor	Pflanzenöl in l	Diesel in l	Pflanzenöl- anteil in %	Kraftstoff- verbrauch in l/h ¹⁾	Harnstoff- verbrauch in l/h	CO ₂ -Äq Einsparung in kg
FE-K	2.412	1.104	69	6,81	–	5.579
DE-K	4.526	1.506	75	12,68	–	10.468
DE-N	4.202	918	82	18,78	–	9.718
FE-A	6.703	1.622	81	11,69	–	15.503
FE-AI	9.522	3.025	76	15,41	–	22.023
JD7-G	6.776	–	100	22,00	–	15.672
JD-B	4.799	–	100	11,33	–	11.100
JD-G	5.712	–	100	11,63	–	13.211
JD-K	2.110	2.520	46	9,09	–	4.880
JD-O	3.960	118	97	11,96	–	9.159
JD5-O	1.595	47	97	6,67	–	3.689
FE-Ka	3.998	1.292	76	15,55	0,81	9.247
JD-P	7.484	–	100	14,74	–	17.310
JD-N	4.544	–	100	11,61	–	10.510
JD6R-B	1.390	–	100	8,96	–	3.215
JD-P4	4.828	–	100	15,80	0,16	11.167
FE-S	2.584	778	77	16,25	1,13	5.975

¹⁾ Bezogen auf Pflanzenöl- und Dieselmotorkraftstoff

Einen hohen Dieselanteil wiesen in den Jahren 2015 und 2017 die Traktoren in Kringell (FE-K, DE-K und JD-K) auf, da es häufiger zu betriebsinternen Beschaffungseingängen mit Pflanzenölkraftstoff kam und infolgedessen Dieselmotorkraftstoff eingesetzt wurde. Ein technischer Defekt lag bei den Traktoren nicht vor.

Auch der Traktor FE-A wurde ab August 2017 nur noch mit Dieselmotorkraftstoff betrieben, was einen Dieselanteil von 64 % zur Folge hatte. Nach Aussage des Betreibers lag kein technischer Defekt vor. Der Dieselmotorkraftstoff wurde aufgrund des geringeren Einkaufspreises im Vergleich zum Rapsölkraftstoff bevorzugt.

Tabelle 25: Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen und THG-Einsparung in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äq) im Feldtestjahr 2016

Traktor	Pflanzenöl in l	Diesel in l	Pflanzenöl- anteil in %	Kraftstoff- verbrauch in l/h ¹⁾	Harnstoff- verbrauch in l/h	CO ₂ -Äq Einsparung in kg
FE-K	2.040	161	93	6,72	–	4.719
DE-K	3.782	884	81	14,28	–	8.746
DE-N	4.600	1.309	78	16,52	–	10.639
FE-A	4.769	2.997	61	10,11	–	11.030
FE-AI	7.587	2.738	73	13,43	–	17.548
JD7-G	7.889	405	95	21,60	–	18.247
JD-B	3.948	–	100	11,31	–	9.130
JD-G	6.670	459	94	11,63	–	15.427
JD-K	5.462	1.125	83	12,71	–	12.633
JD-O	3.937	401	91	11,19	–	9.106
JD5-O	1.156	100	92	5,70	–	2.674
FE-Ka	3.675	477	89	16,48	1,12	8.500
JD-P	7.863	–	100	15,34	–	18.185
JD-N	3.931	–	100	8,34	–	9.093
JD6R-B	1.869	75	96	7,62	–	4.323
JD-Pu	1.604	10	99	6,00	–	3.710
JD-P4	4.031	–	100	13,60	0,11	9.323
FE-S	5.607	1.111	83	10,98	0,40	12.967

¹⁾ Bezogen auf Pflanzenöl- und Dieselmotorkraftstoff

Tabelle 26: *Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen und THG-Einsparung in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äq) im Feldtestjahr 2017*

Traktor	Pflanzenöl in l	Diesel in l	Pflanzenöl- anteil in %	Kraftstoff- verbrauch in l/h ¹⁾	Harnstoff- verbrauch in l/h	CO ₂ -Äq Einsparung in kg
FE-K	921	420	69	5,25	–	2.130
DE-K	1162	589	66	10,64	–	2.687
DE-N	5.125	1.000	84	17,71	–	11.855
FE-A	3.831	6.829	36	14,14	–	8.861
FE-AI	7.370	2.636	74	13,29	–	17.045
JD7-G	8.446	–	100	22,64	–	19.535
JD-B	4.438	–	100	12,44	–	10.265
JD-G	4.399	–	100	9,84	–	10.174
JD-K	2.553	1.002	72	9,85	–	5.906
JD-O	4.327	–	100	11,55	–	10.008
JD5-O	1.567	97	94	7,76	–	3.624
FE-Ka	2.843	466	86	16,10	1,37	6.576
JD-P	8.689	–	100	13,24	–	20.097
JD-N	4.149	–	100	9,16	–	9.597
JD6R-B	905	–	100	5,79	–	2.093
JD-Pu	2.154	–	100	5,61	–	4.982
JD-Ka	581	–	100	6,99	–	1.344
JD-P4	8.478	–	100	16,24	–	19.608
FE-S	4.856	544	90	13,39	1,30	11.231

¹⁾ Bezogen auf Pflanzenöl- und Dieselmotorkraftstoff

Die Traktorenflotte hat durch die Nutzung von Rapsölkraftstoff jedes Jahr in Summe knapp über 180.000 kg CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq) Treibhausgasemissionen eingespart. Als Berechnungsgrundlage dienten regionalspezifische Daten zu den Treibhausgasemissionen bei Anwendung der Substitutionsmethode von 7,54 g CO₂-Äq MJ⁻¹ Rapsölkraftstoff nach DRESSLER et al. (2016) [14] und von 83,80 g CO₂-Äq MJ⁻¹ Dieselmotorkraftstoff nach Richtlinie 2009/28/EG [26].

6.1.1.3 Startverhalten

Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen das Startverhalten der Pflanzenöltraktoren in den Jahren 2015 bis 2017. Das Startverhalten der Pflanzenöltraktoren wurde überwiegend mit der besten Bewertungsangabe „gut“ bewertet. Die Anzahl der Startvorgänge, die mit „kein Start“ möglich oder „schlecht“ bewertet wurden, war über die Jahre rückläufig.

So zeigte sich ein beständiger Rückgang des Anteils „schlechter Start“ an allen Startvorgängen von 6,2 % im Jahr 2015 auf 3,9 % im Jahr 2016 bzw. auf 2,1 % im Jahr 2017. Während in den Jahren 2015 und 2016 vereinzelt kein Motorstart möglich war, war im Jahr 2017 immer ein Motorstart möglich. Oftmals konnte der Grund für die negativen Bewertungen des Startverhaltens ermittelt und behoben werden (siehe auch Abschnitt 6.1.4).

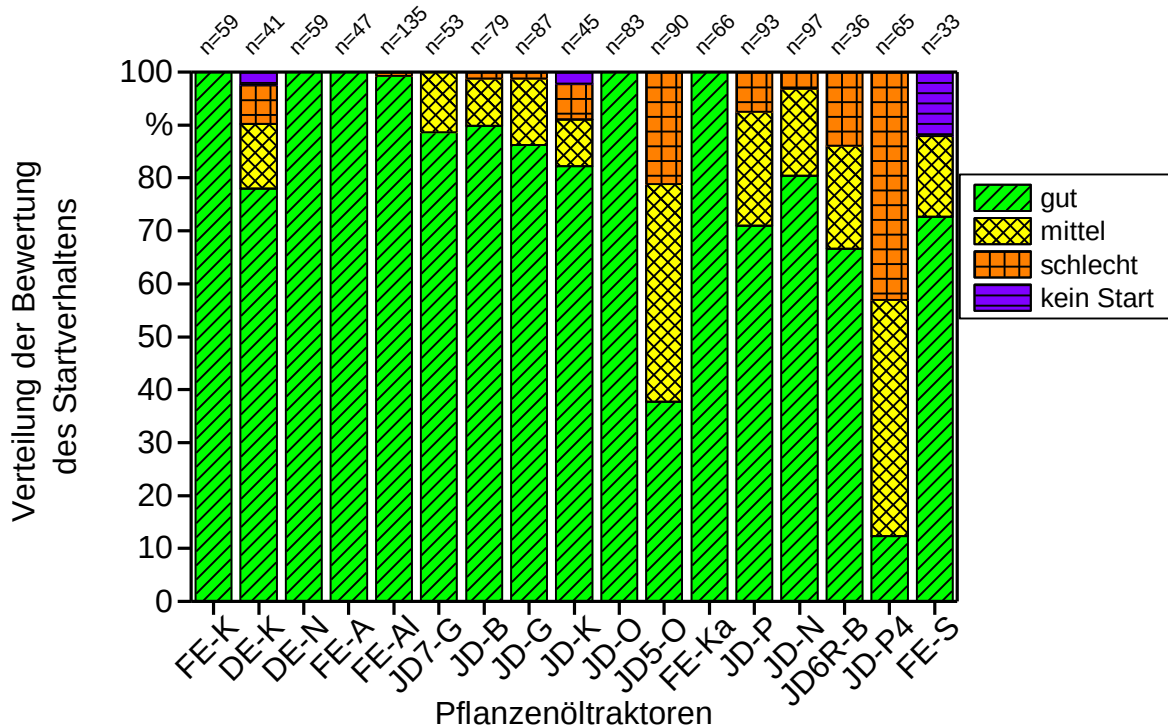


Abbildung 26: Startverhalten der Pflanzenöltraktoren im Feldtestjahr 2015

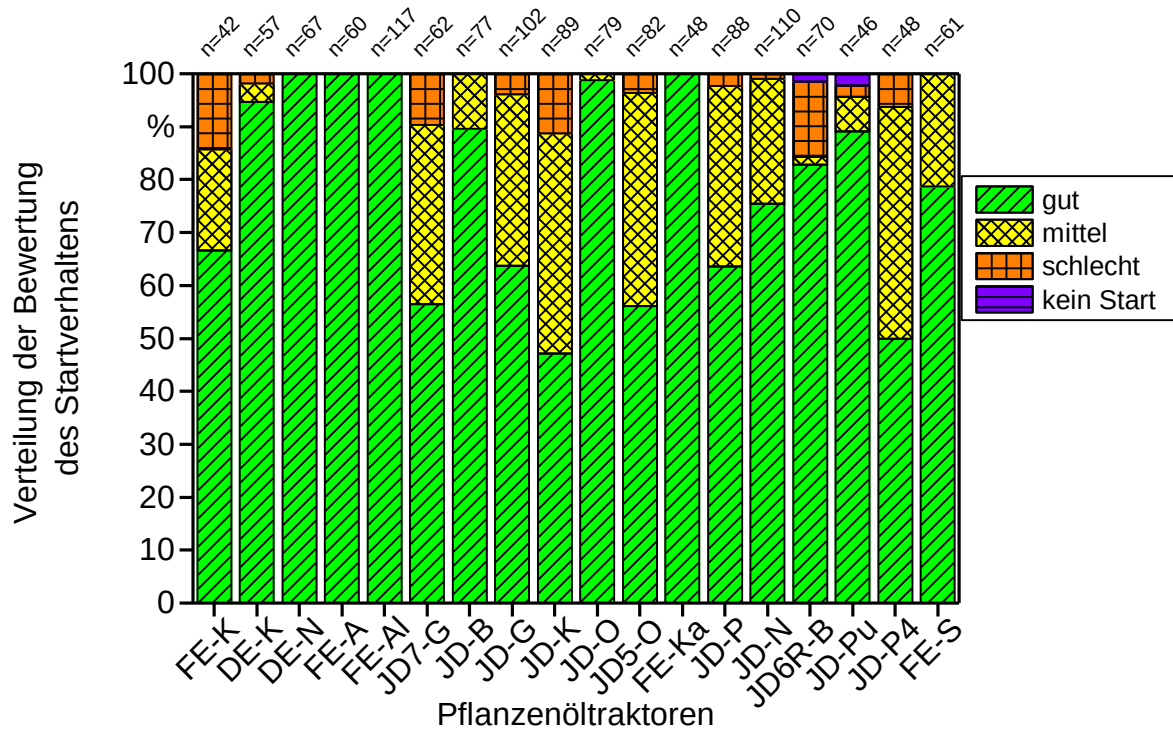


Abbildung 27: Startverhalten der Pflanzenöltraktoren im Feldtestjahr 2016

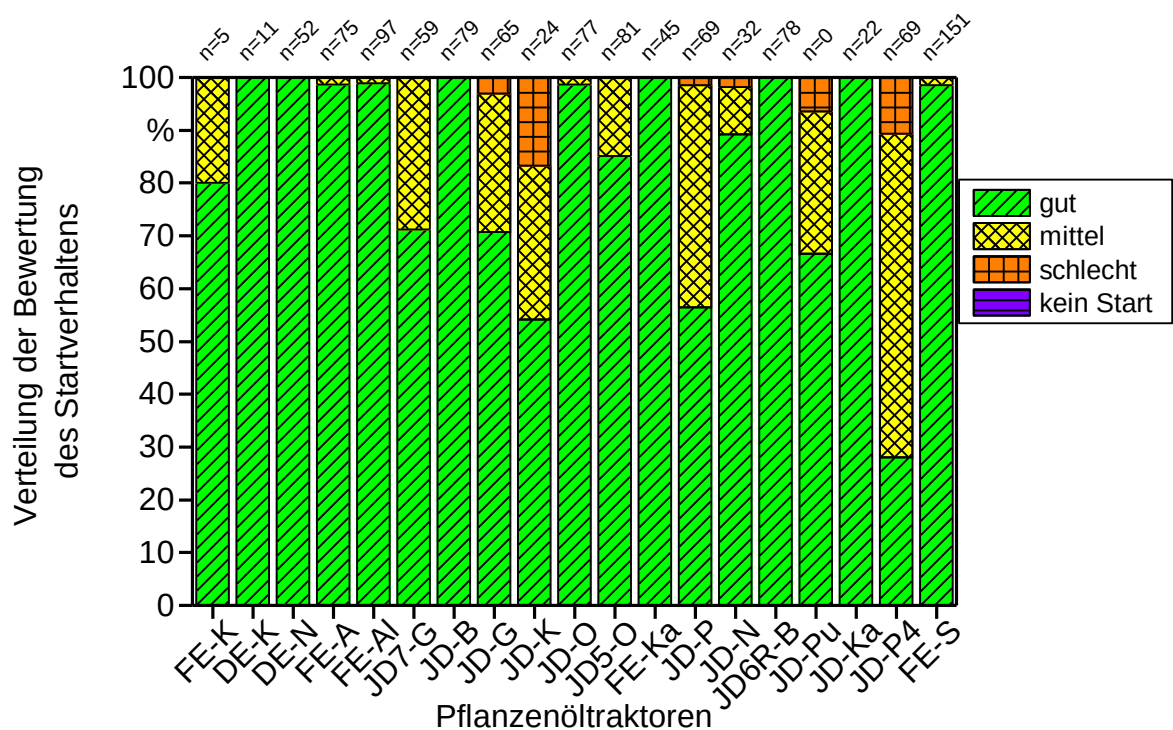


Abbildung 28: Startverhalten der Pflanzenöltraktoren im Feldtestjahr 2017

Durchweg positive Resultate waren erwartungsgemäß bei den Traktoren mit Zwei-Tank-System (DE-N, FE-A, FE-Ka und FE-Al) zu beobachten. Der Traktor FE-S startete bereits vor der Umrüstung auf den Pflanzenölbetrieb mit leichter Verzögerung z. B. im Vergleich zum Traktor FE-Ka. Nach Aussage der Servicewerkstatt liegt hier keine Störung vor. Ein defektes Umschaltventil beim Traktor FE-S führte im Jahr 2015 zu einer schlechteren Bewertung.

Auch die Traktoren JD7-G, JD-B, JD-O und JD-G mit einem Ein-Tank-System konnten überwiegend problemlos über die gesamte jährliche Nutzungsdauer mit Pflanzenöl gestartet werden. Bei den Traktoren DE-K, JD-K, JD-P, JD-4 und JD-N wurde das Startverhalten des Motors häufiger auch als „mittel“ und „schlecht“ eingestuft, d. h., es waren teils zwei Startversuche erforderlich. Beim Traktor DE-K verbesserte sich nach dem Austausch einer defekten Kraftstoffpumpe das Startverhalten im Jahr 2015.

Die etwas schlechtere Bewertung des Startverhaltens des Traktors JD-K im Vergleich zum fast baugleichen Traktor JD-G ist möglicherweise auf die im Mittel niedrigeren Umgebungstemperaturen auf dem Versuchsbetrieb in Kringell zurückzuführen. Zudem war für kurze Zeit die Vorwärmeinrichtung der Injektoren aufgrund einer defekten Sicherung außer Betrieb (siehe Abschnitt 6.1.4). Der Motor wurde daher mit nicht vorgewärmten Injektoren gestartet, was das schlechtere Startverhalten erklärt.

Das Startverhalten der Traktoren JD-N, JD-P4, JD6R-B und JD-P wurde in den Jahren 2015 und 2016 im Durchschnitt am schlechtesten bewertet, wenngleich ein Start der Traktoren fast immer möglich war. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei zum Teil um Prototyptraktoren handelt. Wird der Motorblock bzw. das Kühlwasser über eine an der Netzsteckdose angeschlossene Heizung vorgewärmt, ist ein Start auch bei tiefen Temperaturen ohne Verzögerung möglich. Der Hersteller hat hier durch Optimierungen im Niederdruckkraftstoffsystem und der Motorsteuergerätesoftware eine Verbesserung des Startverhaltens im Jahr 2017 erzielt.

Im Jahr 2015 wiesen die Traktoren JD5-O und JD-P4 einen geringen Anteil an „gut“ bewerteten Startvorgängen von 37 % und 12 % auf. In den Jahren 2016 sowie 2017 verbesserte sich das Startverhalten und der Anteil der mit „gut“ bewerteten Startvorgänge stieg beim Traktor JD5-O auf 55 % bzw. 85 % und beim Traktor JD-P4 auf 62 % bzw. 30 % aufgrund der Änderung der Motorsteuerungssoftware durch den Hersteller. Ferner führte ein Softwareupdate am Traktor JD-P zu einem verbesserten Startverhalten in den Jahren 2015, 2016 und 2017 im Vergleich zum Feldtestjahr 2014, wie Abbildung 29 zeigt. Das durchgehend gut bewertete Startverhalten des JD-P zwischen Oktober 2015 und Mai 2016 wird auf die Verwendung der Kühlwasserheizung zurückgeführt.

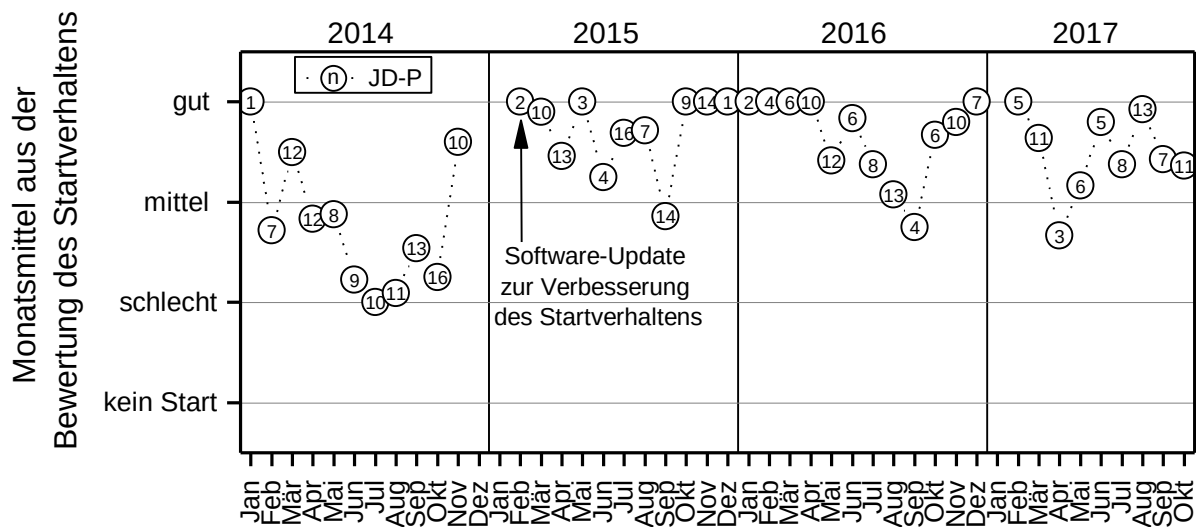


Abbildung 29: Bewertung des Startverhaltens des Pflanzenöltraktors JD-P in den Feldtestjahren 2014 bis 2017

Das Startverhalten mit Rapsölkraftstoff konnte somit vor allem bei den Traktoren mit Ein-Tank-System durch Verbesserungen im Niederdruckkraftstoffsystm und durch die Anpassung der Glühkerzenansteuerzeit und der Einspritzparameter in der Motorsteuerungssoftware verbessert werden. So wurden die Startvorgänge des Traktors JD-Ka mit dem aktuellsten Stand der Pflanzenöltechnik des Herstellers ausschließlich „gut“ bewertet. Dies bestätigten die Betreiber bei einer Befragung zum Abschluss des Forschungsprojekts.

6.1.1.4 Einsatzprofil und Arbeiten

Die Verteilung der durchgeführten landwirtschaftlichen Arbeiten der Traktoren in den Jahren 2015 bis 2017 ist in Abbildung 30 dargestellt. Es zeigt sich, dass die 6-Zylinder- und 4-Zylinder-Traktoren für unterschiedliche Einsatzzwecke verwendet werden. Die 6-Zylinder-Traktoren werden überwiegend zum Transport oder zur Bodenbearbeitung und -bestellung eingesetzt. Die 4-Zylinder-Traktoren FE-K, JD-N, JD5-O, JD6R-B, JD-Ka und JD-Pu weisen einen höheren Anteil an sonstigen Arbeiten sowie Arbeiten mit dem Mähwerk, Frontlader, Schwader und Wender auf. Der Anteil der Bodenbearbeitung an der Gesamteinsatzzeit liegt meist deutlich unter 25 %.

Im Mittel über alle dokumentierten Arbeiten treten der Straßentransport mit 24 %, das Pflügen mit 16 %, das Grubbern mit 15 % und die Gülleausbringung mit rund 13 % am häufigsten auf.

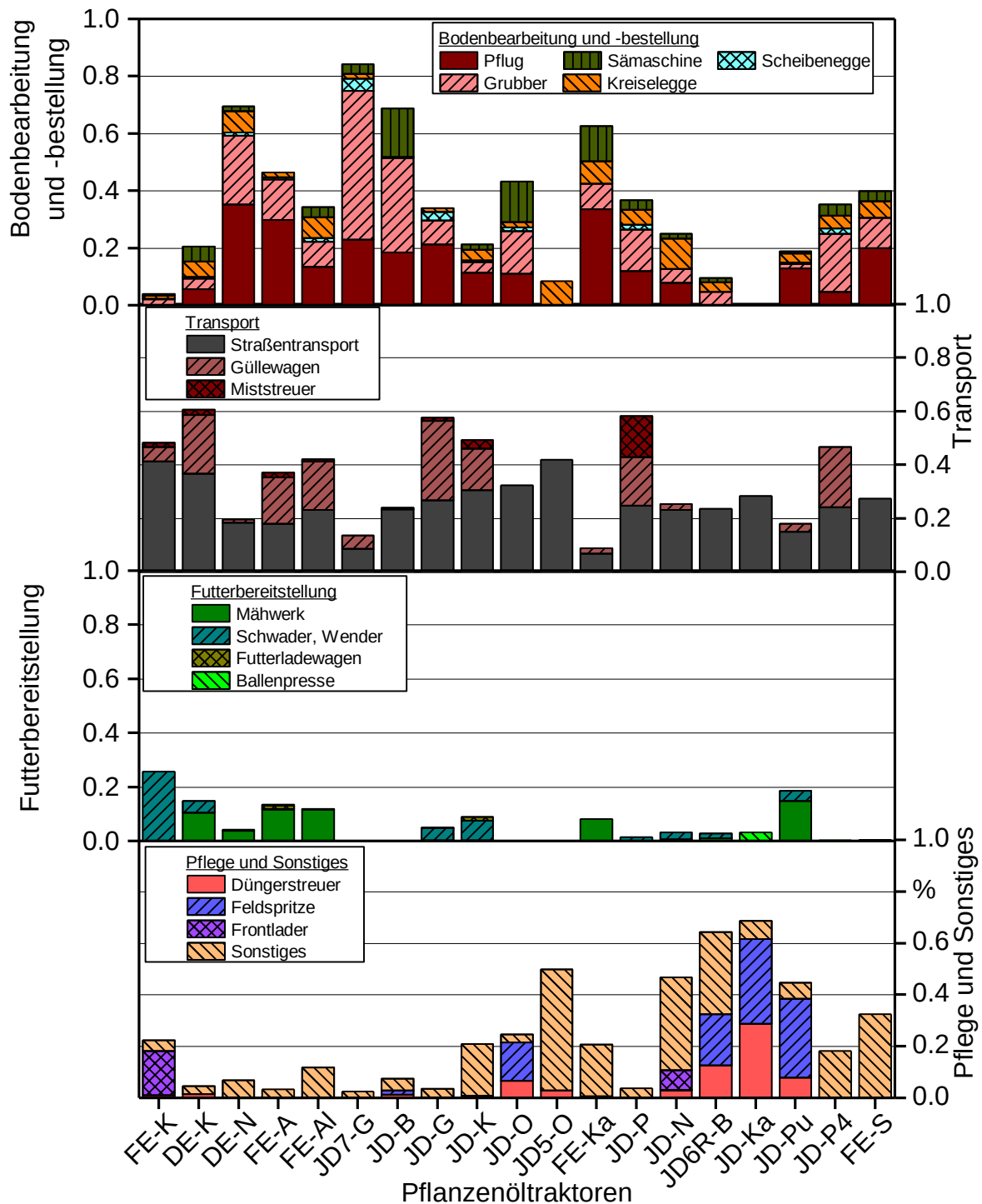


Abbildung 30: Einsatzhäufigkeit der Rapsöltraktoren für Bodenbearbeitung und Bodenbestellung, Transport, Futterbereitstellung, Pflege und Sonstiges in den Jahren 2015 bis 2017

Bei den Traktoren FE-K, DE-K, FE-A, FE-AI, JD-G, JD-K, JD5-O, JD-P und JD-P4 haben die Arbeiten Straßentransport und Gülleausbringung gemeinsam einen Anteil von über

35 %. Unterschiedliche Anhängelasten, Streckenführungen sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge lassen auf überwiegend dynamische Motorbelastung schließen.

Pflügen und Grubbern nehmen ebenso einen sehr hohen Anteil aller durchgeführten Arbeiten ein. Bei den Traktoren DE-N, FE-A, JD7-G, FE-Ka, JD-B, JD-P und JD-P4 liegt der Anteil von Grubbern und Pflügen über 30 %. Beim Grubbern und Pflügen wird die Leistung des Motors überwiegend über den Fahrantrieb durch das Ziehen des Arbeitsgeräts bei stationärer Drehzahl und hoher Last abgerufen. Kurze dynamische Lastphasen sind nur im Vorgewende und bei stark wechselnden Bodenbeschaffenheiten zu erwarten. Der Anteil von Arbeiten, bei denen die Zapfwelle häufig genutzt wird, ist mit 11 % vergleichsweise gering. Die Zapfwelle wird bei den Arbeiten Mähen, Schwaden, Wenden, Saatbettbereitung mit der Kreiselegge und Ballen pressen benötigt.

Der Anteil an Pflegearbeiten und sonstigen Arbeiten ist bei den geringer motorisierten 4-Zylinder-Rapsöltraktoren meist höher als bei den 6-Zylinder-Traktoren. Unter sonstige Arbeiten fallen auch die umfangreichen Prüfstandmessungen am Traktorenprüfstand des TFZ, wie z. B. bei den Traktoren FE-Ka und FE-S. Der Traktor JD5-O leistete viele „sonstige Arbeiten“, z. B. mit dem Mulcher, dem Schneckenkornstreuer, der Güllepumpe und der Walze.

6.1.1.5 Funktion der Abgasnachbehandlung

Pflanzenöltraktoren mit SCR-System

In Abbildung 31, Abbildung 32 und Abbildung 33 sind die Einsatzbedingungen sowie der Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch der Traktoren FE-Ka, FE-S und JD-P4, die mit einem SCR-System zur NO_x-Minderung ausgestattet sind, monatsweise dargestellt. Bei allen Traktoren war durchgängig ein Verbrauch an Harnstoff festzustellen, was auf ein funktionierendes SCR-System hindeutet.

Der mittlere Harnstoffverbrauch des Traktors FE-Ka schwankt in den Jahren 2015 bis 2017 zwischen 0,81 l/h und 1,37 l/h, was zwischen 5,2 Vol.-% und 8,5 Vol.-% Harnstofflösung bezogen auf die eingesetzte Kraftstoffmenge entspricht. Die Spannweite im Verbrauch kann auf das Einsatzprofil des Traktors zugeführt werden. Mit höherer Last des Motors steigt in der Regel wegen der höheren Verbrennungstemperaturen auch die NO_x-Konzentration im Rohabgas. Die aktive Anpassung der Harnstoffdosierung mithilfe des NO_x-Sensors scheint somit im Feldtest mit Rapsölkraftstoff problemlos zu funktionieren. Die Auslegung des SCR-Systems und damit auch die hinzudosierte Harnstoffmenge richten sich nach der Abgasstufe des Traktors sowie weiteren Emissionsminderungsmaßnahmen an der Maschine.

Auch beim Traktor FE-S zeigt sich in den Jahren 2015 bis 2017 ein schwankender Harnstoffverbrauch von 0,4 bis 1,3 l/h bzw. 3,6 bis 9,7 Vol.-% bezogen auf die eingesetzte Kraftstoffmenge. Trotz strengerer Anforderungen der Abgasstufe IV (hinsichtlich der NO_x-Emissionen) ist der Harnstoffverbrauch mit 6,5 Vol.-% bezogen auf die eingesetzte Kraftstoffmenge im Mittel über alle drei Einsatzjahre vergleichbar mit dem Traktor FE-Ka (6,6 Vol.-%). Der Traktor FE-S verfügt im Gegensatz zum Traktor FE-Ka neben dem

SCR-System über eine Abgasrückführung zur NO_x-Minderung. Zudem wurde der Traktor zu einem hohen Anteil auch bei sonstigen Arbeiten mit einer niedrigen Motorlast, z. B. zum Häckseln von Parzellenversuchen, eingesetzt. Beides kann zur Verringerung des Verbrauchs an Harnstofflösung beitragen.

Einen noch geringeren Harnstoffverbrauch, zwischen 1 und 2 Vol.-% der getankten Rapsölkraftstoffmenge, hatte der Prototyptraktor JD-P4 in den Einsatzjahren 2015 und 2016. Bei diesem Traktor werden wie beim Traktor FE-S zur NO_x-Reduzierung neben dem SCR-System auch hohe Abgasrückführraten genutzt. Im Feldtestjahr 2017 wurde das nachträglich am Traktor installierte System durch den Hersteller der Abgasnachbehandlung deaktiviert, sodass keine Harnstofflösung mehr verbraucht wurde.

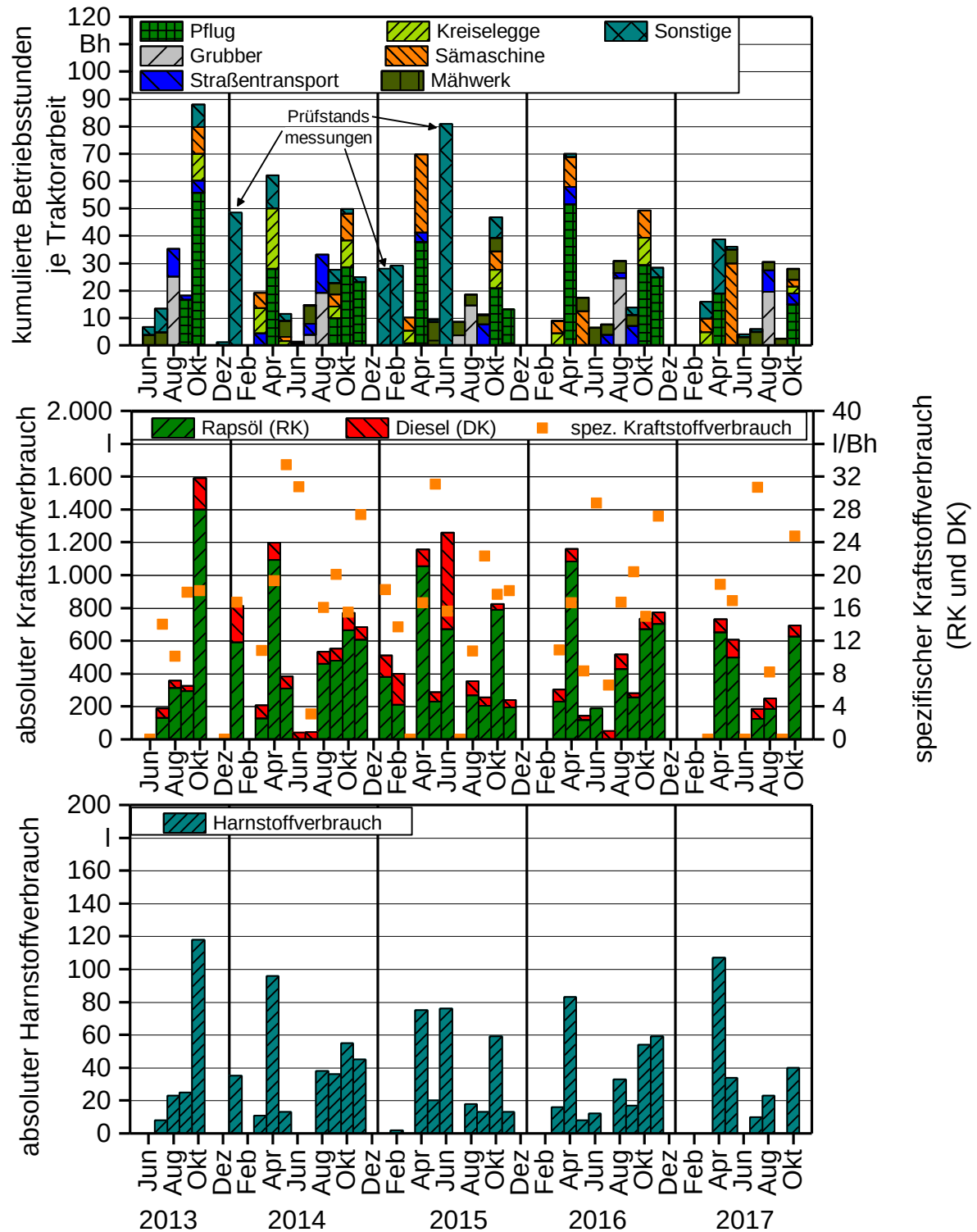


Abbildung 31: Durchgeführte Arbeiten, absoluter und relativer Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch des Traktors FE-Ka

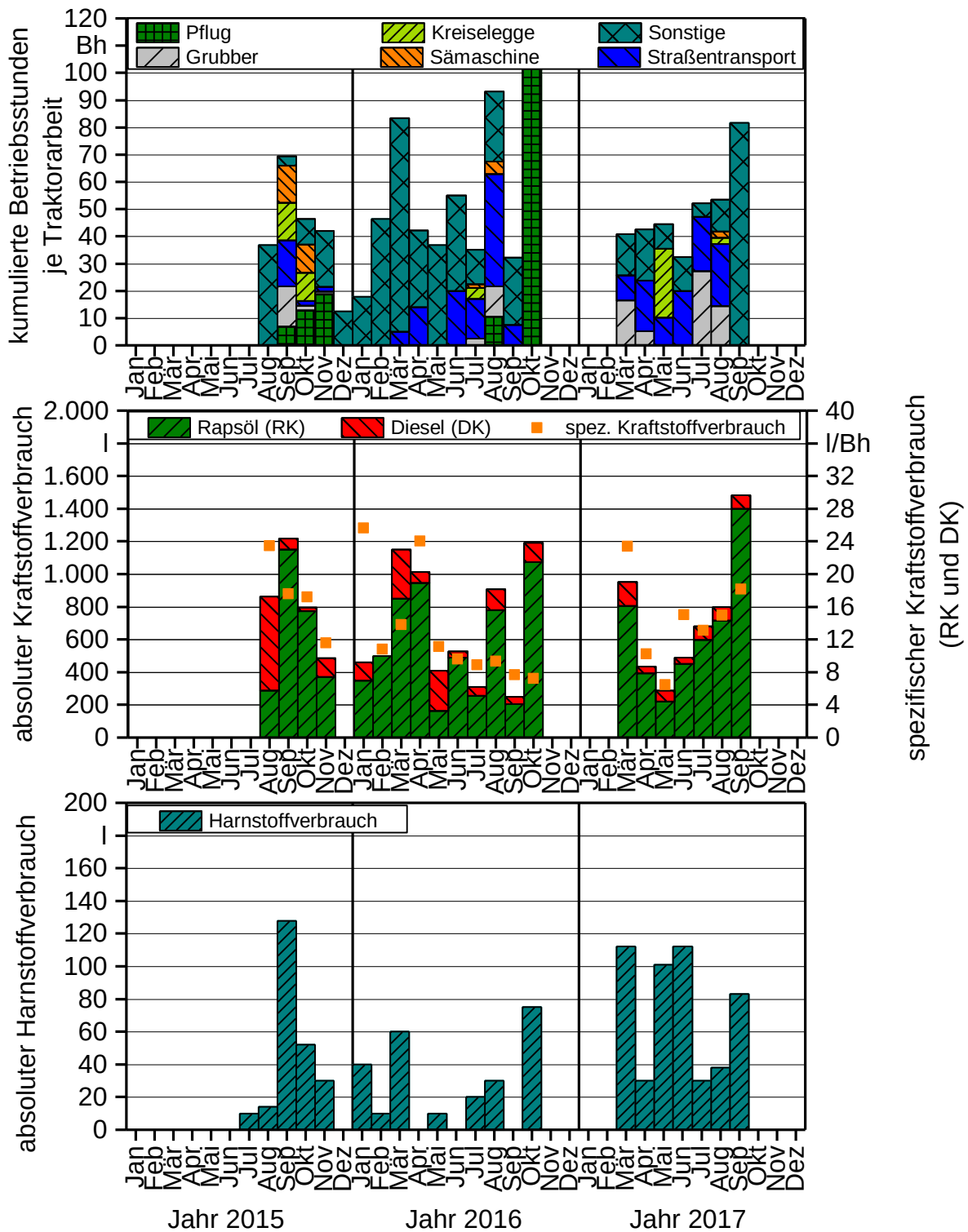


Abbildung 32: Durchgeführte Arbeiten, absoluter und relativer Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch des Traktors FE-S

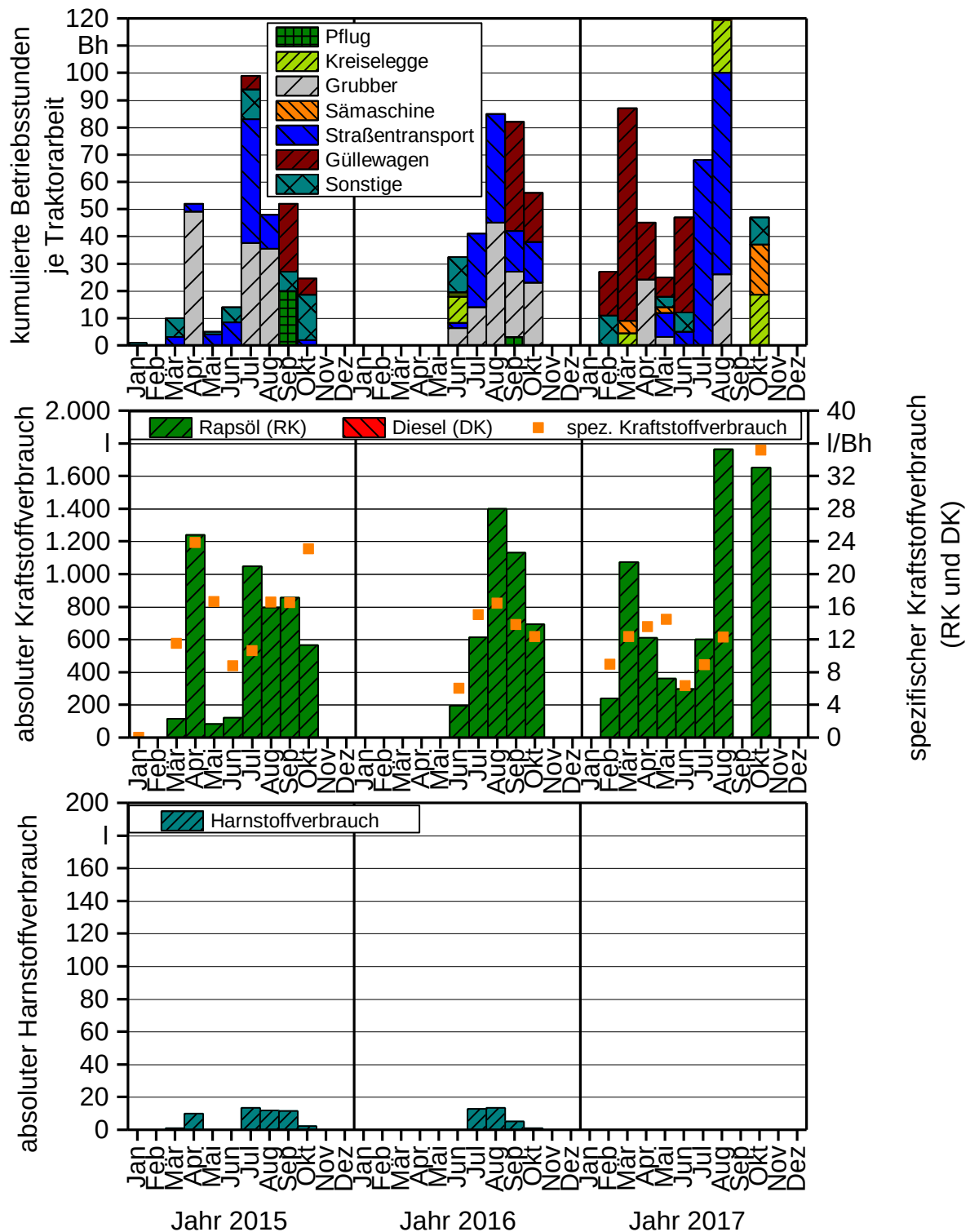


Abbildung 33: Durchgeführte Arbeiten, absoluter und relativer Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch des Traktors JD-P4

Pflanzenöltraktoren mit Partikelfilter

Sechs John-Deere-Traktoren (JD-N, JD6R-B, JD-Pu, JD-Ka, JD-P und JD-P4) der Abgasstufen IIIB und IV sind mit einem beschichteten Partikelfilter ausgestattet. Bei den Traktoren wurde die Kraftstoffeinspritzung in den Abgasstrang vor dem Oxidationskata-

lysator für die aktive Regeneration des Partikelfilters deaktiviert. Stattdessen soll allein durch passive Regeneration ein Fließgleichgewicht von abgeschiedener und oxidierender Pflanzenölrückmenge im Partikelfilter erreicht werden. Die untersuchten Traktoren zeigen bisher keine Beeinträchtigungen durch die passive Regeneration des Partikelfilters. Beim Traktor JD-N deutet ein konstantes Leistungsverhalten bei den Messungen vor Ort auf keine übermäßige Beladung des Partikelfilters hin (siehe Abschnitt 6.2.5). Die elektronische Aufzeichnung des Differenzdrucks am Partikelfilter des Traktor JD-P soll Aufschluss über den Beladungszustand des Partikelfilters geben. Um Veränderungen des Differenzdrucks über die Laufzeit festzustellen, wurden Lastpunkte ausgewertet, bei denen die Drehzahl zwischen 1.700 min^{-1} und 2.100 min^{-1} und die Motorlast zwischen 70 % und 100 % liegt. Dadurch konnte die Lastabhängigkeit des Abgasvolumenstroms und damit des Differenzdrucks weitgehend eingeschränkt werden. Abbildung 34 zeigt, dass der Differenzdruck innerhalb des Zeitraums von ca. 1.500 h geringfügig zunimmt. Allerdings ist mehrfach nach leichtem Anstieg auch wieder ein Rückgang auf das ursprüngliche Niveau zu verzeichnen, sodass die weitere Entwicklung abzuwarten bleibt.

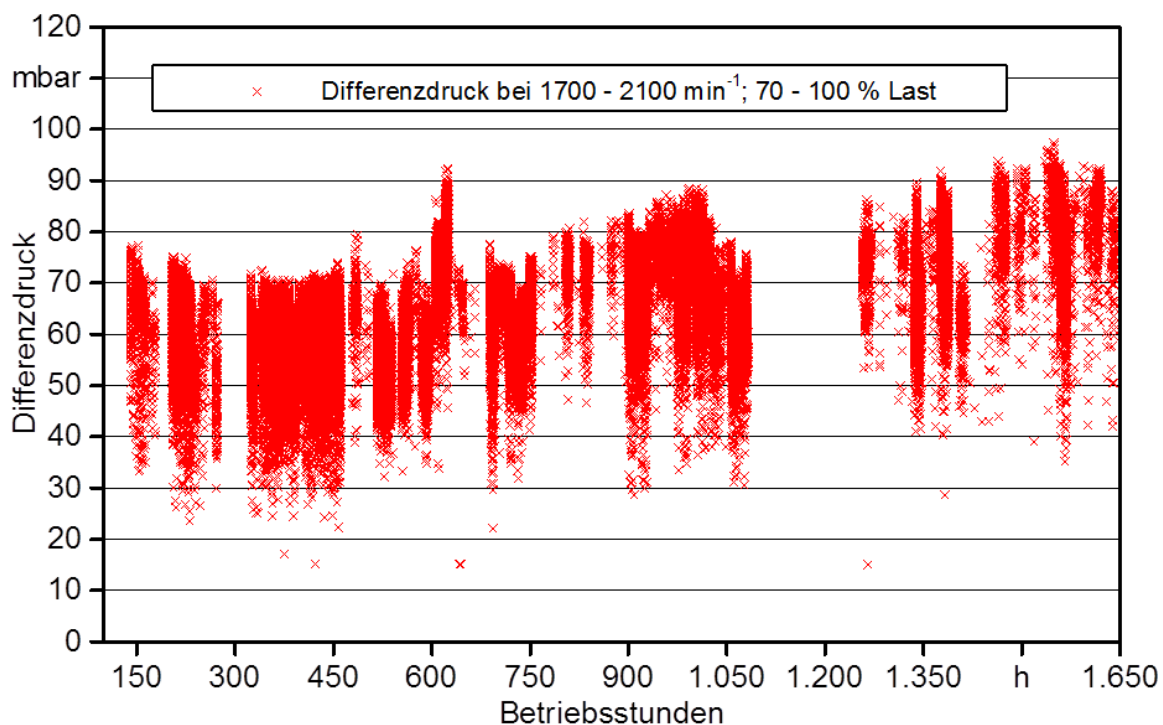


Abbildung 34: Differenzdruck des Dieselpartikelfilters des Traktors JD-P bei 70–100 % Last und einem Drehzahlbereich $1.700\text{--}2.100 \text{ min}^{-1}$ über 1.500 Bh

Der Differenzdruck bewegt sich in einem Bereich von ca. 40 bis 95 mbar. Erst ein Abgasgegendruck über 200 bis 300 mbar wird als problematisch für die Verbrennung im Motor erachtet [60]. Dies bedeutet, dass die rein passive Partikelfilterregeneration bisher funktioniert und sich der von DÜSSELDORF (2015) [13] am Motorenprüfstand nachgewiesene Gleichgewichtszustand des Partikelfilters auch in der Praxis einstellt. Die aktive Regenerierung des Partikelfilters erscheint bei diesem Motorsystem somit beim Einsatz

von Rapsölkraftstoff nicht notwendig und es entsteht dadurch kein zusätzlicher Kraftstoffverbrauch. Durch die kontinuierliche Ablagerung von Aschen im Partikelfilter ist jedoch langfristig, wie auch im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff, eine Zunahme des Differenzdrucks zu erwarten. Die Traktoren JD-N, JD6R-B, JD-Pu, JD-Ka, JD-P und JD-P4 leisteten in Summe ca. 10.370 Bh im Pflanzenölbetrieb ohne Störungen in Bezug auf den Partikelfilter.

Auch der Traktor FE-S ist in Serie mit einem beschichteten Partikelfilter ausgestattet, der sich im laufenden Betrieb passiv regenerieren soll und vom Hersteller als wartungsfrei bezeichnet wird. Wird der Traktor häufig bei niedriger Last betrieben, ist eine sogenannte Stillstandsregeneration durchzuführen, die ca. zwanzig bis dreißig Minuten andauert, im Leerlauf bei stehendem Fahrzeug mit Dieselmotorkraftstoff erfolgt und vom Fahrer aktiviert werden muss. Dabei wird die Temperatur des Abgases durch Kraftstoffnacheinspritzung deutlich angehoben, um die Abgasnachbehandlung von Ruß und Ablagerungen der Harnstofflösung zu befreien. Die Regeneration erfolgte bisher bei 348 Bh am 02.10.2015, bei 796 Bh am 12.08.2016, bei 803 Bh am 17.08.2016, bei 855 Bh am 06.09.2016, bei 925 Bh am 27.10.2016, bei 1.010 Bh am 10.02.2017, bei 1.142 Bh am 12.05.2017, bei 1.312 Bh am 06.09.2017 und bei 1.375 Bh am 22.09.2017. Nach Aussage der Servicewerkstatt ist die Häufigkeit der Stillstandsregenerationen auch im Dieselmotorbetrieb üblich, wenn im regulären Fahrbetrieb nicht dauerhaft ausreichend hohe Abgas Temperaturen zur passiven Regeneration der Abgasnachbehandlung erreicht werden.

6.1.2 Kraftstoffqualität

Alle Traktoren werden mit kaltgepresstem Rapsölkraftstoff aus dezentralen bayerischen Ölmöhlen betrieben. Die Qualität des erworbenen Rapsölkraftstoffs wird bei der Lieferung neuer Chargen überprüft.

Tabelle 27 zeigt die Ergebnisse der Analysen aus dem Feldtestjahr 2015. Die fettgedruckten Werte in den Tabellen kennzeichnen die Nichteinhaltung der Anforderungen nach DIN 51605 [7] für Rapsölkraftstoff.

Tabelle 27: Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen von LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2015 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)

Kenngröße	Einheit	Grenzwerte gemäß DIN 51605	Kraftstoffcharge			
			I-15	II-15	III-15	IV-15
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	26	22	9	5
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	0,86	0,98	0,57	0,64
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	5,7	13,2	6,9	17,8
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	520	500	570	587
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	1,1	< 5,0	4,2	1,3
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 3	1,1	0,2	0,3	1,6
Calciumgehalt	mg/kg	max. 1	1,7	0,2	0,1	0,1
Magnesiumgehalt	mg/kg	max. 1	0,2	< 0,1	0,1	< 0,1

Die Qualität der angelieferten Rapsölkraftstoffcharge I-15 (FE-A) entspricht nicht den Anforderungen der Norm DIN 51605 [7]. Auch die Lieferungen II-15 und III-15 erfüllten anfänglich die Anforderungen der DIN 51605 [7] hinsichtlich des Gehalts an Calcium und Phosphor sowie der Gesamtverschmutzung nicht. Nach Reklamation wurden diese von den Ölmühlen kostenfrei ausgetauscht. Für die Pflanzenöltraktoren an den Standorten in Grub, Baumannshof, Kringell, Karolinenfeld und Osterseeon handelte es sich um die gleiche Liefercharge (III-15). Bei Auslieferung entsprach die Qualität der Lieferung III-15 den Anforderungen der Norm DIN 51605 [7]. Die Gesamtverschmutzung war mit 9 mg/kg gering. Aufgrund von Problemen im Niederdruckkraftstoffsysteem der Traktoren JD-N, JD-G und JD-P4 (siehe Abschnitt 6.1.4) wurden nach vier Wochen erneut Proben von Rapsölkraftstoff aus den Lagerbehältern gezogen. Die Analysen zeigten eine deutlich erhöhte Gesamtverschmutzung zwischen 30 mg/kg und 40 mg/kg Rapsöl. Die Gründe für die hohen Werte des Parameters Gesamtverschmutzung konnten nicht eindeutig geklärt werden. Eine mögliche Ursache ist die Verarbeitung erntefrischer Rapssaat mit einer Lagerdauer von unter zwei Monaten bei dieser Charge. Die Rapssaat sollte nicht unter zwei Monaten Ruhezeit verarbeitet werden, da es ansonsten bei der Lagerung des gereinigten Rapsöls zu Veränderungen kommen kann, die zu einer erhöhten Gesamtverschmutzung führen können [52]. Ferner könnte sich auch durch unzureichend gesäuberte Lagerbehälter Schmutz angereichert haben.

Im Jahr 2016 kam es zu keinen Problemen im Niederdruckkraftstoffsysteem der Traktoren, die auf die Kraftstoffqualität zurückgeführt werden können.

Tabelle 28 beinhaltet die Analyseergebnisse der Rapsölkraftstoffproben des Feldtestjahrs 2016. Die fettgedruckten Werte in den Tabellen heben die Nichteinhaltung der Anforderungen einzelner Parameter nach DIN 51605 [7] für Rapsölkraftstoff hervor.

Tabelle 28: Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen von LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2016 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)

Kenngröße	Einheit	Grenzwerte gemäß DIN 51605	Kraftstoffcharge					
			I-16	II-16	III-16	IV-16	V-16	VI-16
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	22	21	14	18	19	29
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	1,1	1,1	1,0	1,1	0,6	0,5
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	6,4	5,6	6,54	6,7	6,3	5,8
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	570	520	700	662	570	550
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Calciumgehalt	mg/kg	max. 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Magnesiumgehalt	mg/kg	max. 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Die Kraftstoffqualität der Kraftstoffchargen I-16, III-16, IV-16, V-16 entspricht bei allen untersuchten Kenngrößen den Anforderungen der DIN 51605 [7]. Die Probe der Charge VI-16 weist eine geringfügig erhöhte Gesamtverschmutzung und die Proben der Chargen II-16 und VI-16 eine geringfügig zu niedrige Oxidationsstabilität außerhalb des geforderten Grenzwerts nach DIN 51605 auf. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Überschreitungen der Grenzwerte im Bereich der Messgenauigkeit der Prüfverfahren für die Oxidationsstabilität und die Gesamtverschmutzung liegen und daher als noch unkritisch bewertet werden können.

Tabelle 29 zeigt die Analysewerte der Rapsölkraftstoffproben aus dem Jahr 2017. Im Feldtestjahr 2017 konnten teilweise Lagerbestände aus dem Jahr 2016 genutzt und Lieferungen gebündelt werden, wodurch sich eine geringere Anzahl notwendiger Analysen ergab als in den Jahren 2015 und 2016. Einzig die Charge II-17 weist eine etwas zu niedrige Oxidationsstabilität auf. Die Analysewerte der Kraftstoffchargen I-17, III-17 und IV-17 entsprechen den Anforderungen der DIN 51605 [7].

Tabelle 29: Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen von LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2017 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)

Kenngroße	Einheit	Grenzwerte gemäß DIN 51605	Kraftstoffcharge			
			I-17	II-17	III-17	IV-17
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	4	9	–	–
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	1,55	1,58	–	–
Oxidationsstabilität	H	min. 6,0	6,8	5,4	–	–
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	550	735	–	–
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	< 5	< 5	< 5	< 5
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Calciumgehalt	mg/kg	max. 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Magnesiumgehalt	mg/kg	max. 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Es zeigt sich, dass die sichere und zuverlässige Einhaltung der Qualitätsanforderungen für die dezentralen Ölmühlen nach wie vor eine Herausforderung darstellt, wenngleich insgesamt in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erzielt werden konnten. Im Vergleich zu den Vorgängerprojekten [56] [18] [22] lag der Phosphor-, Calcium- und Magnesiumgehalt bei den vorliegenden Untersuchungen deutlich weniger häufig über dem Grenzwert nach DIN 51605:2016 [7].

Die Grenzwertüberschreitungen wurden mit Ölmühlenbetreibern und Traktorenherstellern diskutiert und die Ölmühlenbetreiber hinsichtlich qualitätssichernder Maßnahmen bei Produktion und Abgabe von Rapsölkraftstoff beraten. Es bestätigt sich vor allem, dass eine Bündelung von Bestellungen das Qualitätsmanagement für Ölmühlenbetreiber und Kunden deutlich erleichtern kann.

6.1.3 Motorölqualität

Über 160 Motorölanalysen belegen einen verschleißarmen Motorenbetrieb mit Pflanzenöl und nur einen überwiegend sehr geringen Pflanzenöleintrag in das Motoröl bei modernen Motoren mit Common-Rail-Einspritztechnik. Bei den Traktoren mit 50 Bh Beprobungsintervall konnte auf einen verkürzten Motorölwechsel verzichtet werden, sodass dasselbe Wartungsintervall wie im Betrieb mit Dieselmotoren erreicht werden konnte. Bei weiterhin positivem Verlauf der Untersuchungen erscheint es möglich, dass für diese pflanzenöлтаuglichen Traktortypen das Wartungsintervall auf die bei Diesel üblichen 500 Bh ausgedehnt werden kann.

In Abbildung 35 sind die Ergebnisse zum Pflanzenölgehalt in Abhängigkeit von den Motorölbetriebsstunden der Traktoren der Abgasstufen I und II mit Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Anstieg des Pflanzenölgehalts

im Mittel beim Traktor DE-K ca. 8 % und beim Traktor FE-K ca. 3 % je 100 Bh Motoröleinsatzzeit beträgt. 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.

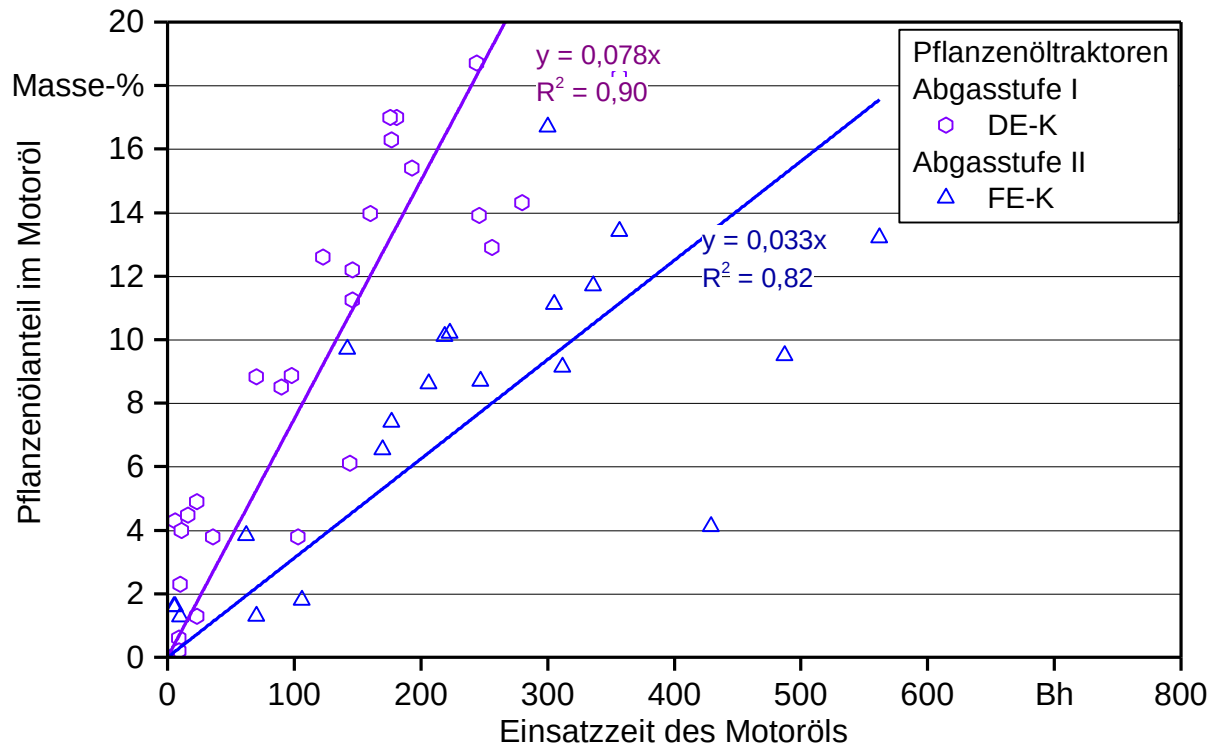


Abbildung 35: Pflanzenölanteil im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls in Pflanzenöltraktoren der Abgasstufen I und II

Der Anstieg des Pflanzenölgehalts ist bei Traktoren der Abgasstufen IIIA und IIIB mit Common-Rail-Einspritztechnik mit zwischen 0,6 % und 1,3 % je 100 Bh deutlich geringer als bei den Traktoren mit Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem, wie in Abbildung 36 und Abbildung 37 zu sehen ist.

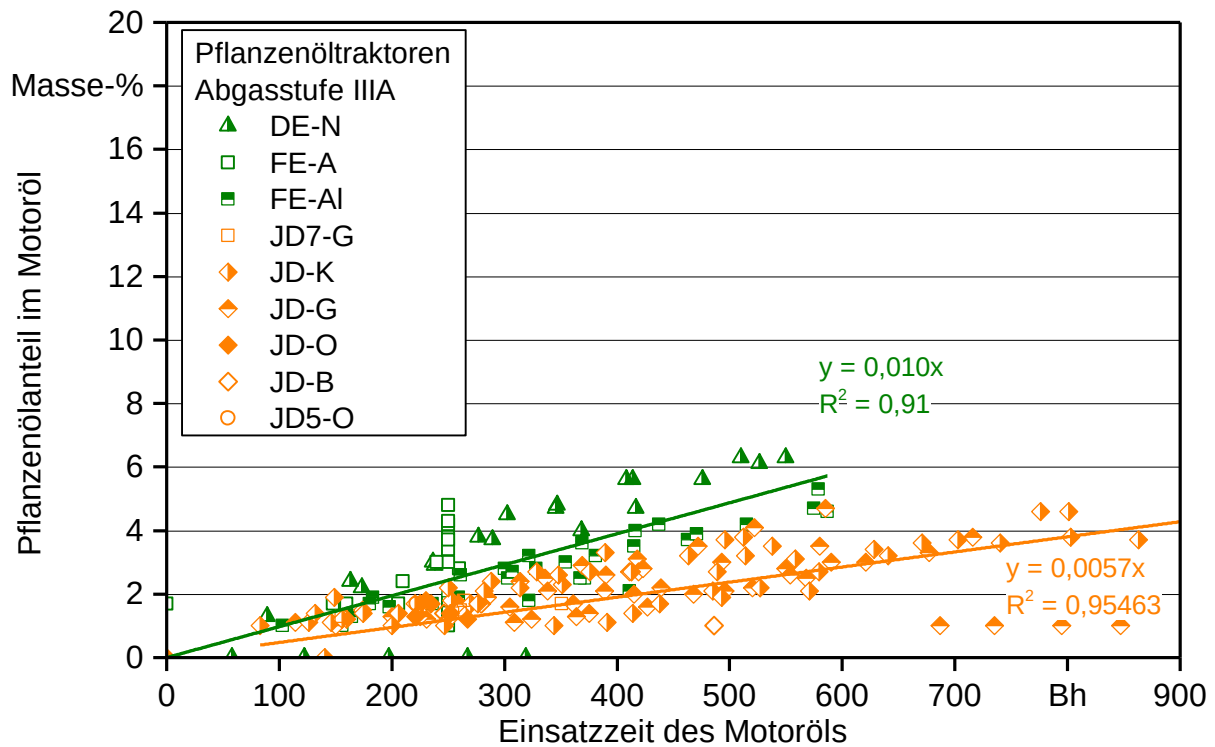


Abbildung 36: Pflanzenölanteil im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls in Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIA

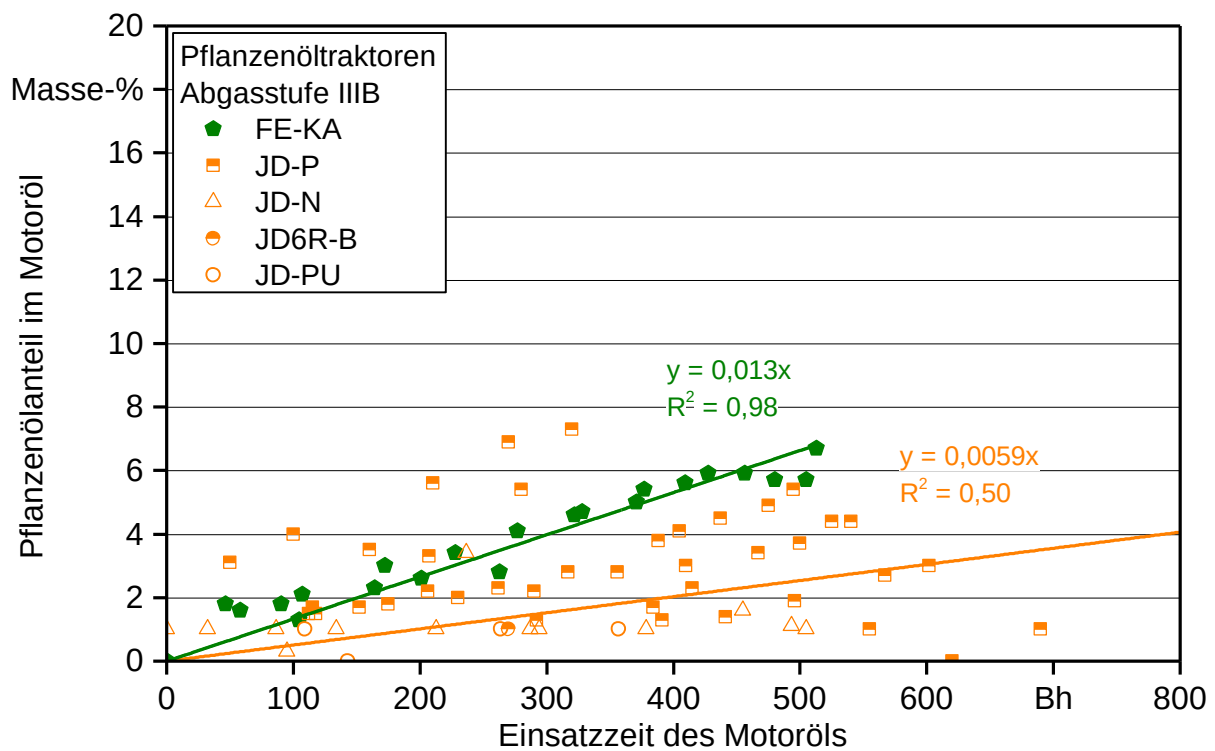


Abbildung 37: Pflanzenölanteil im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls in Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIB

Abbildung 38 zeigt beim Prototyp-Traktor JD-P4 der Abgasstufe IV einen unkritischen Verlauf der Motorölverdünnung mit Pflanzenöl, der auch nach 500 Bh unter 7 Masse-% liegt und vergleichbar mit den Traktoren der Abgasstufen IIIA und IIIB ist.

Beim Traktor FE-S lag die Motorölverdünnung mit Rapsölkraftstoff bis 323 Bh Einsatzzeit des Motoröls ebenfalls unter 10 %, jedoch waren stets höhere Werte als beim Traktor JD-P4 festzustellen. Der höhere Pflanzenölkraftstoffeintrag in das Motoröl könnte durch Untersuchungen der Kaltstartemission im NRTC am Traktorenprüfstand und durch PEMS-Messungen im Pflanzenölbetrieb in diesem Zeitraum verursacht worden sein, da dabei Startvorgänge mit Pflanzenölkraftstoff notwendig waren. Üblicherweise erfolgt der Startvorgang im Feldtest wie vom Umrüster vorgesehen ausschließlich mit Dieselmotorkraftstoff.

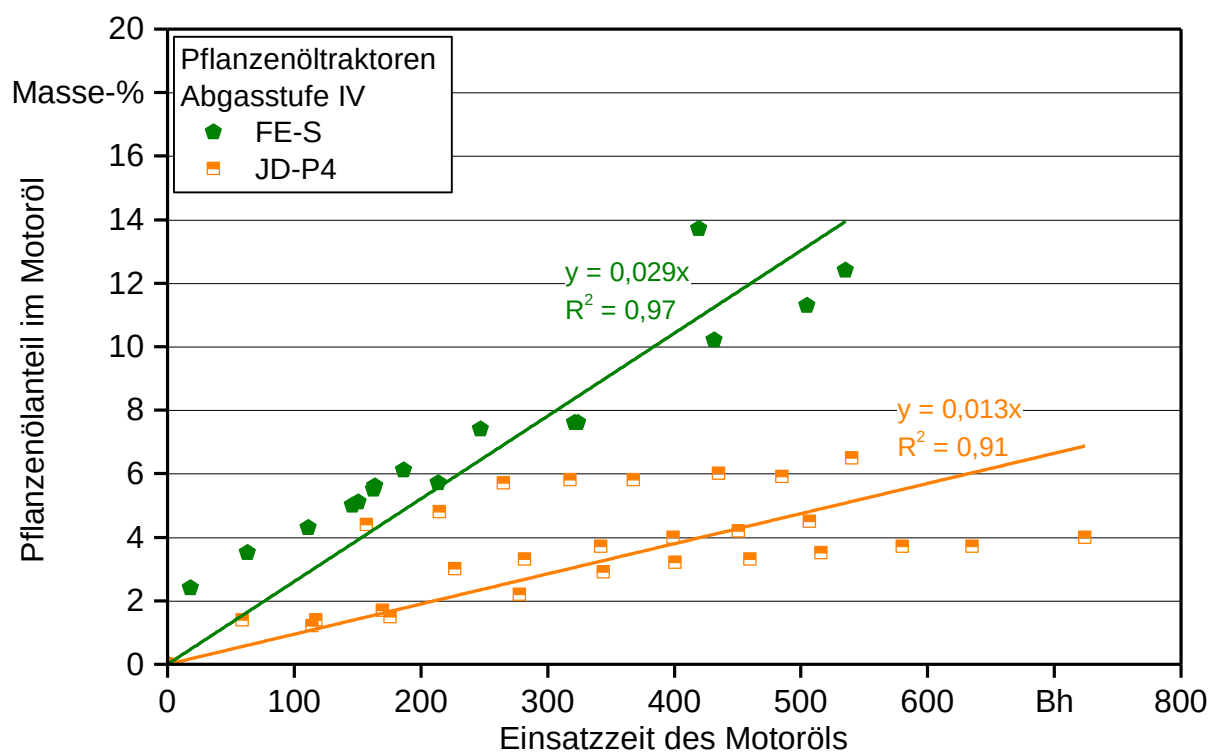


Abbildung 38: Pflanzenölanteil im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls in Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IV

Auffällig ist der stärkere Anstieg des Pflanzenölkraftstoffanteils im Motoröl bei 433 Bh auf knapp 14 Masse-%. Eine mögliche Ursache ist, dass durch eine Fehlbedienung eine aktive Stillstandsregeneration (siehe Abschnitt 6.1.4) zur Reinigung der Abgasnachbehandlung mit Rapsöl- anstatt wie vom Umrüster vorgesehen mit Dieselmotorkraftstoff durchgeführt wurde. Diese Regeneration erfolgt durch Kraftstoffnacheinspritzung in den Brennraum. Dabei kann der Rapsölkraftstoff möglicherweise aufgrund der höheren Siedetemperatur im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff nicht vollständig verdampfen und es könnten Kraftstoffrestmengen im Brennraum über die Zylinderwände in das Motoröl gelangt sein. Insgesamt ist die Datenbasis für den Traktor FE-S noch zu gering, um abzuschätzen, ob es sich bei dem vergleichsweise schnellen Anstieg des Pflanzenölgehalts im Motoröl um

ein einmaliges Ereignis aufgrund von Fehlbedienung oder durchgeführten Kaltstarts mit Rapsölkraftstoff handelt. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um dies abzuklären. Eine Motorölprobe eines rapsöltauglichen Fendt Vario 828 S4 der Abgasstufe IV eines Privatbesitzers, der mit einem ähnlichen Motor und gleichem Umrüstsystem ausgestattet ist, zeigte nach einer Gesamtlaufzeit von 2.740 Bh und Motoröleinsatzzeit von 280 Bh einen geringeren Pflanzenöleintrag von 3,3 %. Dies ist ein erstes Indiz, dass der schnellere Anstieg des Pflanzenölgehalts im Motoröl des Traktors FE-S nicht systembedingt ist.

Auch die weiteren qualitätsbestimmenden Motoröleigenschaften deuten darauf hin, dass bei den untersuchten Traktoren mit Abgasstufe IIIA und höher im Rapsölkraftstoffbetrieb keine häufigeren Ölwechsel erforderlich sind als im Dieselpetrieb. Es waren bei den Untersuchungen keine Auffälligkeiten beim Verlauf der Ruß- und Additivgehalte sowie bei den Qualitätsparametern *Total Acid Number* (TAN), *Total Base Number* (TBN) und der kinematischen Viskosität festzustellen. Der Verlauf der Motorölkennwerte für die Pflanzenöltraktoren ist in Anhang A ab der Seite 188 zu finden.

6.1.4 Reparaturen und Störungen

Tabelle 30 gibt einen Überblick, welche Störungen an den Feldtest-Traktoren während des Berichtszeitraums aufgetreten sind, die möglicherweise im Zusammenhang mit dem Pflanzenölbetrieb oder Testbetrieb der Abgasnachbehandlungssysteme stehen.

Grundsätzlich waren während des Berichtszeitraums an den Traktoren wenige Schäden an Bauteilen zu verzeichnen. Im Feldtest war die Einsatzsicherheit der Traktorenflotte insgesamt sehr hoch.

Tabelle 30: Übersicht zu den Bauteilen und Komponenten mit Störungen im Berichtszeitraum

Traktor	Bauteile/Komponenten mit Störung	Zeitpunkt
Fe-Al	Niederdruckkraftstoffsysteem	4.388 Bh
JD-G	Kraftstoffförderpumpe	3.280 Bh
JD-K	Motorvorwärmung	3.465 Bh
	Anlasser	3.550 Bh
	Elektronische Ansteuerung VTG-Turbolader	4.131 Bh
JD5-O	Injektoren	350 Bh
FE-Ka	Bedienteil Kraftstoffumschalteneinheit	688 Bh
JD-N	Niederdruckkraftstoffsysteem	1.375 Bh
JD-Pu	Niederdruckkraftstoffsysteem	643 bis 840 Bh
JD6R-B	Niederdruckkraftstoffsysteem	3 bis 380 Bh
JD-P4	Niederdruckkraftstoffsysteem	1.840 Bh
	Raildrucksensor	
FE-S	Differenzdrucksensor	370 Bh
	Niederdruckkraftstoffsysteem	375 Bh
	Niederdruckkraftstoffsysteem	850 Bh
	SCR-Überwachung	ab 854 Bh
	Ladeluftschlauch	1.480 Bh

Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-Al)

Im Juni 2016 kam es bei 4.388 Bh zu Störungen im Niederdruckkraftstoffsysteem mit der Fehlermeldung EDC 1.2.08 (Sensor Kraftstoff-Niederdruck, Kraftstoff-Niederdruck unterhalb vom Sollbereich), wodurch nur ein Betrieb mit Dieselmkraftstoff möglich war. Auslöser war eine Undichtigkeit an einem Schauglas im Rapsölkraftstoffsysteem, wie bereits Ettl et al. (2016) [22] am Traktor FE-A festgestellt haben. Nach dem Tausch des defekten Schauglases funktionierte der Traktor wieder störungsfrei. Im Zuge der Fehlersuche wurden die Kraftstoffförderpumpe und der Kraftstoffdrucksensor getauscht, wenngleich sie nicht ursächlich für die Störung waren.

John Deere 6930 Premium (JD-G)

Am Traktor JD-G wurde bei 3.280 Bh die Kraftstoffförderpumpe getauscht. Am Traktor trat beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff mehrmals die Fehlermeldung „Kraftstofffilter“ auf, was zur Aktivierung der Leistungsrosselung führte. Die defekte Pumpe förderte nur noch unregelmäßig Kraftstoff aus dem Tank zur Hochdruckpumpe. Im Zuge der Fehlersuche wurden zudem ein stark verschmutzter Kraftstofftank und ein verunreinigtes Tanksieb festgestellt. Der Tank und das Sieb wurden gesäubert. Die vorhandene Verschmutzung an der Pumpensaugseite war nicht zwingend die Ursache für die Störung, erhöhte jedoch die Leistungsaufnahme der Pumpe und reduzierte damit vermutlich deren Lebensdauer. Im Feldtestjahr 2016 traten keine weiteren Störungen auf.

John Deere 6930 Premium (JD-K)

Während des Feldtests bei 3.465 Bh verschlechterte sich abrupt das Startverhalten des Traktors. Der Tausch einer defekten Blattsicherung der Injektorvorwärmung führte zu einer wesentlichen Verbesserung des Startvorgangs. Zudem wurde der Anlasser des Traktors bei 3.550 Bh gewechselt. Hauptgrund für diese Reparatur war ein verzögertes Startverhalten bei niedrigen Umgebungstemperaturen (unter 5 °C). Nach Aussagen des Betreibers verkürzte sich die Motorstartzeit durch den Einbau des neuen Anlassers weiter und lag wieder im Bereich des Ausgangszustands.

Bei 4.131 Bh trat die Fehlermeldung 641.12 (VTG Communication) unmittelbar nach dem Start des Traktors auf. Infolgedessen wurde die Leistung des Traktors durch die Motorsteuerung gedrosselt. Die Elektronik zur Ansteuerung der variablen Turbinengeometrie des Turboladers war defekt und musste ausgetauscht werden. Die Störung betraf rein elektronische Bauteile und steht nicht im Zusammenhang mit dem Rapsölkraftstoffbetrieb.

John Deere 5080R (JD5-O)

Zu Beginn des Feldtestjahrs 2015 mussten die Injektoren bei 350 Bh innerhalb der Gewährleistungsfrist getauscht werden. Der Betreiber berichtete von einer zu geringen Leistungsfähigkeit nach kurzer Einsatzzeit des Traktors. Die Leistungsmessungen bei der Vertragswerkstatt bestätigten eine deutliche Minderleistung sowohl im Diesel- als auch im Rapsölbetrieb. Nach dem Injektorentausch und einem Softwareupdate entsprach die Leistung des Traktors dem Zustand bei der Auslieferung. Nach Aussage der Werkstatt konnte die Ursache für die defekten Injektoren nicht genau eingegrenzt werden. Ob die Störung durch den Pflanzenölbetrieb verursacht wurde, ist unklar. In der weiteren Feldtestzeit lief der Traktor wieder zuverlässig ohne Beeinträchtigung. Dies bestätigt auch die Leistungs- und Verbrauchsmessung bei 852 Bh (siehe Unterkapitel 6.2).

Fendt 718 Vario SCR (FE-Ka)

Bei 688 Bh musste das elektronische Bedienteil der Kraftstoffumschalteneinheit des Zwei-Tank-Systems getauscht werden. Der Schalter für die Vorwahl des gewünschten Kraftstoffs am Bedienteil in der Kabine war aufgrund eines losen Kontakts defekt. Dies führte zu einem unkontrollierten Umschalten zwischen Rapsöl- und Dieselpetrieb. Der Fehler wurde erst am Traktorenprüfstand durch die getrennte Erfassung des Kraftstoffverbrauchs für Diesel und Rapsöl identifiziert. Nach dem Tausch des Bauteils war die Funktion des Kraftstoffsystems wiederhergestellt. Im Feldtestjahr 2016 und 2017 traten keine Störungen auf.

John Deere 6115R (JD6R-B) und 6100RC (JD-Pu)

Bei beiden Traktoren kam es nach der Auslieferung mehrfach zu Problemen im Bereich des Niederdruckkraftstoffsystems. Dabei wurde die Fehlermeldung ECU 94.18 „Signal für Niederdruckkraftstoff mäßig niedrig“ ausgegeben. Nur durch häufigen Wechsel der Kraftstofffilter alle 25 bis 75 Bh war ein fehlerfreier Betrieb der Traktoren möglich. Der

Hersteller konnte die Probleme durch den mehrfachen Austausch von Komponenten im Niederdruckkraftstoffsystem in den Jahren 2016 und 2017 lösen.

John Deere 6125R (JD-N)

Ein stark verschmutzter Vorfilter im Fahrzeugtank minderte die Kraftstoffversorgung bei 1.375 Bh, was zum Fehler ECU 157.01 „Common Rail Kraftstoffdruck extrem niedrig“ führte. Um den Fehler einzugrenzen, wurden vor Ort am Versuchsbetrieb Leistungs- und Verbrauchsmessungen durchgeführt. Während der Messungen, bei denen der Kraftstoff aus einem externen Behälter angesaugt wurde, trat die Störung unter Volllast nicht auf. Somit konnte die mögliche Ursache auf Probleme im Bereich der Saugseite der Kraftstoffförderpumpe eingegrenzt werden. Eine Reinigung des Fahrzeugtanks und des Kraftstofftanksiebs behob die Probleme. Die nachfolgenden Pflugarbeiten mit hohem Kraftstoffbedarf konnten störungsfrei absolviert werden. Im Feldtestjahr 2016 traten keine weiteren Störungen auf.

Bei 2.403 Bh trat, wie beim Traktor JD-K, die Fehlermeldung 641.12 (VTG Communication) unmittelbar nach dem Start des Traktors auf. Die Elektronik in der Ansteuerung der variablen Turbinengeometrie des Turboladers war defekt und wurde erneuert. Die Störung betraf rein elektronische Bauteile und steht nicht im Zusammenhang mit dem Rapsölkraftstoffbetrieb.

Bei 2.481 Bh meldete der Traktor die Fehlermeldung DTC 3695.14 „Partikelfilterregeneration benötigt“. Es handelte sich dabei um eine Softwarestörung, die vom Hersteller beseitigt wurde. Es musste keine Partikelfilterregeneration durchgeführt werden.

John Deere 6120R (JD-P4)

Der Prototyptraktor JD-P4 hatte ab 1.381 Bh (Anfang August 2015) anhaltende Probleme mit der Kraftstoffversorgung. Der Fehler ECU 94.18 „Signal für Niederdruckkraftstoff mäßig niedrig“ und die resultierende Leistungsreduzierung waren nur mit wiederkehrendem Kraftstofffilterwechsel zu beheben. Der Einbau einer neuen Kraftstoffförderpumpe durch den Hersteller brachte keine Verbesserung. Das Problem intensivierte sich bei einer neuen Kraftstofflieferung Anfang September 2015, bei der eine erhöhte Gesamtverschmutzung bei Proben aus den Lagertanks festgestellt wurde (siehe Abschnitt 6.1.2). Ein Kraftstofffilterwechsel war alle 20 Bh notwendig. Die erhöhte Gesamtverschmutzung war höchstwahrscheinlich nicht alleine ursächlich für die Probleme im Kraftstoffsystem, da die Störung ebenfalls bei einer Pflanzenölcharge mit geringer Verschmutzung auftrat. Das Niederdruckkraftstoffsystem wurde im Mai 2016 durch den Landmaschinenhersteller überarbeitet. Im restlichen Feldtestjahr 2016 war der Traktor ohne Störungen im Niederdruckkraftstoffsystem im Einsatz.

Bei 1.840 Bh konnte der Traktor aufgrund eines defekten Drucksensors im Common-Rail-System nicht mehr gestartet werden. Nach der Erneuerung war wieder ein Betrieb der Maschine möglich.

Fendt 724 Vario S4 (FE-S)

Bei 370 Bh musste der Sensor zur Erfassung des Partikelfilterdifferenzdrucks getauscht werden. Der Traktor gab die Fehlermeldung ECU 1D.1.34 aus und war aufgrund einer permanenten Leistungsreduzierung nicht mehr zum Pflügen einsetzbar. Vermutlich aufgrund des defekten Sensors meldete der Traktor einen zu hohen Rußbeladungszustand des Partikelfilters. Mit dem neu verbauten Sensor zeigte der Traktor einen sehr geringen Differenzdruck und damit Beladungszustand des Partikelfilters an und war ohne Fehlermeldung zu bedienen.

Der Traktor hatte bei ca. 375 Bh und 435 Bh Probleme im Niederdruckkraftstoffsysteem. Beim Umschalten vom Rapsöl- in den Dieselbetrieb kam es zum Bersten eines Schlauchs im Kraftstoffrücklauf. Diese Störung trat auch am Traktorenprüfstand des TFZ auf: Beim Umschalten von Rapsöl- auf Dieseldruckstoff im Leerlauf überstieg der Kraftstoffvordruck im Dieselbetrieb den Soll-Bereich von 3 bis 6 bar nach wenigen Minuten. Dabei stieg der Druck auf ein Niveau über dem Anzeigewert des Drucksensors von 7 bar. Nach weiteren wenigen Minuten stieg auch der Raildruck ausgehend vom Soll-Wert von ca. 600 bar rapide auf über 1.700 bar. In der Folge öffnete das Druckbegrenzungsventil des Hochdrucksystems und der Druck im Kraftstoffrücklauf stieg so stark an, dass ein Schlauch platzte. Im Rücklauf war ein Umschaltventil verbaut, über das im Leerlauf nicht genügend Kraftstoff in den Tank abfließen konnte und das somit den Druckanstieg verursachte. Der Tausch des Umschaltventils im Rücklauf durch eine Ausführung mit einem höheren Leitungsquerschnitt behob das Problem.

Bei ca. 850 Bh im September 2016 traten die Fehlermeldungen EDC 1D.1.08 und EDC 1D.1.02 nach Ende des Arbeitseinsatzes direkt nach dem Umschalten vom Rapsöl- in den Dieselbetrieb auf. Grund war der Abfall des Kraftstoffvordrucks im Dieselbetrieb, der möglicherweise durch Lufteintrag ins Kraftstoffsysteem ausgelöst worden war. Durch den Tausch des Vorlaufventils und den Einbau von Rückschlagventilen im Diesel- und Rapsölkraftstoffkreislauf konnte der Fehler behoben werden. Im Feldtestjahr 2017 war keine Störung des Niederdruckkraftstoffsystems zu verzeichnen.

Ab ca. 854 Bh trat mehrfach die Fehlermeldung 1D.1.16 „SCR-Überwachung; NO_x-Wert nach Kat., oberen Grenzwert erreicht“ auf. Die Motorsteuerung weist dabei auf ungewöhnlich hohe NO_x-Emissionswerte hin, die von der fahrzeuginternen NO_x-Sensorik erfasst werden. Die Fehlermeldung trat im weiteren Betrieb bis 1.480 Bh nur sporadisch erneut auf und konnte vom Fahrer unmittelbar über das Traktorterminal quittiert werden. Die Fehlermeldung deckt sich mit den Ergebnissen der Befundungen des SCR-Systems ab 1.010 Bh, wo Ablagerungen unmittelbar nach der Dosierung der Harnstofflösung festzustellen waren (siehe Abschnitt 6.4.2). Ein Anstieg der NO_x-Emissionen nach der Abgasnachbehandlung bei ca. 1.000 Bh war bei den in Abschnitt 6.3.3 beschriebenen Emissionsmessungen festzustellen. Das Fahrzeug war jedoch durchweg betriebsbereit und eine Leistungsreduzierung wurde von der Motorsteuerung nicht ausgelöst, was bei dauerhafter Aktivierung dieser Fehlermeldung eingetreten wäre.

Bei der Befundung bei 1.480 Bh wurde ein beschädigter Ladeluftschlauch, der nach dem Turbolader angebracht ist, entdeckt und ausgetauscht. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der Schaden in

Abbildung 39 bereits bei der Auslieferung des Prototyp-Traktors bei ca. 230 Bh vorhanden war. Im Untersuchungszeitraum war in der Umgebung der Stelle des Schadens kein Bauteil installiert, das eine solche Scheuerstelle hätte verursachen können. Die Ladedrucküberwachung in der Motorsteuerung des Traktors gab über die gesamte Betriebszeit des Traktors keine Fehlermeldung aus. Ob Ladedruck während des Betriebs entweichen konnte, ist unklar. Bei einem Druckabfall im Ladeluftsystem sinken die Ansaugluftmasse und damit die Sauerstoffkonzentration in der Brennkammer, was eine unvollständige Verbrennung bzw. einen Rückgang der Motorleistung zur Folge haben kann. Die CO- und HC-Emissionen des Rohabgases vor der Abgasnachbehandlung (siehe Abschnitt 6.3.3) zeigen dahingehend keinen signifikanten Anstieg über die Betriebsdauer. Trotz leichter Leistungseinbußen über die Betriebsdauer wird daher der Einfluss des Schadens auf das Leistungs- und Emissionsverhalten des Traktors als gering eingeschätzt.



Abbildung 39: Schaden am Ladeluftschlauch des Traktors FE-S (links, vergrößert)

6.1.5 Umweltwirkung des Pflanzenöleinsatzes

Die Betriebszeit aller untersuchten Rapsöltraktoren auf den staatlichen Betrieben beträgt knapp 60.000 Stunden im Zeitraum von 2003 bis 2018. Durch den Rapsölbetrieb wurden somit rund 581.000 Liter Diesel ersetzt, was einer Treibhauseinsparung von ca. 1.389.000 kg CO₂-Äquivalenten entspricht. In Abbildung 40 sind die indirekten Effekte der Rapsölnutzung durch die Versuchstraktoren für die heimische Eiweißfuttermittelver-

sorgung und das Potenzial für die Nährstoff- und Humusversorgung aus den Ernterückständen des Rapsanbaus (Stroh, Wurzeln und Stoppeln) dargestellt. Demnach wurde über die Jahre verteilt auf insgesamt rund 420 ha Raps angebaut und daraus 600.000 l Rapsöl als Kraftstoff für die Traktoren, ca. 1.100.000 kg Rapspresskuchen als Eiweißfutter und 6.600 t organische Substanz zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit gewonnen.

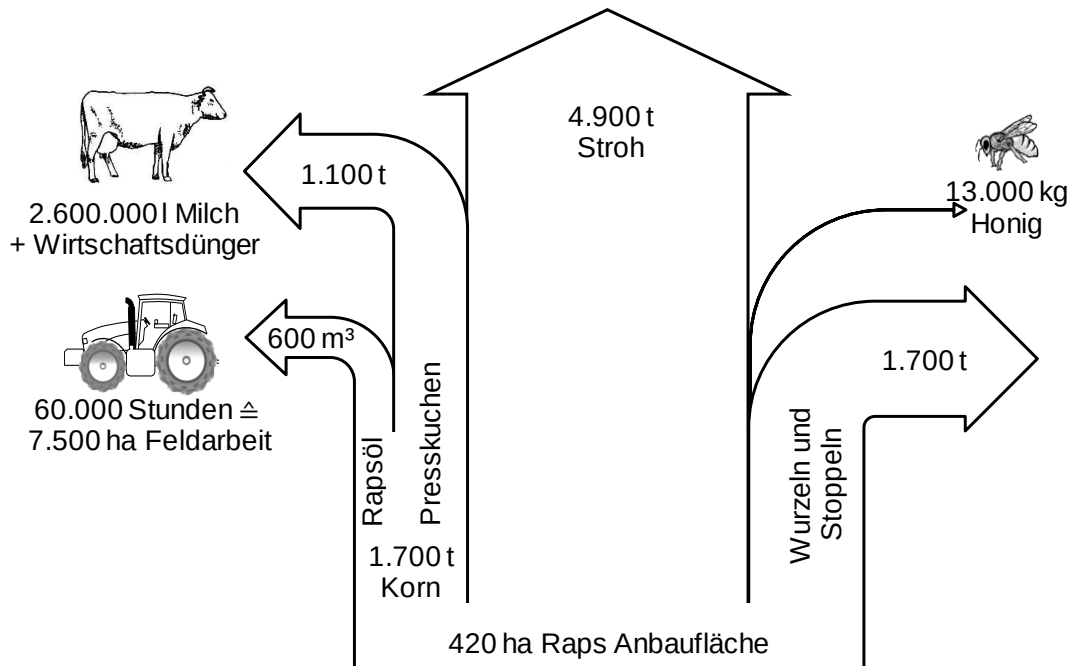


Abbildung 40: Beispielrechnung zu den Stoffströmen aus dem Rapsanbau zur Gewinnung von Rapsölkraftstoff für die Rapsöltraktoren der bayerischen staatlichen Versuchsgüter im Zeitraum von 2003 bis 2018

6.2 Leistungs- und Verbrauchsmessung auf den Versuchsbetrieben

Ergänzend zu den Untersuchungen am Traktorenprüfstand wurden die Zapfwellenleistung nach OECD Code 2 und der gravimetrische Kraftstoffverbrauch vor Ort auf den Versuchsbetrieben erhoben.

6.2.1 Abgasstufe IIIA: John Deere 6630 (JD-B und JD-O)

Die Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsmessungen am John Deere 6630 Premium (JD-O) fanden bei 2.693 Bh mit Rapsölkraftstoff auf dem Versuchsgut Osterseeon statt. Insgesamt konnte die Messung am Traktor JD-O mit Rapsölkraftstoff störungsfrei in zweifacher Wiederholung durchgeführt werden.

Der drehzahlabhängige Verlauf des äquivalenten Motordrehmoments, der Leistung, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle ist in Ab-

bildung 41 zu sehen. Die Ergebnisse beider Wiederholungsmessungen sind nahezu deckungsgleich.

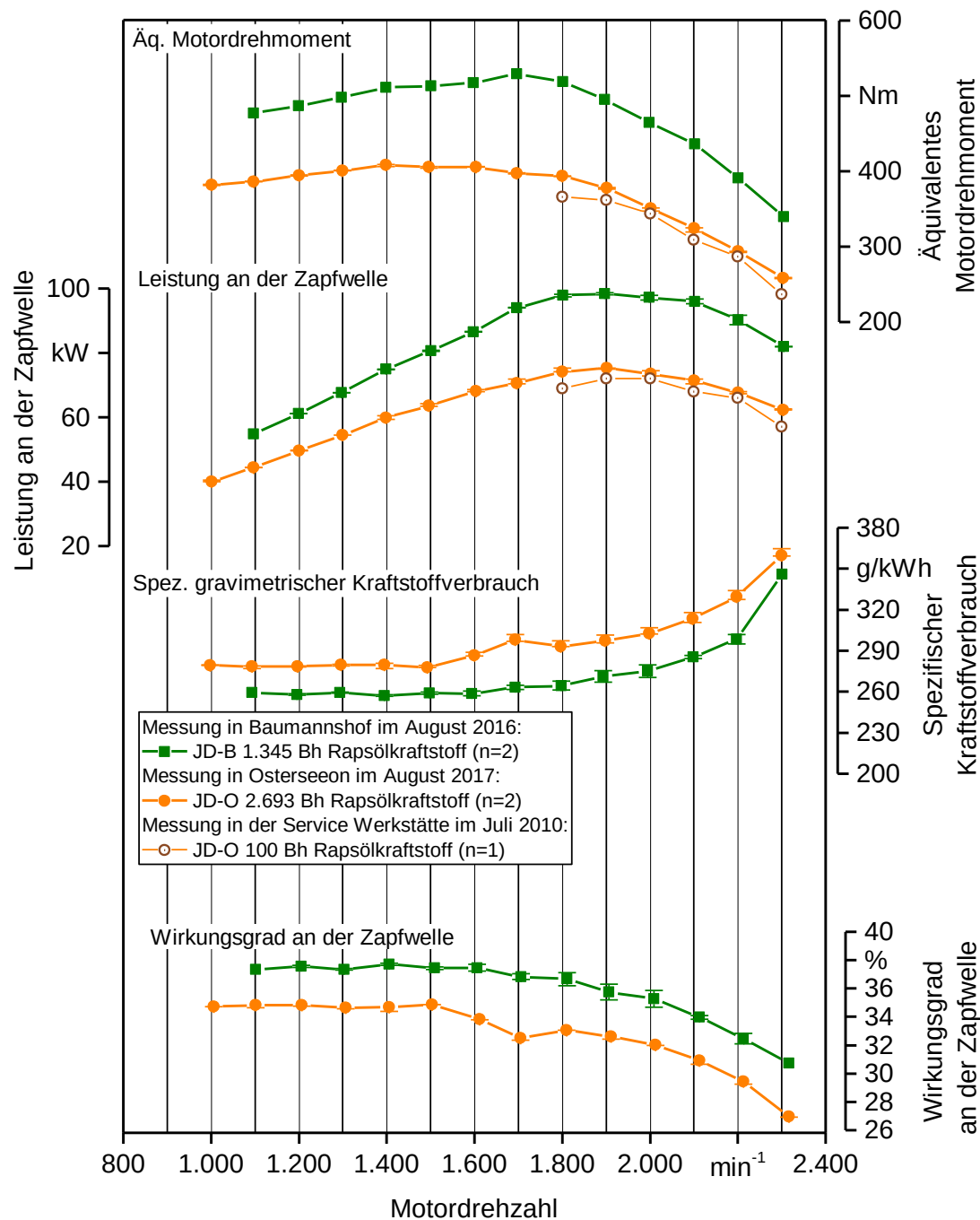


Abbildung 41: Äquivalentes Motordrehmoment, Leistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle der Traktoren JD-O und JD-B mit Rapsölkraftstoff

Beim Traktor JD-O betrug die Leistung an der Zapfwelle bei der Nenndrehzahl von 2.300 min^{-1} 62 kW und die maximale Leistung 75 kW. Die Leistungskennwerte des JD-O fallen um ca. 25 % geringer als beim baugleichen Traktor John Deere 6630 Premium

(JD-B) aus, der bei 1.345 Bh im August 2017 an der Versuchsstation Baumannshof mit Rapsölkraftstoff gemessen wurde. Beim Traktor JD-B betrug die Leistung an der Zapfwelle bei der Nenndrehzahl von 2.300 min^{-1} 82 kW und die maximale Leistung 99 kW. Die Leistungsdaten des Traktors JD-B entsprechen in etwa den Ergebnissen nach DLG-TESTZENTRUM (2010) [11] mit 86 kW Leistung bei Nenndrehzahl und 99 kW maximaler Leistung an der Zapfwelle mit Diesel.

Ein Abgleich der Daten des Traktors mit der Service-Werkstätte bei ca. 100 Bh zeigt, dass der Traktor JD-O im Auslieferungszustand in etwa die gleiche Leistung aufwies wie bei der Messung festgestellt. Es war somit kein Leistungsverlust über die Betriebszeit vorhanden. Die Leistungsdifferenz der Traktoren JD-B und JD-O ist auf abweichende Motorsteuerungseinstellungen zurückzuführen. Die Traktoren wurden von unterschiedlichen Firmen auf den Betrieb mit Rapsöl umgerüstet. Aufgrund des ca. 16 % geringeren gravimetrischen Heizwerts von Rapsölkraftstoff (37,5 MJ/kg) im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff (42,9 MJ/kg) reduziert sich die Leistung im Rapsölkraftstoffbetrieb bei dieselloptimierten Einstellungen des Einspritzsystems. Der Heizwertunterschied soll zukünftig durch die Optimierung der Motorsteuerung wie beim Traktor JD-B kompensiert werden.

6.2.2 Abgasstufe IIIA: John Deere 5080R (JD5-O)

Die Leistung an der Zapfwelle und der Kraftstoffverbrauch des Traktors John Deere 5080R (JD5-O) wurden bei 852 Bh im Rapsölkraftstoffbetrieb in dreifacher Wiederholung bestimmt. Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der Messungen an der Versuchsstation Osterseeon.

Nach Herstellerangaben besitzt der Motor eine Nennleistung von 59 kW und eine maximale Motorleistung von 64 kW. Die Leistung an der Zapfwelle ist mit 43 kW bei Nenndrehzahl und 49 kW Maximalleistung geringer. Die Differenz von 16 kW bzw. 15 kW ist auf Verluste des Getriebes sowie zusätzliche Nebenaggregate zurückzuführen und in dieser Höhe plausibel. Insgesamt deuten die Resultate der Messung auf ein einwandfreies Betriebs- und Leistungsverhalten hin.

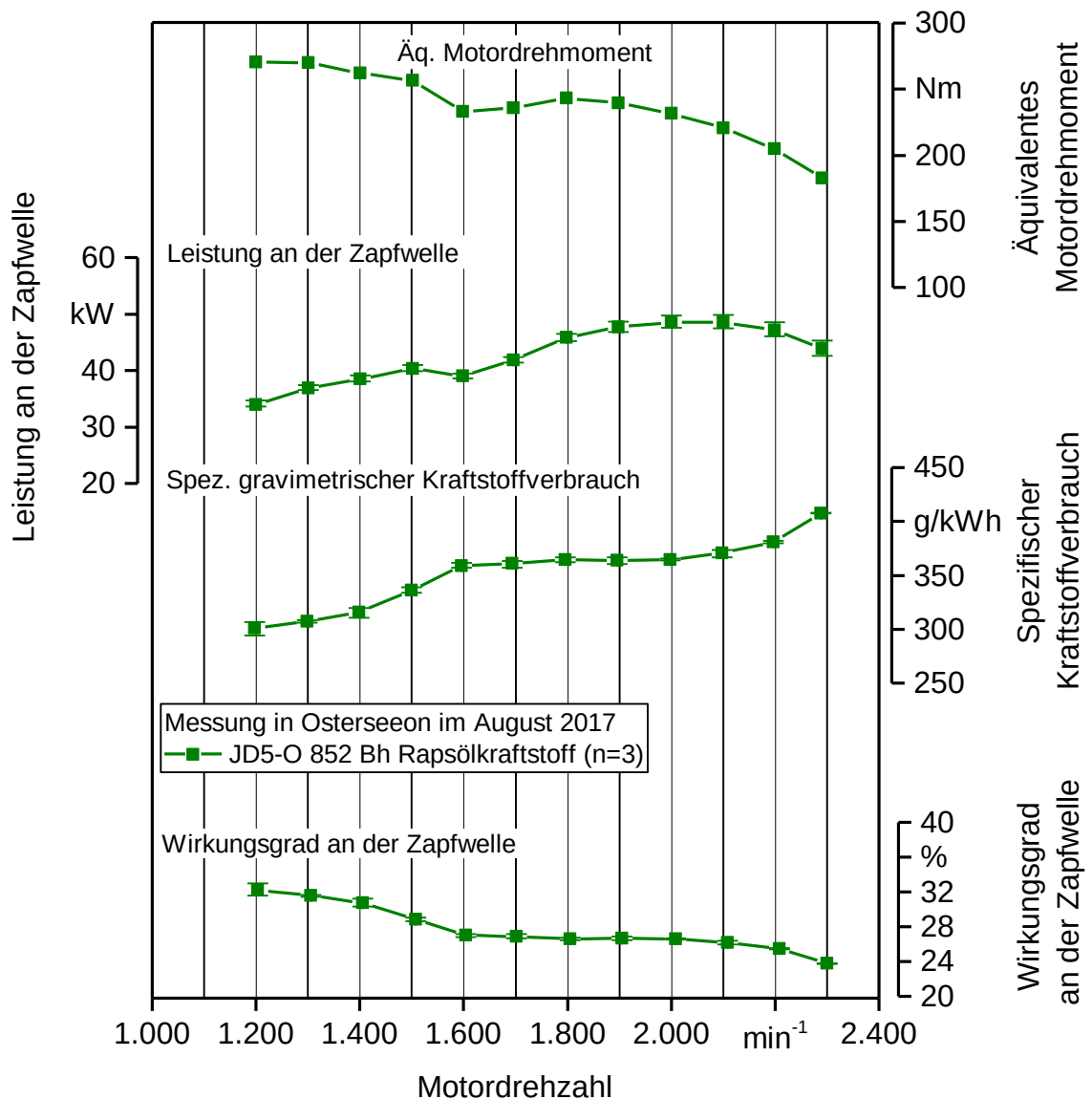


Abbildung 42: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle des Traktors JD5-O

6.2.3 Abgasstufe IIIA: Deutz-Fahr Agrottron 650 M (DE-N)

Die Zapfwellenleistung und das äquivalente Motordrehmoment des Deutz-Fahr Agrottron 650 M (DE-N) bei 1.412 Bh sind in Abbildung 43 dargestellt.

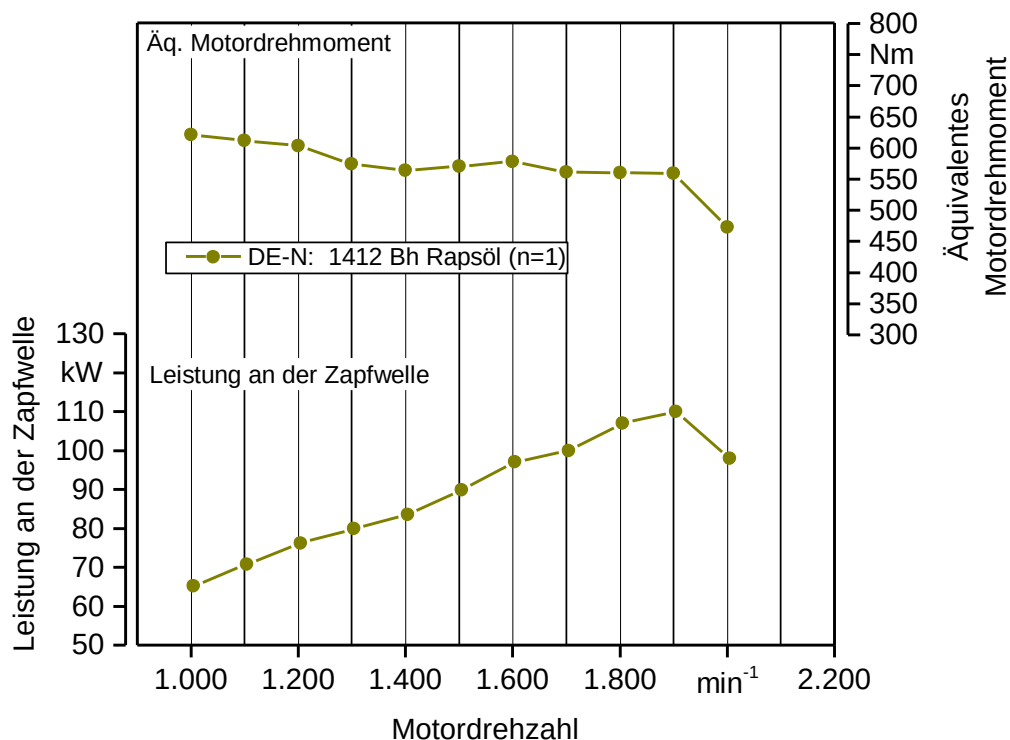


Abbildung 43: Äquivalentes Motordrehmoment und Leistung an der Zapfwelle des Traktors DE-N bei 1.412 Bh mit Rapsölkraftstoff

Die Messung am Traktor DE-N auf der Versuchsstation Straßmoos im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ergab eine Maximalleistung an der Zapfwelle von 110 kW. Die vom Motorhersteller angegebenen Maximalleistung der Deutz Natural Fuel Engine an der Kurbelwelle beträgt 141 kW im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff. Leistungsunterschiede in Höhe von etwa 20 % lassen sich durch die unterschiedlichen Messstellen Zapfwelle und Kurbelwelle erklären. Zudem gibt der Motorenhersteller für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff etwa 10 % Minderleistung im Vergleich zum Dieselmotorbetrieb an. Dies ist auf den geringeren Heizwert von Rapsölkraftstoff und das unterschiedliche Verhalten im Einspritzsystem zurückzuführen. Da Vergleichsmesswerte fehlen, konnten die Leistungsdaten nur mit Erfahrungen der Servicewerkstatt abgeglichen werden, die die ermittelten Leistungsmesswerte an der Zapfwelle als praxisüblich einschätzte.

6.2.4 Abgasstufe IIIA: Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-AI)

Die Leistung an der Zapfwelle und der Kraftstoffverbrauch des Traktors Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-AI) bei 5.240 Bh wurde im Rapsölkraftstoffbetrieb am LVFZ Almesbach in zweifacher Wiederholung bestimmt. Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse der Prüfung unter Volllast über den Drehzahlbereich zwischen 2.100 min⁻¹ und 1.100 min⁻¹, welche ohne Störungen oder technische Ausfälle durchlaufen werden konnten.

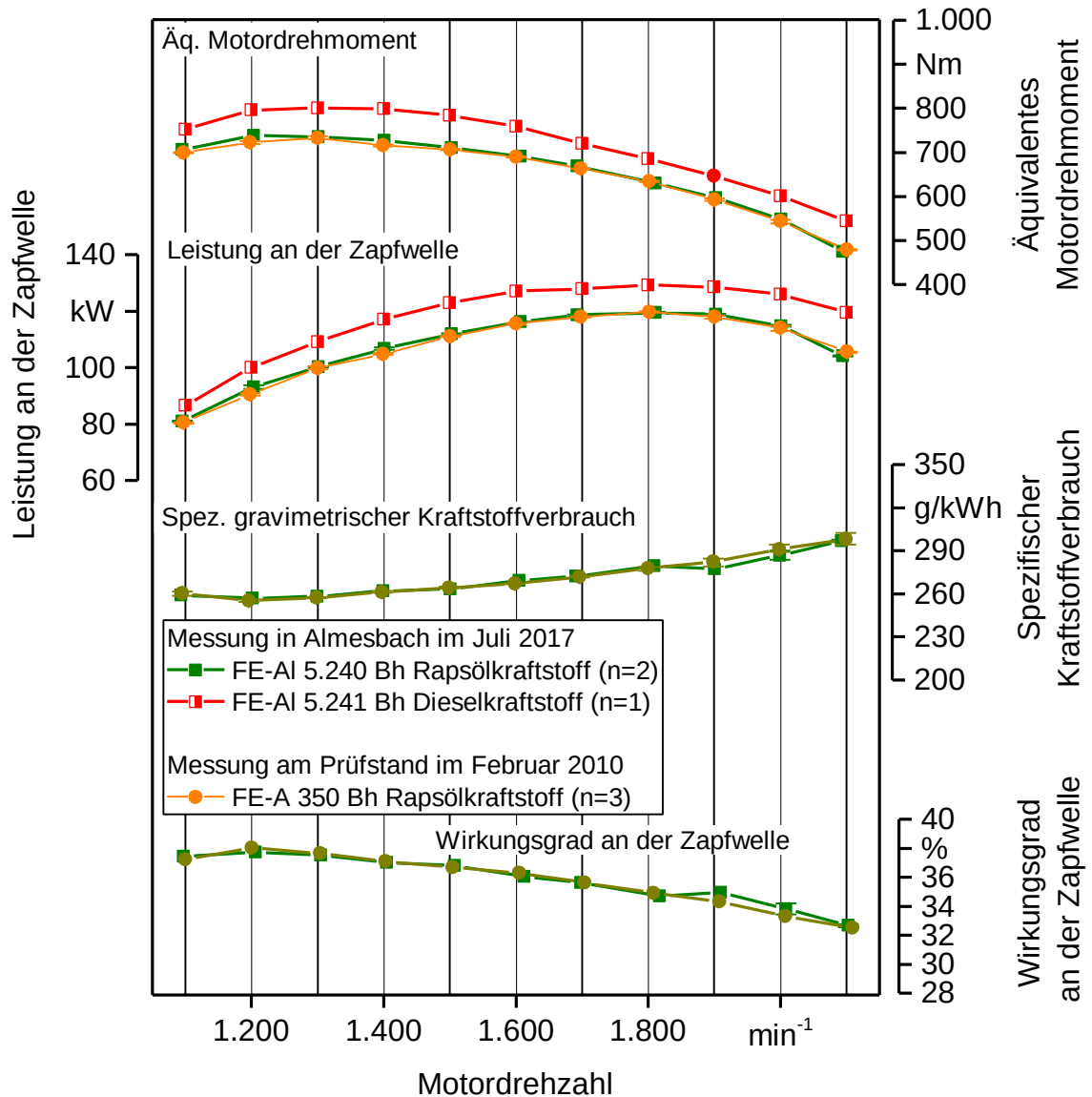


Abbildung 44: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle der Traktoren FE-AI und FE-A

Die Leistung an der Zapfwelle betrug mit Rapsölkraftstoff 104 kW (141 PS) bei der Nenndrehzahl von 2.100 min^{-1} und erreichte bei einer Drehzahl von 1800 min^{-1} mit 120 kW (163 PS) das Maximum. Damit entsprechen die gemessenen Leistungskennzahlen des Traktors FE-AI den am Traktorenprüfstand ermittelten Werten einer Messung des baugleichen Traktors FE-A bei 350 Bh aus dem Jahr 2010 mit Rapsölkraftstoff. Hier wurde eine Zapfwellenleistung von 105 kW bei 2.100 min^{-1} bzw. 119 kW bei 1.800 min^{-1} festgestellt.

Darüber hinaus wurde eine Leistungsmessung mit Diesekraftstoff nach DIN EN 590 aus dem Fahrzeugtank ohne Kraftstoffverbrauchsmessung durchgeführt. Die Leistung und das äquivalente Motordrehmoment des Traktors waren im Mittel über alle Messpunkte

mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zur Messung mit Dieselmotorkraftstoff um 9 % geringer, wie vom Motorenhersteller angegeben. Aufgrund des ca. 16 % geringeren gravimetrischen Heizwerts von Rapsölkraftstoff (37,1 MJ/kg) im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff (42,9 MJ/kg) ist die Leistung bei gleichbleibenden Einstellparametern des Einspritzsystems im Rapsölkraftstoffbetrieb reduziert.

Abhängig von der Motordrehzahl variiert der spezifische gravimetrische Rapsölkraftstoffverbrauch zwischen 257 g/kWh und 297 g/kWh bei einem Wirkungsgrad von 33 % bis 38 %.

Trotz der vergleichsweise hohen Umgebungstemperaturen (T_a) zwischen 299 K und 302 K (26 °C und 29 °C) bei einem atmosphärischen Druck von $p_s = 96,7$ kPa entsprach der Faktor f_a mit 1,2 bis 1,3 bei der Messung im Freien dem Gültigkeitsbereich von $0,93 \leq f_a \leq 1,07$ nach ISO 8178.

Insgesamt weist die Messung darauf hin, dass die Motorleistung auch nach einer Betriebsdauer von ca. 5.000 Bh konstant ist.

6.2.5 Abgasstufe IIIB: John Deere 6125R (JD-N)

Die Messung der Zapfwellenleistung am Traktor JD-N erfolgte bei 1.450 Bh in Straßmoos mit Rapsölkraftstoff. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 45 dargestellt. Zum Vergleich werden die Ergebnisse der Leistungsmessungen am Traktorenprüfstand bei 850 Bh, 1.110 Bh und 1.152 Bh herangezogen [22].

Sowohl die Leistung an der Zapfwelle als auch der Kraftstoffverbrauch waren seit der letzten Messung am Traktorenprüfstand mit Rapsölkraftstoff bei 1.152 Bh konstant. Bei 1.110 Bh wurde im Betrieb mit Rapsölkraftstoff am Traktorenprüfstand eine geringere Zapfwellenleistung als kurz nach der Umrüstung bei 855 Bh festgestellt. Durch Anpassungen an der Motorsteuergerätesoftware wurde dieser Leistungsrückgang durch den Landmaschinenhersteller behoben und die Zapfwellenleistung war bei 1.152 Bh wieder auf dem Ausgangsniveau. Da als Ursache Ablagerungen in den Injektoren vermutet wurden, wie diese auch bei rein dieselbetriebenen Motoren mit Common-Rail-Einspritzsystem auftreten können [9] [10], wurde dem Rapsölkraftstoff ab 1.152 Bh auf Empfehlung des Herstellers das Additiv John Deere Fuel Protect [4] in einer Konzentration von 1.000 ppm beigemischt. Die Ergebnisse der Vor-Ort-Messung weisen darauf hin, dass sich seit Einsatz des Additivs das Leistungsverhalten nicht mehr verändert hat. Auch ein stark beladener Partikelfilter könnte das Leistungsverhalten beeinflussen, jedoch bewegt sich der Abgasgegendruck auf einem niedrigen Niveau deutlich unter 100 mbar. Es zeigt sich, dass der zuverlässige Betrieb des Traktors bei niedrigem Abgasgegendruck ohne aktive Regeneration des Partikelfilters mit Rapsölkraftstoff möglich ist.

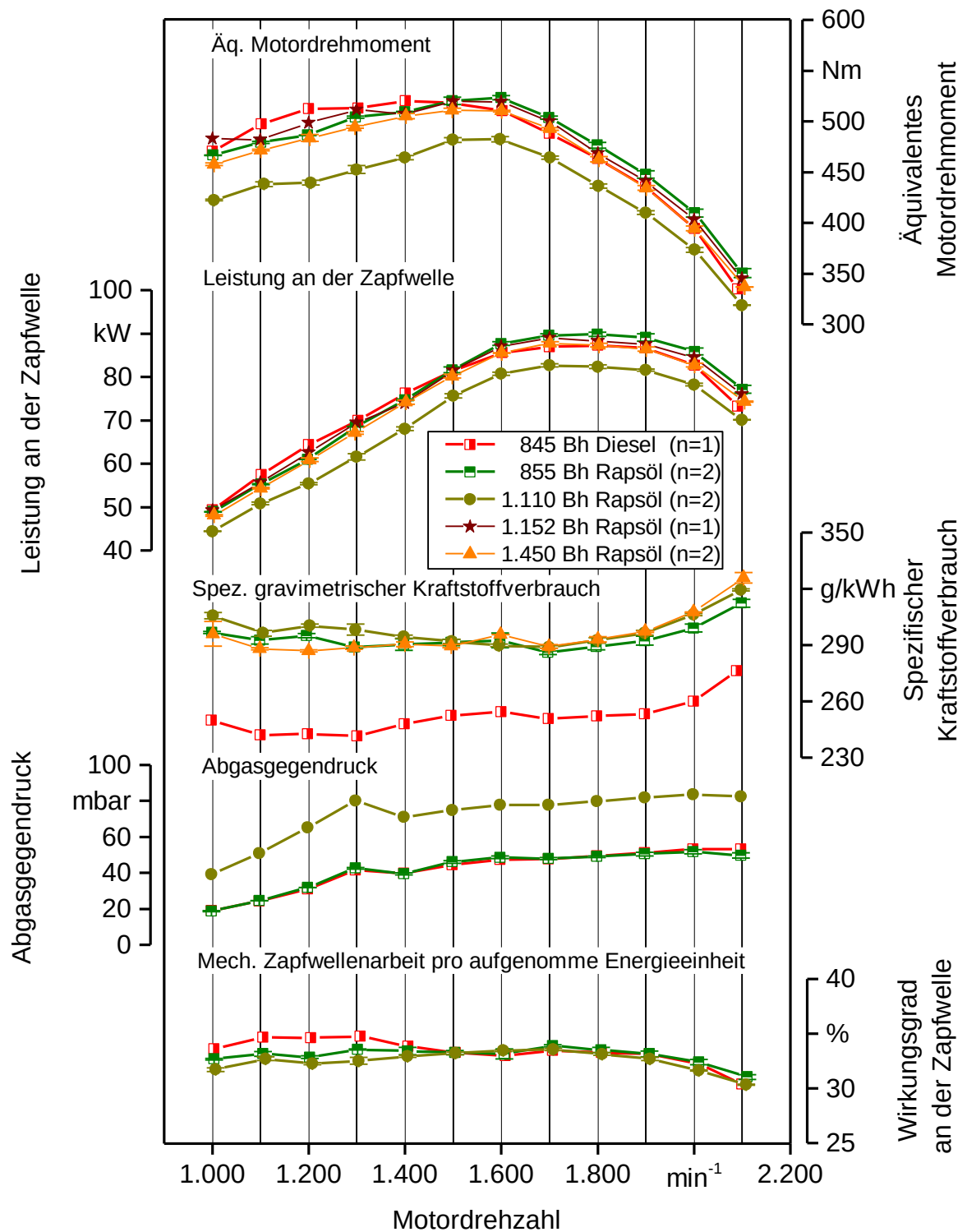


Abbildung 45: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle und Abgasgegendruck des Traktors JD-N

6.3 Leistungs- und Emissionsmessungen

Im Vorhaben wurden Emissions- und Leistungsmessungen am Abgasstufe-IIIA-Traktor John Deere 6930 (JD-K), am Abgasstufe-IIIB-Traktor Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) und an den Abgasstufe-IV-Traktoren Fendt Vario 724 S4 (FE-S) sowie John Deere 6215R (JD-S) mit Rapsölkraftstoff durchgeführt. Emissionsmessungen im realen Fahrbetrieb erfolgten mit den Traktoren FE-S und JD-S.

6.3.1 Abgasstufe IIIA: John Deere 6930 Premium (JD-K)

Die Emissions- und Leistungsmessungen am John Deere 6930 Premium (JD-K) fanden mit Rapsöl bei 4.137 Bh statt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 46 zu sehen. Hier sind zudem Ergebnisse aus früheren Messungen zum Vergleich enthalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei den Messungen zwischen 2.300 Bh und 3.500 Bh eine Prototyp-Abgasnachbehandlung am Fahrzeug installiert war und die Messungen bei 2.335 und 2920 Bh mit Sojaölkraftstoff durchgeführt wurden [22]. Die bei 4.137 Bh gemessene Zapfwellenleistung und der spezifische Kraftstoffverbrauch liegen auf dem gleichen Niveau wie im Neuzustand bei ca. 50 Bh. Die Leistung bei 4.137 Bh und bei 50 Bh war im Mittel um ca. 7 % höher als im Vergleich zu den Messungen bei 2.300 Bh bis 3.500 Bh mit Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN). Dies ist auf veränderte Motoreinstellungen und auf den niedrigeren Abgasgegendruck ohne AGN zurückzuführen.

Beim Traktor JD-K ist trotz einer zwischenzeitlich installierten Prototyp-AGN keine Verschlechterung von Leistung und Kraftstoffverbrauch über eine Laufzeit von über 4.000 Bh festzustellen. Daher ist davon auszugehen, dass die verbauten Motorbauteile, wie z. B. die Injektoren, ordnungsgemäß funktionieren.

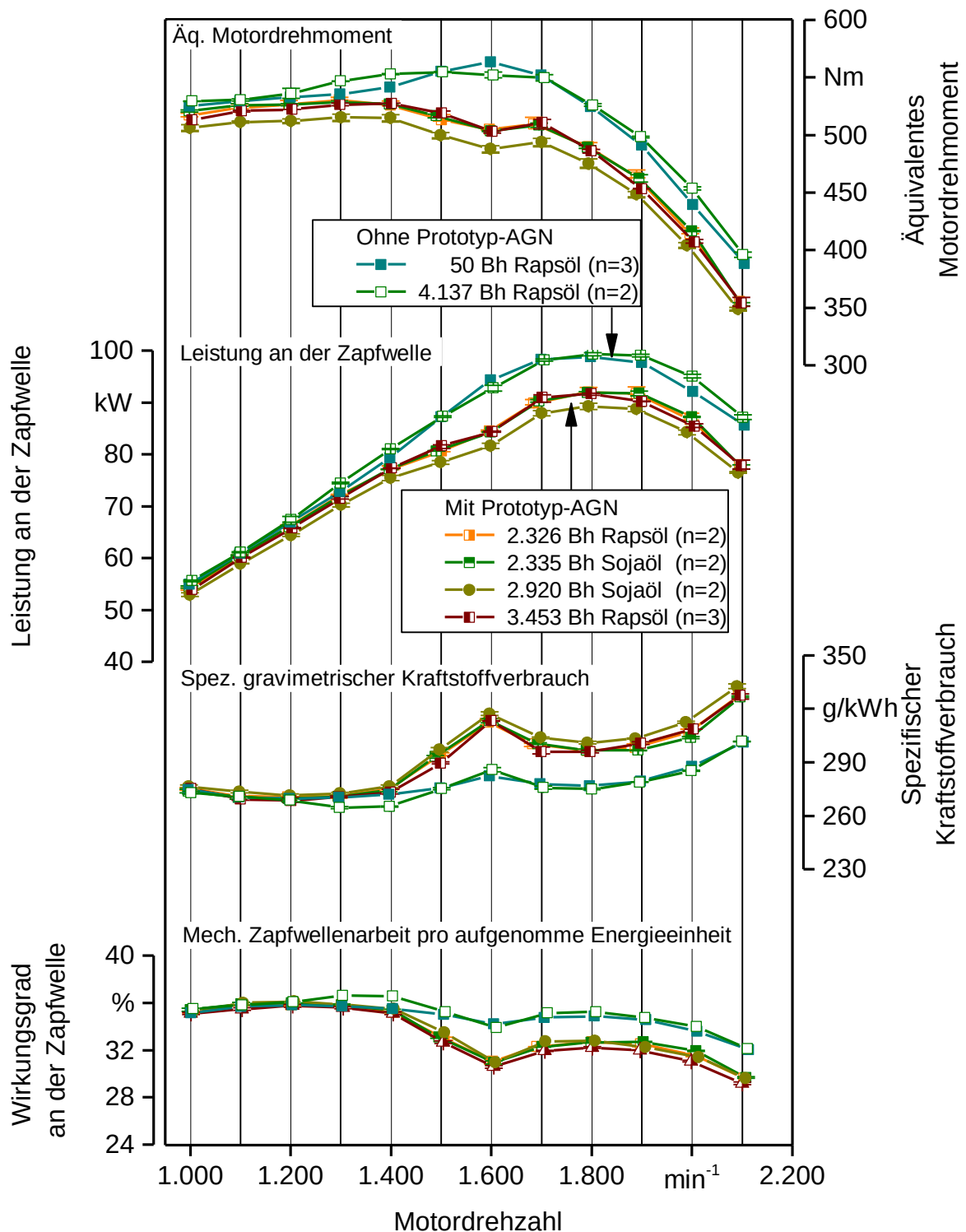


Abbildung 46: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des John Deere 6930 (JD-K) im Betrieb mit Rapsöl- und Sojaölkraftstoff bei verschiedenen Betriebsstunden

Abbildung 47 zeigt den Verlauf der limitierten Abgasemissionen mit Rapsöl-, Sojaöl- und Dieseldieselkraftstoff über die Laufzeit des Traktors JD-K.

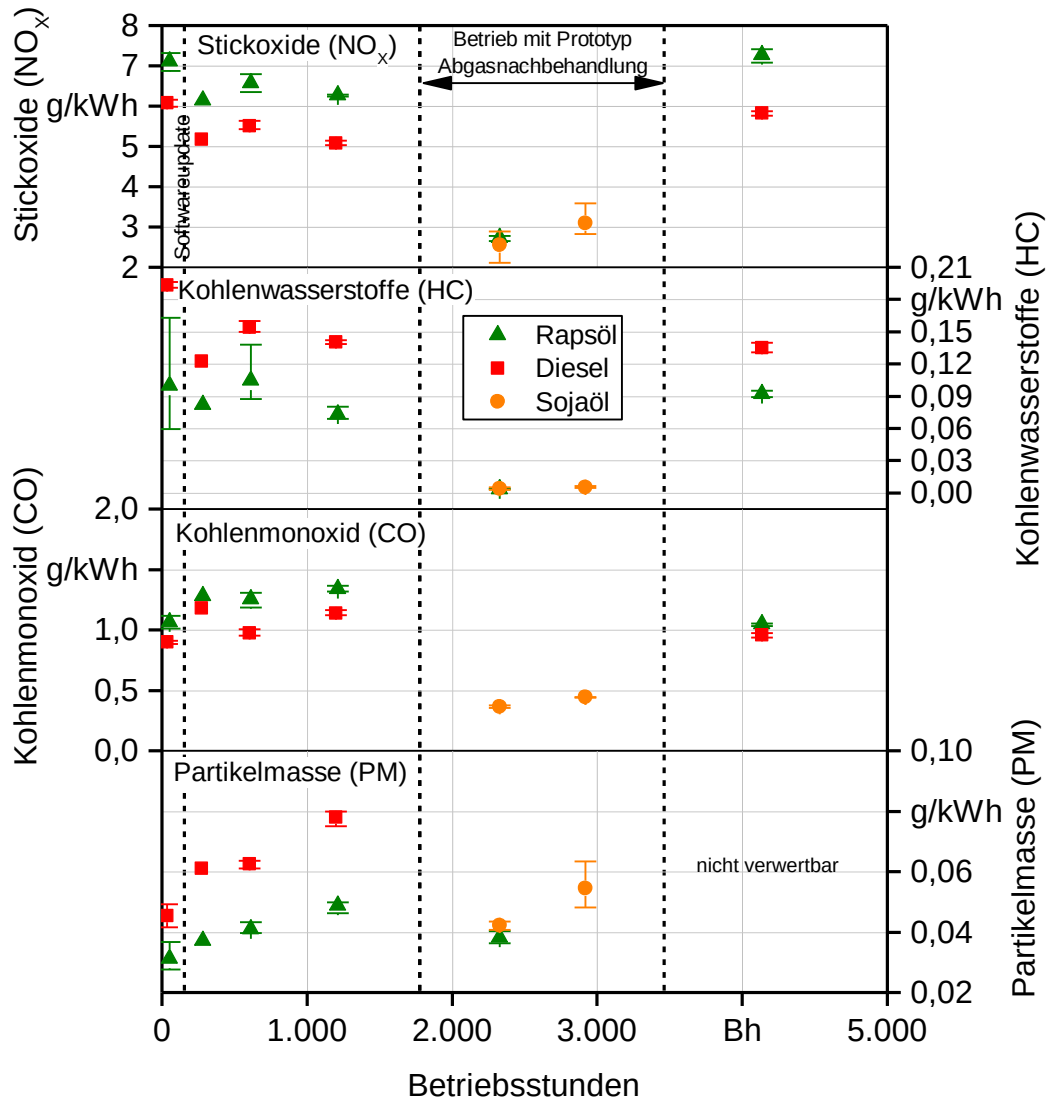


Abbildung 47: Limitierte Abgasemissionen im NRSC in Anlehnung an ISO 8178 für Rapsöl-, Sojaöl- und Dieseldieselkraftstoff über die Betriebsdauer

Mit dem Ziel, die Abgasemissionen zu reduzieren, wurden am Traktor im Anschluss an die erste Messung bei ca. 50 Bh eine neue Motorsteuergerätesoftware und später eine Prototyp-AGN zwischen 2.326 Bh und 3.453 Bh erfolgreich getestet [18] [22]. Nach dem Ende der Untersuchung bei 3.453 Bh wurden die Motorsteuerungssoftware und die Abgasanlage des Traktors auf den Auslieferungszustand zurückgesetzt. Das Emissionsverhalten bei 4.137 Bh hat sich im Vergleich zu den Ergebnissen bei 50 Bh im Rapsöl- und Dieseldieselbetrieb nicht wesentlich verändert. Die NO_x- und CO-Emissionen mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff bewegen sich nach einer Laufzeit von ca. 4.100 Bh auf dem Niveau der Ausgangsmessung bei 50 Bh. Die HC-Emissionen im Rapsölbetrieb sind ebenfalls auf dem Ausgangsniveau, im Dieseldieselbetrieb jedoch bei 4.137 Bh geringer als bei 50 Bh. Die Partikelmassemessung (PM) bei 4.137 Bh konnte aufgrund eines Messgerätefehlers nicht ausgewertet werden.

Insgesamt hat der Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff über mehr als 4.000 Bh bisher keinen negativen Einfluss auf das Emissionsverhalten.

6.3.2 Abgasstufe IIIB: Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka)

Leistung, Drehmoment, Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad

Die Leistung an der Zapfwelle ist im Dieselmotorbetrieb mit 105 kW um ca. 21 % geringer als die vom Hersteller mit 133 kW angegebene Motornennleistung (nach der EU-Richtlinie 97/68/EG). Diese Leistungsdifferenz ergibt sich bei der Leistungsmessung an der Zapfwelle durch zusätzliche Verbraucher wie Lüfter, Kühlmittelpumpe, Lichtmaschine und durch die Verluste im Getriebe.

Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei 50 Bh ist das äquivalente Motordrehmoment des Traktors über den gesamten Drehzahlbereich um ca. 15 % bis 20 % geringer als mit Dieselmotor bei 10 Bh (siehe Abbildung 48). Aufgrund anderer physikalischer Eigenschaften von Rapsöl im Vergleich zu Dieselmotor verringert sich die Einspritzmenge bei gleichen Motoreinstellungen, was zu einer geringeren Leistung führt [58] [22]. Die Einspritzmenge hängt bei Common-Rail-Systemen primär von der eingestellten Bestromungsdauer des Injektoröffnungsventils ab [50]. Dies ist auch beim Fendt Vario 718 SCR festzustellen. Um die zugeführte Brennstoffenergiemenge von Rapsöl- und Dieselmotor und damit die Leistung anzugleichen, müsste die Einspritzmenge im Rapsölbetrieb erhöht werden.

Eine Betrachtung des Verhältnisses von abgegebener Zapfwellenleistung zu zugeführter Brennstoffleistung ergibt, dass die Unterschiede zwischen Dieselmotor und Rapsölkraftstoff lediglich $\pm 2 \%$ betragen. Der Wirkungsgrad des Traktormotors ist somit im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotor in etwa gleich.

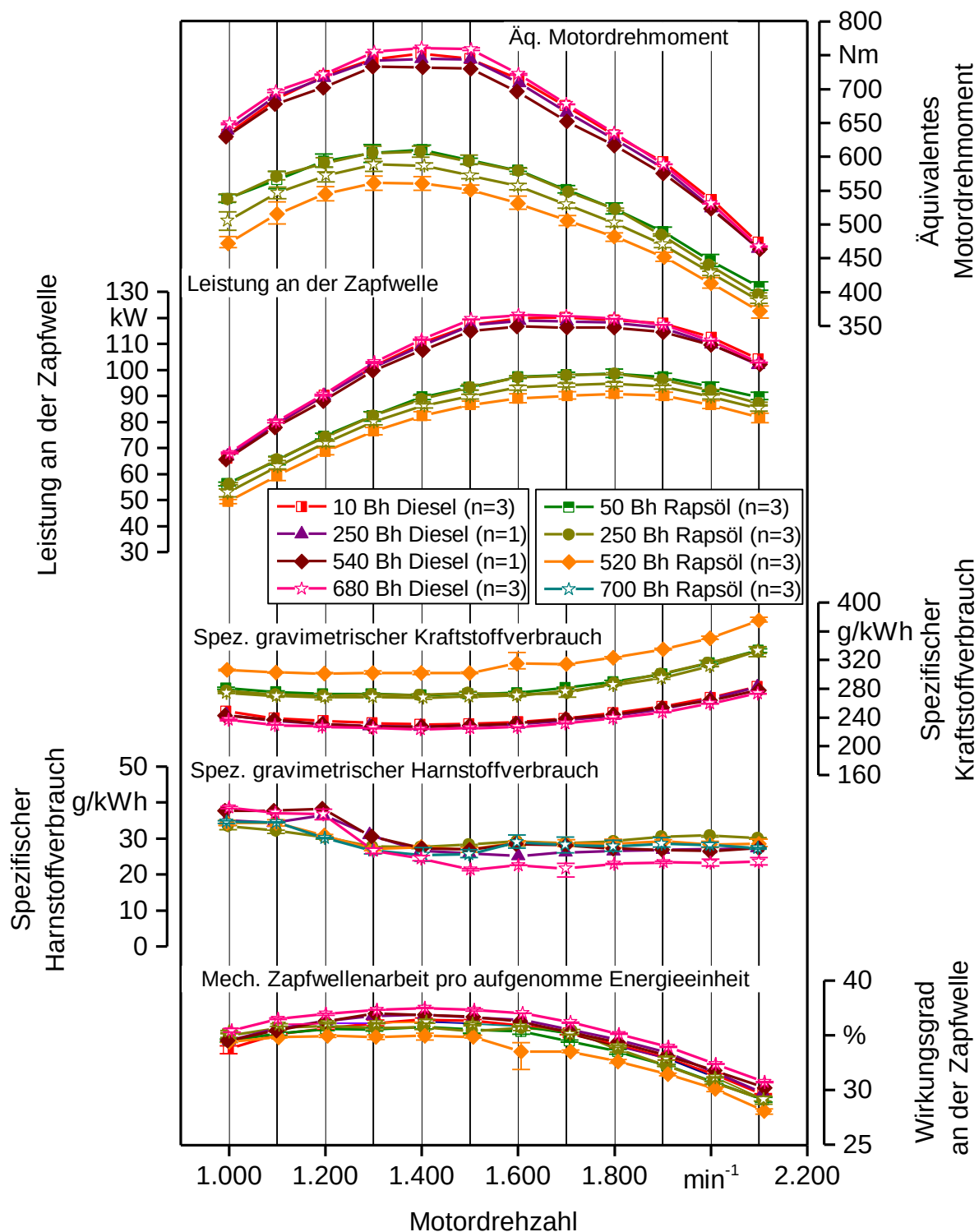


Abbildung 48: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und Harnstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff

Nach 200 Bh Feldtesteinsatzzeit bei einem Betriebsstundenzählerstand von 250 Bh zeigten sich bei den Messungen im Rapsölbetrieb keine Änderungen von Leistung, Kraftstoffverbrauch oder Wirkungsgrad im Vergleich zum Ausgangszustand bei 50 Bh. Nach knapp 500 Bh Feldtesteinsatzzeit ist die Leistung jedoch im Rapsölbetrieb unter Volllast um durchschnittlich 7,8 % gesunken. Die verringerte Leistung wird durch eine um 5,1 % geringere volumetrische Einspritzmenge und einen um ca. 2,9 % niedrigeren Wirkungsgrad an der Zapfwelle verursacht. Im Dieselmotorbetrieb sinken im gleichen Zeitraum die volumetrische Einspritzmenge und die Leistung im Mittel der Volllastkurve um 1,4 % bei unverändertem Wirkungsgrad. Die Durchflussreduzierung kann durch Ablagerungen im Injektor verursacht worden sein. Da auch bei rein dieselmotorbetriebenen Motoren mit Common-Rail-Einspritzsystemen deutliche Leistungseinbußen bis 20 % über kurze Einsatzzeiten auftreten können [9] [10], wurde dem Rapsölkraftstoff ab 520 Bh auf Empfehlung des Landmaschinenherstellers das Additiv Deutz Clean-Diesel InSyPro [9] (2.500 ppm) beigemischt. Dies wird vom Motorenhersteller auch beim Einsatz biodieselhaltiger Dieselmotorkraftstoffe zur Vermeidung und Minderung von Ablagerungen empfohlen.

Bei den Messungen bei 700 Bh (nach ca. 180 Bh Additivanwendung) wurden eine höhere Leistung und ein höherer Wirkungsgrad im Vergleich zu den Messungen bei 520 Bh festgestellt. Damit sind Leistung und Wirkungsgrad nur noch um ca. 4 % bzw. 1 % geringer als bei den ersten Messungen mit Rapsölkraftstoff bei 50 Bh. Im Dieselmotorbetrieb wird das Leistungs- und Betriebsverhalten der Messungen bei 10 Bh wieder erreicht.

Die Datenbasis zur Beurteilung der Wirkung von Reinigungsadditiven in Verbindung mit Rapsölkraftstoff ist derzeit noch gering, jedoch deuten die Ergebnisse auf einen positiven Einfluss auf den Motorenbetrieb hin. Es ist daher, wie auch im Diesel- und Biodieselmotorbetrieb, deren wiederkehrender Einsatz zu empfehlen.

Der spezifische Harnstoffverbrauch beträgt im Betrieb mit Rapsöl über den ganzen Drehzahlbereich im Mittel ca. 30 ± 2 g/kWh. Im Dieselmotorbetrieb liegt der spezifische Harnstoffverbrauch bei Drehzahlen über 1.250 min^{-1} im Mittel bei ca. 27 ± 2 g/kWh und ist damit etwas geringer als mit Rapsölkraftstoff.

NO_x- und NH₃-Emissionen sowie Harnstoffverbrauch im NRSC

Die Konzentration an Stickstoffoxiden (NO_x) im Abgas des Traktors vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem (AGN) im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff ist in Abbildung 49 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in den Prüfphasen 1 bis 7 die NO_x-Emissionen durch das AGN-System unabhängig vom verwendeten Kraftstoff deutlich reduziert werden.

Die NO_x-Konzentrationen betragen in jeder dieser Prüfphasen weniger als 200 ppm. Im Durchschnitt über alle Prüfphasen hat die Effizienz der NO_x-Minderung zwischen den Messungen mit Rapsöl bei 50 Bh und 250 Bh von 88 % auf 85 % abgenommen. Die mittlere NO_x-Umsatzrate des SCR-Systems sinkt bei 520 Bh weiter ab auf 82 %. Dieser Trend setzte sich bei den nachfolgenden Messungen nicht fort. Bei den Emissionsmessungen mit Diesel (bei 680 Bh) bzw. Rapsöl (bei 700 Bh) arbeitete das SCR-System mit einer mittleren NO_x-Minderung von 87 % bzw. 84 %. In weiteren Messungen bleibt zu

untersuchen, wie sich das Emissionsverhalten mit zunehmender Betriebszeit weiter entwickelt.

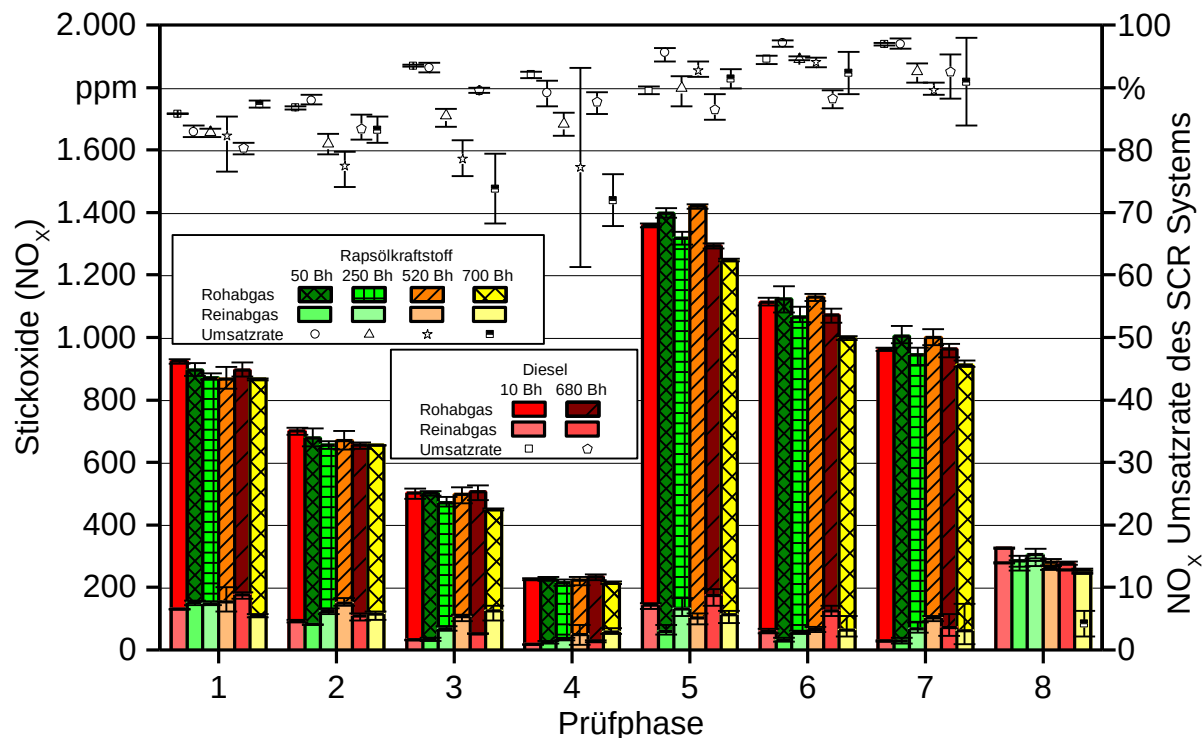


Abbildung 49: Mittelwerte und Spannweiten der Stickstoffoxid-Emissionen des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen NRSC-Prüfphasen für Rapsöl- und Dieselmotoren vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (Reinabgas)

Die NO_x -Konzentrationen im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung von Rapsöl- und Dieselmotoren unterscheiden sich bei gleichen Prüfphasen sowohl vor als auch nach dem AGN-System nur geringfügig. Sowohl bei Nenndrehzahl (Prüfphasen 1 bis 4) als auch bei der Zwischendrehzahl (Prüfphasen 5 bis 7) nehmen die NO_x -Konzentrationen vor dem AGN-System mit abnehmender Leistung ab. Dies weist darauf hin, dass im Brennraum geringere Spitzentemperaturen erreicht werden und damit die Bildung thermisches Stickstoffmonoxids (NO) reduziert wird. Die Tendenz zu abnehmenden NO_x -Konzentrationen mit abnehmender Leistung ist auch nach dem AGN-System noch zu erkennen, wenngleich in deutlich geringerem Maße.

In der Prüfphase 8 (Leerlauf) ist das AGN-System nicht aktiv und die NO_x -Konzentrationen bewegen sich vor und nach der Abgasnachbehandlung in etwa auf gleichem Niveau. Die Deaktivierung der Harnstoffdosierung erfolgt üblicherweise, wenn die Arbeitstemperaturen für den nachgelagerten SCR-Katalysator nicht erreicht werden. Der Verbrauch wässriger Harnstofflösung ist in Abbildung 50 für Diesel- und Rapsölmotoren bei 10, 50, 250, 520, 680 und 700 Bh dargestellt.

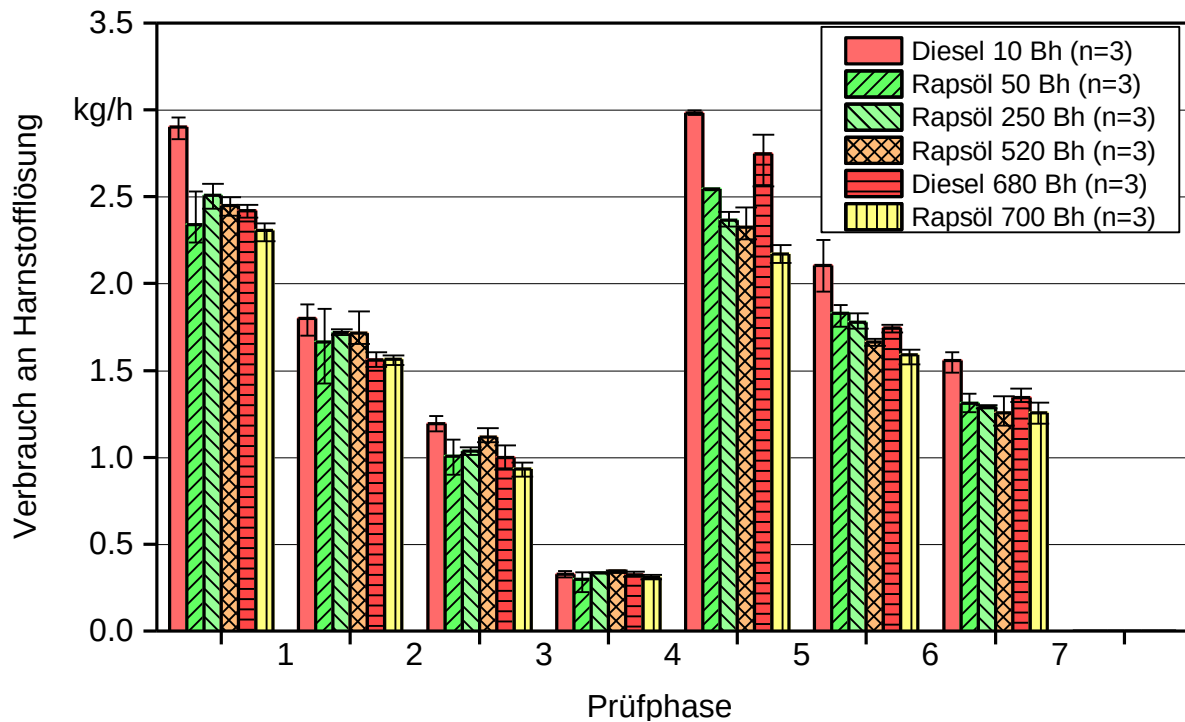


Abbildung 50: Mittelwerte und Spannweiten des Verbrauchs an Harnstofflösung des SCR-Systems in den NRSC-Prüfphasen des Versuchstraktors Fendt 718 SCR

Bei der Nenn- und bei der Zwischendrehzahl ist ein Rückgang des Harnstoffverbrauchs mit abnehmender Leistung und damit abnehmenden NO_x -Konzentrationen vor dem AGN-System festzustellen. Das SCR-System gleicht die Dosierung der Harnstofflösung den NO_x -Konzentrationen an. In den Prüfphasen 1, 5, 6 und 7 ist im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ein etwas geringerer Harnstoffverbrauch als mit Dieselmotorkraftstoff zu erkennen. Im Durchschnitt über alle Prüfphasen verbraucht der Traktor im Rapsölbetrieb mit 1,36 kg/h rund 15 % weniger Harnstoff als mit Dieselmotorkraftstoff (bei 10 Bh).

Die hinzudosierte Harnstoffmenge ist über die Betriebsdauer leicht gesunken. Der rückläufige Verbrauch an Harnstofflösung ist im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff in den Prüfphasen 1, 2, 3, 5, 6 und 7 festzustellen. Im Rapsölbetrieb werden im Vergleich zum Neuzustand (50 Bh) nur in den Prüfphasen 5 und 6 geringere Mengen Harnstoff eingebracht. Der zunächst beobachtete Anstieg der NO_x -Emissionen kann daher u. a. auch auf die Qualität der Harnstoffdosierung zurückzuführen sein.

Ein geringer Ammoniakslupf ist ein weiterer Indikator für die gute Funktion des SCR-Systems. Abbildung 51 zeigt, dass der Ammoniakslupf im Mittel über die Betriebszeit ansteigt. Vor allem in den Prüfpunkten 1, 2 und 5 mit Diesel- und Rapsölkraftstoff nehmen die NH_3 -Emissionen zu, obwohl die dosierte Menge an Harnstofflösung in diesen Prüfpunkten tendenziell rückläufig ist. Dies kann durch eine Überdosierung der Harnstofflösung oder durch abnehmende Umsatzraten des SCR- und/oder NH_3 -Katalysators (auch Slip-Kat genannt) verursacht werden.

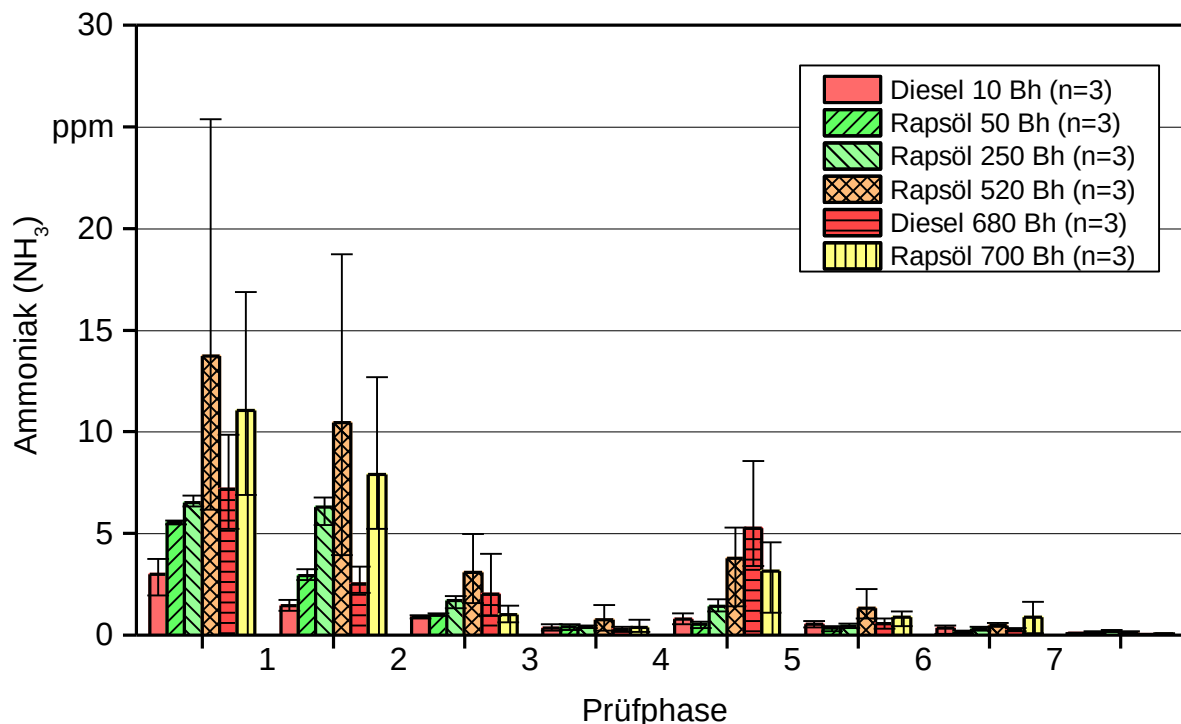


Abbildung 51: Ammoniak-Emissionen (NH_3) des Traktors FE-Ka nach dem SCR-System über die einzelnen Prüfphasen des Fendt 718 SCR im NRSC

HC- und CO-Emissionen im NRSC

In Abbildung 52 und Abbildung 53 sind die Konzentrationen an Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenstoffmonoxid (CO) im Abgas dargestellt. Mit Ausnahme des Leerlaufs ist bei allen Prüfphasen eine deutliche Reduktion dieser Schadstoffkomponenten durch das AGN-System zu beobachten.

Im Durchschnitt über alle Prüfpunkte ergibt sich eine nahezu gleiche Effizienz des Oxidationskatalysators (DOC) von 94 % für HC und 61 % für CO bei den Messungen mit Rapsöl bei 50 Bh und 250 Bh. Bei beiden Abgaskomponenten sinkt die Effizienz nach 520 Bh um 3 %, was auch durch die geringere Leistung und damit den geringeren Betriebstemperaturen des Katalysators bedingt sein kann. Die Messungen bei 680 Bh mit Diesel und bei 700 Bh mit Rapsöl zeigen einen deutlichen Rückgang der Umsatzrate des DOC in den Prüfphasen 1, 2, 3 und 8. Jedoch sind die CO- und HC-Emissionen sowohl vor als auch nach dem AGN-System auf einem sehr geringen Niveau. Der Rückgang der Umsatzrate ist deshalb bislang unkritisch.

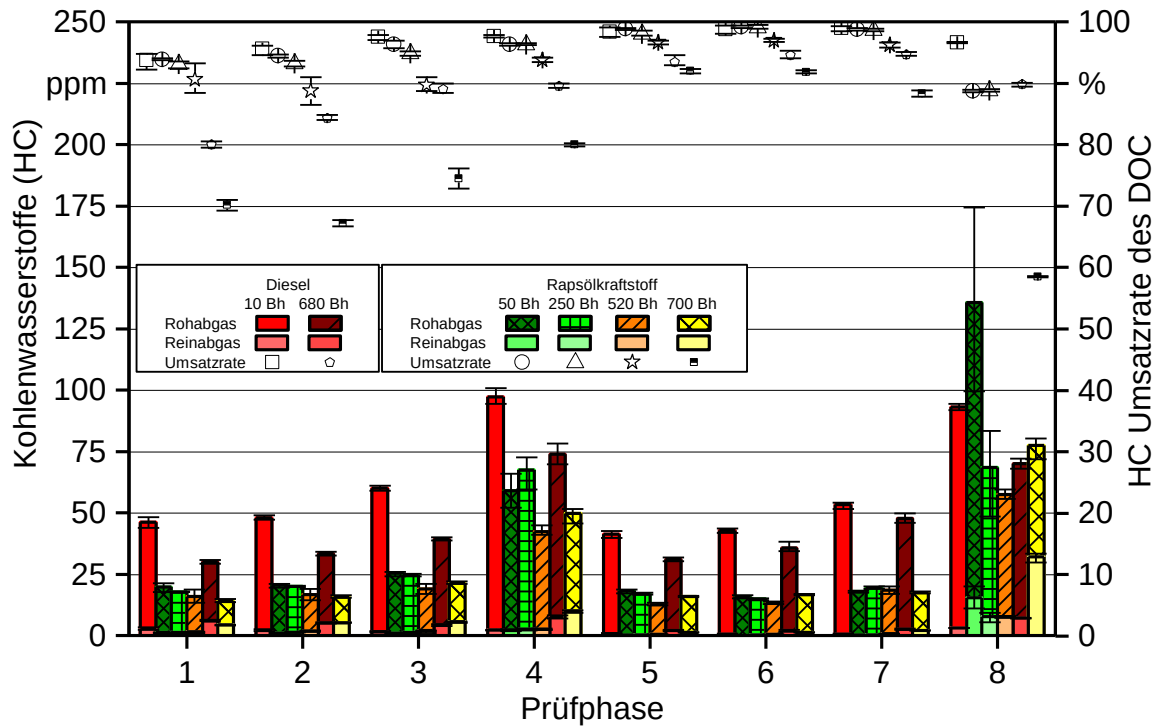


Abbildung 52: HC-Emissionen des Traktors FE-Ka für Rapsöl- und Dieselkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (Reinabgas) im NRSC

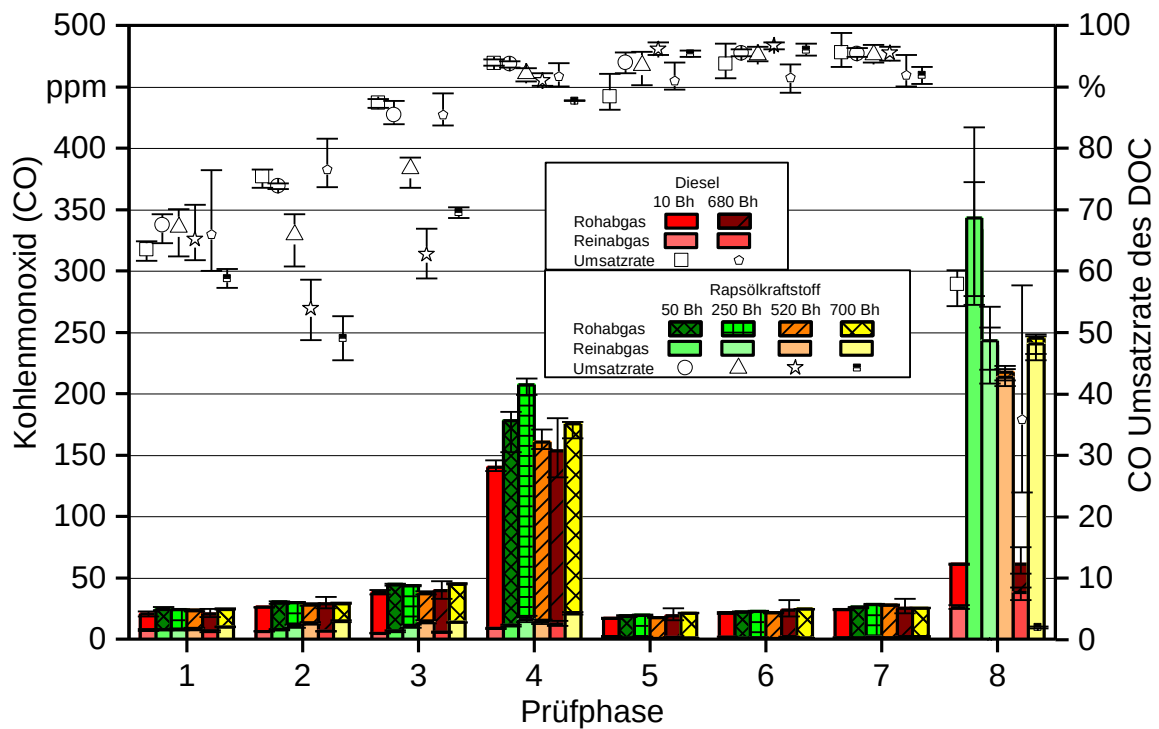


Abbildung 53: CO-Emissionen des Traktors FE-Ka für Rapsöl- und Dieselkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (Reinabgas) im NRSC

Partikelmasse-Emissionen (PM-Emissionen) im NRSC

In Abbildung 54 ist die Partikelmasse-Konzentration (PM-Konzentration) im Abgas nach dem AGN-System dargestellt. Mit Ausnahme des Leerlaufs im Betrieb mit Rapsölkraftstoff betragen bei 50 Bh Laufzeit die PM-Konzentrationen im Abgas weniger als 10 mg/m^3 . Im Leerlauf mit Rapsölkraftstoff sind im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff und zu den anderen Prüfphasen deutlich höhere PM-Konzentrationen festzustellen. Zudem sind zwischen den Wiederholungsmessungen größere Schwankungen zu verzeichnen. Die PM-Konzentrationen im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff bei 10, 50, 250, 680 und 700 Bh unterscheiden sich in den Prüfphasen 4, 5, 6 und 7 weniger stark. Neben dem Leerlaufbetriebspunkt sind auch in den Prüfphasen 1, 2 und 3 mit Rapsölkraftstoff höhere PM-Konzentrationen feststellbar als mit Dieselmotorkraftstoff. In diesen Lastpunkten besteht das größte Potenzial zur Optimierung und Absenkung der PM-Emissionen im Betrieb mit Rapsölkraftstoff. In Prüfphase 8 ist kein Anstieg der Partikelmasse im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen ersichtlich.

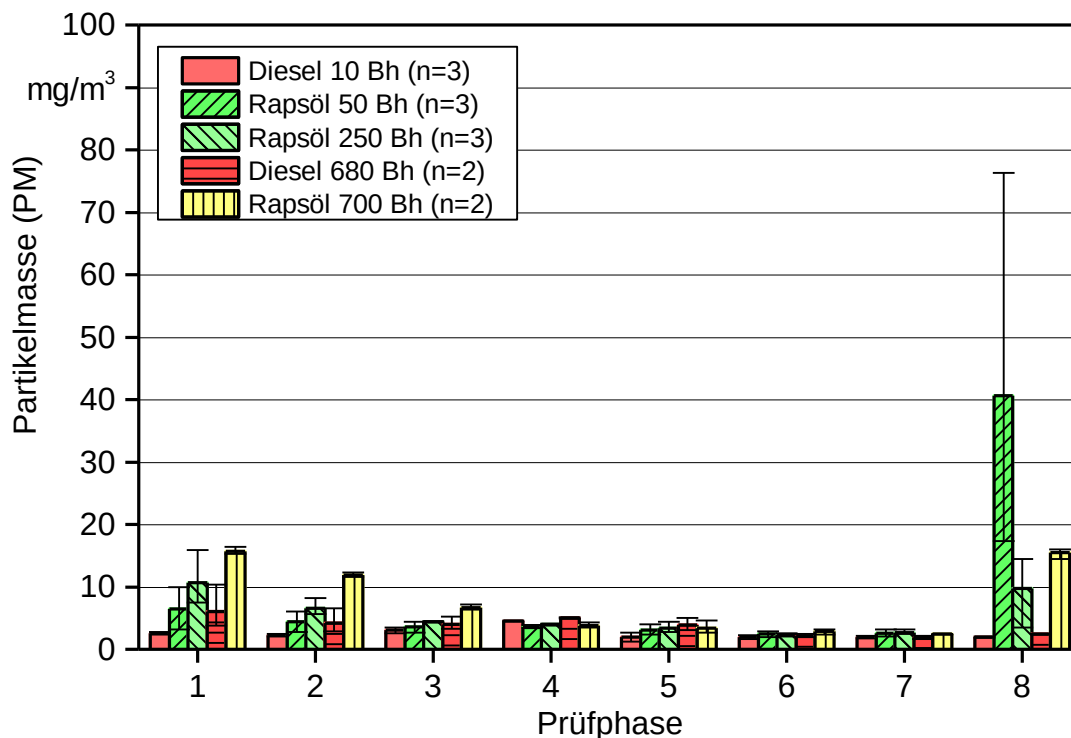


Abbildung 54: Partikelmasse-Emissionen des Traktors FE-Ka für Rapsöl- und Diesel nach der Abgasnachbehandlung (Reinabgas) im NRSC

Partikelanzahl (PN) und Partikelgrößenverteilung im NRSC

Nachfolgend werden die Ergebnisse hinsichtlich der Partikelanzahl (PN) sowie der Partikelgrößenverteilung im Abgas geschildert. Dabei wurden die Emissionen vor AGN im Rohabgas und nach AGN im Reinabgas gemessen. Damit sollen der Einfluss des Rapsölkraftstoffbetriebs sowie die Auswirkungen der AGN (DOC und SCR-System) auf die Partikelanzahl (PN) sowie -größenverteilung im NRSC untersucht werden.

Abbildung 55 zeigt die mittlere Partikelanzahl (PN) für Rapsöl bei 700 Bh und für Diesel bei 680 Bh in den Prüfphasen 1 bis 8 im Roh- und Reinabgas.

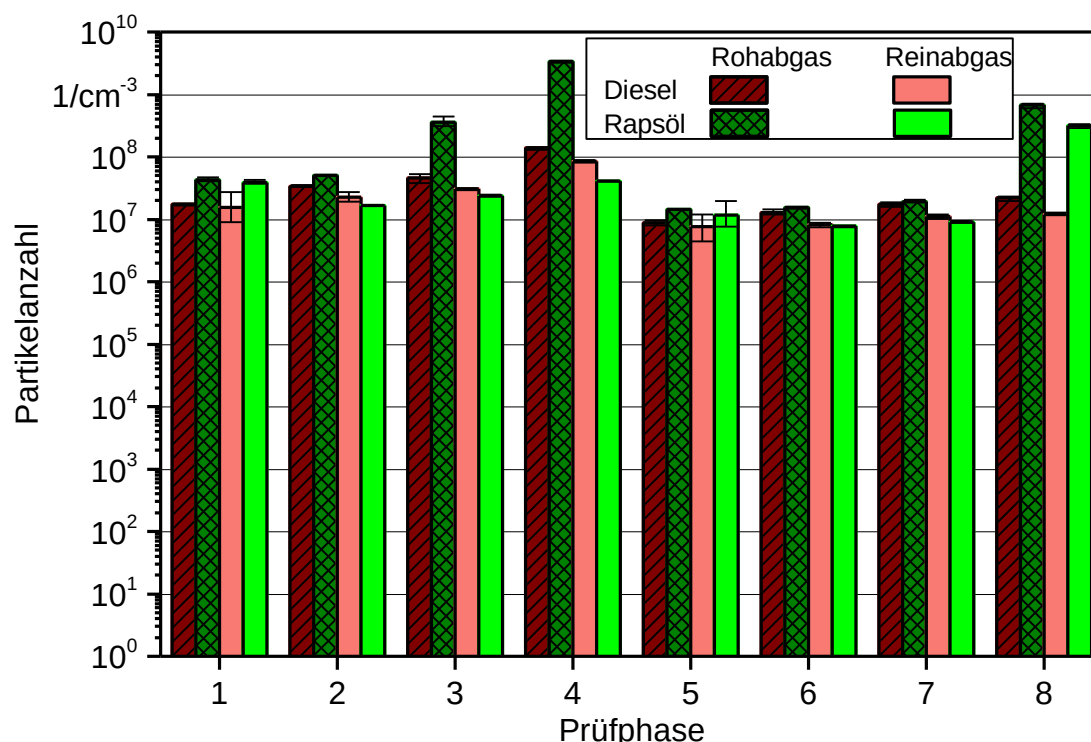


Abbildung 55: Partikelanzahl-Emissionen (PN) des Traktor FE-Ka in den einzelnen NRSC-Prüfphasen für RK (700 Bh) und DK (680 Bh) im Roh- und Reinabgas

Die PN-Emissionen vor der AGN im Rohabgas fallen mit Dieseldieselkraftstoff im Niedriglastbereich insbesondere in den Prüfphasen 3, 4 und 8 geringer aus als mit Rapsölkraftstoff. In den Prüfphasen 1, 2, 5, 6 und 7 im oberen Lastbereich sind die PN-Emissionen im Rohabgas mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff auf einem vergleichbaren Niveau.

Die Partikelreduktionsrate durch den DOC und das SCR-System fällt im Rapsölkraftstoffbetrieb insbesondere in den Prüfphasen 3 und 4 höher aus als mit Dieseldieselkraftstoff. Mit Ausnahme des Leerlaufs (Prüfphase 8) bewegen sich die Partikelanzahl-Emissionen (PN) mit Rapsölkraftstoff im Reinabgas nach der AGN je nach Lastpunkt leicht oberhalb bzw. unterhalb der PN-Emissionen im Dieseldieselbetrieb.

Insgesamt fallen die Partikelreduktionsraten durch den DOC und das SCR-System deutlich geringer aus, als dies bei Partikelfiltern zu beobachten ist. Die Größenverteilung der PN-Emissionen in den acht Prüfphasen des NRSC werden in Abbildung 56 dargestellt.

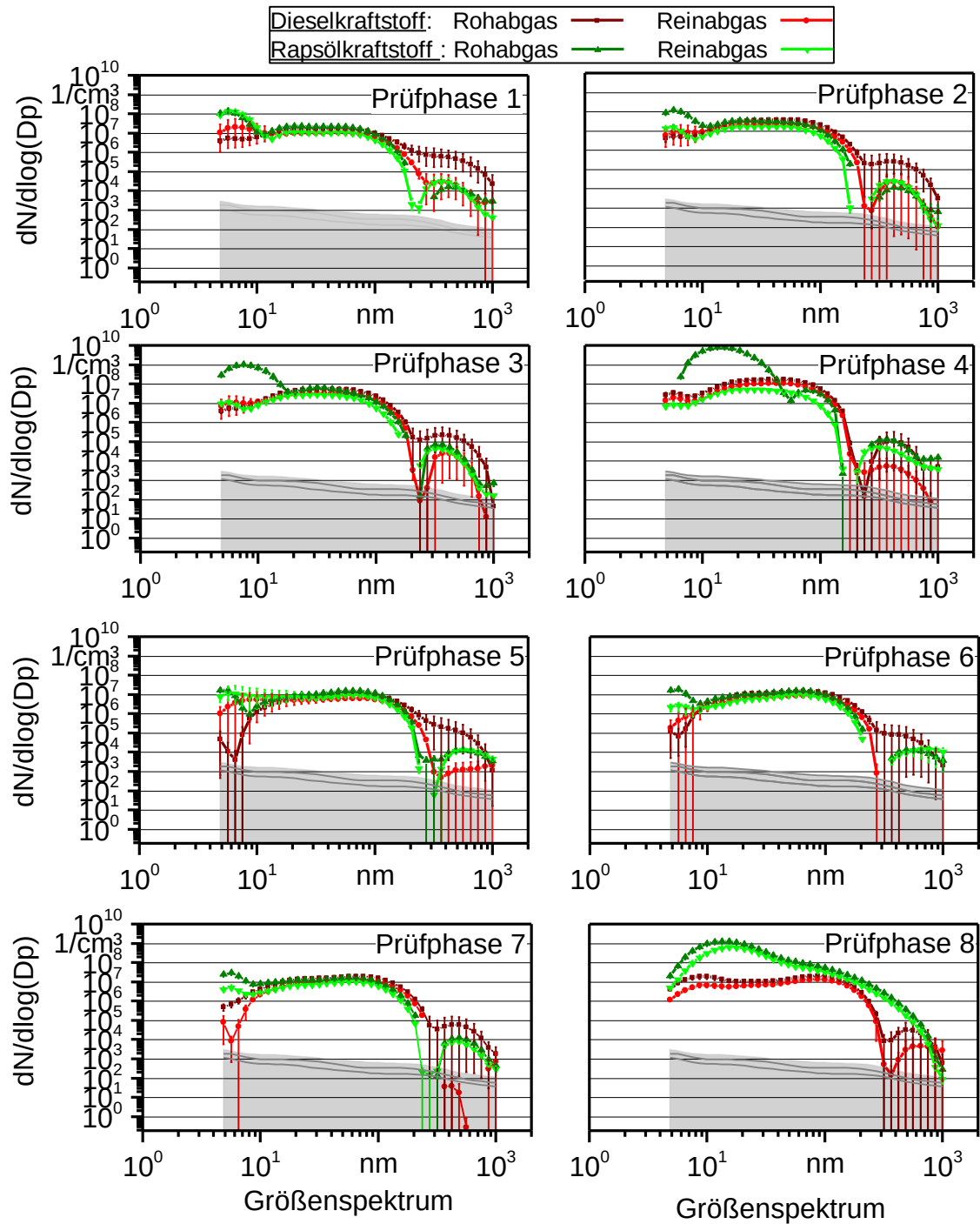


Abbildung 56: Partikelgrößenspektrum des FE-Ka der NRSC in den Prüfphasen 1 bis 8 für RK (700 Bh) und DK (680 Bh) im Rohabgas und Reinabgas mit Bereich des Fehlerrauschens des Messgeräts ($n = 3$)

Im Partikelgrößenspektrum 23 nm bis 150 nm sind die PN-Emissionen mit Ausnahme der Prüfphasen 4 und 8 im Rapsöl- und Dieselkraftstoffbetrieb sowie im Roh- und Reinabgas ähnlich ausgeprägt.

Insgesamt bewegen sich die PN-Emissionen beim Einsatz von Rapsölkraftstoff im Reinabgas nach der AGN mit Ausnahme des Leerlaufs überwiegend auf dem Niveau von Dieselmotorkraftstoff.

Oberhalb von 150 nm und unterhalb von 23 nm bewegen sich die Messwerte der PN in einzelnen Wiederholungen im Bereich des Fehlerrauschens des Messgeräts, was durch die hohen Spannweiten in den Grafiken zu erkennen ist. Rangieren alle Messwerte bei drei Wiederholungen im Bereich des Fehlerrauschens (grauer Bereich), werden sie nicht dargestellt.

Partikel unter 23 nm kommen im Rapsölbetrieb vor der AGN im Rohabgas mit Ausnahme der Prüfphase 5 häufiger vor als im Dieselmotorkraftstoffbetrieb. LÜFT (2015) [47] führt diesen Effekt auf Tröpfchenbildung infolge einer schlechteren Zerstäubung des Rapsölkraftstoffs im Brennraum im Vergleich zum Diesel bei niedriger Last zurück. Die resultierenden feinen Kraftstoffreste im Rohabgas, die am häufigsten im Leerlauf auftreten, werden vom Messgerät als Partikel erkannt. Außer in den Prüfphasen 1 und 8 werden die Partikel unterhalb 23 nm durch den DOC und das SCR-System deutlich reduziert (siehe auch Abbildung 55). In Prüfphase 1 fällt die Reduktion der PN möglicherweise aufgrund des sehr hohen Abgasmassenstroms und in Prüfphase 8 durch zu niedrige Betriebstemperaturen der AGN geringer aus als bei den restlichen Prüfphasen. Generell ist bei hoher Last die Größenfraktion unter 23 nm im Rohabgas vor der AGN geringer. Daher kann von einer besseren Oxidation der Rapsölkraftstoffreste unter hoher Last ausgegangen werden. In der Gesetzgebung der Abgasstufe IV werden die PN-Emissionen unter einem Durchmesser von 23 nm nicht berücksichtigt [29].

Im Rohabgas vor der AGN treten die Partikel über 150 nm im Dieselmotorkraftstoffbetrieb in den Prüfphasen 1 häufiger auf als im Rapsölkraftstoffbetrieb, werden jedoch durch die AGN reduziert. Die Größenfraktion über 150 nm hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis der Partikelmasse. Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der emittierten Partikelanzahl bzw. -größenverteilung sowie der gemessenen Partikelmasse (Abbildung 54) ist jedoch bei dieser Messung nicht ersichtlich.

Prüfzyklus-Emissionen im stationären Betrieb im NRSC

Die spezifischen Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC) und Partikelmasse (PM) nach der Abgasnachbehandlung sind in Abbildung 57 dargestellt. Bei den Zykluswerten ist zu beachten, dass sich die Angaben auf die an der Zapfwelle (ZW) und nicht auf die an der Kurbelwelle (KW) abgegebene Arbeit beziehen. Die Zykluswerte bezogen auf die Zapfwellenarbeit sind daher höher als die Zykluswerte, die auf die Kurbelwellenarbeit bezogen werden.

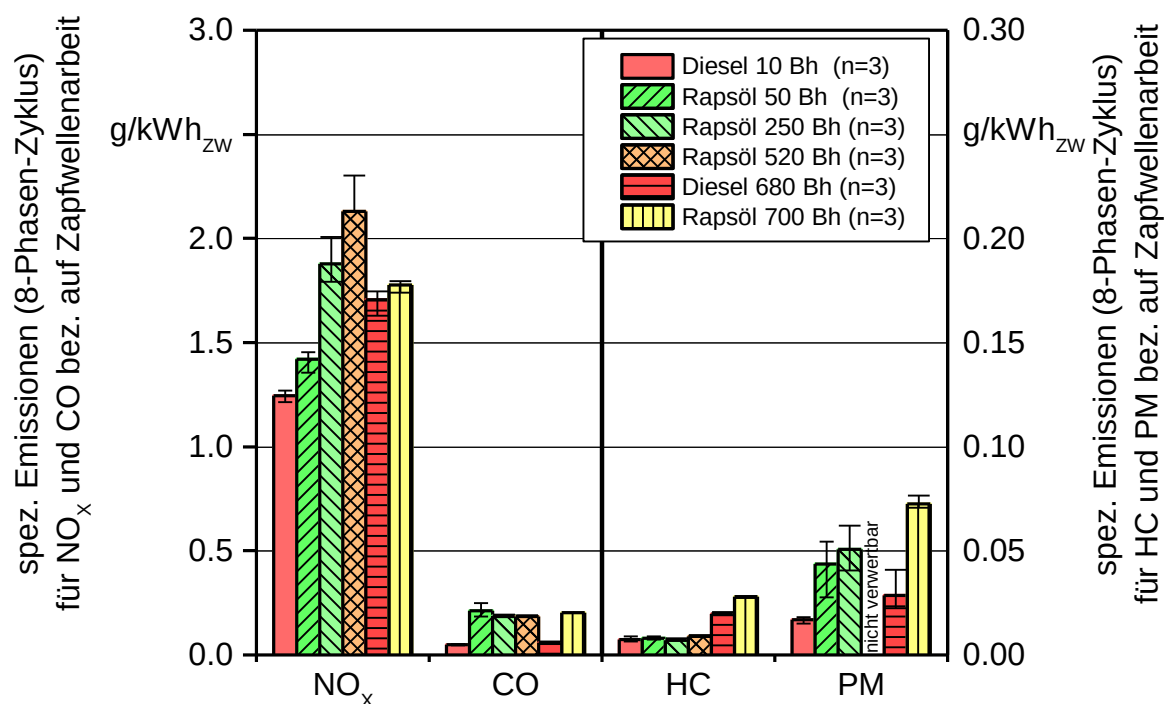


Abbildung 57: Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 (NRSC) nach der Abgasnachbehandlung (im Reinabgas) für Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff

Im Rapsölbetrieb weist der Traktor FE-Ka im Prüfzyklus zumeist etwas höhere Abgasemissionen auf als im Dieseldieselbetrieb. Dennoch werden die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe IIIB für NO_x (2,0 g/kWh), für CO (3,5 g/kWh) und für HC (0,19 g/kWh) mit Diesel bei 10 Bh und mit Rapsöl bei 50 Bh sowie 250 Bh unterschritten. Die höheren NO_x -Emissionen nach knapp 500 Bh Feldtest mit Rapsölkraftstoff deuten auf eine Effizienzminde rung des SCR-Systems hin, was auch aus den Ergebnissen der einzelnen Prüfphasen zu erkennen ist. Die Messungen nach 680 Bh bzw. 700 Bh zeigen jedoch wieder einen Rückgang der spezifischen NO_x -Emissionen und der Emissionsgrenzwert von 2,0 g/kWh wird erneut unterschritten.

Die Partikelmasse-Emissionen sind mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff deutlich höher und überschreiten den Grenzwert von 0,025 g/kWh auch unter Berücksichtigung der geringeren Zapfwellenarbeit am Traktorenprüfstand im Vergleich zur Kurbelwellenarbeit, die bei der Typgenehmigungsprüfung am Motorenprüfstand als Grundlage für den Vergleich mit den gesetzlichen Grenzwerten dient. Dies ist vor allem auf die im Vergleich zum Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff deutlich höheren PM-Konzentrationen im Leerlauf zurückzuführen. Wird im Leerlauf der Traktor mit Dieseldieselkraftstoff betrieben, was durch das Zwei-Tank-System des Traktors möglich ist, könnten die Anforderungen an die spezifischen PM-Emissionen über den stationären Prüfzyklus vermutlich eingehalten werden. Der Umrüster der Maschine schreibt dies auch bei längerem Leerlaufbetrieb mit Rapsölkraftstoff vor.

Die spezifischen CO- und HC-Emissionen bewegen sich bei allen Messungen deutlich unter den Grenzwerten.

Prüfzyklus-Emissionen im transienten Betrieb (10sNRTC)

Abbildung 58 zeigt das Emissionsverhalten des Traktors FE-Ka im stationären (NRSC) und transienten Betrieb (10sNRTC) vor und nach der Abgasnachbehandlung mit Rapsöl bei 680 Bh und Dieselkraftstoff bei 700 Bh.

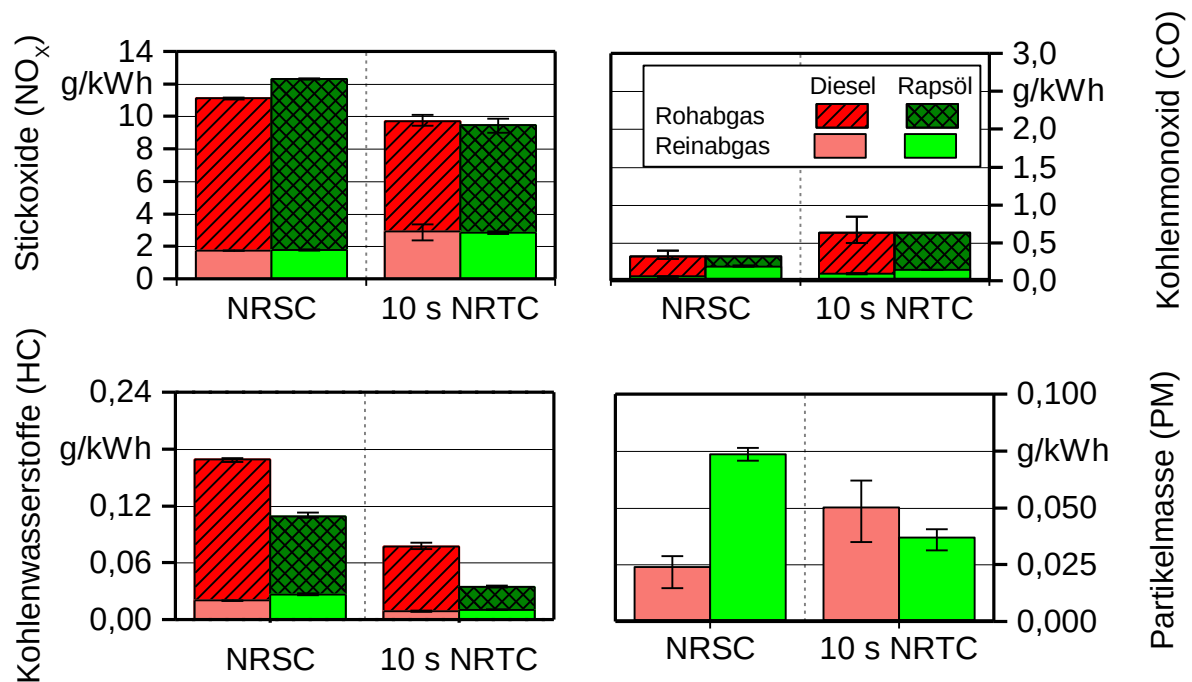


Abbildung 58: Limitierte Abgasemissionen im NRSC und 10sNRTC in Anlehnung an ISO 8178 vor (im Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (im Reinabgas) für Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei 700 und 680 Bh

Im Rohabgas zeigen sich bei beiden Kraftstoffen im NRSC höhere spezifische NO_x-Emissionen im Vergleich zum 10sNRTC. Dies ist auf die höhere mittlere Leistung im NRSC und die demzufolge höheren Verbrennungstemperaturen zurückzuführen, die die Bildung von thermischem NO fördern. Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff sind etwa 10 % höhere NO_x-Emissionen im NRSC im Vergleich zum Betrieb mit Dieselkraftstoff festzustellen. Im 10sNRTC hingegen werden vom Traktor bei geringeren mittleren Leistungen mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff in etwa gleiche Mengen an NO_x emittiert.

Nach der Abgasnachbehandlung sind die spezifischen NO_x-Emissionen im 10sNRTC mit Rapsöl und Diesel im Vergleich zum NRSC höher. In der ersten Hälfte des Kaltstartabschnitts des NRTC werden die Abgastemperaturen für ein Anspringen des SCR-Systems nicht erreicht und daher erfolgt keine Reduktion von NO_x. Im NRSC werden lediglich im Leerlauf diese Temperaturen unterschritten, sodass im überwiegenden Teil des NRSC-Prüfzyklus das SCR-System die NO_x-Emissionen deutlich reduziert. Die Unterschiede

zwischen den spezifischen NO_x -Emissionen im 10sNRTC und NRSC werden somit wesentlich durch das Anspringen des SCR-Systems beeinflusst. Im 10sNRTC unterscheidet sich das Emissionsverhalten nach der AGN im Rapsöl- und Dieselpetrieb kaum.

Nach der Abgasnachbehandlung sind die HC- und CO-Emissionen im Betrieb mit beiden Kraftstoffen im Vergleich zu den Grenzwerten auf einem geringen Niveau, sodass auch die Unterschiede zwischen transienter (10sNRTC) und stationärer (NRSC) Betriebsweise zu vernachlässigen sind.

Die PM-Emissionen sind mit Dieselpkraftstoff im NRSC niedriger als im 10sNRTC. Bei den Drehzahl- und Lastsprüngen im 10sNRTC kann es zu höherer Rußbildung aufgrund eines lokalen Sauerstoffmangels bzw. einer partiellen Kraftstoffüberdosierung kommen. Beim Betriebspunktwechsel können diese Bedingungen z. B. durch die verzögerte Wirkung des Turboladers (das sogenannte Turboloch) entstehen.

Im 10sNRTC mit Rapsölkraftstoff emittiert der Traktor hingegen weniger PM als im NRSC und im Mittel auch weniger als im 10sNRTC mit Diesel. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der im Rapsöl enthaltene Sauerstoff einem lokalen Sauerstoffmangel beim dynamischen Motorbetrieb im Vergleich zum Dieselpkraftstoff entgegenwirken kann. Ferner haben die NRSC-Prüfpunkte der Nenndrehzahl (1 bis 3) mit vergleichsweise hohen PM-Emissionen im Rapsölbetrieb im 10sNRTC nur einen geringen Anteil.

Insgesamt sind im transienten Betrieb (10sNRTC) mit Rapsölkraftstoff in etwa gleich hohe spezifische NO_x - und tendenziell niedrigere spezifische PM-Emissionen im Vergleich zum Dieselpkraftstoff zu verzeichnen.

6.3.3 Abgasstufe IV: Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) fanden zwischen 236 Bh und 1.490 Bh mehrere Messreihen mit Diesel- und Rapsölkraftstoff am Traktorenprüfstand sowie im Feld mit portabler Emissionsmesstechnik PEMS statt. Zudem wurde bei 1.100 Bh der Einfluss des Tauschs der externen gekühlten Abgasrückführung (AGR) sowie bei 1.480 Bh der Einfluss der Erneuerung der Kraftstoffinjektoren auf das Betriebs- und Emissionsverhalten untersucht.

Leistung, Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad

Die Leistung bei der Nenndrehzahl von 2.100 min^{-1} ist im Dieselpbetrieb mit 141 kW an der Zapfwelle bei 235 Bh um ca. 19 % geringer als die vom Hersteller mit 174 kW angegebene Motornennleistung nach der Typgenehmigungsprüfung. Die geringere Leistung (gemessen an der Zapfwelle) im Vergleich zum Motorenprüfstand ergibt sich bei der Leistungsmessung an der Zapfwelle durch Verluste von zusätzlichen Nebenaggregaten bzw. Getriebekomponenten. In Abbildung 59 ist der Verlauf von Leistung, Drehmoment, spezifischen Kraftstoff- sowie Harnstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle der Messungen zwischen 236 Bh und 1470 Bh mit Dieselpkraftstoff und zwischen 247 Bh und 1490 Bh mit Rapsölkraftstoff dargestellt.

Wie zu erwarten, ist die Leistung im Rapsölbetrieb ohne Anpassung der Motorparameter geringer als im Dieselmotorbetrieb. Im Mittel beträgt der Unterschied bei Volllast 15 % und schwankt in Abhängigkeit von der Motordrehzahl zwischen 13 % (bei 1.600 min^{-1}) und 18 % (bei 2.100 min^{-1}). Über den gesamten untersuchten Drehzahlbereich der Leistungsmessung werden im Rapsölbetrieb im Mittel 10 % weniger Kraftstoffvolumen pro Hub in den Brennraum eingetragen als im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff. In Verbindung mit dem ca. 5 % geringeren volumetrischen Heizwert von Rapsölmotorkraftstoff, lässt sich diese geringere Leistung mit Rapsölmotorkraftstoff erklären. Der Wirkungsgrad unter Volllast unterscheidet sich im Dieselmotor- und Rapsölbetrieb kaum. Leistung und Wirkungsgrad sowie Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch haben sich bis zu 1000 Bh Betriebszeit nicht signifikant verändert.

Die Messreihen ab ca. 1.000 Bh zeigen einen leichten Rückgang der Leistungskennwerte im Dieselmotor- und Rapsölbetrieb. Im Rapsölbetrieb sank die maximale Leistung an der Zapfwelle von 134 kW bei 455 Bh auf 128 kW bei 1.000 Bh sowie 126 kW bei 1.460 Bh. Auch im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff nahm die maximale Leistung von 153 kW bei 465 Bh auf 140 kW bei 1.470 Bh ab. In den Versuchsreihen von 236 Bh bis 1.470 Bh reduzierte sich zudem das maximal eingespritzte Kraftstoffvolumen mit Dieselmotorkraftstoff von $153 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ auf $146 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ und mit Rapsölmotorkraftstoff von $142 \text{ mm}^3/\text{Hub}$ auf $136 \text{ mm}^3/\text{Hub}$.

Bei den Messungen mit Rapsölmotorkraftstoff bei 1.460 Bh und mit Dieselmotorkraftstoff bei 1.470 Bh war ein ca. 2 % höherer mittlerer spezifischer Kraftstoffverbrauch festzustellen. Der Abgasgegendruck vor der Abgasnachbehandlung war mit 165 mbar bei 1.460 Bh annähernd auf dem Niveau des Ausgangszustands von 162 mbar (bei 247 Bh) und hatte somit einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Leistungskennwerte.

In Zusammenarbeit mit Deutz AG wurden bei 1.480 Bh die Kraftstoffinjektoren getauscht, um den Einfluss auf die Leistung und Kraftstoffverbrauch zu prüfen. Nach dem Tausch der Komponenten zeigte sich nahezu die gleiche Leistungs- und Verbrauchscharakteristik mit Rapsölmotorkraftstoff wie bei der Ausgangsmessung bei 247 Bh. Der vor dem Komponententausch festgestellte Leistungsabfall unter Volllast von ca. 8 kW bzw. die Minderung des maximal eingespritzten Kraftstoffvolumens könnte daher durch Verunreinigungen am Injektor verursacht worden sein. Möglicherweise könnte sich, wie beim Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka), eine Additivzugabe zum Kraftstoff positiv auf die Leistungs- und Verbrauchscharakteristik auswirken (siehe Abschnitt 6.3.2). Die Gründe für die Ablagerungsbildung an den Injektoren sind vielfältig und auch Gegenstand der Dieselmotorforschung [46][40][2]. Im praktischen Betrieb wurde die leicht verminderte Motorleistung von den Fahrern nicht bemerkt und es konnten alle Arbeiten mit der Maschine erledigt werden.

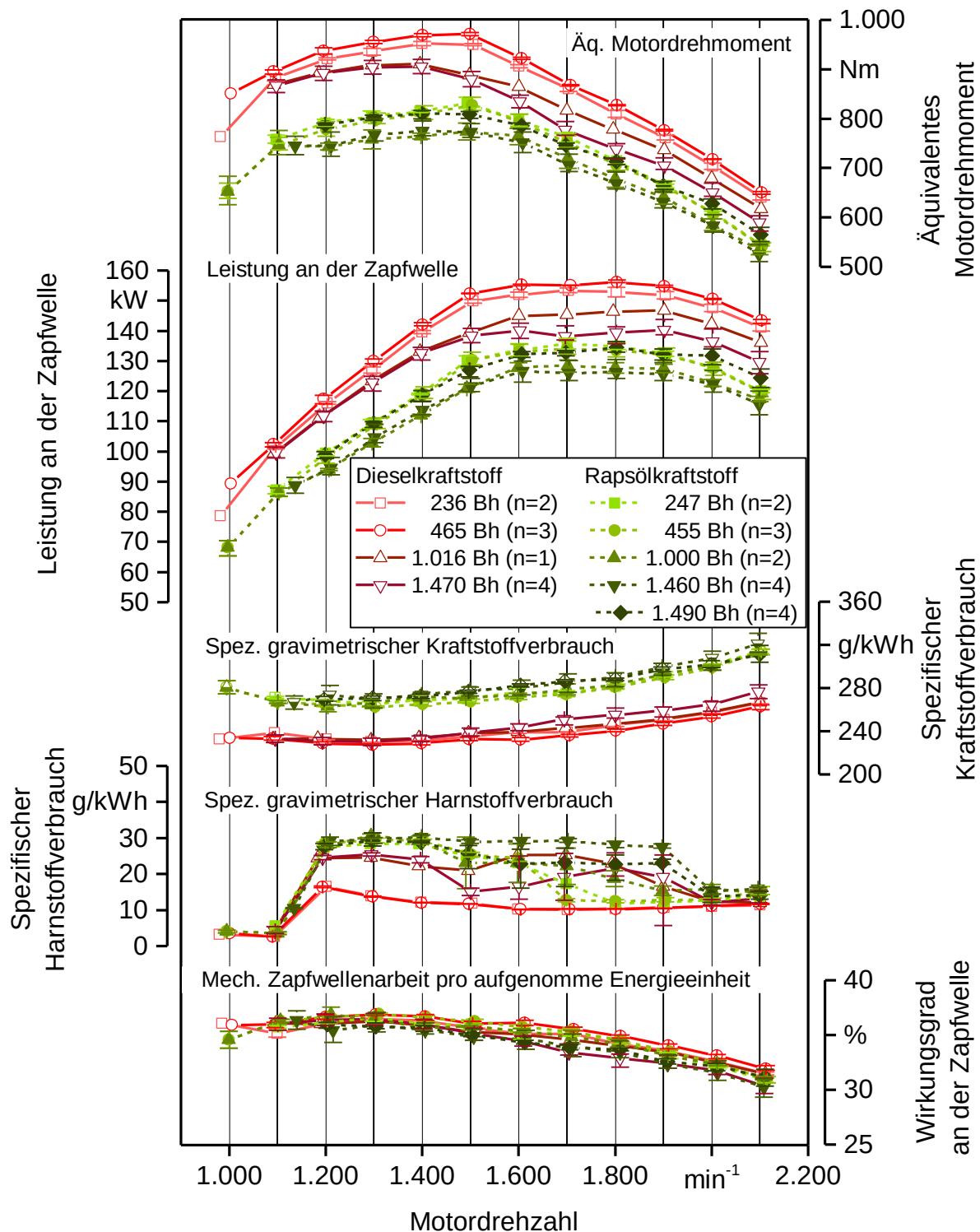


Abbildung 59: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und des Harnstoffverbrauchs sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle des Fendt Vario 724 S4 (FE-S) im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotoren

Die Unterschiede beim spezifischen Harnstoffverbrauch für Rapsöl- und Dieselmotoren lassen sich in die Drehzahlbereiche über und unter 2.000 min^{-1} einteilen. Im oberen

Drehzahlbereich ist der spezifische gravimetrische Harnstoffverbrauch mit Rapsölkraftstoff in etwa gleich hoch, im mittleren Drehzahlbereich dagegen wird deutlich mehr Harnstoff verbraucht. Über die Betriebsdauer stieg der Harnstoffverbrauch im Diesel- und Rapsölkraftstoffbetrieb an. Grund hierfür könnte ein ebenfalls beobachteter Anstieg der NO_x -Emissionen im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung sein, wie in Abbildung 60 bei der Zwischendrehzahl von 1.500 min^{-1} dargestellt ist. Höhere NO_x -Emissionen im Rohabgas werden von der Steuerungssoftware des Abgasnachbehandlungssystems detektiert und führen zu höheren Dosieraten der Harnstofflösung, um diese im SCR-Katalysator zu neutralisieren.

NO_x , HC-, CO und PM-Emissionen in den Prüfphasen des NRSC

Die Emissionsmessungen im NRSC erfolgten in den gleichen Zeiträumen wie die Leistungsprüfungen.

Die in Abbildung 60 dargestellten NO_x -Emissionen im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN) sind in den Prüfphasen 1 bis 4 bei der Nenndrehzahl von 2.100 min^{-1} im Diesel- und Rapsölbetrieb auf einem vergleichbaren Niveau. Bei Nenndrehzahl liegt das Niveau der NO_x -Emissionen vor der AGN unter 800 ppm . Abbildung 61 zeigt, dass die AGR-Rate bei den Prüfphasen der Nenndrehzahl bei beiden Kraftstoffen zwischen 19 % und 26 % beträgt. Die gekühlte Abgasrückführung war in diesen Messpunkten immer aktiviert.

In den Prüfphasen 5, 6 und 7 bei der Zwischendrehzahl von 1.500 min^{-1} fallen die NO_x -Rohemissionen mit Rapsöl in etwa doppelt so hoch aus wie mit Diesel. Grund hierfür ist, dass im Betrieb mit Rapsölkraftstoff die Abgasrückführung nicht aktiviert war, im Dieseltreibetrieb jedoch schon. Dies zeigen die Ergebnisse der Messungen der AGR-Rate bei 1460 Bh mit Rapsölkraftstoff und der darauffolgenden Messung mit Dieseltreibstoff bei 1475 Bh. Darüber hinaus sind für die Messungen im Zeitraum zwischen 1000 Bh und 1475 Bh tendenziell höhere NO_x -Konzentrationen vor der Abgasnachbehandlung bei beiden Kraftstoffen festzustellen, als bei den Messungen bei 455 Bh bzw. 465 Bh. Bei der letzten durchgeführten Messung bei 1490 Bh waren jedoch deutlich geringere NO_x -Konzentrationen zu beobachten. Unterschiede bei den Rohabgasemissionen resultieren somit primär aus unterschiedlichen AGR-Raten bei den verschiedenen Prüfphasen, welche in Abbildung 61 zu sehen sind.

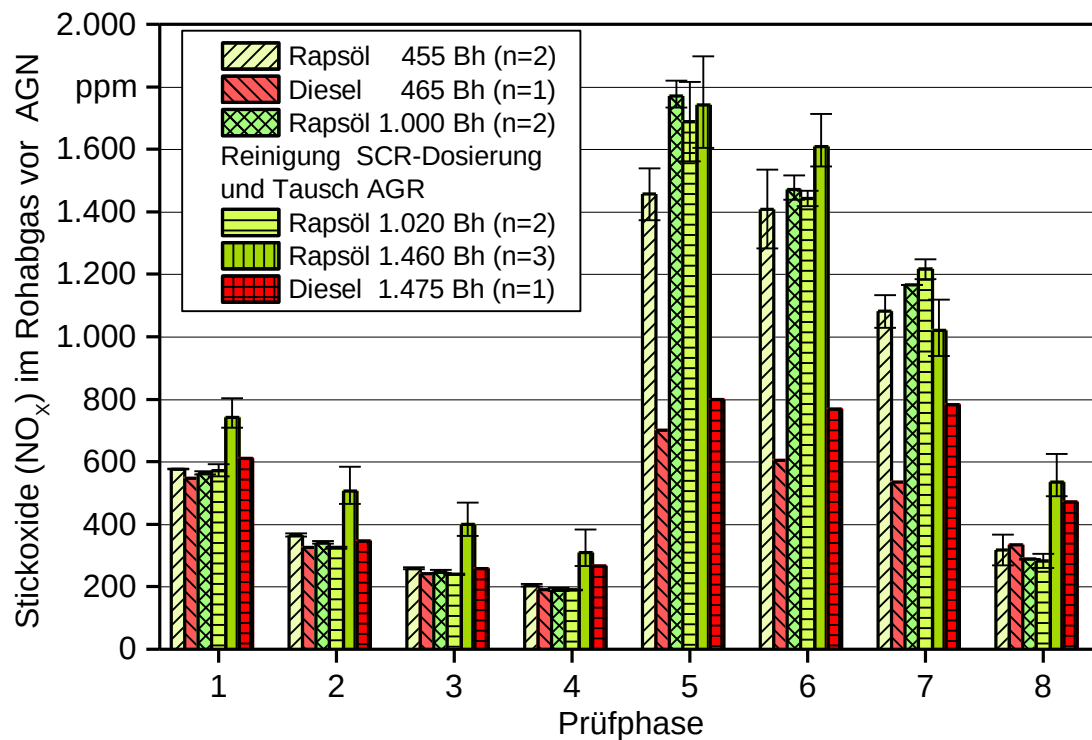


Abbildung 60: NO_x -Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)

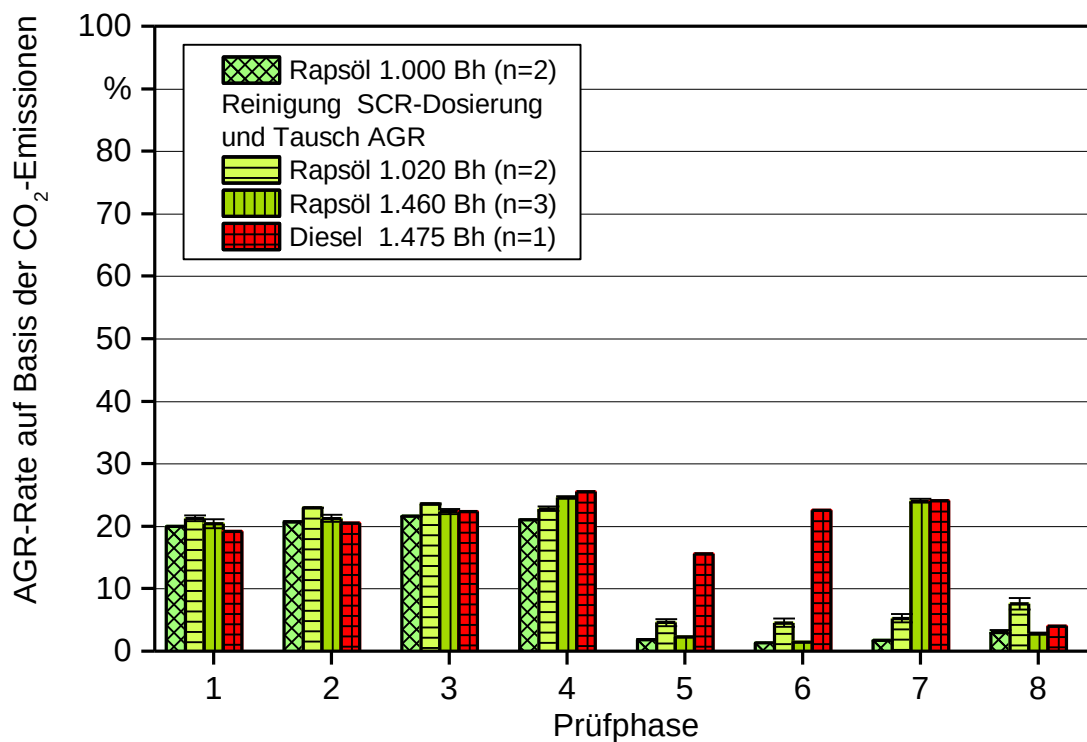


Abbildung 61: Abgasrückführrate des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff

Die NO_x -Emissionen im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (Abbildung 62) sind aufgrund hoher Umsatzraten des SCR-Systems von bis zu 99 % in den Prüfphasen 1 bis 7 (siehe Abbildung 63) insgesamt auf einem geringen Niveau. Der Tausch der externen gekühlten Abgasrückführung (AGR) bzw. die Reinigung der Dosiereinheit des SCR-Systems bei ca. 1.010 Bh (siehe Abschnitt 6.4.2) hatten nur einen geringen Einfluss auf die NO_x -Emissionen vor und nach der AGN. Bei den Messungen zwischen 1.000 Bh und 1.475 Bh wird bei beiden Kraftstoffvarianten in den Prüfphasen (1, 2, 3, 5, 6) die NO_x -Umsatzrate im Vergleich zur Messung bei 455 Bh bzw. 465 Bh nicht mehr erreicht. Folglich steigt auch der Ausstoß an NO_x im Reinabgas an. Gründe hierfür können nicht eindeutig eingegrenzt werden. Auf hohe NO_x -Rohemissionen reagiert das SCR-System mit höheren Einspritzmengen an wässriger Harnstofflösung. Das Risiko für die Ablagerungsbildung und die Reduktion der NO_x -Umsatzrate wird dadurch erhöht. Ferner können auch Störungen an der NO_x -Sensorik oder die dieseloptimierten Softwareeinstellungen hinsichtlich der Einspritzparameter oder Abgasrückführung Einfluss auf die NO_x -Emissionen nehmen. Eine Alterung der katalytischen Beschichtung ist dahingehend nach Aussage des Traktorenherstellers aufgrund der geringen Einsatzzeit unter 1.500 Bh wenig wahrscheinlich (siehe Kapitel 6.4.2). Im Leerlauf ist nur ein geringer oder kein Umsatz von NO_x festzustellen, da hier das SCR-System aufgrund zu niedriger Abgastemperaturen deaktiviert ist.

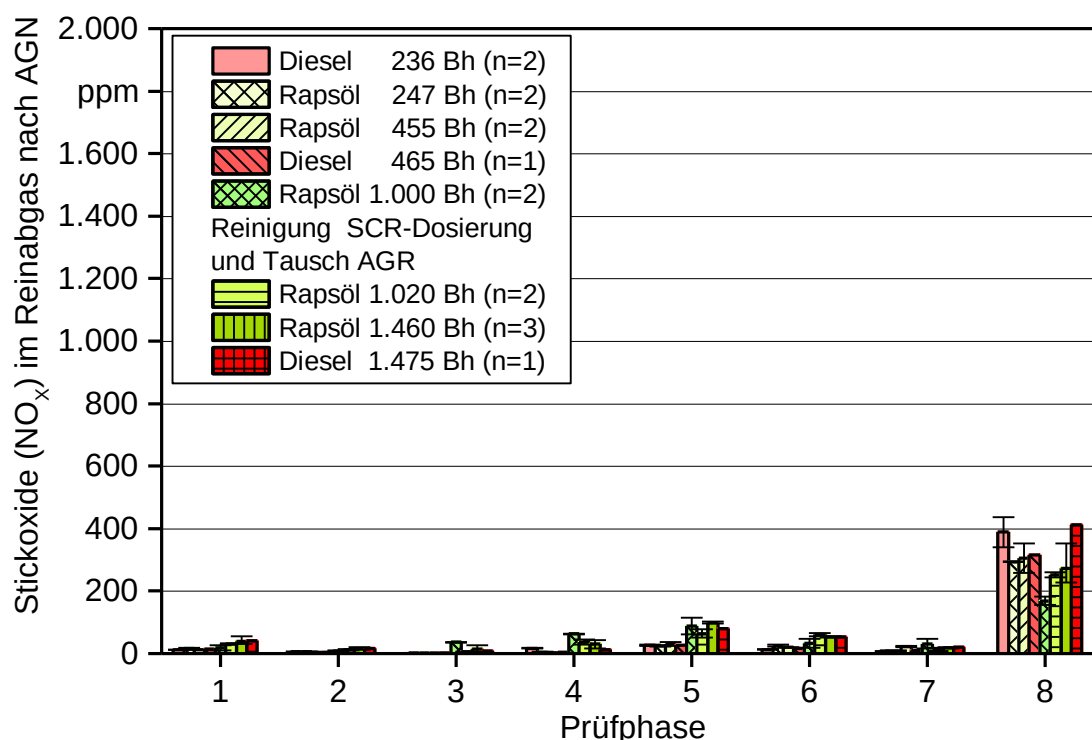


Abbildung 62: NO_x -Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN)

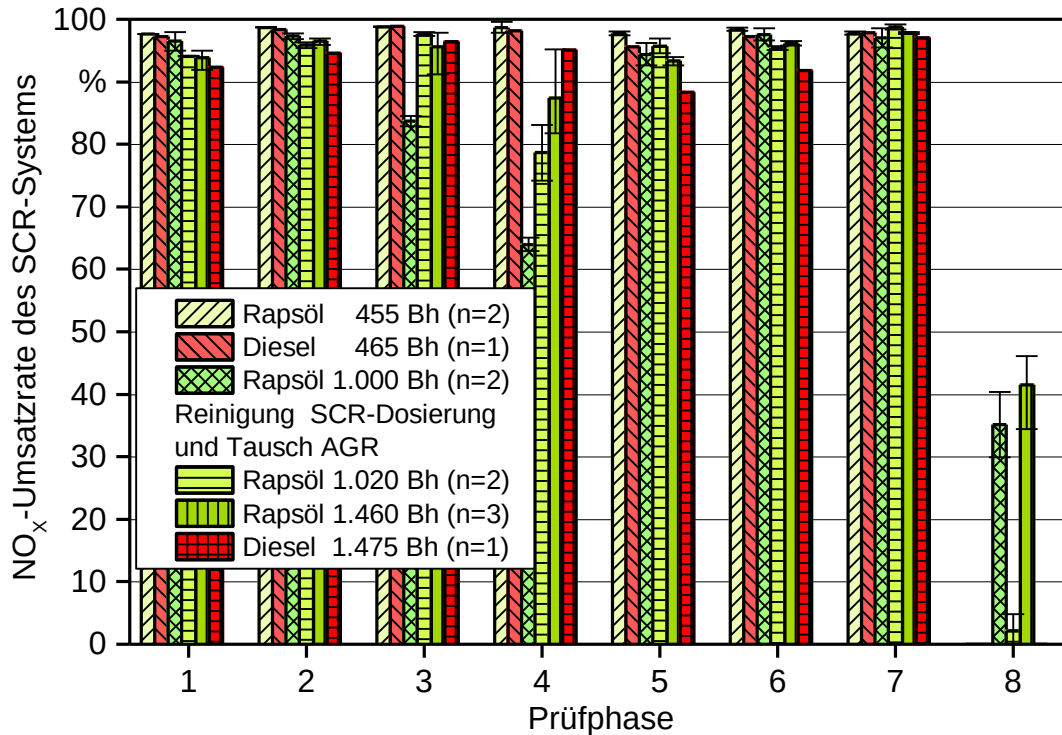


Abbildung 63: NO_x-Umsatzrate der Abgasnachbehandlung des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff

In den meisten Prüfphasen waren die HC- und CO-Emissionen mit Dieseldkraftstoff im Rohabgas vor der AGN höher als im Vergleich zum Rapsölkraftstoff, wie in Abbildung 64 und Abbildung 67 zu sehen ist. Aufgrund der hohen Umsatzrate des Oxidationskatalysators (Abbildung 66 und Abbildung 69) sinken bei beiden Kraftstoffen die CO- und HC-Konzentrationen im Reinabgas in den Prüfphasen 1 bis 7 auf unter 10 ppm ab, wie in Abbildung 65 und Abbildung 68 deutlich wird. Einzig in Prüfphase 8, dem Leerlauf, sind etwas geringere Reduktionsraten von CO und HC durch die Abgasnachbehandlung zu verzeichnen. Die Abgastemperaturen sind in dieser Prüfphase für die optimale Funktion des Oxidationskatalysators nicht ausreichend. Ab 1.460 Bh wurde die Einfachfilter- statt der Mehrfachfiltermethode für die Bestimmung der Partikelmasse-Emissionen angewandt. Die dadurch verkürzten Probenahmezeiten können sich vor allem in den Phasen 4 und 8 positiv auf die Umsatzrate der Katalysatoren auswirken, da diese weniger lange mit einer niedrigen Abgastemperatur durchströmt und damit abgekühlt werden.

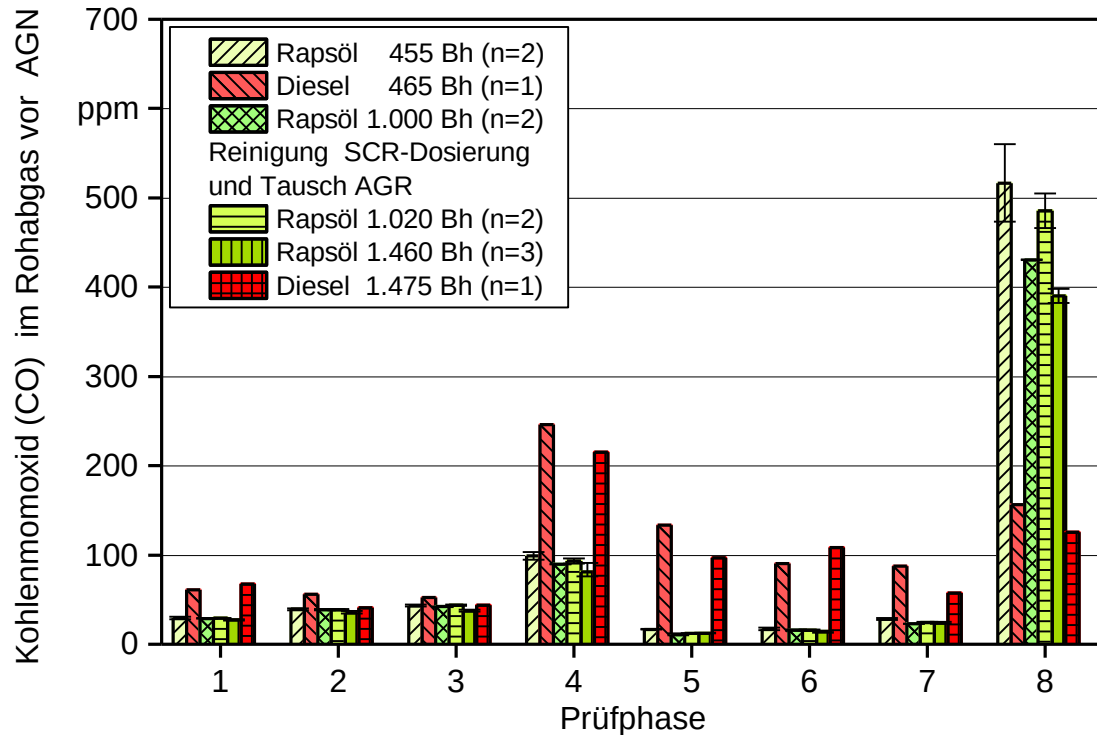


Abbildung 64: CO-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)

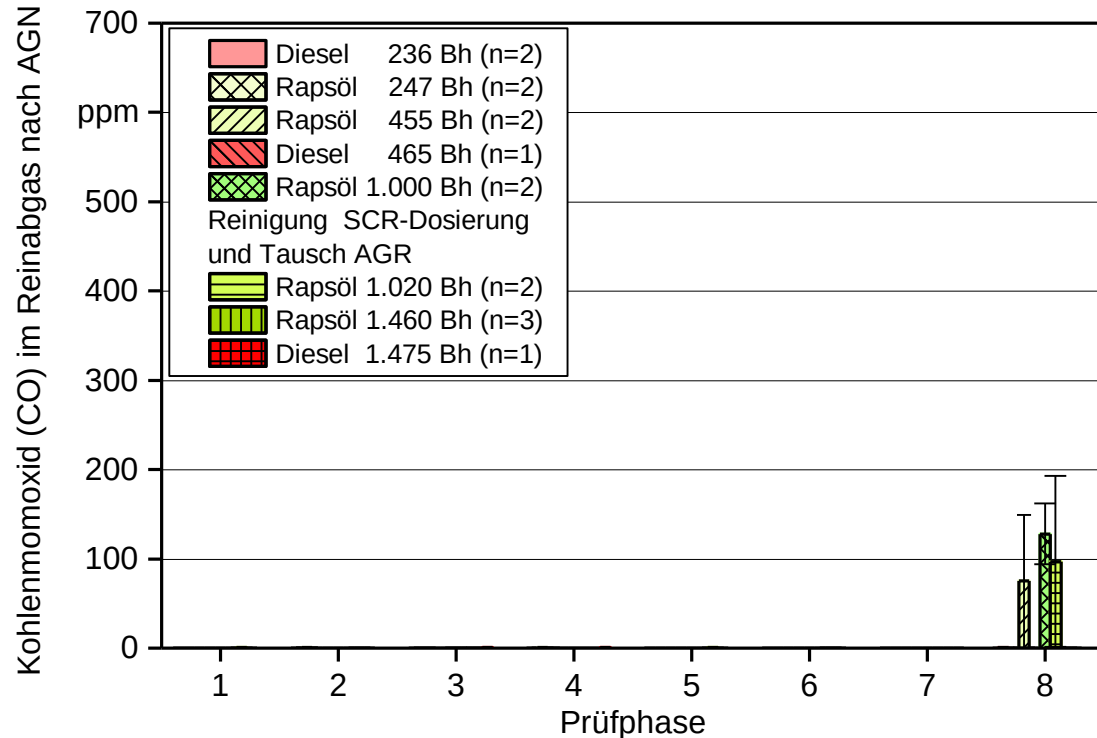


Abbildung 65: CO-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN)

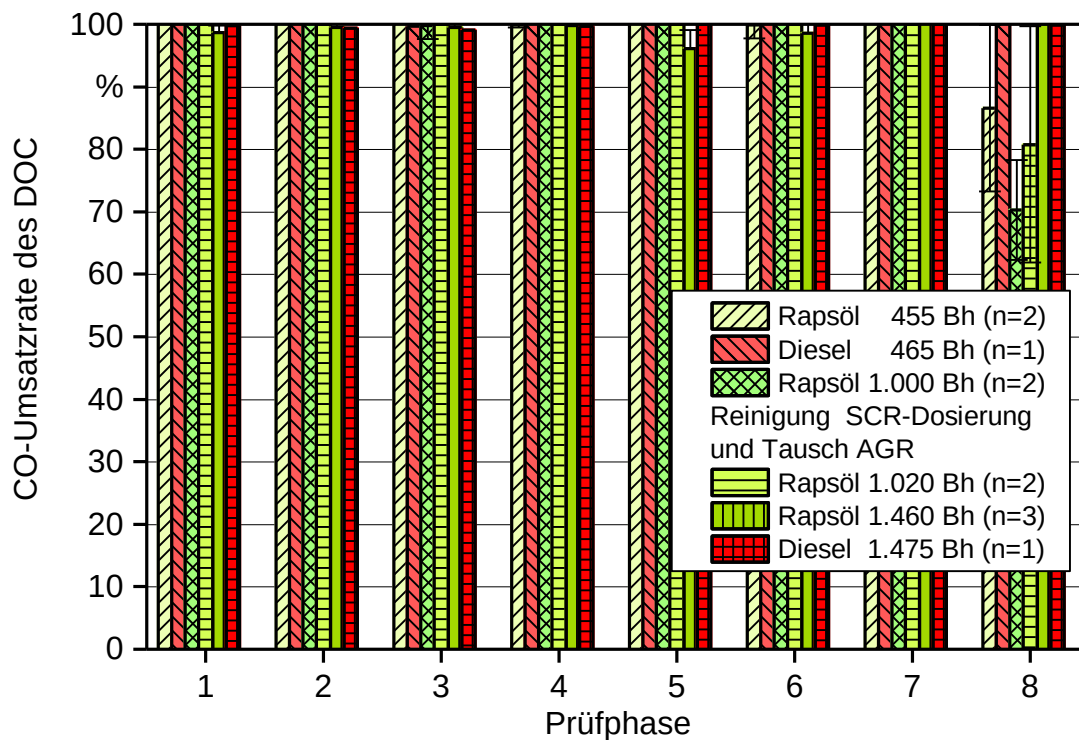


Abbildung 66: CO-Umsatzrate der Abgasnachbehandlung des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff

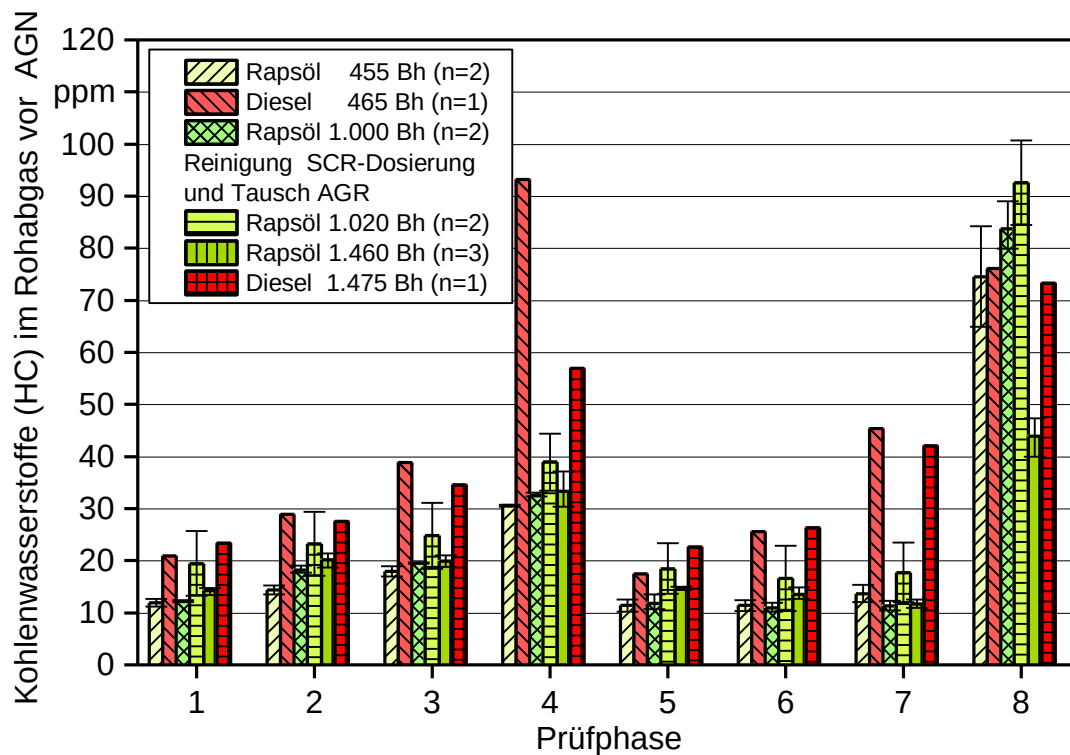


Abbildung 67: HC-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)

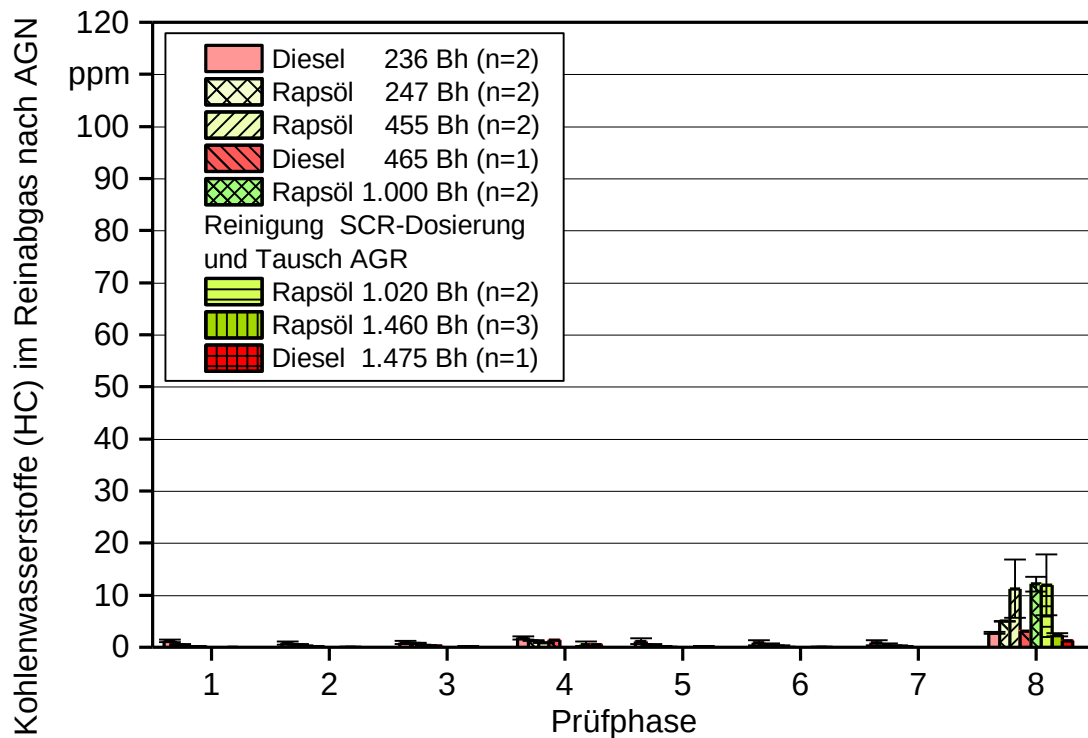


Abbildung 68: HC-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN)

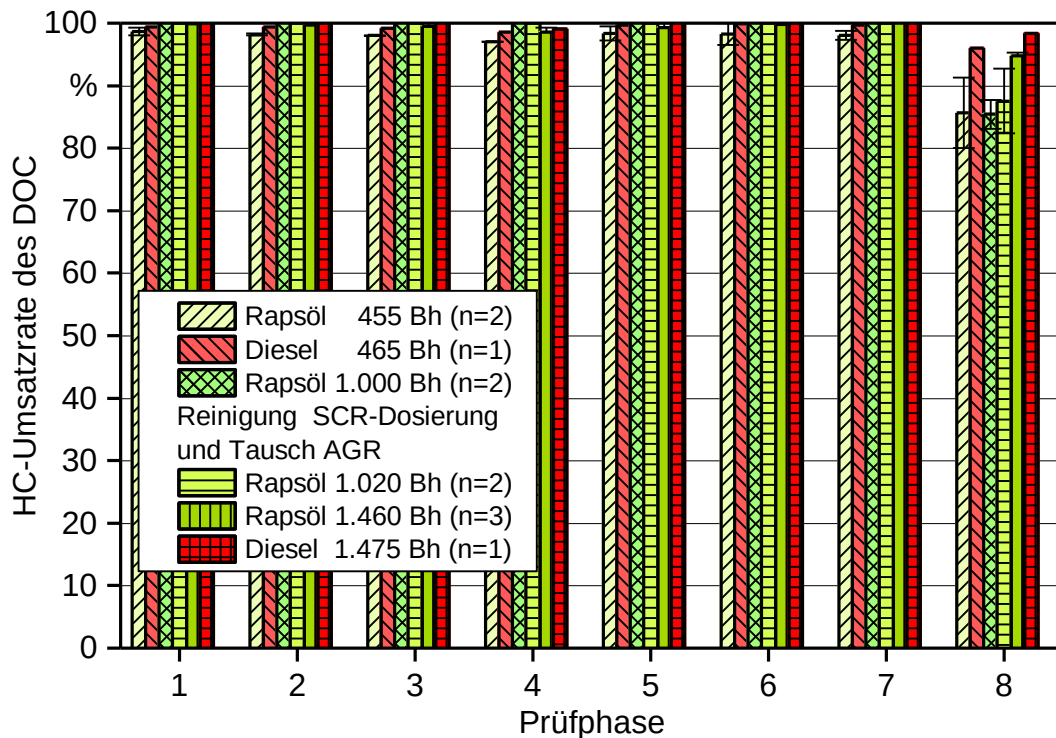


Abbildung 69: HC-Umsatzrate der Abgasnachbehandlung des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff

Die Partikelmasse-Emissionen befinden sich auf geringem Niveau und zeigen messverfahrensbedingte Schwankungen zwischen den Wiederholungsmessungen. Der PM-Ausstoß im Rapsölbetrieb, wie in Abbildung 70 zu sehen ist, unterscheidet sich nicht im Vergleich zum Dieselpetrieb.

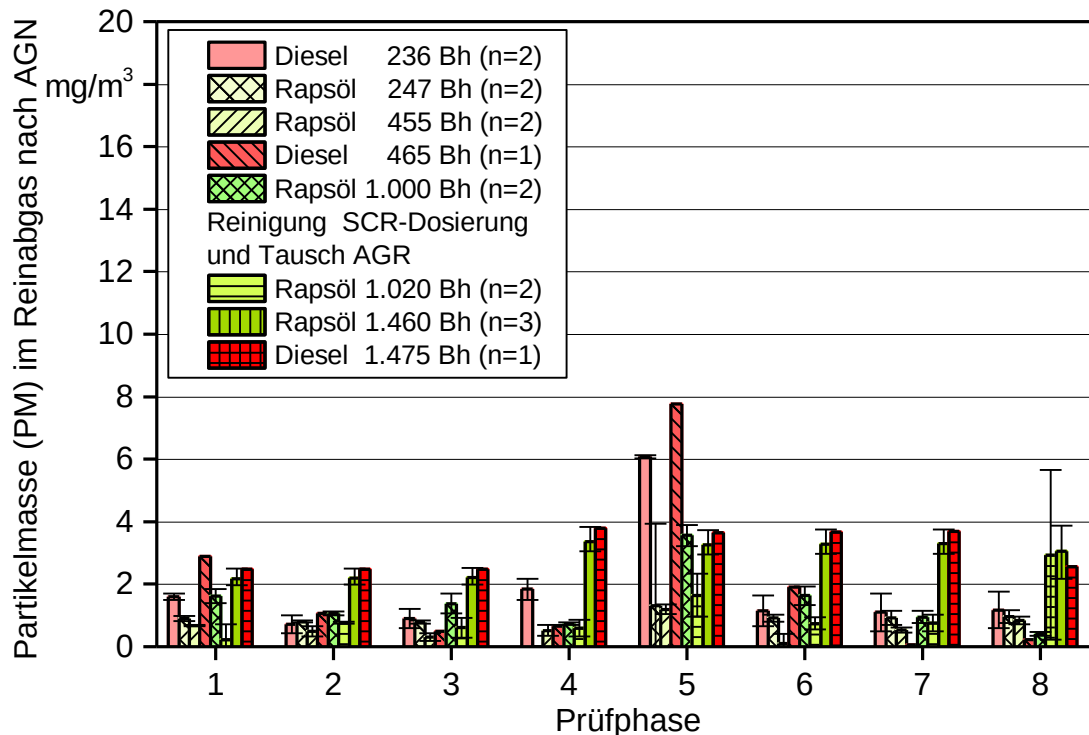


Abbildung 70: PM-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselpkraftstoff im Reinabgas nach der Abgasnachbehandlung (AGN)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Betrieb des Traktors über 1.200 Betriebsstunden mit Rapsölpkraftstoff nur geringfügige Auswirkungen auf das Emissionsverhalten im NRSC hat. Es zeigt sich zudem, dass unterschiedliche Vorgaben der Motorsteuerung z. B. hinsichtlich der Abgasrückführung in den Prüfphasen einen hohen Einfluss auf die Emissionen haben können. Ferner haben der Wartungszustand sowie Regenerationsintervalle der Abgasnachbehandlung einen hohen Einfluss auf die Emissionen.

Prüfzyklus-Emissionen

Die spezifischen Emissionen im NRSC und 10sNRTC sind in Abbildung 71 für NO_x , in Abbildung 72 für CO, in Abbildung 73 für HC und in Abbildung 74 für die PM dargestellt. Die NO_x -, CO-, HC- und PM-Emissionen werden durch das SCR-System, den Oxidationskatalysator und den Partikelfilter im Betrieb mit beiden Kraftstoffen auf ein geringes Niveau reduziert.

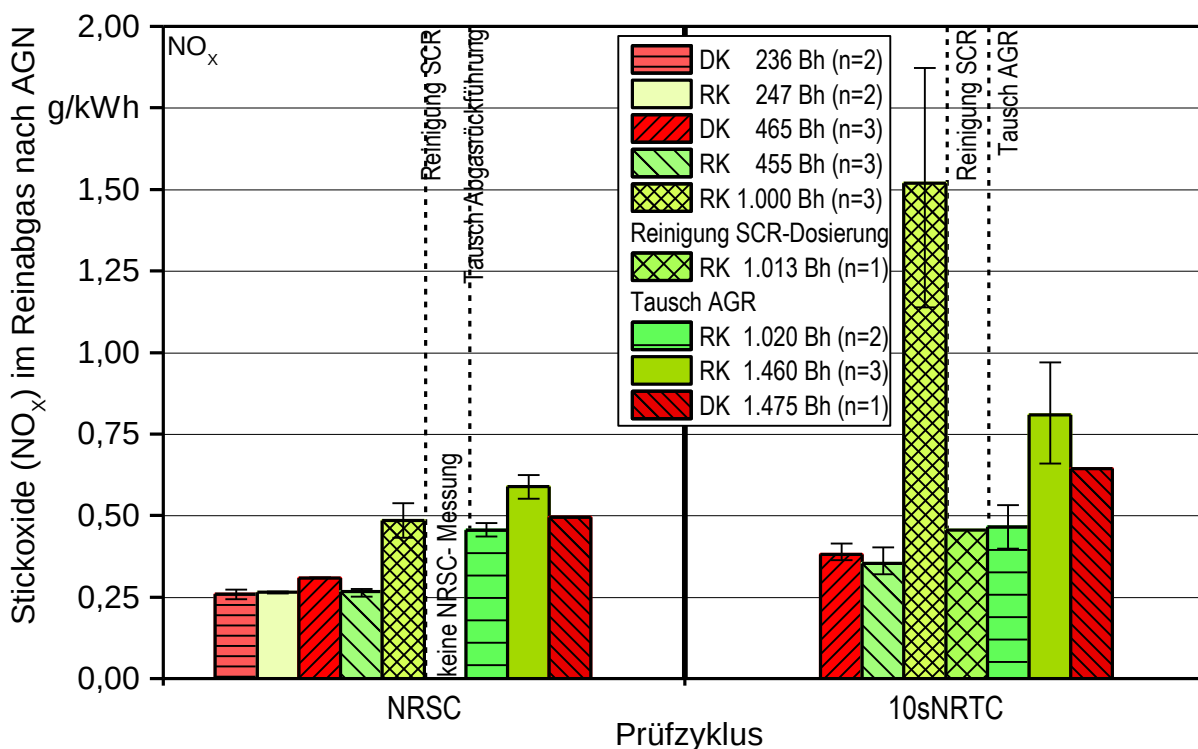


Abbildung 71: NO_x -Emissionen des Traktors FE-S im NRSC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK)

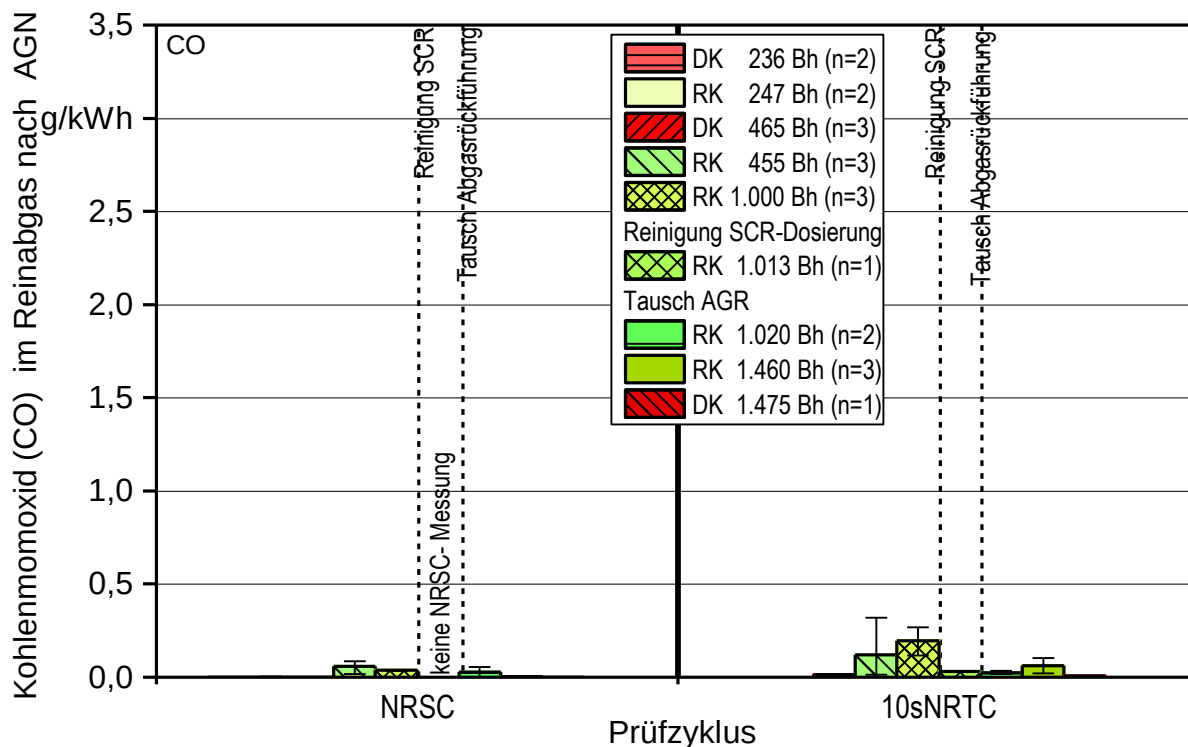


Abbildung 72: CO-Emissionen des Traktors FE-S im NRSC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK)

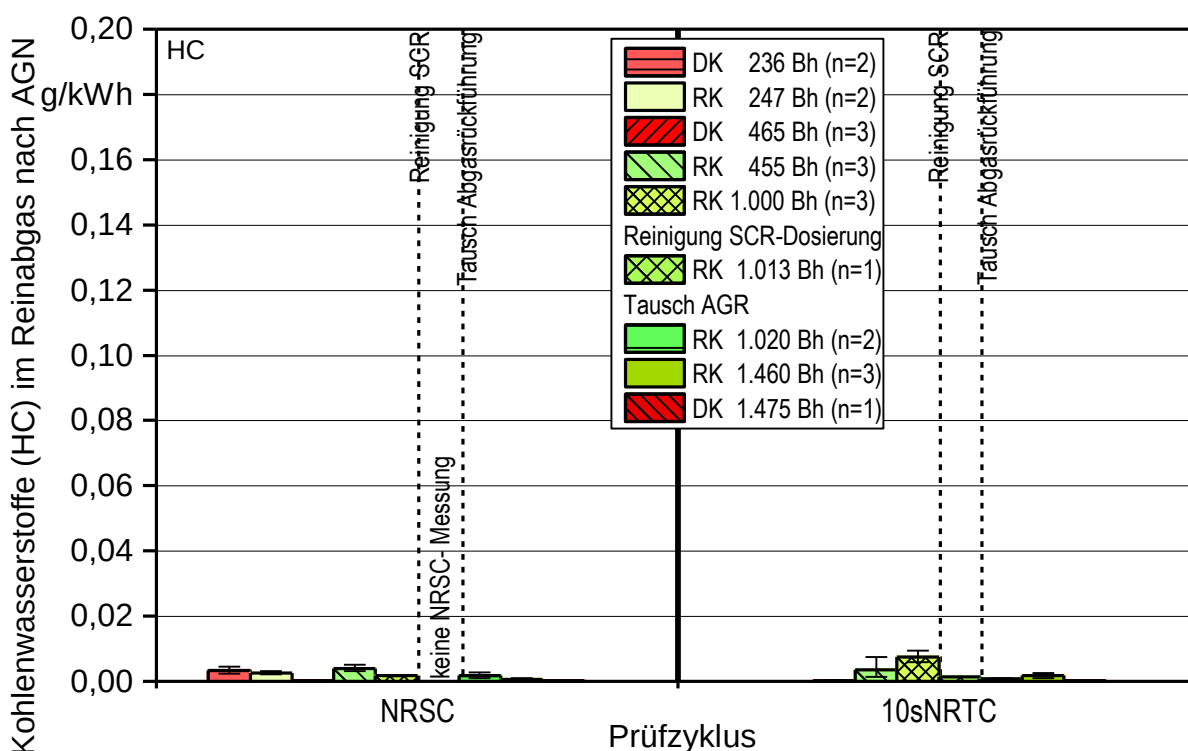


Abbildung 73: HC-Emissionen des Traktors FE-S im NRSC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK)

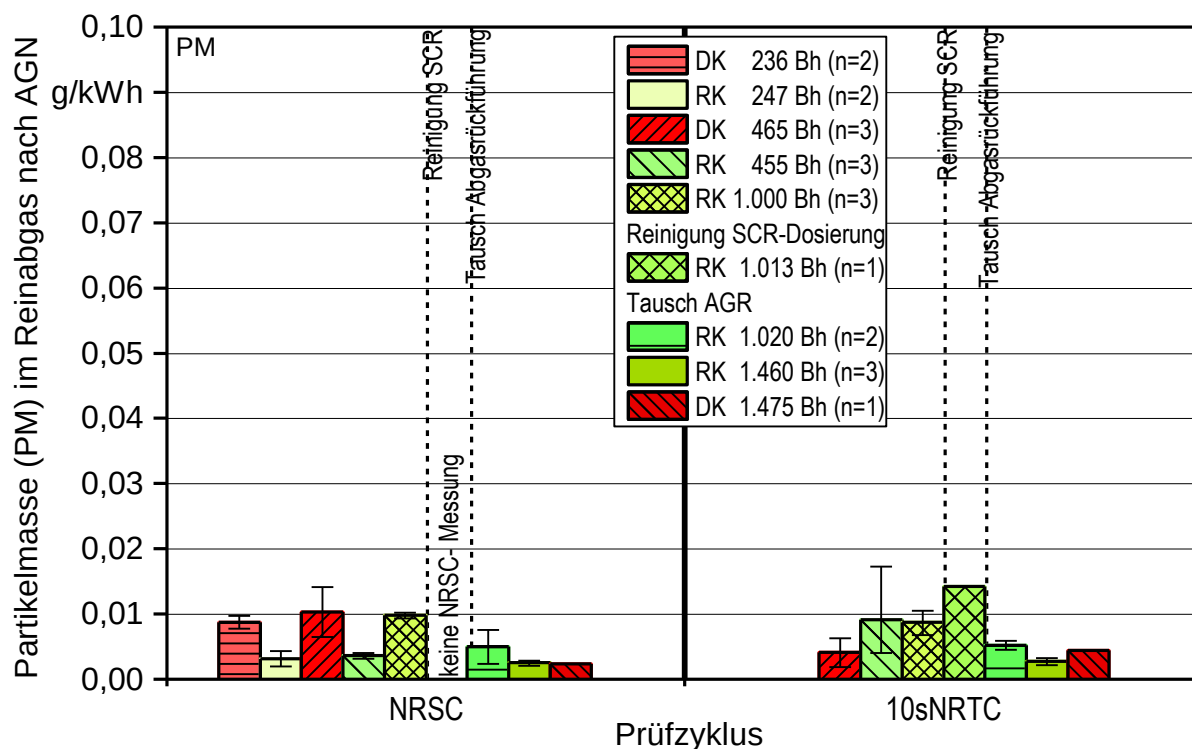


Abbildung 74: PM-Emissionen des Traktors FE-S im NRSC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK)

Wird berücksichtigt, dass die gemessene Leistung an der Zapfwelle um ca. 25 % geringer ausfällt als an der Kurbelwelle, so ergibt sich ein korrigierter Grenzwert für die NO_x -Emissionen von 0,5 g/kWh für die Messungen am Traktorenprüfstand anstatt 0,4 g/kWh für Messungen an der Kurbelwelle am Motorenprüfstand. Der korrigierte Grenzwert für die NO_x -Emissionen wird im NRSC im Diesel- und Rapsölbetrieb eingehalten. Nur die NRSC-Messung bei 1.475 Bh mit Rapsölkraftstoff liegt knapp über diesen Wert.

Der korrigierte Grenzwert von 0,5 g NO_x /kWh wird im 10sNRTC bei 479 Bh, 1013 Bh und 1020 Bh mit Rapsölkraftstoff und bei 475 Bh mit Dieselkraftstoff im Mittel über die Einzelwiederholungen unterschritten. Die mechanische Reinigung der Dosierung des SCR-Systems und eine aktive Regeneration der AGN bei 1.010 Bh führten zu einer drastischen Reduzierung der NO_x -Emissionen von ca. 1,5 g/kWh auf unter 0,5 g/kWh. Der Austausch der Abgasrückführung zeigte hingegen keinen Einfluss auf das Emissionsverhalten des Traktors. Die Ergebnisse zeigen, dass die regelmäßige Regeneration der Abgasnachbehandlung und ein ordnungsgemäßer Zustand der Dosier- und Mischeinrichtung der wässrigen Harnstofflösung wichtig für einen schadstoffarmen Betrieb des Traktors sind.

Die Verläufe der NO_x -Emissionen während der Messungen im 10sNRTC sind ab Anhang B 1 auf Seite 204 dargestellt.

Resultierend aus einer etwas geringeren Leistung an der Zapfwelle ab 1.000 Bh und der damit geringeren geleisteten Arbeit erhöhen sich die spezifischen Emissionen geringfügig.

gig über den gesamten Prüfzyklus betrachtet. Insbesondere die CO- und HC-Emissionen sind bei allen Messungen nahe der Nachweisgrenze. Die Emissionsgrenzwerte für PM von 0,025 g/kWh, CO von 3,5 g/kWh und HC von 0,19 g/kWh werden bei allen Messungen deutlich unterschritten.

Partikelanzahl

In Abbildung 75 werden die Ergebnisse der Partikelanzahl-Emissionen (PN) im NRSC und 10sNRTC dargestellt.

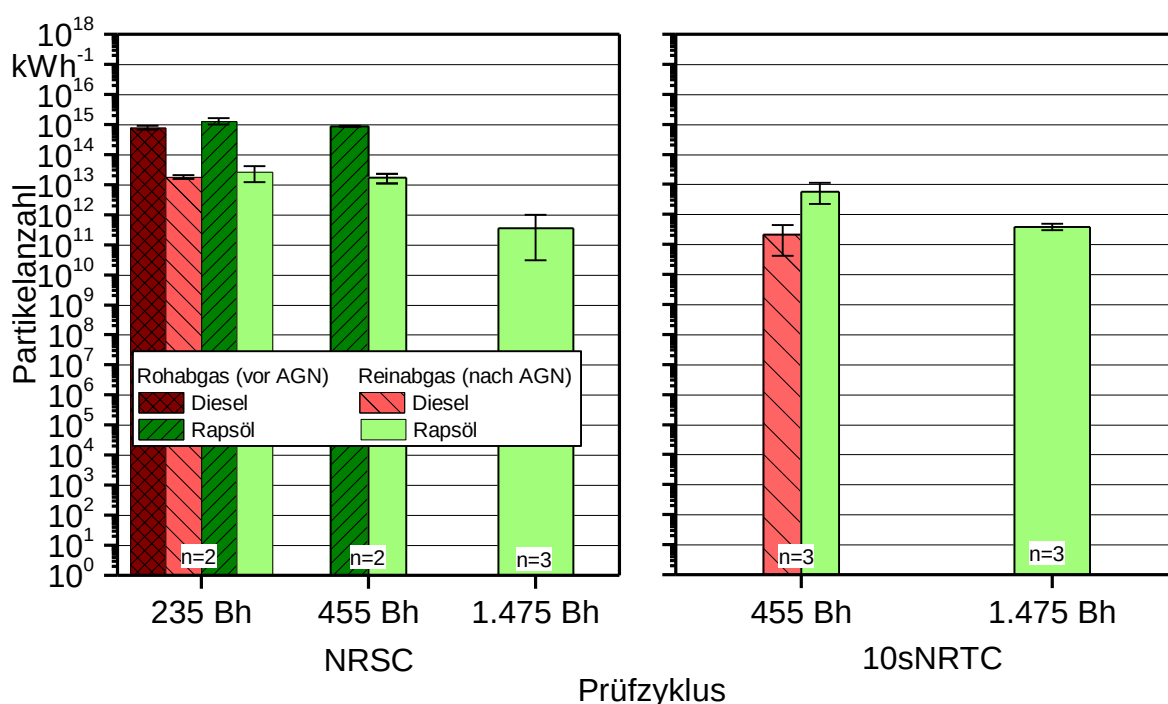


Abbildung 75: Partikelanzahl-Emissionen (PN) im NRSC und 10sNRTC vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) mit Rapsöl- (RK) und Dieseldieselkraftstoff (DK)

Die PN-Emissionen vor AGN im Rohabgas, welche im NRSC bei 235 Bh und 455 Bh erfasst wurden, unterscheiden zwischen dem Rapsöl- und Dieseldieselbetrieb nicht.

Durch die Abgasnachbehandlung werden die PN-Emissionen im NRSC im Reinabgas auf einen Wert von knapp über 10^{13} kWh^{-1} reduziert. Im 10sNRTC werden bei 455 Bh mit Diesel weniger Partikel ausgestoßen als mit Rapsölkraftstoff. Mit zunehmender Betriebsdauer nimmt der PN-Ausstoß im NRSC und 10sNRTC im Rapsölbetrieb auf unter 10^{12} kWh^{-1} ab. Der Beladungszustand des Partikelfilters und die dadurch ansteigende Partikelabscheiderate könnten dafür ursächlich sein.

Die Einhaltung des Grenzwerts der kommenden Abgasstufe V von 10^{12} kWh^{-1} wird mit einem anderen Messfahren geprüft, das von einem Motor ausgestoßenen Partikel mit einem Durchmesser von unter 23 nm nicht berücksichtigt. Die Partikelanzahlemissionen

des vorliegenden Messverfahrens sind daher nur bedingt mit dem PN-Grenzwert der Abgasstufe V vergleichbar, da hier auch die Partikel unter 23 nm mit berücksichtigt werden. Die Ergebnisse verdeutlichen dennoch, dass mit dem Einsatz des Partikelfilters eine drastische Reduktion der Anzahl emittierter Partikel im Rapsöl- und Dieselmotorbetrieb möglich ist.

Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb

Die Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb des Fendt 724 S4 mit Rapsölkraftstoff wurden während der Arbeiten mit dem Pflug bei ca. 372 Bh, mit dem Grubber bei ca. 377 Bh, mit der Kreiselegge bei ca. 1.136 Bh sowie während Straßenfahrten bei ca. 1.130 Bh gemessen. Tabelle 31 zeigt eine Auswahl an Parametern der Messungen nach der Auswertung mit der Software EMROAD 5.96 Build 3. Die Datenaufzeichnung dauerte bei den Messungen zwischen 0,74 und 1,7 h.

Tabelle 31: Parameter aus der Auswertung mit EMROAD des Traktors FE-S

Messfahrten	Traktor- laufzeit in Bh	Auswerte- zeitraum in h	Relative Prüfdauer (PD)	Anzahl Fenster	T _a in °C	φ in %
Pflug I	372	1,60	6,91	4.710	9,8	68,5
Pflug II	374	1,40	6,94	4.337	12,8	63,8
Pflug III	376	1,42	6,92	4.405	19,1	46,5
Grubber	377	1,36	6,92	4.221	9,2	79,7
Straßenfahrt I	1.130	0,81	1,70	1.443	15,8	65,9
Straßenfahrt II	1.133	0,80	1,74	1.467	12,0	46,9
Straßenfahrt III	1.135	0,74	1,52	1.120	17,6	32,5
Kreiselegge I	1.136	1,70	3,47	4.420	15,5	53,8
Kreiselegge II	1.138	1,61	2,67	3.390	19,2	49,6

Die Umgebungstemperatur (T_a) und die relative Luftfeuchte (φ) waren innerhalb des zulässigen Bereichs der Gesetzgebung für Nicht-Straßenfahrzeuge (*Non-Road Mobile Machinery*, NRMM) nach EU-Verordnung 2016/1628 [29] sowie der delegierten EU-Verordnung 2017/655 [27]. Die relative Prüfdauer (PD), wonach die Messung das Fünf- bis Siebenfache der CO₂-Referenzmasse aus dem NRTC enthalten muss, wurde beim Arbeiten mit der Kreiselegge und dem Straßentransport nicht erreicht. Zum Zeitpunkt der Messungen waren diese Vorgaben in der NRMM-Gesetzgebung noch nicht veröffentlicht. Sogenannte Nicht-Betriebsereignisse (*Non-Working Events*) kamen nur bei der Messung „Kreiselegge II“ vor. Der Anteil der gültigen Fenster beträgt 78 %. Die ungültigen Fenster wurden aufgrund der dauerhaft niedrigen Motorlast für die Auswertung nicht berücksichtigt. Bei allen weiteren Messungen sind 100 % der Fenster gültig.

Die Verteilung der Übereinstimmungsfaktoren (CF) für die NO_x -Emissionen mit Rapsölkraftstoff ist in Abbildung 76 dargestellt.

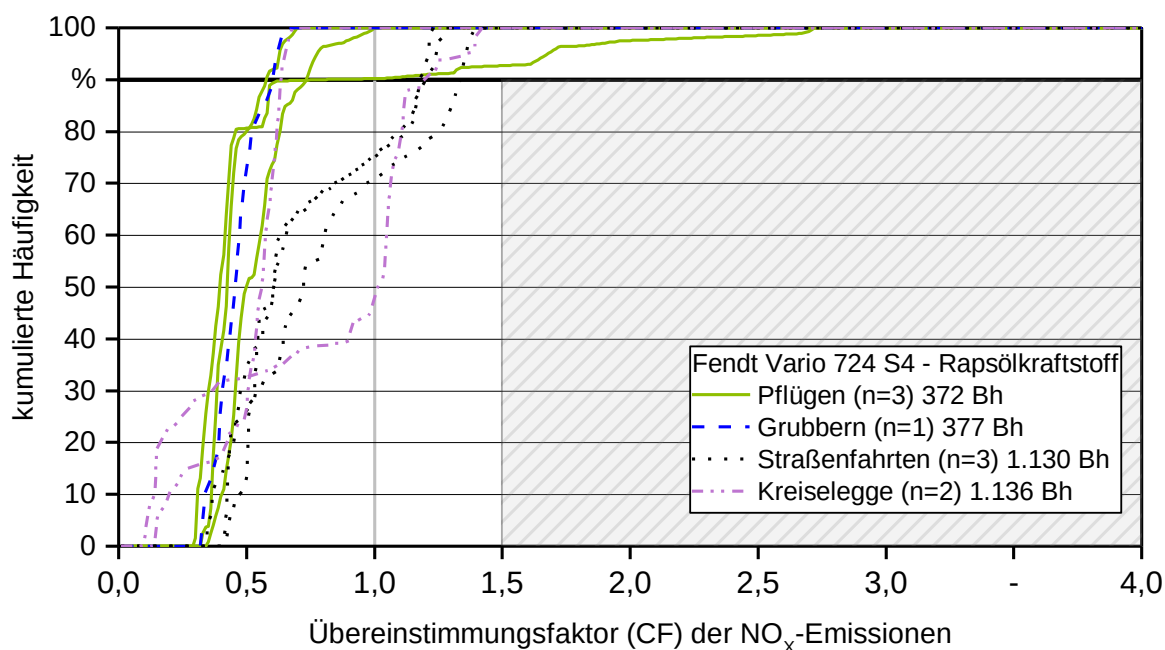


Abbildung 76: Kumulierte Häufigkeit der NO_x -Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors FE-S im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Der Richtwert aus der Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge (HDV) von 1,5 für das kumulative 90. Perzentil der Übereinstimmungsfaktoren (CF), der auch für die NRMM-Gesetzgebung diskutiert wird, wurde deutlich unterschritten.

Über 90 % der einzelnen Emissionsfenster der NO_x -Emissionen waren beim Pflügen und Grubbern geringer als der Prüfstandgrenzwert von 0,4 g/kWh ($\text{CF} = 1$). Ein möglicher Grund sind bessere Umsatzraten der AGN durch die hohen Abgastemperaturen der leistungsintensiven Bodenbearbeitung. Ferner werden die Kaltstartemissionen im 10sNRTC bei einer Kühlmitteltemperatur unter 70 °C berücksichtigt im Gegensatz zur Auswertemethodik bei portablen Emissionsmessungen nach der NRMM-Gesetzgebung. Bereits bei früheren Untersuchungen wurden überwiegend geringere limitierte Emissionen bei der Anwendung von Drehzahl- und Drehmomentverläufen aus realen Traktorarbeiten im Vergleich zum 10sNRTC festgestellt [21].

Abbildung 77 exemplifiziert NO_x -Konzentration, Kühlmittel- und Abgastemperaturen während einer Messung mit dem Pflug im Rapsölbetrieb abhängig von den Positionsdaten.

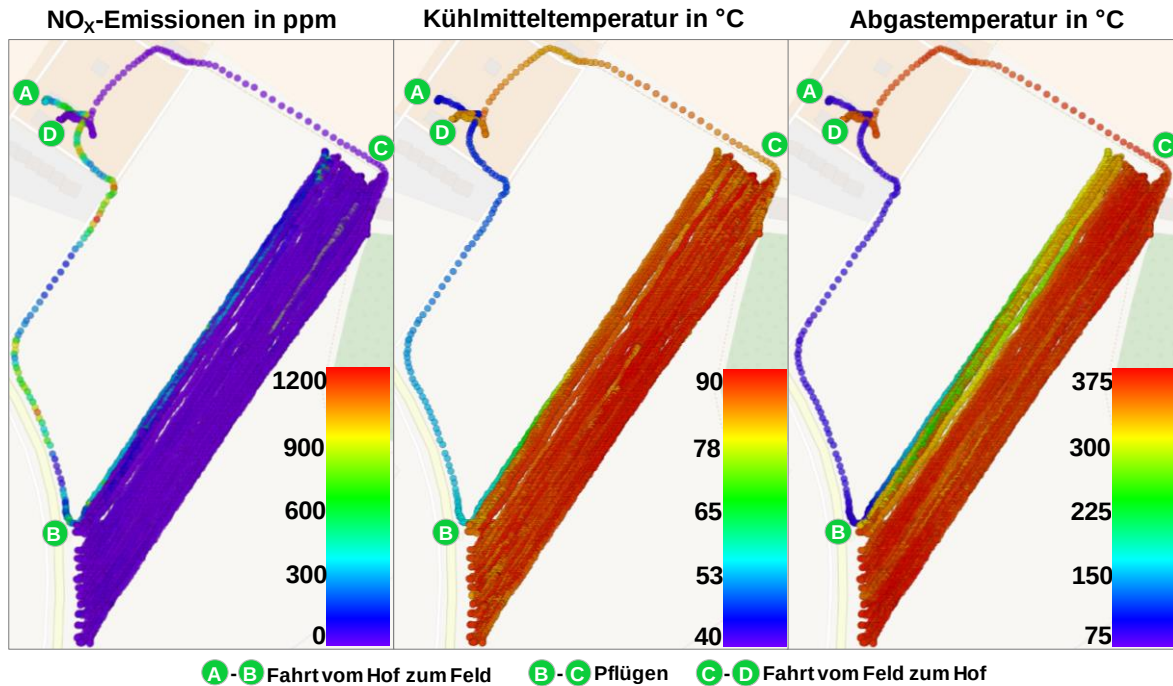


Abbildung 77: NO_x -Emissionen sowie Kühlmittel- und Abgastemperaturen beim Pflügen

Vor allem bei Arbeitsbeginn zeigte sich ein Zusammenhang geringer Kühlmittel- und Abgastemperaturen mit höheren NO_x -Emissionen. Nach der Gesetzgebung werden die Emissionen nach dem Motorstart erst ab einer Kühlmitteltemperatur von 70°C betrachtet. Die neunminütige Aufwärmphase von 42°C auf 70°C umfasste am Messtag hauptsächlich die Fahrt vom Hof zum Feld (A–B) und wird nach NRMM-Gesetzgebung nicht für die Auswertung berücksichtigt. Während der Aufwärmphase weisen die Katalysatoren aufgrund der niedrigen Abgastemperaturen unter 250°C geringe Umsatzraten auf, wodurch hierbei mit über 300 ppm die höchsten NO_x -Emissionen der gesamten Messdauer zu verzeichnen waren. Beim Pflügen (B–C) und bei der Fahrt zurück zum Hof (C–D) waren die NO_x -Emissionen mit meist weniger als 50 ppm auf einem geringen Niveau.

Die CO- und HC-Emissionen, die in Abbildung 78 und Abbildung 79 dargestellt sind, lagen in allen Fenstern weit unterhalb der NRMM-Grenzwerte ($\text{CF} = 1$) und belegen somit die hohe Wirksamkeit der katalytischen Abgasnachbehandlung auch im realen Fahrbetrieb. Durch den beschichteten Partikelfilter lag die Partikelmasse (PM) mit einem maximalen $\text{CF} < 0,01$ nahe der Nachweisgrenze.

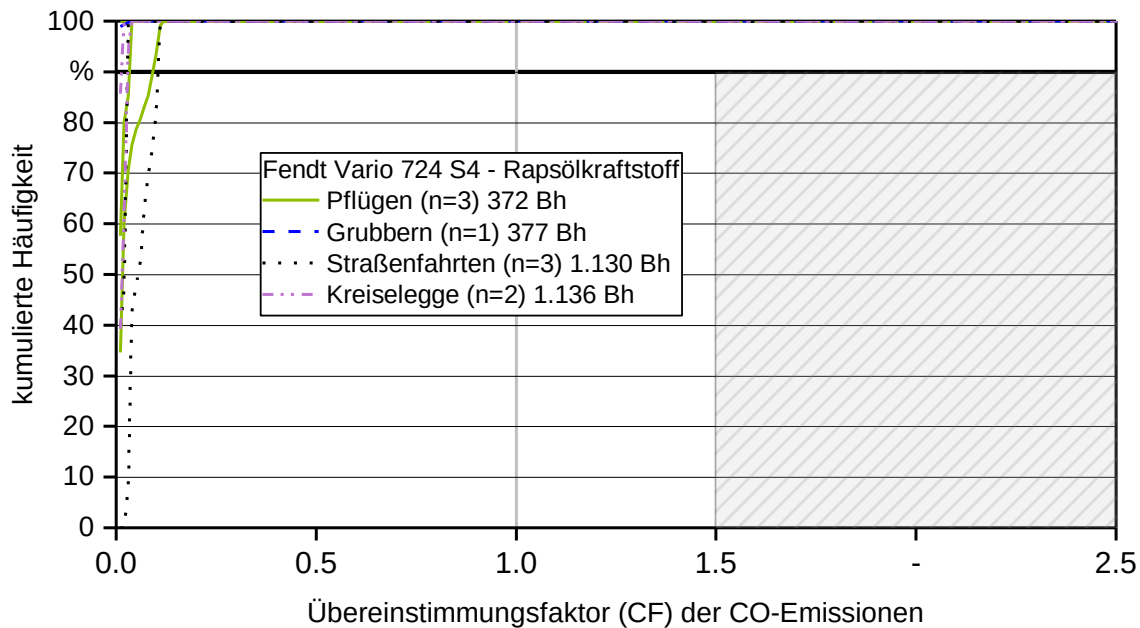


Abbildung 78: Kumulierte Häufigkeit der CO-Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors FE-S im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

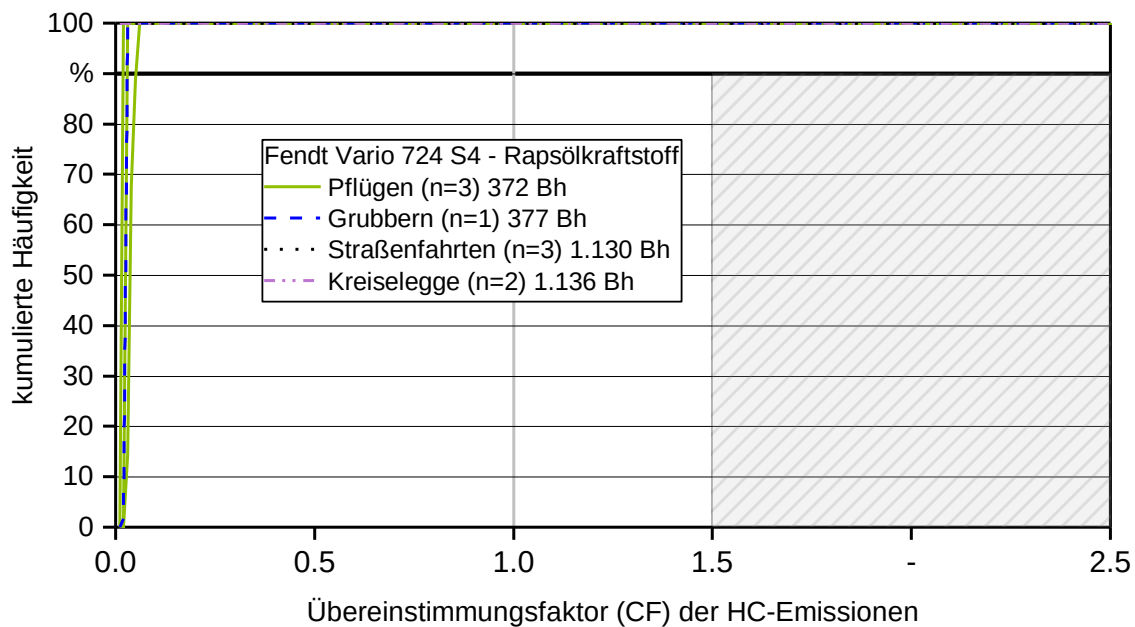


Abbildung 79: Kumulierte Häufigkeit der HC-Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors FE-S im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

6.3.4 Abgasstufe IV: John Deere 6215R (JD-S)

Leistung, Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad

Die Eignung modernster Traktoren für den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff sollen die Prüfstandtests mit einem John Deere 6215R (JD-S) zeigen. Der Traktor der Abgasstufe IV mit Abgasnachbehandlung und Abgasrückführung wurde vom Hersteller auf den Pflanzenölbetrieb optimiert. Die in Abbildung 80 dargestellten Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsmeasurements konnten ohne Störung durchgeführt werden.

Die maximale Leistung an der Zapfwelle (ohne aktiviertem Boost) liegt im Drehzahlbereich von etwa 1900 min^{-1} und beträgt mit Rapsölkraftstoff 139 kW. Die Leistung bei der Nenndrehzahl von 2.100 min^{-1} des Traktors beträgt 132 kW. Die Messdaten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und des Harnstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads sind mit den Ergebnissen früherer Messungen des Traktors John Deere 6210R (JD-P4) vergleichbar [37].

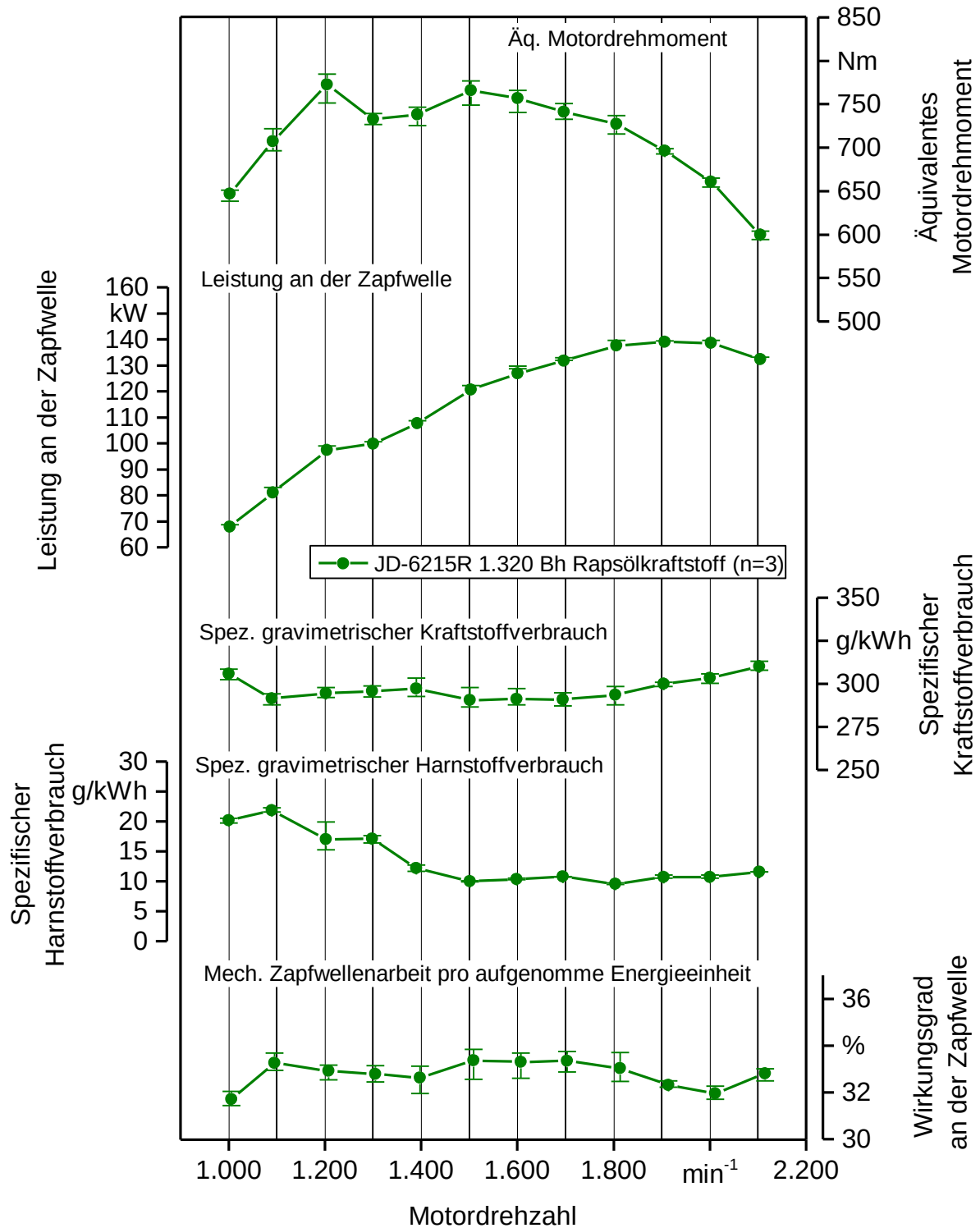


Abbildung 80: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und des Harnstoffverbrauchs sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle des John Deere 6215R (JD-S) im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Prüfzyklus-Emissionen

In Abbildung 81 sind die spezifischen Emissionen über den gesamten Zyklus betrachtet dargestellt. Die NO_x -, CO-, HC- und PM-Emissionen werden durch den Oxidationskatalysator, das SCR-System und den Partikelfilter effektiv reduziert. Die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe IV für NO_x (0,4 g/kWh), CO (3,5 g/kWh), HC (0,19 g/kWh) und PM (0,025 g/kWh) werden bei allen NRSC- und NRTC-Messungen unterschritten.

Zusätzlich zum 10sNRTC wurde am John Deere 6215R (JD-S) der NRTC ohne Mittelwertbildung der Drehzahl- und Drehmomentvorgaben absolviert (1sNRTC). Trotz des deutlich dynamischeren Prüfzyklusverlaufs gab es keine signifikanten Unterschiede in den NO_x -, CO- und HC-Emissionen. Lediglich die PM-Emissionen fielen geringfügig höher aus.

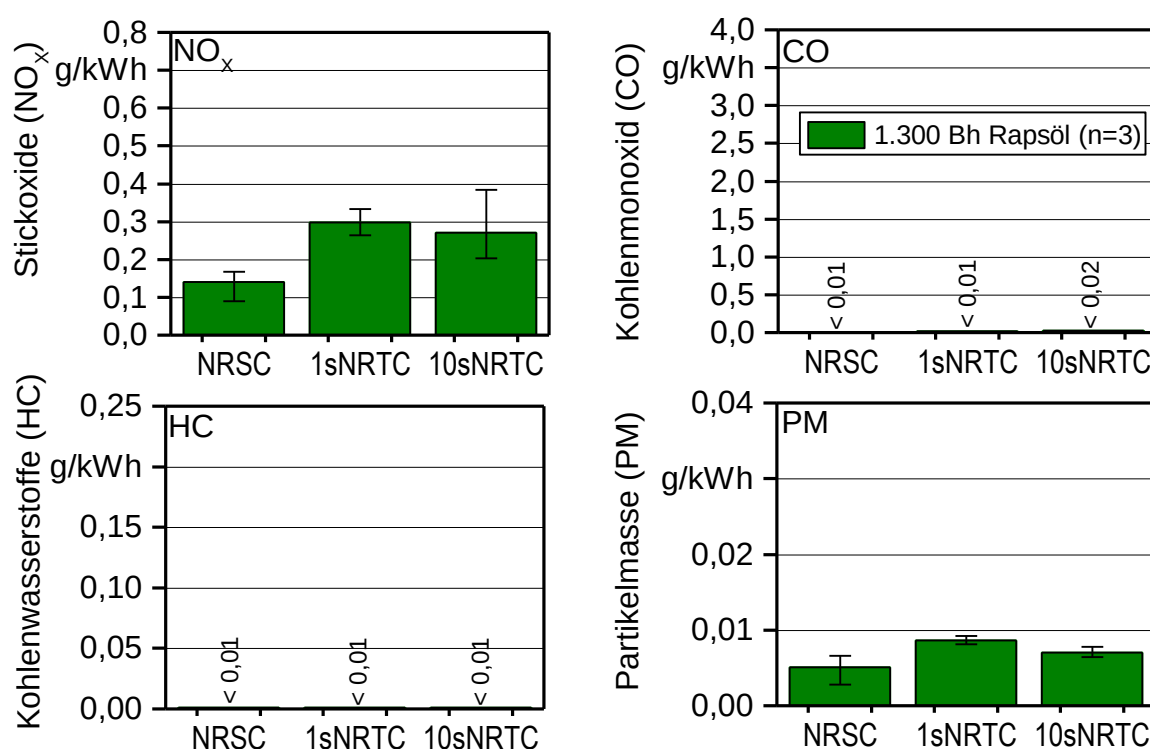


Abbildung 81: Limitierte Abgasemissionen des Traktors JD-S im NRSC, 1sNRTC und 10sNRTC nach der Abgasnachbehandlung im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Die Partikelanzahl-Emissionen (PN-Emissionen) im Rapsölbetrieb nach der Abgasnachbehandlung im Reinabgas betragen im Mittel $5,8 \cdot 10^9 \text{ kWh}^{-1}$ im NRSC, $7,1 \cdot 10^{10} \text{ kWh}^{-1}$ im 10sNRTC und $9,8 \cdot 10^{10} \text{ kWh}^{-1}$ im 10sNRTC. Durch den Einsatz des Partikelfilters sind die PN-Emissionen auf einem sehr geringen Niveau.

Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb

Die Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb des John Deere 6215R (JD-S) mit

Rapsölkraftstoff wurden während Straßenfahrten ohne Anhängelast bei einer Traktorsamtlaufzeit von ca. 1.353 Bh durchgeführt. Tabelle 32 zeigt eine Auswahl an Parametern aus der Auswertung mit der Software EMROAD 5.96 Build 3.

Tabelle 32: Parameter aus der Auswertung mit EMROAD des Traktors JD-S

Messfahrten	Traktor-laufzeit in Bh	Auswerte- zeitraum in h	Relative Prüfdauer (PD)	Anzahl Fenster	T _a in °C	φ in %
Straßenfahrt I	1.353	2,16	6,07	6.530	17,0	42,1
Straßenfahrt II	1.359	2,37	6,24	7.343	23,1	33,7
Straßenfahrt III	1.362	2,27	6,20	6.912	16,0	57,2

Die Umgebungstemperatur (T_a) und die relative Luftfeuchte (φ) lagen innerhalb des zulässigen Bereichs der Gesetzgebung [29] [27]. Auch die Prüfdauer (PD) der Messung entspricht der geforderten fünf- bis siebenfachen CO₂-Referenzmasse aus dem NRTC. Bei allen Messungen waren 100 % der über 6.500 Fenster je Wiederholung gültig.

Das Emissionsverhalten des John Deere 6215R war beim Straßentransport mit Rapsölkraftstoff gemessen mit portabler Emissionsmesstechnik (PEMS) auf einem geringen Niveau. Die Auswertung in Abbildung 82 für die NO_x-, in Abbildung 83 für die CO- und in Abbildung 84 für die HC-Emissionen zeigt, dass der Prüfstandgrenzwert (mit einem Übereinstimmungsfaktor von 1) bei allen Fenstern der drei Einzelmessungen im Betrieb mit Rapsölkraftstoff deutlich unterschritten wurde. Die PM-Emissionen waren unterhalb der Nachweisgrenze und sind daher nicht dargestellt.

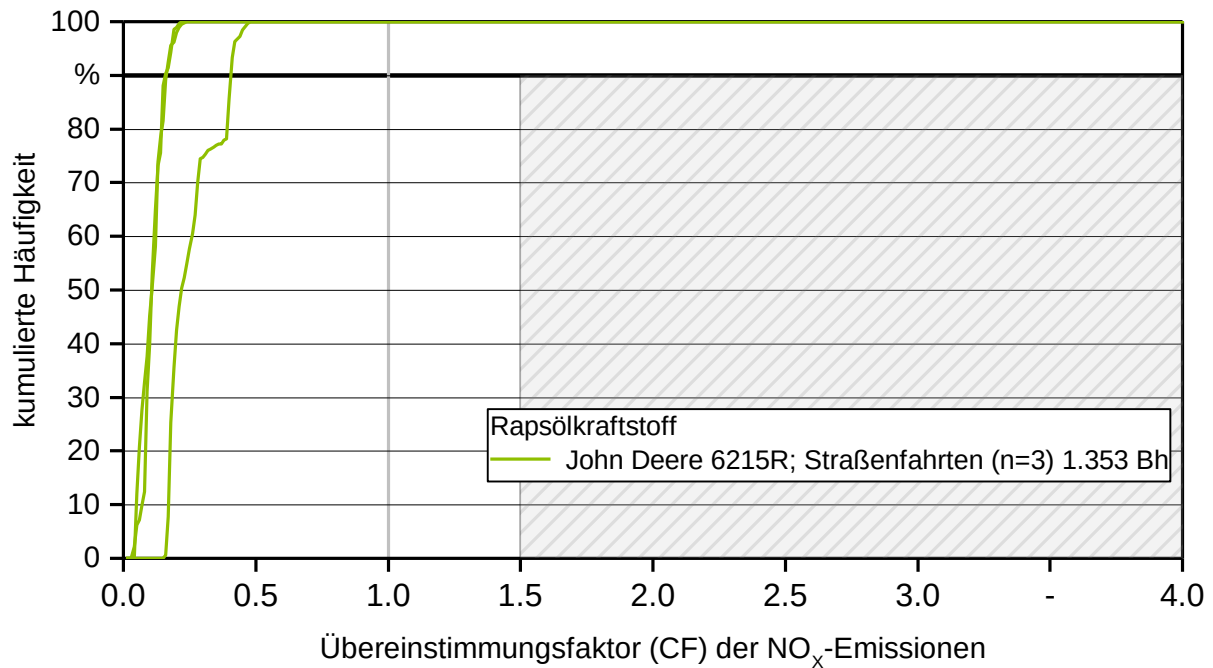


Abbildung 82: Kumulierte Häufigkeit der NO_x -Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandsgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors JD-S im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

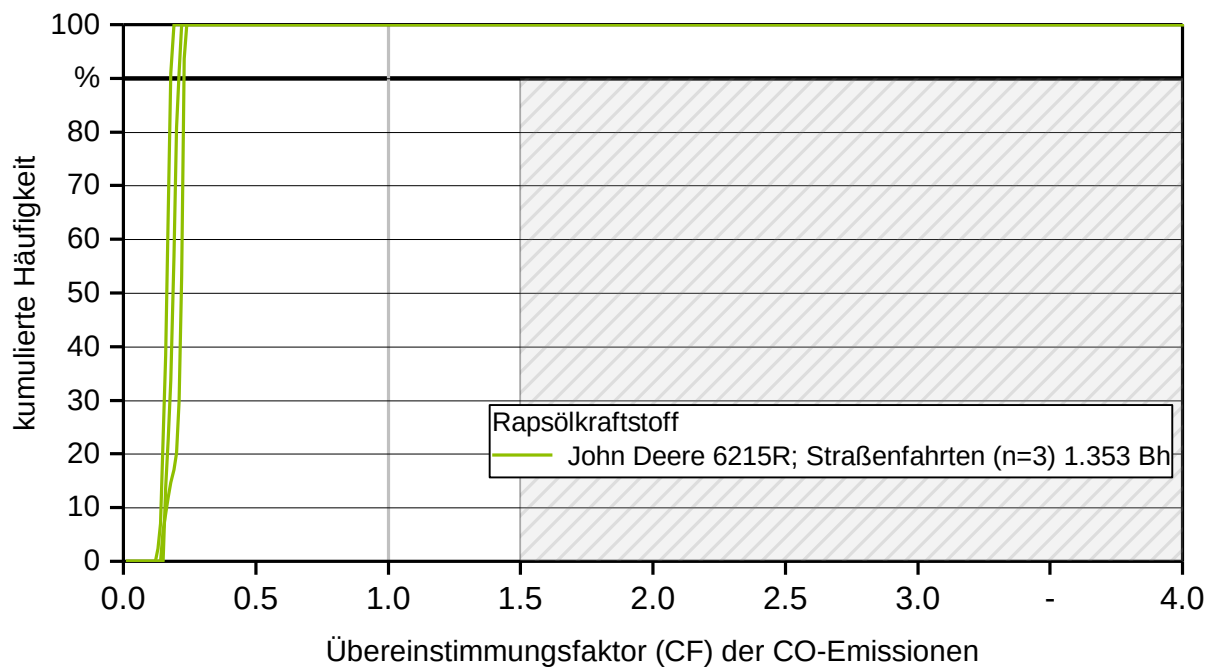


Abbildung 83: Kumulierte Häufigkeit der CO-Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandsgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors JD-S im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

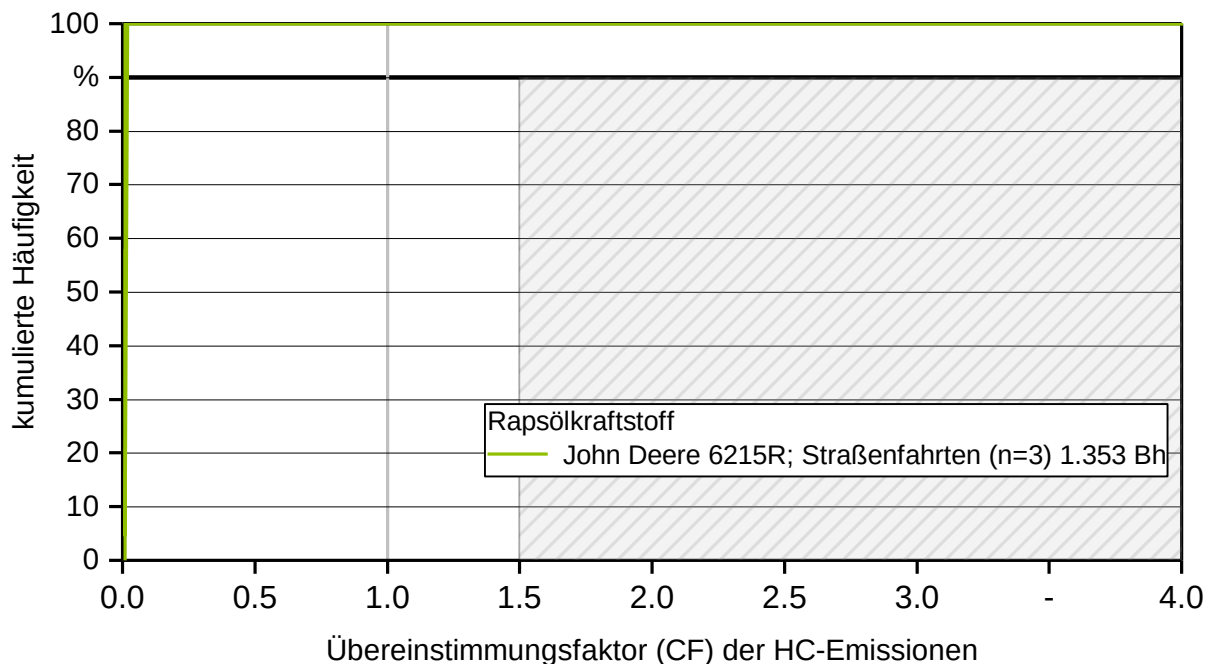


Abbildung 84: Kumulierte Häufigkeit der HC-Emissionen im Auswertefenster im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors JD-S im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

6.4 Motorenbegutachtung

6.4.1 Fendt Farmer Vario 412 (FE-K)

Am Fendt Farmer Vario 412 (FE-K) erfolgte eine Befundung des Motors nach absolvierten 7.050 Bh mit Rapsölkraftstoff. Es wurden ein Bruch der Regelstange zur Regelung der Kraftstofffördermenge und vier Stegrisse zwischen den Ein- und Auslasskanälen im Zylinderkopf am zweiten und dritten Zylinder festgestellt. Alle weiteren Bauteile des Motors zeigten sich in einem guten Zustand und damit vergleichbar mit den Ergebnissen der Befundung von EMBERGER et al. (2013) [17] bei 4.900 Bh. Nachfolgend werden der Zustand des Kraftstoffeinspritzsystems, des Zylinderkopfs, der Ventile, der Ein- und Auslasskanäle, des Kolbenbodens und der Zylinderwände beschrieben.

Kraftstoffeinspritzsystem (Regelstange und Hochdruckkraftstoffpumpen)

Abbildung 85 zeigt die über Stößel und Antriebsnocken angetriebenen Hochdruckeinspritzpumpen. Die Fördermengenverstellung erfolgt über einen Hebel, der durch die Regelstange betätigt wird. Der Drehzahlregler des Motors bestimmt über die Stellung der Regelstange die einzuspritzende Kraftstoffmenge, die wiederum die Motordrehzahl beeinflusst.

Die Regelstange brach an der Verbindungsstelle zur Fördermengenverstellung der Einspritzpumpe des dritten Zylinders, wie in Abbildung 85 zu sehen ist. Nach Angaben des Motorenherstellers ist ein Schaden an der Regelstange sehr selten, zumal vom Dreh-

zahlregler (Aktuator) nur eine geringe Kraft auf die Regelstange ausgeübt wird. Ferner können Ermüdungsbrüche die Folge zu hoher Abweichungen in der Passgenauigkeit beim Verschieben der Regelstange zur Fördermengenregulierung sein. Da keine Reparaturarbeiten am Kraftstoffsystem durchgeführt wurden, kann ein Montagefehler als Ursache für Abweichungen in der Passgenauigkeit ausgeschlossen werden.

Die Hochdruckeinspritzpumpen zeigten äußerlich keine Beschädigungen. Die Servicewerkstatt gab jedoch die Empfehlung, die Hochdruckeinspritzpumpen auszutauschen, da der Verstellmechanismus der gebrauchten Pumpen im Vergleich zum Neuzustand als schwergängig eingeschätzt wurde. In Abstimmung mit dem Motorenhersteller und der Servicewerkstatt konnte kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der gebrochenen Regelstange und dem schwergängigen Verstellmechanismus der Einspritzpumpen mit dem Rapsölbetrieb festgestellt werden.

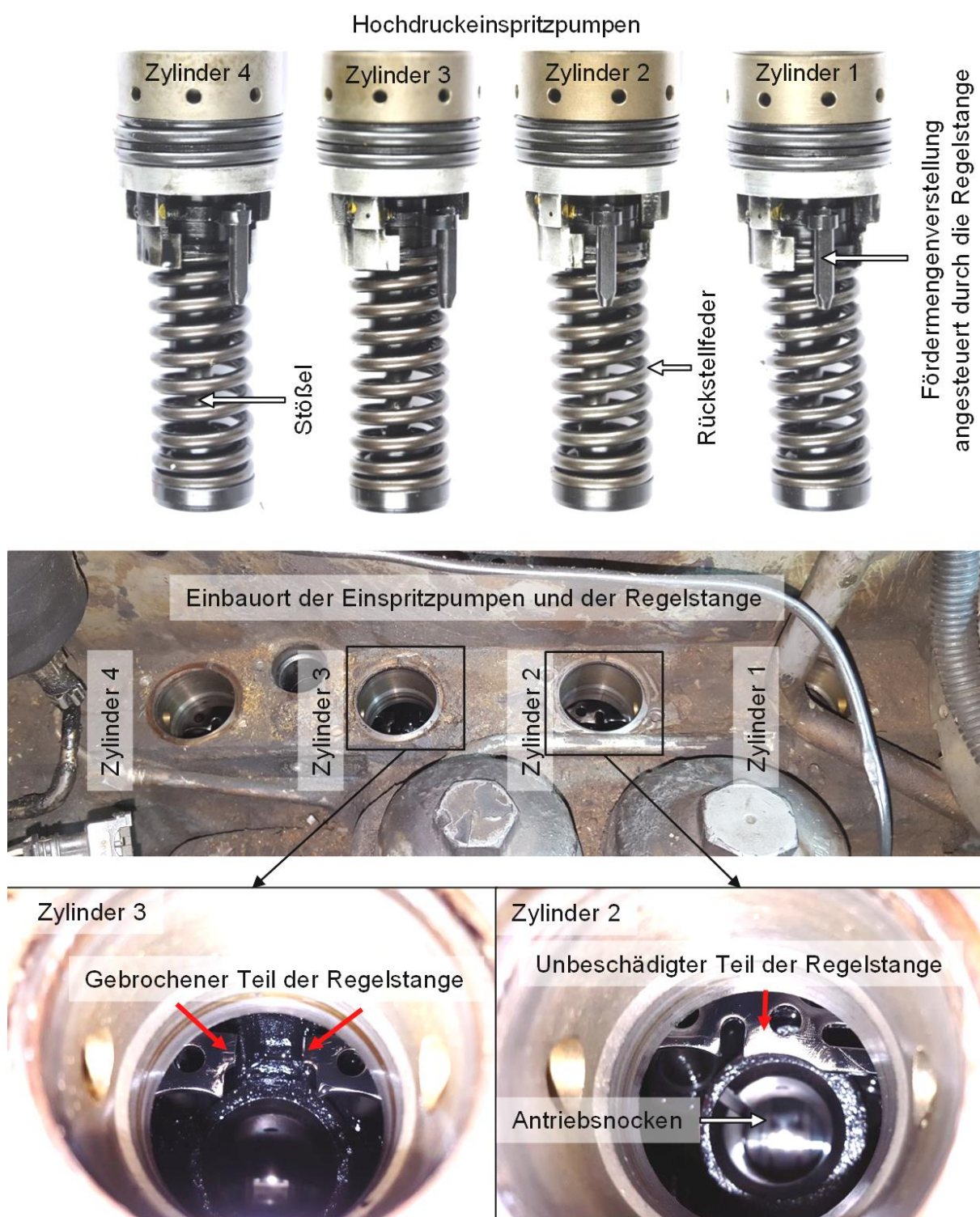


Abbildung 85: Hochdruckeinspritzpumpen und Regelstange des Traktors FE-K

In Abbildung 86 sind der Zylinderkopf und die Einspritzdüsen in der Draufsicht zu sehen. An den Düsenkuppen sind durchgängig Verkokungen mit ähnlicher Struktur zu erkennen. Bei allen Einspritzlöchern sind jedoch die Austrittskanäle des Kraftstoffs deutlich zu erkennen und frei. Die sichtbaren Einspritzdüsenlöcher deuten darauf hin, dass die äußerliche Ablagerungsbildung das Einspritzverhalten nicht stark beeinträchtigt hat.

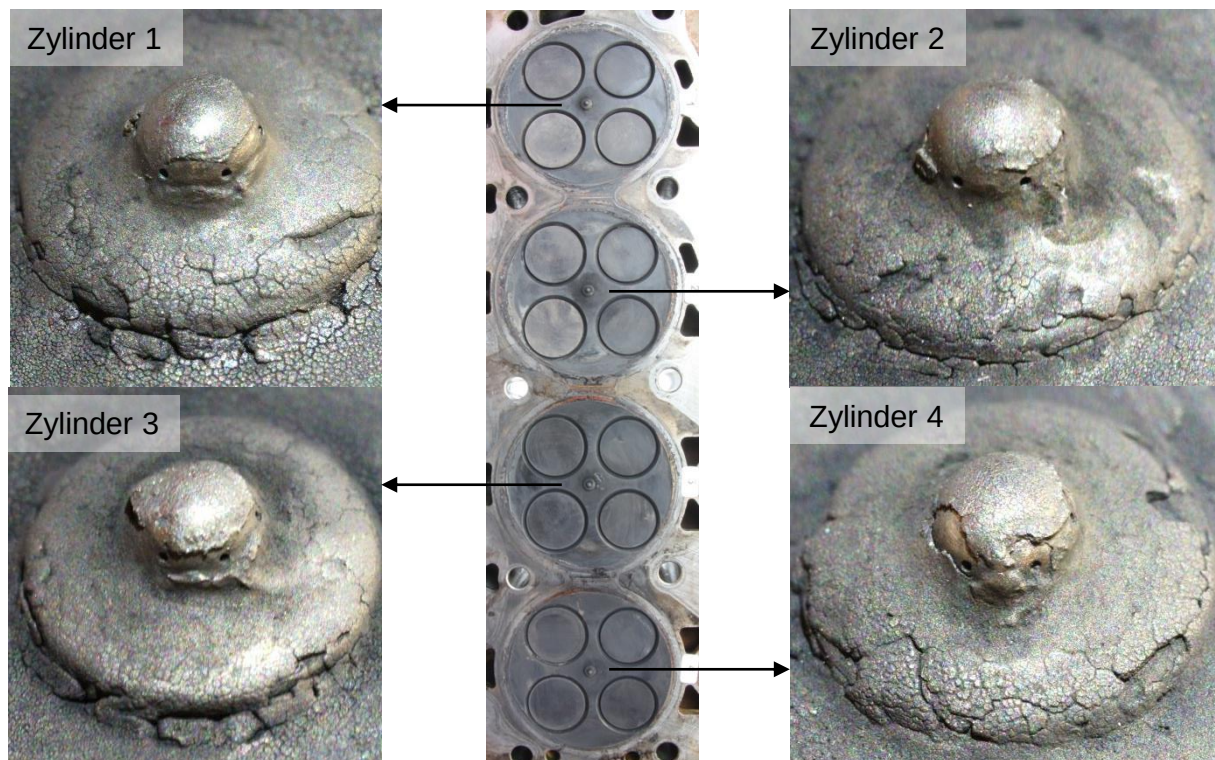


Abbildung 86: Einspritzdüsen des Traktors FE-K

Zylinderkopf, Ventile, Ein- und Auslasskanäle

In Abbildung 87 ist der Zylinderkopf mit den eingebauten Ein- und Auslassventilen sowie Einspritzdüsen dargestellt. Im Bereich der Zylinder 1 bis 4 sind keine Ablagerungen zu erkennen.

Am Zylinderkopf sind zwischen den Stegen der Ein- und Auslassventile der Zylinder 2 und 3 Haarrisse zu erkennen. Abbildung 87 und Abbildung 88 zeigen die Risse, die durchgängig über den Steg verlaufen und jeweils an den Ventilsitzringen enden. Die Ventilsitzringe weisen keine Beschädigungen auf. Wie tief die Risse in den Zylinderkopf reichen, kann nicht festgestellt werden. Risse im Zylinderkopf entstehen häufig durch eine thermische Überlastung des Materials. Die Materialermüdung kann z. B. bei mangelnder Kühlung, unkontrollierten Verbrennungsvorgängen oder bei zu hohen Zylinder-spitzendrücken auftreten [31].

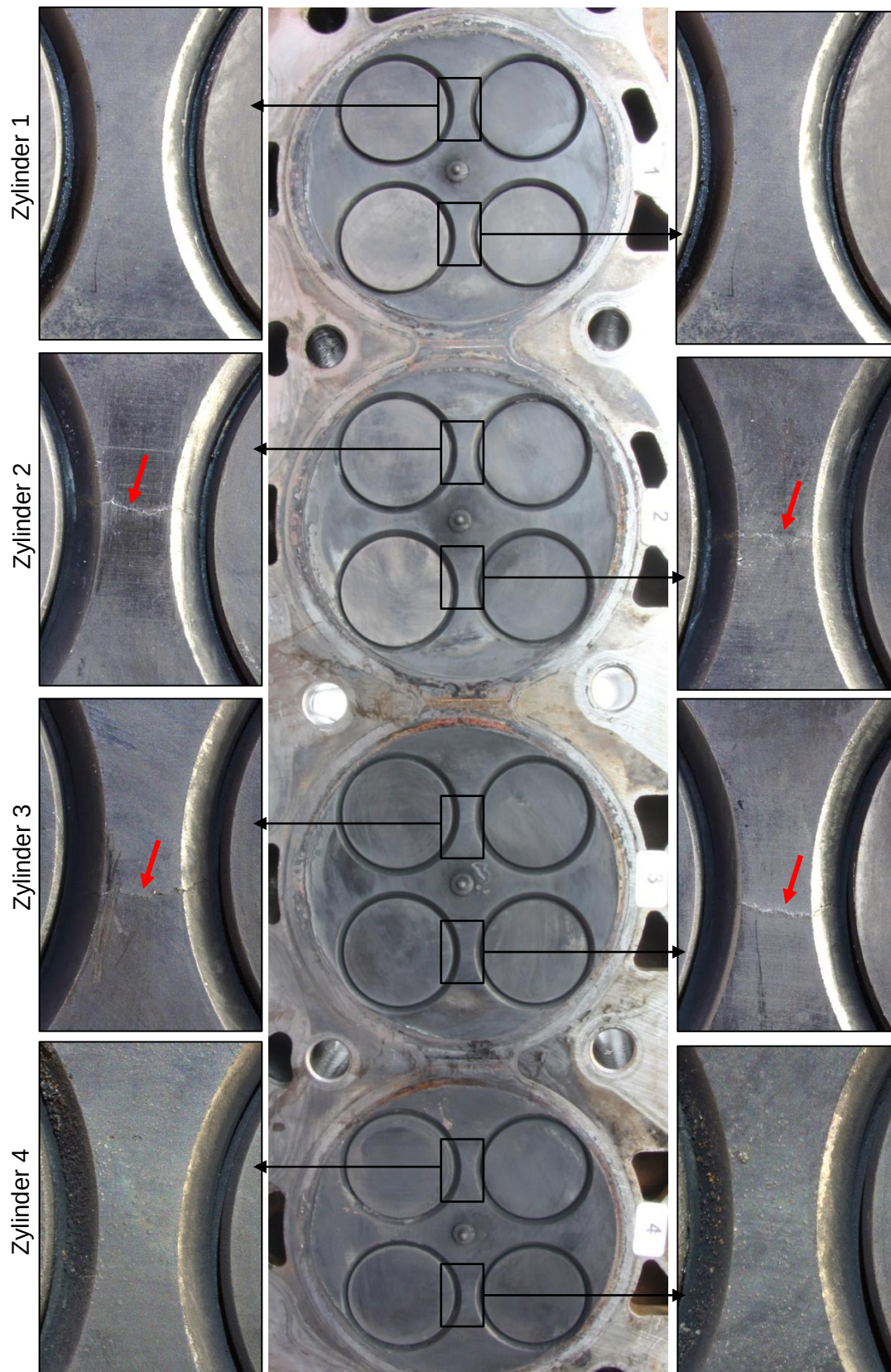


Abbildung 87: Zustand der Ventilstege des Zylinderkopfs des Traktors FE-K bei ca. 7.050 Bh (rote Pfeile zeigen Haarrisse)



Abbildung 88: Ventilsteigriss des Zylinders 2 (links) des Traktors FE-K bei ca. 7.050 Bh

Abbildung 89 zeigt den Zylinderkopf des Traktors FE-K bei ca. 4.900 Bh an Zylinder 2 und 3. Dabei zeigt sich, dass bereits bei ca. 4.900 Bh eine beginnende Rissbildung vorhanden war. Im Gegensatz zur Befundung bei 7.050 Bh war am Zylinder 2 noch ein Steg unbeschädigt und der vorhandene Riss verlief nicht ganz durchgängig. Das Schadensbild hatte sich somit über ca. 3.150 Bh Laufzeit bei Zylinder 2 verschlechtert, während bei den Zylindern 1, 3 und 4 keine Änderung ersichtlich war. Leistungs- und Emissionsmessungen bei ca. 4.900 Bh [17] zeigten, dass der Betrieb des Motors durch die Rissbildung nicht beeinträchtigt war.

Möglicherweise wurde das Material über die gesamte Laufzeit von 7.000 Bh durch die ca. 9 % höhere Leistung unter Volllast mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff [22] höher belastet als vom Hersteller vorgesehen. Gerade bei Motoren mit Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem, bei denen beim Einsatz von Rapsölkraftstoff unveränderte Einstellungen die Motorleistung gegenüber der Verwendung von Diesel ansteigen lassen, sollte die thermische Belastung durch Senkung der Motorleistung gemindert werden. Aus diesem Grund wurde die Leistung des Traktors im Rapsölbetrieb nach dem Tausch des Zylinderkopfs auf das Leistungsniveau im Dieselmotorbetrieb abgesenkt.

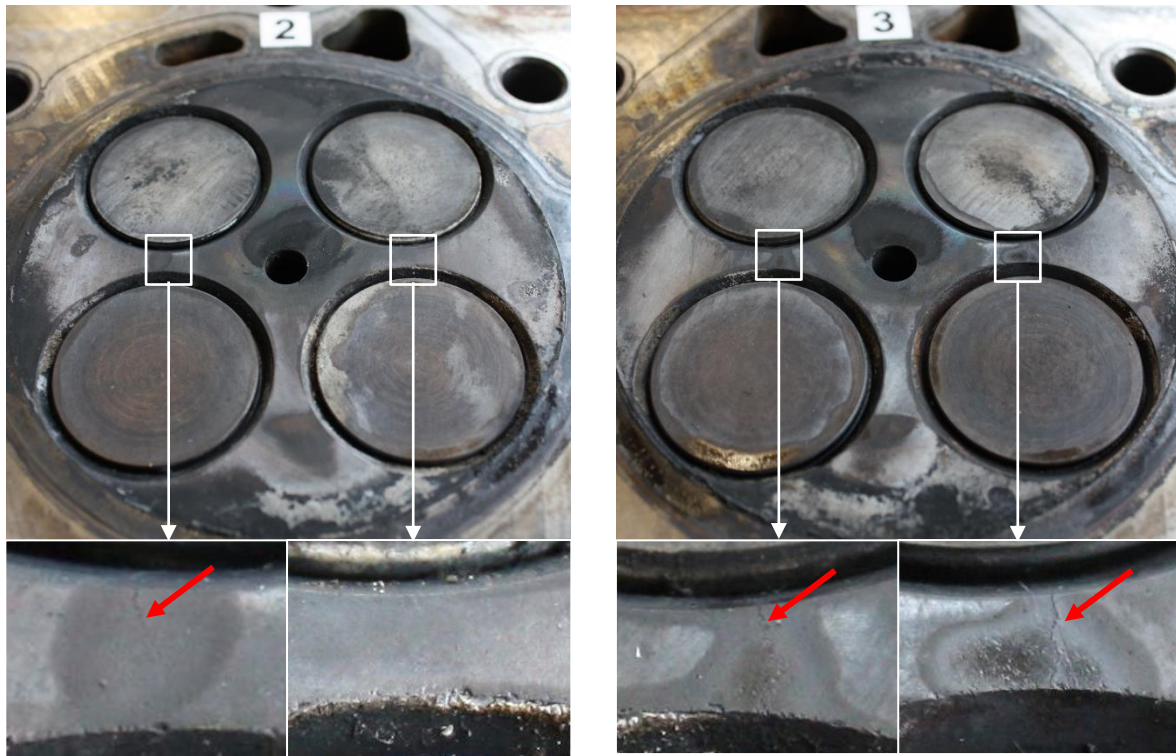


Abbildung 89: Zustand der Ventilstege des Zylinderkopfs bei den Zylindern 2 und 3 des Traktors FE-K bei ca. 4.900 Bh (rote Pfeile zeigen Haarrisse)

Kolbenboden

Die Kolbenböden in Abbildung 86 präsentierten sich in einem technisch sehr guten Zustand. Es wurden weder für den Betrieb kritische Ablagerungen noch ein hoher Materialabtrag z. B. durch Erosion oder Berührung mit einem Ventil festgestellt. Die Kolbenböden 1 bis 4 des Traktors FE-K weisen zudem ein symmetrisches Strahlbild auf und deuten auf eine ordnungsgemäße Einspritzung hin. Rot gefärbte Ablagerungen am Kolbenrand und in der Kolbenmitte am Kolben von Zylinder 4, die in EMBERGER et al. (2013) [17] bei ca. 4.900 Bh festgestellt worden waren, zeigten sich bei 7.050 Bh nicht mehr. Womöglich unterscheiden sich die Ablagerungen bei dieser und der vorangegangenen Untersuchung aufgrund abweichender Betriebsbedingungen des Motors vor der Befundung.

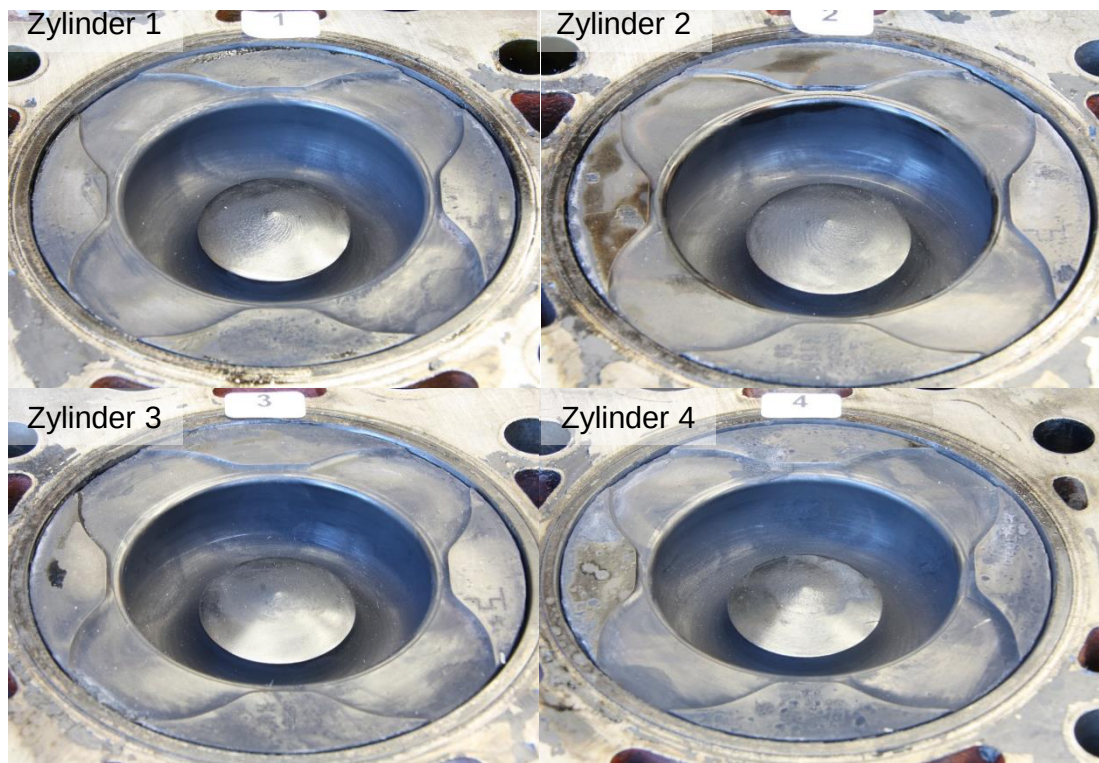


Abbildung 90: Kolbenböden des Traktors FE-K bei ca. 7.050 Bh

Zylinderwand und Honung

Abbildung 91 zeigt die auf den Zylinderlaufflächen deutlich sichtbaren Honriefen. Der Verschleißzustand und damit die noch vorhandene Riefentiefe der Honung beeinflussen die Motorölmenge, die als Film an der Laufbuchse anhaftet. Die Zylinderlaufflächen weisen keine Spiegelbildung auf, sodass eine durchgängige Schmierung zwischen Lauffläche und Zylinder stattfinden kann. Aufgrund des nur geringen Verlusts an Oberflächenrauigkeit über die Betriebszeit, insbesondere im oberen Bereich der Zylinderwände, kann auf eine geringe Kraftstoff- und Motorölablagerungsbildung am Feuersteg geschlossen werden, welche bei der Auf- und Abwärtsbewegung des Kolbens abrasiv wirkt. Insgesamt waren an den Zylinderlaufflächen und am Honnbild keine Mängel ersichtlich.

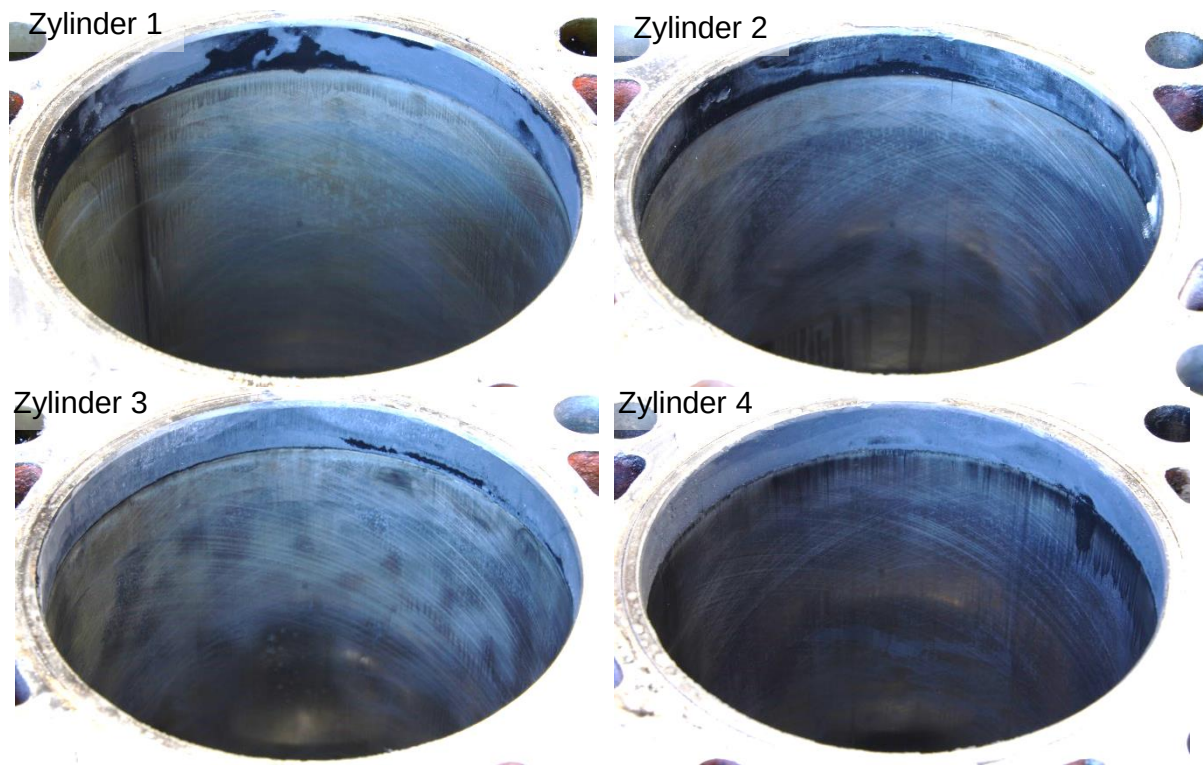


Abbildung 91: Zylinderlaufflächen und Honriefen des Traktors FE-K bei ca. 7.050 Bh

Fazit der Motorbegutachtung

Die Zylinderlaufflächen, die Kolbenböden, die Einspritzdüsen sowie Ein- und Auslasskanäle des Motors zeigen nach über 7.000 Bh weder übermäßige Ablagerungen noch einen unüblichen Verschleißzustand auf. Die Ergebnisse der Befundung sind vergleichbar mit dem Zustand des Traktors bei 4.900 Bh bei der Untersuchung von EMBERGER et al. (2013) [17]. Der Schaden an der Regelstange zur Kraftstofffördermengenregulierung und die Stegrisse im Zylinderkopf sind nicht eindeutig auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff zurückzuführen.

6.4.2 Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Abgasnachbehandlung (AGN)

Nach ca. 854 Bh des Traktors trat mehrfach die Fehlermeldung 1D.1.16 „SCR-Überwachung; NO_x-Wert nach Katalysator, oberen Grenzwert erreicht“ auf (siehe Abschnitt 6.1.4), woraufhin ab 1.010 Bh ausgewählte Komponenten des SCR-Systems befundet wurden. Hierzu wurde der Injektor für die Dosierung der wässrigen Harnstofflösung ausgebaut und über die Öffnung eine optische Begutachtung vorgenommen. In Abbildung 92 sind der ausgebaute Injektor sowie die Injektoraufnahme zu sehen.



Abbildung 92: Injektor (links) und Injektoraufnahme (rechts) für die Dosierung der Harnstofflösung am Traktor FE-S

Abbildung 93 zeigt den nachgelagerten statischen Mischer im Abgasstrang zwischen Partikelfilter und SCR-System bei unterschiedlichen Laufzeiten des Traktors. Der Mischer soll für eine homogene Aufbereitung des Reduktionsmittels bei der Thermolyse und Hydrolyse im heißen Motorabgas sorgen. Bei 1.010 Bh (links oben) sind deutliche Ablagerungen aus den Produkten der Harnstofflösung und dem Abgas zu erkennen. Es sind jedoch noch Öffnungen vorhanden, durch die die Harnstofflösung in den Abgasstrang eindringen kann. Bei Emissionsmessungen unmittelbar vor der Befundung bei ca. 1.000 Bh waren die NO_x -Emissionen höher als im Ausgangszustand (ca. 230 Bh), jedoch wurden bei den stationären Prüfphasen des NRSC sehr hohe NO_x -Umsatzraten bis über 95 % erreicht (siehe Abschnitt 6.3.3). Im NRTC zeigten sich jedoch deutlich höhere NO_x -Emissionen als im Ausgangszustand.

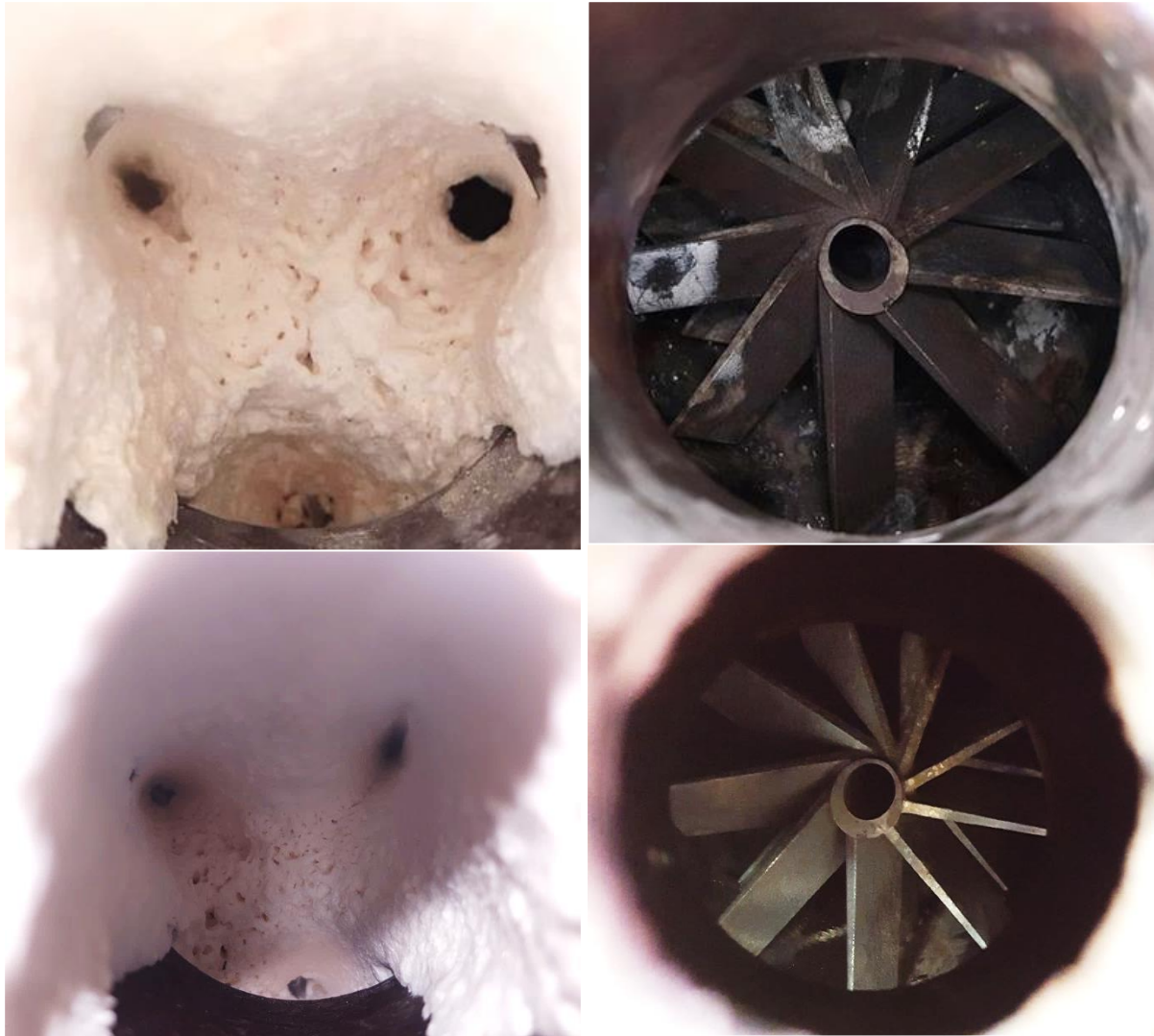


Abbildung 93: Ablagerungen am Mischer nach der Harnstofflösungsdosierung bei 1.010 Bh (links oben), gereinigt bei 1.010 Bh (rechts oben), bei 1.270 Bh (links unten) und bei 1.480 Bh (rechts unten)

Die Ablagerungen konnten mechanisch von Hand herausgebrochen werden und sind in Abbildung 93 rechts oben zu sehen. Nach Aussage der Servicewerkstatt wird eine mechanische Reinigung auch bei konventionellen Dieseltraktoren durchgeführt. Abbildung 94 zeigt die entfernten Ablagerungen. Nach der mechanischen Reinigung wurde noch eine Partikelfilterregeneration durchgeführt.



Abbildung 94: Harnstoffablagerungen aus der Mischdüse nach der Dosiereinheit bei 1.010 Bh des Traktors FE-S

Nach 260 Bh Einsatzzeit war bei 1.270 Bh (Abbildung 93, links unten) erneut eine Ansammlung von Harnstoffablagerungen im Dosierkanal vorhanden. Diese Ablagerungen wurden nicht entfernt und haben sich bis zur erneuten Befundung der Dosierung bei 1.480 Bh (Abbildung 93, rechts unten) vollständig abgebaut. Es wird vermutet, dass die Partikelfilterregenerationen bei 1.312 Bh und 1.375 Bh zum Abbau der Ablagerungen beigetragen haben.

In einem Stichversuch wurde die Temperaturstabilität der Harnstoffablagerungen untersucht. Teilstücke der Ablagerungen mit einem Durchmesser von ca. 3 cm wurden im Muffelofen bei 400 °C sowie bei 500 °C für je 2 h behandelt. Das Ergebnis in Abbildung 95 zeigt, dass sich die Ablagerungen zwischen einer Temperatur von 400 °C und 500 °C verflüchtigen können. Eine aktive Regeneration der Abgasnachbehandlung, bei der üblicherweise Abgastemperaturen über 500 °C herrschen, kann somit zur Minderung oder Entfernung dieser Ablagerung führen.



Abbildung 95: Unbehandelte Harnstoffablagerung (links) und Harnstoffablagerung nach der Behandlung im Muffelofen für 2 h bei 400 °C (mittig) und für 2 h bei 500 °C (rechts)

Am Traktor FE-S wurde bei 1.010 Bh mit einem Endoskop die Einlassseite des SCR-Katalysators auf Ablagerungen untersucht und bei 1.480 Bh die Auslassseite fotografiert. Abbildung 96 zeigt, dass an den Oberflächen des SCR-Katalysators keine deutlichen Ablagerungen vorhanden sind.

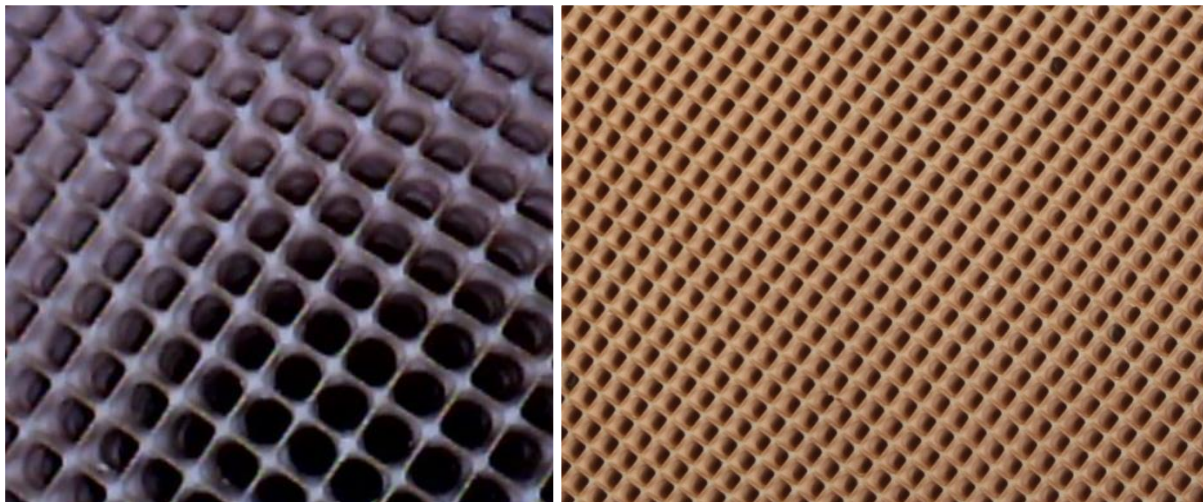


Abbildung 96: Abgaseinlass- (links) und -auslassseite (rechts) des SCR-Katalysators

Bei 1.480 Bh wurde zudem der ausgebaute Partikelfilter des Traktors FE-S optisch begutachtet. Abbildung 97 zeigt, dass an der Oberfläche des Partikelfilters nahezu kein Belag vorhanden ist. Auch eventuelle Anhäufungen von Ablagerungen oder verstopfte Kanäle waren nicht ersichtlich. Dies deutet auf eine geringe Asche- und Rußbildung im Pflanzenölbetrieb hin.

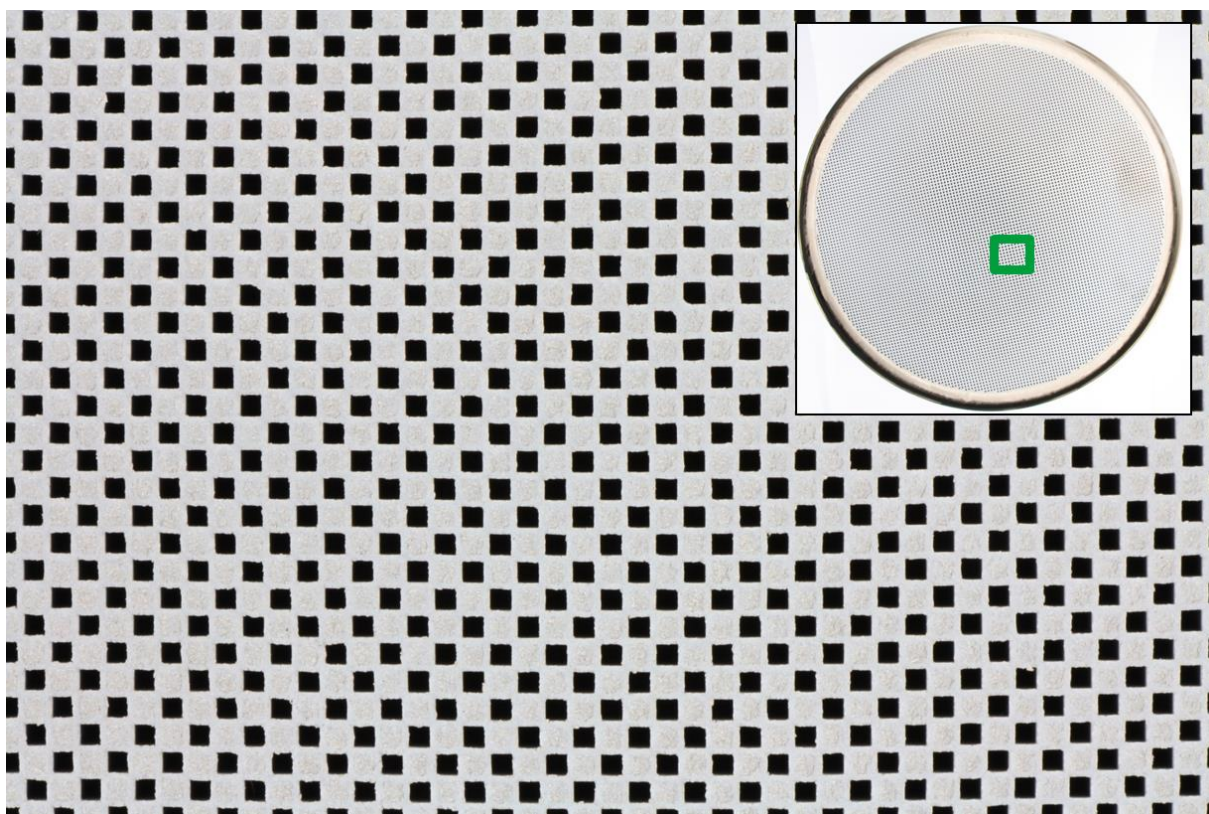


Abbildung 97: Bildausschnitt von der Oberfläche der Einlassseite des Abgaspartikelfilters beim Traktor Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Überprüfung des SCR-Systems am Modellgasprüfstand durch die Deutz AG

Das SCR-System wurde bei 1.480 Bh ausgebaut und von der Deutz AG am Modellgasprüfstand befundet: Um den Zustand des SCR-Systems beurteilen zu können, wurden mit einem Kernbohrer aus dem Substrat vier Proben entlang der Durchflussrichtung entnommen. Diese Proben wurden konditioniert und am Modellgasprüfstand der Deutz AG geprüft. Dabei sollte die thermische Alterung, die chemische Deaktivierung und die Selektivität der Beschichtung im Vergleich zu den Referenzwerten eines im Labor hydrothermal gealterten Substrats untersucht werden.

Bei der Prüfung des Speicherverhaltens von Ammoniak (NH_3) ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Einzelproben, was auf eine gleichmäßige thermische Belastung schließen lässt. Insgesamt ist jedoch eine thermische Beanspruchung des Substrats im Vergleich zum Neuzustand messbar. Die ermittelten NH_3 -Speichermengen aller Proben liegen jedoch über den Referenzwerten der Vergleichsprobe. Die thermische Alterung des Katalysators wurde möglicherweise durch konstant hohe Abgastemperaturen bei landwirtschaftlichen Arbeiten mit hoher Last (wie z. B. beim Pflügen oder Grubbern) begünstigt. Hinweise auf Rückstände im Katalysator z. B. aus Schwefelverbindungen, welche das NH_3 -Speicherverhalten zudem mindern könnten, gibt es nicht.

Das NH_3 -Oxidationsverhalten liegt im Bereich der Referenz und es ist keine unerwünschte N_2O -Bildung zu verzeichnen. Dies deutet auf eine insgesamt niedrige Ablage-

rungsbildung und nur geringer chemischer Deaktivierung der katalytischen Beschichtung hin.

Die katalytische Leistungsfähigkeit der NO_x-Reduktion des Substrats liegt im Mittel unterhalb der Werte im Vergleich zur hydrothermal gealterten Substrats (Referenz). Die Performance der NO_x-Reduktion nimmt dabei in Durchflussrichtung zu, was auf geringfügig höhere laufzeitbedingte Ablagerungen an der Einlassseite im Vergleich zur Auslassseite des Katalysators schließen lässt.

Insgesamt entspricht der SCR-Katalysator mit 1.480 Bh dem üblichen laufzeitbedingten Alterungszustand. Es zeigen sich dabei keine Hinweise auf eine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des SCR-Systems durch den Betrieb mit Rapsölkraftstoff.

Abgasrückführung (AGR)

Beim Traktor Fendt Vario 724 S4 (FE-S) wurde der AGR-Kühler an der Einlass- und Auslassseite bei 1.010 Bh begutachtet. Wie Abbildung 98 verdeutlicht, ist die Einlassseite des AGR-Kühlers kaum mit Rußablagerungen versehen. Eine Versottung der AGR-Komponenten durch Akkumulation von Ruß- und Kohlenwasserstoffrückständen konnte nicht festgestellt werden. Nach dem Kühler sind die Kanäle, die mit vier Rückschlagventilen versehen sind, ebenso nur mit einer dünnen Rußschicht belegt. Die Rückschlagventile verhindern einen Rückstrom von Ladeluft in das AGR-System und waren bei der Befundung ohne erkennbaren Schaden. Die Verschlussklappen des AGR-Ventils (siehe Abbildung 99) waren über den ganzen Stellbereich beweglich und an den Dichtflächen waren kaum Ablagerungen vorhanden. Ein drastischer Anstieg der NO_x-Emissionen im Rohabgas konnte über die Lebensdauer der AGR nicht beobachtet werden, was auf eine ausreichende Kühlleistung und eine funktionstüchtige AGR schließen lässt.

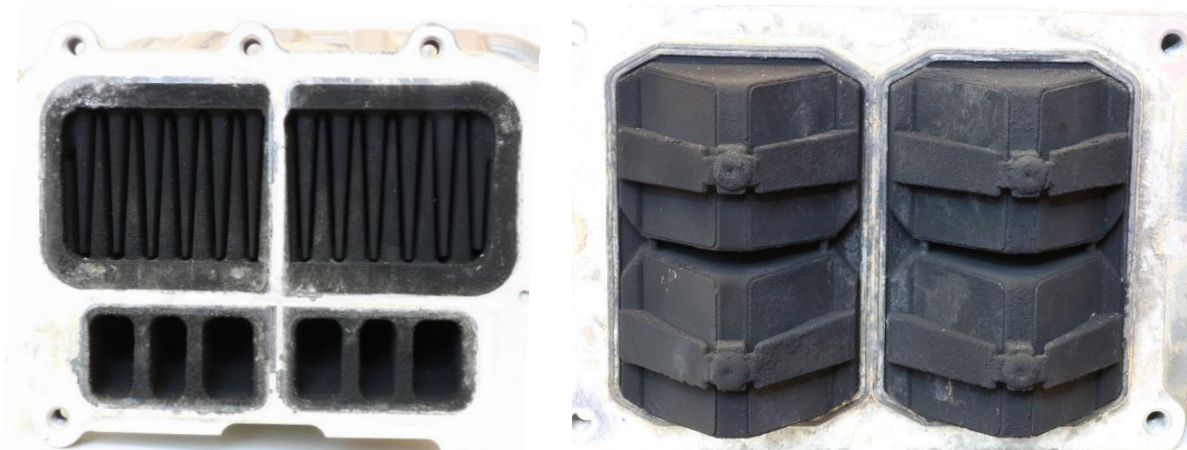


Abbildung 98: Einlass- (links) und Auslasskanäle (rechts) des AGR-Kühlers des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S)



Abbildung 99: AGR-Ventil (links geschlossen und rechts geöffnet) des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Zusammenfassung

Nach dem UN-Klimaschutzabkommen von Paris sind eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen, eine effiziente Rohstoffnutzung und eine Abkehr von fossilen oder nuklearen sowie Hinwendung zu erneuerbaren Energiequellen unabdingbar. Für die meisten mobilen landwirtschaftlichen Antriebe sind flüssige Biokraftstoffe und moderne Verbrennungsmotoren derzeit die einzige nachhaltige und treibhausgasmindernde Alternative zu konventionellen Dieselantrieben. Insbesondere Rapsölkraftstoff könnte bereits jetzt einen aktiven Beitrag zum Klima-, Boden- und Gewässerschutz sowie zur Ressourcenschonung leisten und zu mehr Unabhängigkeit von Mineralölimporten führen.

Steigende Anforderungen hinsichtlich der Abgasemissionen von Traktoren haben in den letzten Jahren zur Entwicklung neuer Motorgenerationen mit komplexer Abgasnachbehandlung geführt. Hinsichtlich des Einsatzes von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 in solchen modernen Traktoren liegen kaum Erfahrungen zum Betriebs- und Emissionsverhalten vor, insbesondere nicht über längere Betriebszeiträume.

Ziel des Vorhabens ist es daher, moderne Traktoren mit Abgasnachbehandlungssystemen auf Funktionalität, Effizienz und Umweltwirkung im Feldeinsatz und am Traktorenprüfstand im Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff zu untersuchen. Zudem sollen auch einzelne Pflanzenöltraktoren älterer Bauart hinsichtlich ihrer Dauerhaltbarkeit über die Lebensdauer beurteilt werden. Weiterhin sollen die Maschinenbetreiber beim Einsatz der Pflanzenöltraktoren beraten werden.

Die Untersuchungen werden an 20 Rapsöltraktoren der Abgasstufen I bis IV durchgeführt. Die Traktoren werden im Feldeinsatz überwacht und einzelne Maschinen am Traktorenprüfstand detailliert hinsichtlich ihres Emissions- und Leistungsverhaltens untersucht. Dabei kommen neben stationären auch transiente Prüfzyklen zum Einsatz. Zudem soll das reale Emissionsverhalten im Praxiseinsatz mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) erfasst werden. Schließlich wird auch der Zustand von Komponenten ausgewählter Motoren und Abgasnachbehandlungssysteme genauer befundet.

Erkenntnisse aus dem Feldtest

Betriebssicherheit. Die Pflanzenöltraktoren leisteten in Summe knapp über 60.000 Bh auf den landwirtschaftlichen Versuchsbetrieben. Im täglichen Praxiseinsatz arbeiteten die Pflanzenöltraktoren mit hoher Betriebssicherheit. Einzelne Störungen beschränkten sich meist auf das Kraftstoffniederdrucksystem oder die Programmierung der Motorsteuerung und auf defekte elektronische Bauteile, wie z. B. Sensoren. Bei einer Motorbefundung am Fendt Vario 412 (FE-K) bei 7.050 Bh wurden vier Stegrisse im Zylinderkopf festgestellt, die möglicherweise durch thermische Überlastung aufgrund einer zu hohen Motorleistung im Rapsölbetrieb entstanden sind. Der Bruch der Regelstange am Traktor FE-K konnte nicht auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff zurückgeführt werden. Die Zylinderlaufflächen, die Kolbenböden, die Einspritzdüsen sowie Ein- und Auslasskanäle des Motors wiesen nach über 7.000 Bh weder übermäßige Ablagerungen noch einen unüblichen Verschleißzustand auf. Die Störungen konnten in Zusammenarbeit mit dem Hersteller, der Servicewerkstatt und dem Traktorenbetreiber behoben werden.

Das Startverhalten mit Rapsölkraftstoff wurde von den Betreibern überwiegend sehr positiv beurteilt und verbesserte sich zudem im Laufe der Untersuchungszeit bei den Traktoren mit Ein-Tank-System durch Optimierungsmaßnahmen des Herstellers.

Abgasnachbehandlungssysteme. Sechs John-Deere-Traktoren der Abgasstufe IIIB sind mit einem katalytisch beschichteten Partikelfilter ausgestattet. Auf eine aktive Regeneration der Partikelfilter wurde verzichtet, da Untersuchungen des Landmaschinenherstellers im Vorfeld gezeigt hatten, dass eine rein passive Regeneration beim Einsatz von Pflanzenölkraftstoff ausreichen kann. Dies wurde im Feldtest über insgesamt ca. 10.370 Bh bestätigt. Durch den Verzicht auf eine aktive Regeneration beim Einsatz von Pflanzenölkraftstoff kann der technische Aufwand für die Regeneration reduziert und der dafür benötigte Kraftstoff eingespart werden. Der Traktor Fendt Vario 724 S4 der Abgasstufe IV ist dagegen für eine aktive Regeneration im Leerlauf mit Einspritzung von Dieselkraftstoff in den Brennraum ausgerüstet. Dies ist vor allem dann vorteilhaft, wenn – wie bei diesem Traktor – ein hoher Anteil an Niedriglastphasen im Betrieb auftritt, in denen die Abgastemperaturen für die passive Regeneration häufig zu niedrig sein können.

Zwei Fendt-Traktoren der Abgasstufen IIIB bzw. IV sind serienmäßig mit einem SCR-System zur Minderung der NO_x-Emissionen ausgestattet. Je nach Einsatzprofil und Traktortyp (mit/ohne Abgasrückführung) sind unterschiedliche mittlere monatliche Harnstoffverbräuche zwischen ca. 1 % und 10 Vol.-% bezogen auf die Kraftstoffmenge zu verzeichnen. Im Feldversuch gab es bisher keine Hinweise auf eine Fehlfunktion der SCR-Systeme.

Pflanzenölqualität. Die Versorgung der Versuchsbetriebe mit Rapsölkraftstoff nach gültiger Norm DIN 51605:2016 [7] war überwiegend gewährleistet. Bei einzelnen Chargen waren zwar geringfügige Überschreitungen von Grenzwerten festzustellen, die aber meist im Bereich der Messgenauigkeit der Prüfverfahren lagen und als unkritisch bewertet werden können. Die Betreiber der Ölmühlen und der Traktoren wurden bei Problemen hinsichtlich qualitätssichernder Maßnahmen bei Produktion, Anlieferung und Lagerung von Pflanzenölkraftstoff beraten.

Motorölqualität. Im Feldtest wurden über 160 Motorölproben untersucht. Die Analysen belegen einen verschleißarmen Betrieb der Traktoren mit Pflanzenölkraftstoff. Der Eintrag von Pflanzenöl in das Motoröl ist bei modernen Motoren mit Common-Rail-Einspritzsystemen gering. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Motorölwechselintervall bei modernen Common-Rail-Motoren auch beim Einsatz von Rapsölkraftstoff bei den für Dieselkraftstoff üblichen 500 Betriebsstunden (Bh) beibehalten werden kann und dahingehend kein Mehraufwand notwendig ist. Eine Unsicherheit stellen jedoch Traktoren mit aktiver Regeneration des Abgasnachbehandlungssystems durch Kraftstoffeinspritzung in den Brennraum dar, bei denen vermehrt nicht verbrannter (Pflanzenöl-) Kraftstoff ins Motoröl eingetragen werden kann. Daher sollte mindestens für diese, idealerweise für alle Traktortypen vorab geprüft werden, welches Motorölwechselintervall zu empfehlen ist.

Leistungs- und Emissionsverhalten

Leistungsmessungen vor Ort. Die Messungen an zwei Traktoren des Typs John Deere 6630 Premium bei 2.693 Bh (JD-O) und 1.345 Bh (JD-B) zeigten einen beanstandungslosen Betrieb mit Rapsölkraftstoff. Der festgestellte Leistungsunterschied beider Traktoren ist auf die unterschiedlichen Softwareeinstellungen in der Motorsteuerung zurückzuführen. Auch die Messwerte des John Deere 5080R (JD5-O) bei 852 Bh und des Deutz-Fahr Agrottron 650 M (DE-N) bei 1.412 Bh deuten auf ein einwandfreies Betriebs- und Leistungsverhalten hin. Die gemessenen Leistungs- und Verbrauchskennzahlen des Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-AI) bei 5.240 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff entsprachen denen des baugleichen Traktors FE-A bei 350 Bh. Insgesamt wurden über die beobachtete Laufzeit weitgehend konstante Leistungs- und Verbrauchswerte festgestellt, was auf eine einwandfreie Funktion der Motorkomponenten, wie z. B. der Kraftstoffinjektoren oder der Hochdruckpumpe, schließen lässt.

Messungen am Traktorenprüfstand. Die Leistungs- und Emissionsmessungen am John Deere 6930 Premium (JD-K) erfolgten mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei ca. 4.135 Bh Gesamtlaufzeit des Traktors. Im Vergleich zu den anfänglichen Messungen bei ca. 50 Bh war keine Verschlechterung des Betriebs- und Emissionsverhaltens erkennbar.

Für den Traktor der Abgasstufe IIIB Fendt Vario 718 SCR (Fe-Ka) liegen Messdaten über einen Zeitraum von 700 Bh vor. Bei der Zapfwellenleistung des Traktors war zwischenzeitlich ein Rückgang festzustellen. In Absprache mit dem Landmaschinenhersteller wurde auch hier dem Rapsölkraftstoff ein „Keep-Clean“-Additiv zugesetzt, wie es der Motorenhersteller Deutz auch für den Einsatz von Dieselkraftstoffen mit hohen Biodieselanteilen empfiehlt. Nach ca. 180 Bh mit additiviertem Rapsölkraftstoff war wieder eine dem Ausgangszustand ähnlich hohe Zapfwellenleistung festzustellen. Der Wirkungsgrad an der Zapfwelle war bei allen Messungen im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff auf vergleichbarem Niveau.

Bei den spezifischen Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffen (HC) kann auf Basis der Ergebnisse der Messungen im stationären Prüfzyklus auch nach 700 Bh von einer Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ausgegangen werden. Auch bei den spezifischen Emissionen der Partikelmasse (PM) ist die Einhaltung des Grenzwerts absehbar, wenn der Traktor entsprechend der verwendeten Zwei-Tank-Technologie im Leerlauf mit Dieselkraftstoff betrieben wird. Die Partikelanzahlemissionen (PN), die für diesen Traktor noch nicht gesetzlich limitiert sind, sondern erst ab Abgasstufe V gelten, unterscheiden sich nach der Abgasnachbehandlung in den meisten Prüfphasen nicht wesentlich zwischen Rapsölkraftstoff- und Dieselbetrieb.

Am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) der Abgasstufe IV erfolgten 60 Einzelmessungen von Leistung und Emissionen über die Betriebszeit von knapp 1.300 Bh. Die Zapfwellenleistung unter Volllast ist im Rapsölbetrieb um etwa 15 % geringer als im Dieselbetrieb. Dies ergibt sich aufgrund der verringerten Einspritzmenge im Betrieb mit Rapsölkraftstoff in Verbindung mit dem geringeren Heizwert im Vergleich zum Dieselkraftstoff. Der gemessene Wirkungsgrad des Motors an der Zapfwelle ist im Diesel- und Rapsölbetrieb nahe-

zu identisch, was auf eine ähnlich effiziente Verbrennung hinweist. Durch eine Anhebung der Einspritzmenge könnte der Leistungsunterschied ausgeglichen werden.

Die Emissionsgrenzwerte für NO_x, CO, HC und PM der Abgasstufe IV können im stationären und transienten Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff unterschritten werden. Die Abgasemissionen, die Leistung, der Wirkungsgrad sowie der Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch haben sich bis zur Messung bei ca. 1.000 Bh nicht signifikant verändert.

Erst ab ca. 1.000 Bh nahm die Leistung an der Zapfwelle sowohl mit Rapsöl- als auch mit Dieselkraftstoff leicht ab. Es wird vermutet, dass sich aufgrund von Ablagerungen an den Injektoren die maximale Einspritzmenge reduziert hat. Ablagerungsbildung in den Injektoren tritt auch bei rein dieselbetriebenen Motoren auf. Um dieser entgegenzuwirken, werden meist Kraftstoffadditive eingesetzt. Bei diesem Traktor wurden bewusst keine Additive im Feldeinsatz mit Rapsölkraftstoff eingesetzt, um Informationen über die Neigung zur Bildung von Ablagerungen zu sammeln.

Ferner ist ein Anstieg der NO_x-Emissionen bei 1.000 Bh zu erkennen. Es wird vermutet, dass die dieseloptimierten Motoreinstellungen zu unzureichenden Abgasrückführraten im Rapsölbetrieb und somit höheren NO_x-Rohemission führen. Dadurch sind höhere Harnstoffdosiermengen notwendig, wodurch die Bildung von Harnstoffablagerungen begünstigt wird. Harnstoffablagerungen zeigen einen negativen Einfluss auf die NO_x-Emissionen, können aber auch im Fahrbetrieb durch hohe Abgastemperaturen, z. B. bei der aktiven Regeneration der Abgasnachbehandlung, wieder abgebaut werden.

Der Traktor der Abgasstufe IV John Deere 6215R (JD-S) wies bei den Messungen am Traktorenprüfstand ein gutes Emissionsverhalten auf. Die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe IV für NO_x, CO, HC, und PM wurden im stationären (NRSC) und transienten Betrieb (10sNRTC) mit Rapsölkraftstoff deutlich unterschritten.

Die Messungen der Traktoren der Abgasstufen IIIB und IV am Traktorenprüfstand zeigen, dass mit zunehmendem Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen der Einfluss verschiedener Kraftstoffe auf das Emissionsverhalten sinkt.

Messungen im realen Betrieb mit portabler Emissionsmesstechnik (PEMS). Das Emissionsverhalten des Fendt Vario 724 S4 (FE-S) war im tatsächlichen Fahrbetrieb bei Arbeiten mit dem Pflug, dem Grubber, der Kreiselegge sowie während Straßenfahrten mit Rapsölkraftstoff auf einem geringen Niveau. Die Emissionswerte beim Pflügen mit Rapsölkraftstoff waren dabei zumeist geringer als die am Traktorenprüfstand ermittelten und die im Rahmen der Gesetzgebung diskutierten zukünftigen Grenzwerte.

Mit dem Traktor der Abgasstufe IV John Deere 6215R (JD-S) wurden drei Straßenfahrten ohne Anhängelast mit portabler Emissionsmesstechnik (PEMS) durchgeführt. Auch dabei waren die Emissionswerte bereits geringer als die für die kommende Gesetzgebung diskutierten Grenzwerte.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen einen zuverlässigen, effizienten und emissionsarmen Betrieb der Traktoren der Abgasstufen I bis IV mit Rapsölkraftstoff. Dabei konnten bisher 584.000 l

Dieseldieselkraftstoff ersetzt, Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 1.389.000 kg CO₂-Äquivalenten vermieden und als Koppelprodukt 1.100.000 kg Rapspresskuchen bereitgestellt werden. Die Nutzung von Rapsölkraftstoff in Traktoren kann somit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Bereitstellung heimischer Eiweißfuttermittel leisten.

Forschungsbedarf

Trotz der in diesem Vorhaben erzielten umfangreichen Ergebnisse bleiben Fragestellungen unbeantwortet, wie z. B. zur Dauerhaltbarkeit der Abgasnachbehandlungskomponenten über die gesamte Lebensdauer des Traktors. Ferner ist unklar, ob die kommenden Traktoren der Abgasstufe V mit Rapsölkraftstoff den neuen Grenzwert der Partikelanzahl am Prüfstand einhalten. Ebenso gilt es, das Emissionsverhalten mit Rapsölkraftstoff im tatsächlichen Fahrbetrieb hinsichtlich der künftigen Anforderungen der Abgasstufe V mit PEMS zu prüfen. Dies ist wichtig, da die Einhaltung dieser Vorgaben Grundvoraussetzung für die Markteinführung rapsölkraftstofftauglicher Traktoren durch die Industrie ist.

Abstract

Regionally produced pure plant oil fuels, used in compatible agricultural machinery contribute to sustainable food supply. Especially rapeseed oil fuel significantly reduces greenhouse gas emissions up to 91 % and thus, lowers the carbon footprint of agricultural products. Harmlessness on climate and environment is guaranteed by the Directive 2009/28/EC in combination with national sustainability ordinances. Additionally, rapeseed oil fuel used for agricultural tractors features benefits such as the increase of regional added value, synergy effects with combined feed production, protection of soil and water and the reduction of import dependency. However, despite major advantages plant oil fuels are barely used in practice, because of technical, economical and sustainability concerns of potential users. It is the purpose of this work, to show the reliability and downtimes of pure rapeseed oil compatible tractors in practice. The research is conducted on 20 tractors of different manufacturers and development stages (exhaust gas stage I, II, IIIA, IIIB, IV) by both field tests and test stand trials. Results of operational reliability, engine wear, power output, fuel efficiency and exhaust gas emissions are evaluated and if possible compared with diesel fuel operation.

During the investigated period cold-pressed rapeseed oil, complying with the German standard DIN 51605 for rapeseed oil fuel was used and analysed regularly. The operation behaviour was assessed by the evaluation of data from the tractors' electronic control unit (ECU), handwritten operation logbook, engine oil analysis as well as driver interviews. Emission testing on the tractor test stand is based on the standard procedure of EU guideline 2016/1628. Differing from type approvals, where engine test stands are used, here the measurement is done at the tractors with mounted engines. The power is measured at the power take-off (PTO) with a dynamometer. As testing cycle the Non-Road-Steady-Cycle (NRSC) and an adapted Non-Road-Transient-Cycle (10sNRTC) are applied. For real driving emission (RDE) measurements two state-of-the-art tractors are being used. The tractors Fendt 724 S4 and John Deere 6215R meet latest exhaust gas stage IV and were tested in practice performing various agricultural works. By using a PEMS Semtech Ecostar, which was set up in a box for off-road use, the emission components nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), hydrocarbons (HC) and particulate mass (PM) are measured.

None of the monitored 20 tractors (exhaust stages I, II, IIIA, IIIB and IV) showed considerable failures or damages. In total more than 60.000 operating hours were achieved. Exhaust gas after treatment systems also enabled a reliable operation with high emission reduction efficiency. Neither performance nor fuel consumption showed any deterioration during the investigated period. Generally, the limited exhaust gas components (NO_x, CO, HC, PM) determined at a tractor test stand nearly remained at the same level over the entire operating time. Without exhaust after treatment, HC and PM emissions with rapeseed oil fuel are mainly lower than with diesel fuel, whereas NO_x are little higher. However, with increasing exhaust stages and application of exhaust after treatment systems differences between fuels become less relevant. Plant oil tractors with exhaust gas stage IV mainly achieve the legal emission limits with rapeseed oil fuel in the NRSC and

10sNRTC. Results of RDE measurements show that recorded emission values also fulfil related limiting values for both fuels. Conformity factors that relate actual emissions, measured with PEMS, to corresponding test cycle values, measured at the test stand are within approaching legitimacy.

Research on various plant oil compatible tractors show prospective results in terms of engine performance, emission behaviour and overall technical reliability. Hence, plant oil fueled tractors could play a major role within decarbonisation strategies of the agricultural sector. The technology is available and can be immediately implemented in practice.

Literaturverzeichnis

- [1] APFELBECK, R.; GESSNER, B. H. (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht - Teil II: Untersuchung der Abgaszusammensetzung von Dieselmotoren beim Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester sowie deren Mischungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben Zuwendungsbescheid Nr. Z 3/a-0734.1-5147 vom 11.04.1988 des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Freising: Technische Universität München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weißenstephan, 315 Seiten
- [2] BARKER, J.; REID, J. (2015): Injector and Fuel System Deposits. In: BARTZ, W. J.; KEUPER, R. (Hrsg.): Fuels 2015. Conventional and Future Energy for Automobiles. 10th International Colloquium. Technische Akademie Esslingen (TAE), 20.-22. Januar Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 263-270
- [3] CAO, T.; DURBIN, T. D.; RUSSELL, R. L.; COCKER, D. R.; SCORA, G.; MALDONADO, H.; JOHNSON, K. C. (2016): Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment. Atmospheric Environment, Jg. 147, Nr. 12 (December), S. 234-245
- [4] DEERE & COMPANY (2012): Fuel-Protect - Keep Clean solution for diesel injectors (MCTY26827), URL: <https://jdparts.deere.com> (Stand: 02.02.2015)
- [5] DEUTSCHER BUNDESTAG (2016): Entwurf eines Gesetzes zu dem Übereinkommen von Paris vom 12. Dezember 2015, Drucksache, Nr. 427/16, 12.08.2016, Berlin, 48 Seiten, URL: <https://www.bundesrat.de/> (Stand: 11.11.2016)
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (1996): DIN EN ISO 8178-4 - Hubkolben-Verbrennungsmotoren, Abgasmessung. Teil 4: Prüfzyklen für verschiedene Motorverwendungen. Dezember 1996. Berlin: Beuth Verlag, 14 Seiten
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN 51605 - Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren - Rapsölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. Januar 2016. Berlin: Beuth Verlag, 15 Seiten
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2015): Entwurf DIN 51623 - Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren - Pflanzenölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. Dezember 2015. Berlin: Beuth Verlag, 25 Seiten
- [9] DEUTZ AG (2010): Original DEUTZ Additives Clean-Diesel InSyPro., 2 Seiten, URL: <http://www.deutz.de/> (Stand: 23.11.2015)
- [10] DEUTZ AG (2010): Technisches Rundschreiben 0199-99-1210/0 DE Motorprobleme durch verklebte/verharzte Einspritzventile, 6 Seiten, URL: <http://www.deutz.de/> (Stand: 23.11.2015)
- [11] DLG-TESTZENTRUM (2010): Datenblatt DLG-PowerMix John Deere 6630 Premium DLG 2010-114, 5 Seiten, URL: <http://www.dlg-test.de> (Zugriff am 23.11.2016)
- [12] DÖNGES, P.; TRAULSEN, H. (2006): Felderprobung Rapsöl pur. Rendsburg: DEULA Schleswig-Holstein GmbH, 51 Seiten

- [13] DÜSSELDORF, C. (2015): Experimentelle Untersuchungen zur inner- und außermotorischen Partikelreduktion an einen Nutzfahrzeugdieselmotor zur Erfüllung der Abgasstufe IV im Betrieb mit biogenen Kraftstoffen. VKM-Schriftenreihe, Nr. 15. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, 147 Seiten, ISBN 978-3-943995-86-2
- [14] DRESSLER, D.; ENGELMANN, K.; BOSCH, F.; BÖSWIRTH, T.; BRYZINSKI, T.; EFFENBERGER, M.; HAAS, R.; HIJAZI, O.; HÜLSBERGEN, K.-J.; JORISSEN, T.; KLEIN, D.; MAZE, M.; RICHTER, K.; RÖDER, H.; SCHULZ, C.; SERDJUK, M.; STRIMITZER, L.; WIDMANN, B.; TIEMANN, A.; WEBER-BLASCHKE, G.; WOLF, C.; ZERLE, P.; REMMELE, E. (2016): ExpReSSBio Ergebnisse. Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. Abschlussbericht Langfassung. Hrsg. v. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Straubing, 748 Seiten
- [15] 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
- [16] EMBERGER, P.; LANDIS, M.; KRAMMER, K.; PRANTL, H.; SCHAUFLE, H.; SCHIEBE, 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.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II. Berichte aus dem TFZ, Nr. 31. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 56 Seiten, ISSN 1614-1008
- [18] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA. Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Berichte aus dem TFZ, Nr. 32. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 125 Seiten, ISSN 1614-1008
- [19] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; GESSNER, T.; PICKLE, P. (2010): Exhaust Gas Emissions of New Vegetable Oil Compatible Exhaust Gas State IIIA Tractors. Emission Behaviour with Rapeseed, Sunflower and Soybean Oil. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI), MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2010. 68. Internationale Tagung, Braunschweig, 27. - 28. Oktober 2010, Tagungsband. VDI-Berichte, Nr. 2111. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 79-84, ISBN 978-3-18-092111-2
- [20] 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. July 6. - 10. Zürich: Agroscope; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, S. 1-8, ISBN 978-0993023606

- [21] Ettl, J.; Bernhardt, H.; Thüneke, K.; Emberger, P.; Remmele, E. (2015): Exhaust emissions and fuel consumption under real driving conditions on a tractor test stand – Results with dynamic test cycles based on real tractor works for exhaust emissions and fuel consumption testing. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) UND MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (MEG) (Hrsg.): Innovations in Agricultural Engineering for Efficient Farming. Conference Agricultural Engineering. LAND. TECHNIK AgEng 2015, 73. International Conference on Agricultural Engineering. Hannover, 6.- 7. November. VDI-Berichte, Nr. 2251. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 29-38, ISBN 978-3-18-092251-5
- [22] Ettl, J.; Emberger, P.; Thüneke, K.; Remmele, E. (2016): Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöлтаuglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern. In Kooperation mit: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), John Deere - European Technology Center, BayWa AG. Berichte aus dem TFZ, Nr. 47. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) 179 Seiten, ISSN 1614-1008
- [23] Ettl, J.; Huber, G.; Bernhardt, H.; Thüneke, K. (2016): Reale Emissionen eines pflanzenöлтаuglichen Traktors Gemessen mit PEMS und am Traktorenprüfstand. ATZ offhighway, Jg. 9, Nr. 11, S. 48-53
- [24] Ettl, J.; Landis, M.; Huber, G.; Bernhardt, H. (2014): Erfahrungen und Resultate mit einem dynamischen Zyklus zur Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessung an Traktoren. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI); MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (MEG) (Hrsg.): LAND. TECHNIK AgEng 2014, 72. International Conference on Agricultural Engineering. Berlin, 19. - 20. November. VDI-Berichte, Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 433-438, ISBN 978-3-18-09222-3
- [25] Ettl, J.; Thüneke, K.; Remmele, E.; Emberger, P.; Huber, G.; Bernhardt, H. (2017): Real driving emissions of tractors during field work and on the test stand. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI); MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (MEG); EUROPEAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING (EURAGENG) (Hrsg.): LAND. TECHNIK AgEng 2017 - The Forum for Agricultural Engineering Innovations. Conference: Agricultural Engineering VDI-MEG 2017. 75. International Conference on Agricultural Engineering. Convention Center, Exhibition Ground, Hannover, 10.-11. November. VDI-Berichte, Nr. 2300. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 391-398, ISBN 978-3-18-092300-0
- [26] EUROPÄISCHES PARLAMENT; RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (2009): Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 52, Nr. L 140 vom 5. 6. 2009, S. 16-62
- [27] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Delegierte Verordnung (EU) 2017/655 der Kommission vom 19. Dezember 2016 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates in Hinblick auf die Überwachung der Emissionen gasförmiger Schadstoffe vor in Betrieb befindlichen Verbrennungsmotoren in nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 60, Nr. L 102 vom 13. 4.2017, S. 334-363

- [28] EUROPÄISCHES PARLAMENT; RAT DER EUROPÄISCHEN (2009): EU-Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmaschinen für mobile Maschinen und Geräte (ABl. L 59 vom 27. 2.1997, S. 1). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Jg. 52, Nr. L 68 vom 13.3. 2009, S. 1-249
- [29] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2016): Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. September über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der EU-Richtlinie 97/68/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 59, Nr. L 252 vom 16.9.2016, S. 53-117
- [30] GIETZELT, C.; DEGRELL, O.; MATHIES, K. (2012): In-use-Emissionsmessungen an Motoren von mobilen Maschinen. Landtechnik, Jg. 67, Nr. 5, S. 366-369
- [31] GREUTER, E.; ZIMA, S.; HOFFMANN, W. (2006): Motorschäden. Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen. 3. Aufl. Vogel-Fachbuch. Würzburg: Vogel Buchverlag, 656 Seiten, ISBN 978-3834331939
- [32] HAAS, R.; REMMELE, E. (2013): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 - eine bundesweite Befragung. Berichte aus dem TFZ, Nr. 34. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) 51 Seiten, ISSN 1614-1008
- [33] HASSEL, E.; PRESCHER, K.; BERNDT, S.; FLÜGGE, E.; GOLISCH, J.; HARKNER, W.; SCHÜMANN, U.; SY, G.; WICHMANN, V. (2005): Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöltauglichen Traktoren. Abschlussbericht über die Begleitforschung zum Demonstrationsvorhaben, Aktenzeichen: 00 NR 200, Teil 1. Rostock: Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock, 107 Seiten
- [34] HELMS, H.; LAMBRECHT, U.; KNÖRR, W. (2009): Aktualisierung des Modells TREMOD - Mobile Machinery (TREMOM-MM). Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), 42 Seiten
- [35] HELMS, H.; HEIDT, C. (2014): Erarbeitung eines Konzeptes zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand. Durchführung: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.). Bericht, Nr. 24/2014. Dessau-Roßlau, 98 Seiten
- [36] 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
- [37] HUBER, G.; SCHOLZ, A.; DÜSSELDORF, C., FLIERL, R.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; PICKEL, P. (2015): Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe Tier 4/EU Stufe IV im Betrieb mit Pflanz

- zenöl, Berichte aus dem TFZ, Nr. 44. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 86 Seiten, ISSN 1614-1008
- [38] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2006): ISO 8178-1. Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions. English version (8178). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 19 Seiten
- [39] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2006): ISO 8178-11: Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 11: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions from engines used in non-road mobile machinery under transient test conditions. First edition 2006-04-01. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 71 Seiten
- [40] JUNK, R.; NOWOTNY, M.; SCHÜMANN, U.; FINK, C.; BUCHHOLZ, B. (2018): Ablagerungen in Common-Rail-Injektoren – Kraftstoffseitige und konstruktive Vermeidungsstrategien. Quantitative Bewertung kraftstoffseitiger Einflussgrößen auf die Ablagerungsbildung im Inneren von Common-Rail-Injektoren sowie Validierung systemischer und kraftstoffseitiger Maßnahmen unter motornahen Bedingungen. Schlussbericht zum Vorhaben; Förderkennzeichen 6011860 (FVV) und 22033814 bzw. 14NR338 (FNR), Laufzeit: 01.01.2015 bis 31.03.2017. Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren (Hrsg.). Rostock, 131 Seiten
- [41] KODER, A.; ALTMANN, R.; RABL, H.-P.; MAYER, W. (2014): Injection rate characteristics of a Piezo-Common-Rail-Injector fueled with straight rapeseed oil and its mixtures with orange peel oil. In: RWTH AACHEN UNIVERSITY, INSTITUTE FOR COMBUSTION ENGINE, FUEL DESIGN CENTER (Hrsg.): Book of Abstracts. Cluster of Excellence. Tailor-Made Fuels from Biomass. 2nd International Conference. Eurogress, Aachen, Germany, June, 16-18. Aachen: RWTH Aachen, S. 26-27
- [42] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Aufl. Darmstadt: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, 1180 Seiten, ISBN 978-3-939371-91-5
- [43] LANDIS, M. (2012): Dynamischer Messzyklus für Emissionsmessungen an Traktoren. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI); MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (MEG) (Hrsg.): LAND.Technik 2012. Mit Erfahrung und Innovationskraft zu mehr Effizienz. Conference: Agricultural Engineering 70. Internationale Tagung. Karlsruhe, 6. - 7. November. VDI-Berichte, Nr. 2173. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 81-86, ISBN 978-3-18-092173-0
- [44] LIJEWSKI, P.; MERKISZ, J.; FUC, P. (2013): The analysis of the operating conditions of farm machinery engines in regard to exhaust emissions legislation. Applied Engineering in Agriculture, Jg. 29, Nr. 4, S. 445-452

- [45] LINDGREN, M. (2007): A methodology for estimating annual fuel consumption and emissions from non-road mobile machinery. Annual emissions from the non-road mobile machinery sector in Sweden for year 2006. Sveriges lantbruksuniversitet - Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) (Hrsg.). Uppsala: Department of Biometry and Engineering. Rapport - miljö, teknik och lantbruk, Nr. 2007:01, 43 Seiten, ISSN 1652-3237
- [46] LUCKA, K.; HOFFMANN, H. (2016): Biodiesel quality watch: Systematic investigation with the "ENIAK". Fuel Injector Deposit Test. In: BUNDESVERBAND BIOENERGIE E. V. (BBE); UNION ZUR FÖRDERUNG VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN E. V. (UFOP); BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN BIOETHANOLWIRTSCHAFT E. V. (BDBE); VERBAND DER DEUTSCHEN BIOKRAFTSTOFFINDUSTRIE E. V. (VDB) (Hrsg.): Kraftstoffe der Zukunft. 13. Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe. CityCube, Berlin, 18.-19.1., S. 1-18
- [47] LÜFT, M. (2015): Ein Beitrag zur Optimierung der motorischen Verbrennung von Rapsölkraftstoff in Heavy Duty Dieselmotoren. Forschungsberichte aus dem Institut für Kolbenmaschinen, Nr. 3/2014. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenbau, Institut für Kolbenmaschinen, 164 Seiten, ISSN 1615-2980
- [48] MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E. V. (2015): MWV Mineralölzahlen als Excel-Datei mit Daten zu Kapazitäten, zur Mineralölein- und -ausfuhr, zum Mineralölverbrauch, zu Preisen und zum Weltölmarkt. URL: <http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikeninfoportal> (Zugriff am 30.11.2015)
- [49] RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; KRIECHBAUM, T.; PRANTL, H.; BREINESBERGER, J. (2008): Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft. Wieselburg; St. Pölten: HBLFA Francisco Josephinum; BLT Biomass, Logistic, Technology; AGRAR PLUS GmbH, 1078 Seiten
- [50] REIF, K. (2012) (Hrsg.): Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung. 5. Aufl. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 501 Seiten, ISBN 978-3-8348-1715-0
- [51] REMMELE, E.; ECKEL, H.; WIDMANN, B. (2014): Regenerative Energieträger und alternative Antriebskonzepte für mobile Arbeitsmaschinen. Landtechnik, Jg. 69, Nr. 5, S. 256–259
- [52] REMMELE, E. (2009): Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. 2. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 88 Seiten, ISBN 978-3-9803927-9-2
- [53] SCHÄFFELER, U.; KELLER, M. (2008): Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980–2020. Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.). Umwelt Wissen – Luft, Nr. 28/08. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 172 Seiten
- [54] 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
- [55] THE 2ND VEGOIL CONSORTIUM (2011): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Work package 7 Dissemination. Deliverable No. 7.7. Final Results. Version 1. URL: <http://www.2ndvegoil.eu> (Stand: 20.04.2012)

- [56] 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 (TFZ), 177 Seiten, ISSN 1614-1008
- [57] THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; GASSNER, T.; REMMELE, E.; WIDMANN, B.; FISCHER, H.; KRIST, H.; SCHNELLE-KREIS, H.; HOPPENHEIDT, K. (2007): Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotortreibstoff betriebenen Traktors. Berichte aus dem TFZ, Nr. 14. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 96 Seiten, ISSN 1614-1008
- [58] THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; GASSNER, T.; REMMELE, E. (2011): Emission Behaviour of New Tractors with Different Vegetable Oils. In: QUENDLER, E.; KÖSSLER, K. (Hrsg.): Efficient and safe production processes in sustainable agriculture and forestry, XXXIV CIOASTA CIGR V Conference 2011, 29. June - July 1, Vienna, Austria. Proceedings, Abstract Book. Vienna, Austria: BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, S. 1-10, ISBN 978-3-200-02204-1
- [59] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2010): Exhaust and Crankcase Emission Factors for Non-Road Engine Modeling - Compression-Ignition. United States, Environmental Protection Agency (EPA) (Hrsg.). Washington, D. C. Report, Nr. EPA-420-R-10-018 NR-009d, 141 Seiten
- [60] BASSHUYSEN, R. V. (2010): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 5., vollst. überarb. und erw. Aufl. ATZ-MTZ Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 1176 Seiten, ISBN 3-834806994
- [61] WIDMANN, B. A.; APFELBECK, R.; GESSNER, B. H.; PONTIUS, P. (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht. Gesamtbericht. Gelbes Heft, Nr. 40. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF), 650 Seiten
- [62] WIDMANN, B.; REMMELE, E.; RIEPL, C. (2012): Biokraftstoffe. Fragen und Antworten. TFZ-Kompakt, Nr. 9. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 15 Seiten

Anhang

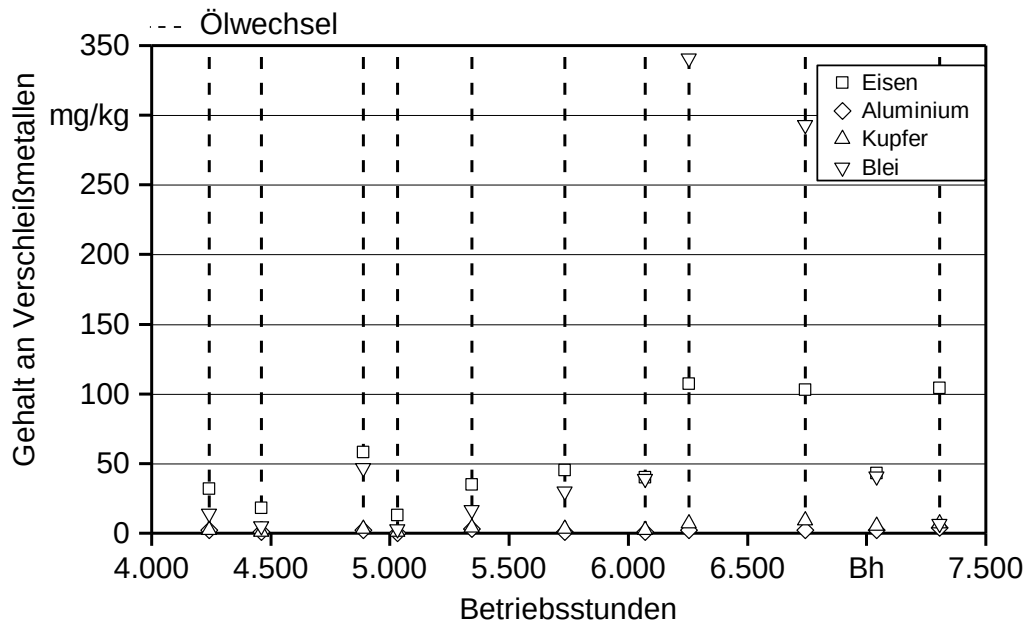
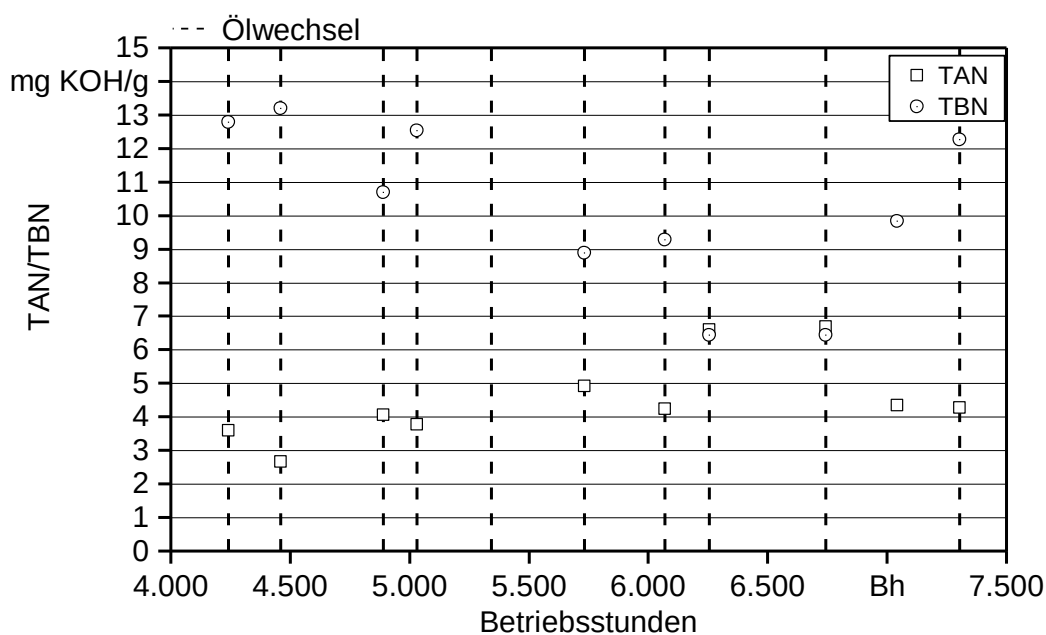
Anhang A: Motorölanalysen

Anhang A 1:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-K.....	188
Anhang A 2:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-K.....	188
Anhang A 3:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors DE-K	189
Anhang A 4:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors DE-K	189
Anhang A 5:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors DE-N	190
Anhang A 6:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors DE-N	190
Anhang A 7:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-A.....	191
Anhang A 8:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-A.....	191
Anhang A 9:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-Al	192
Anhang A 10:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-Al	192
Anhang A 11:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls der Traktoren JD7-G, JD-B und JD-O	193
Anhang A 12:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls der Traktoren JD7-G, JD-B und JD-O	193
Anhang A 13:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-G.....	194
Anhang A 14:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-G.....	194
Anhang A 15:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-K	195
Anhang A 16:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-K	195
Anhang A 17:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD5-O.....	196
Anhang A 18:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD5-O.....	196

Anhang A 19:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-Ka	197
Anhang A 20:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-Ka	197
Anhang A 21:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD6R-B	198
Anhang A 22:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD6R-B	198
Anhang A 23:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-Pu	199
Anhang A 24:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-Pu	199
Anhang A 25:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-N	200
Anhang A 26:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-N	200
Anhang A 27:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-P	201
Anhang A 28:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-P	201
Anhang A 29:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-P4	202
Anhang A 30:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-P4	202
Anhang A 31:	Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-S	203
Anhang A 32:	Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-S	203

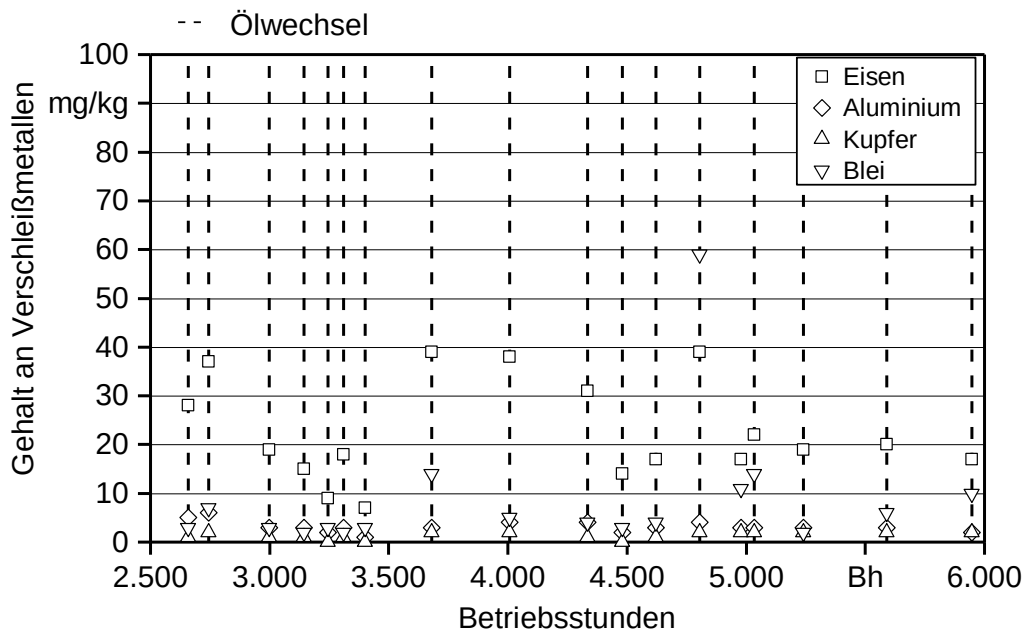
Anhang B: 10sNRTC

Anhang B 1:	NO _x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 479 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)	204
Anhang B 2:	NO _x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1000 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)	205
Anhang B 3:	NO _x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1013 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)	206
Anhang B 4:	NO _x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1020 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)	207
Anhang B 5:	NO _x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1460 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)	208
Anhang B 6:	NO _x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Diesel bei 1475 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)	209
Anhang B 7:	NO _x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1490 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)	210

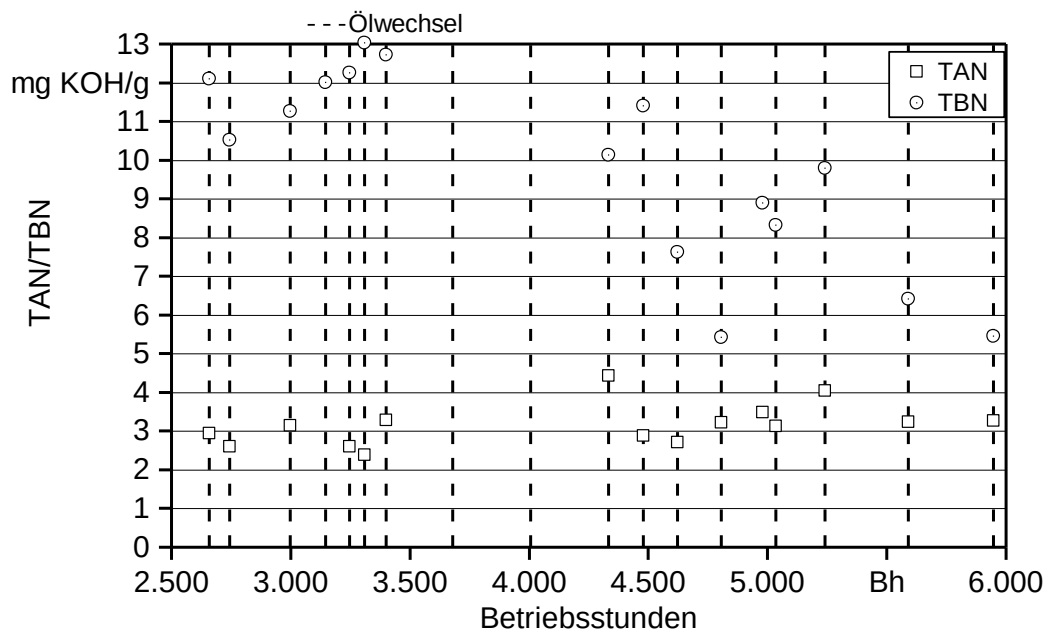
Anhang A: Fendt Farmer Vario 412 (FE-K)*Anhang A 1: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-K**Anhang A 2: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-K*

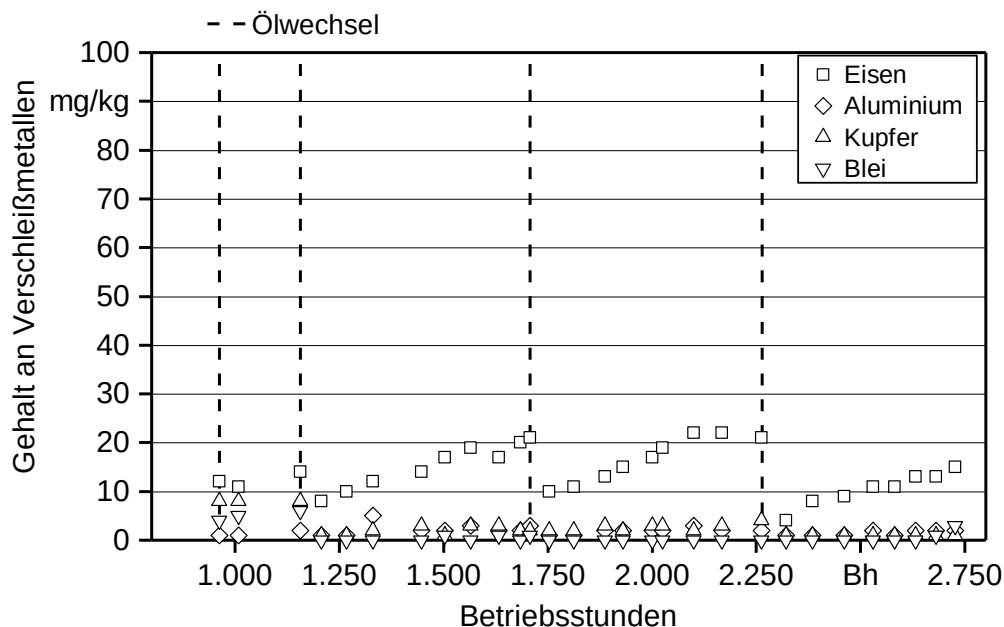
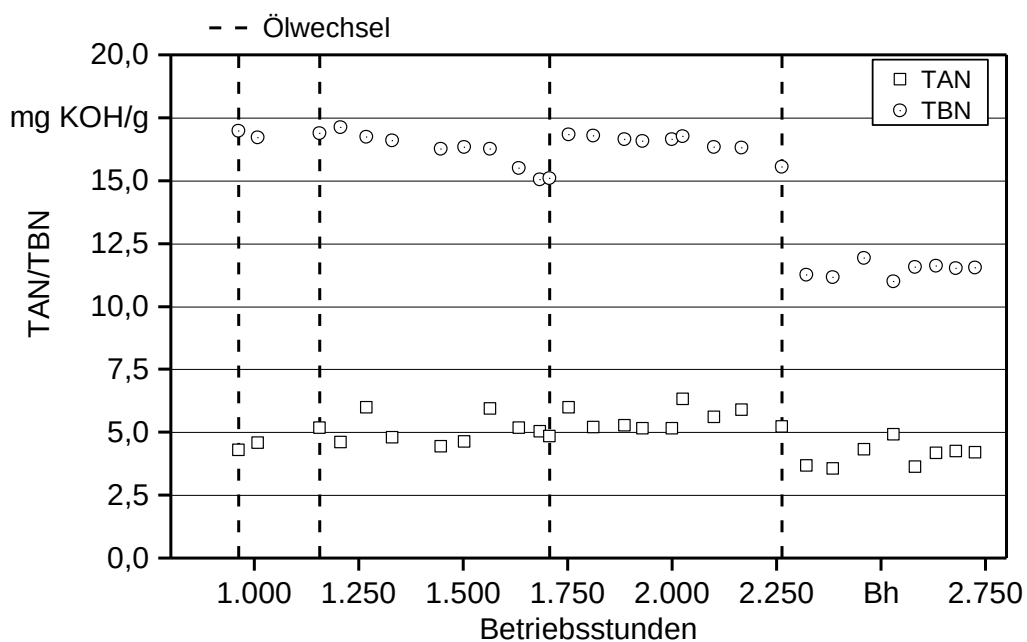
Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K)

Anhang A 3: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors DE-K



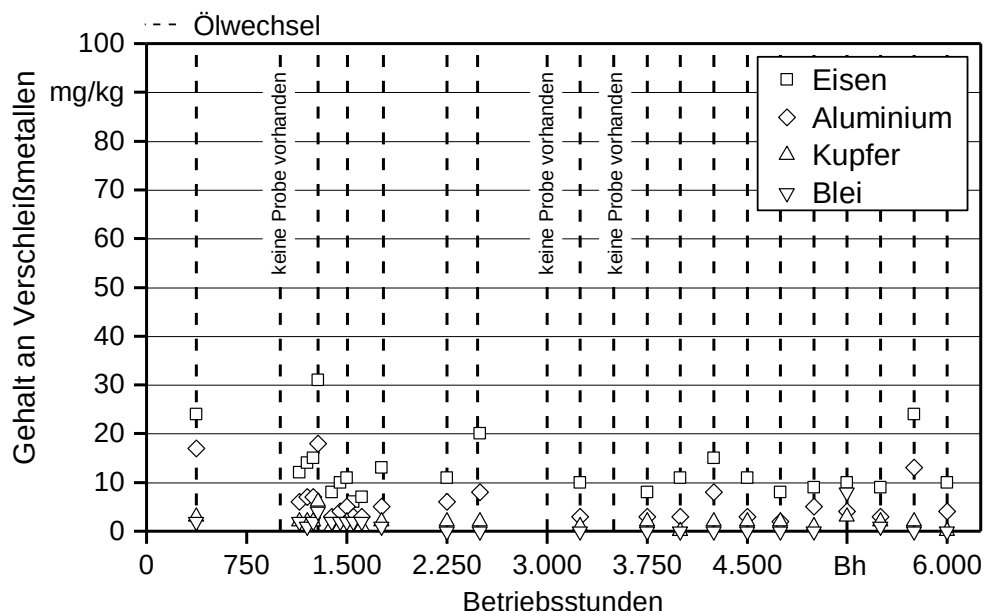
Anhang A 4: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors DE-K



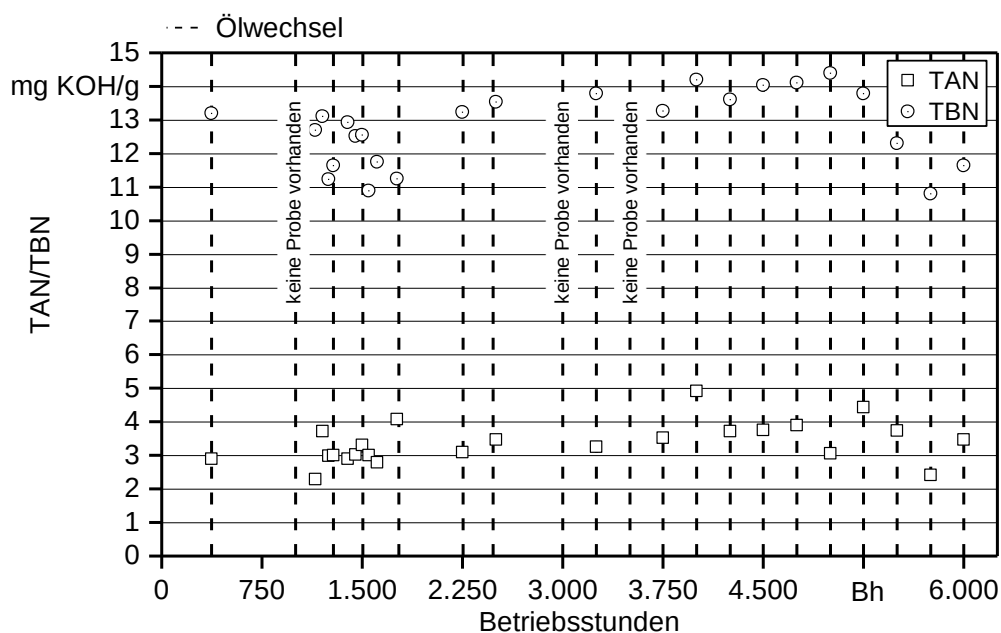
Deutz-Fahr Agrottron 650 M (DE-N)*Anhang A 5: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors DE-N**Anhang A 6: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors DE-N*

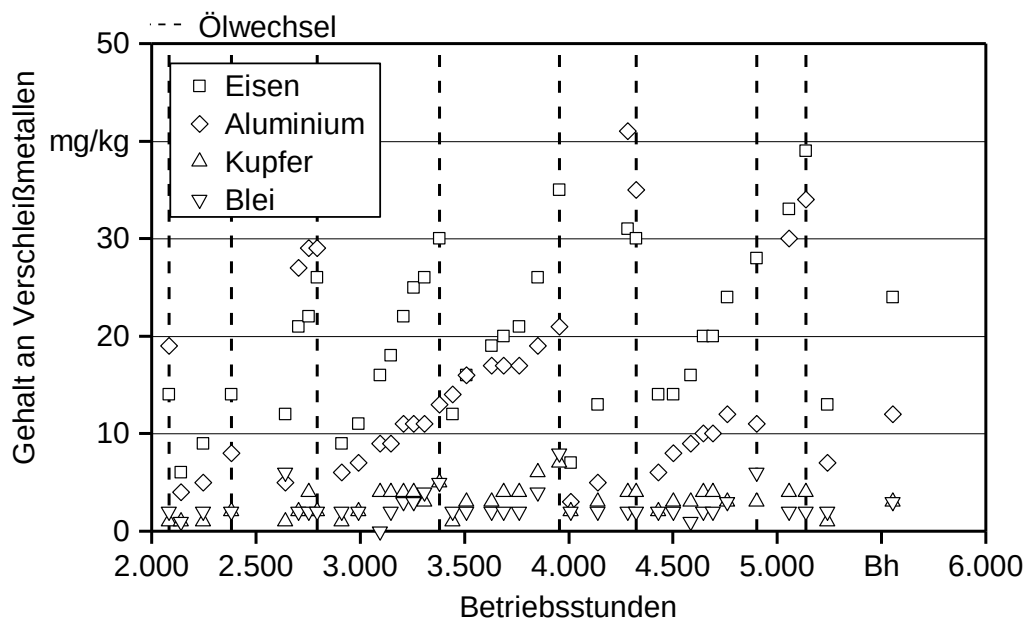
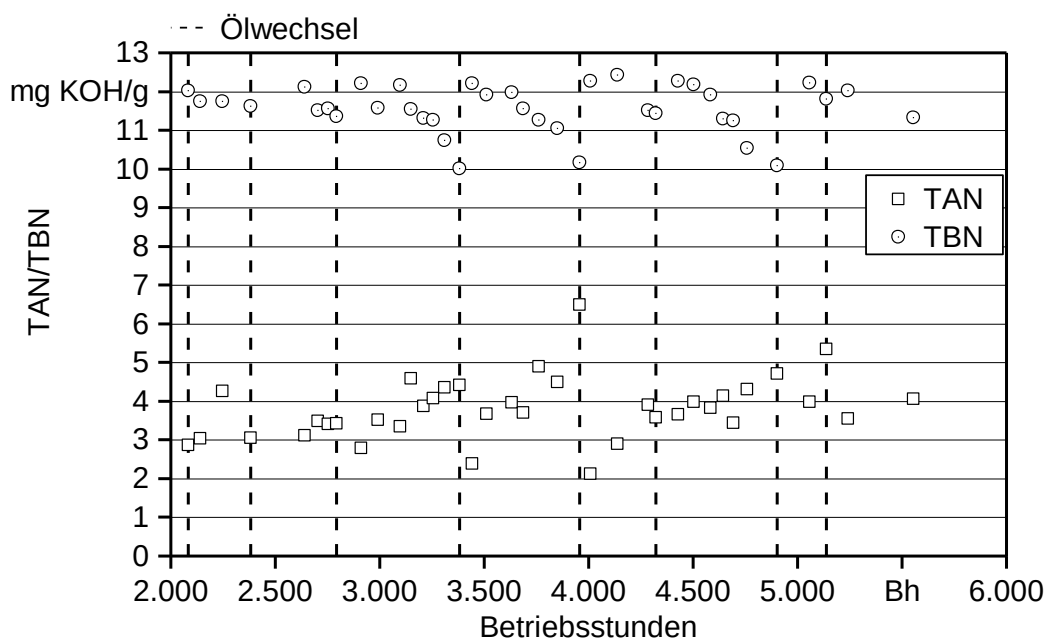
Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-A)

Anhang A 7: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-A



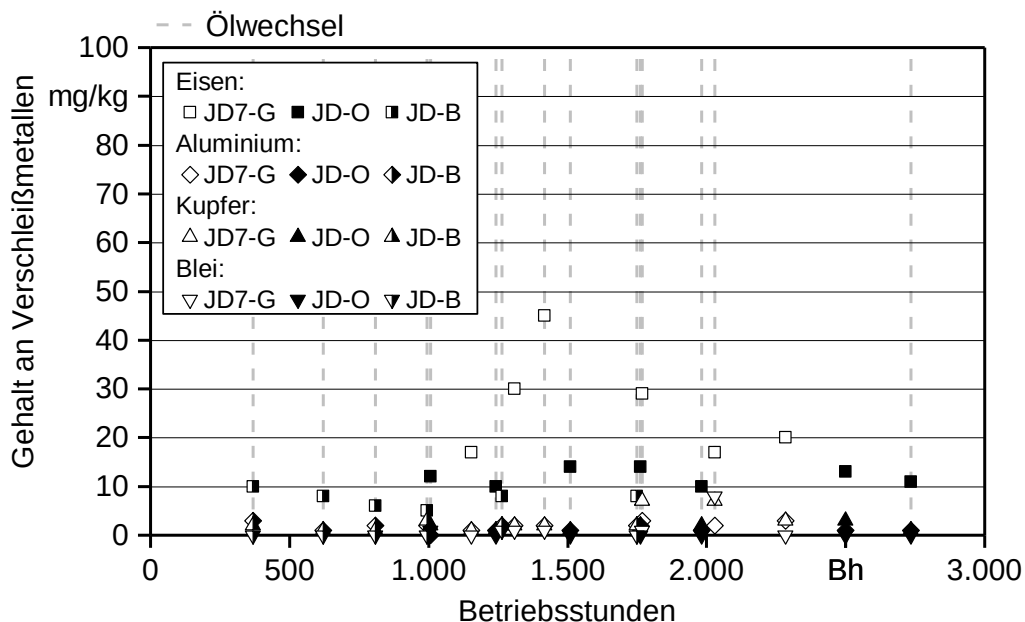
Anhang A 8: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-A



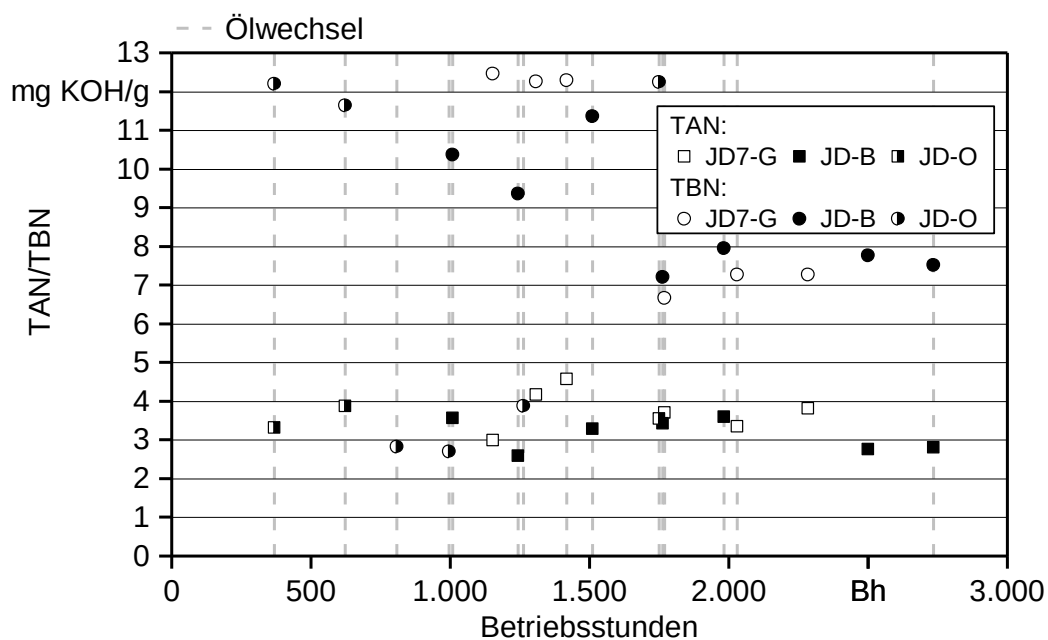
Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-AI)*Anhang A 9: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-AI**Anhang A 10: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-AI*

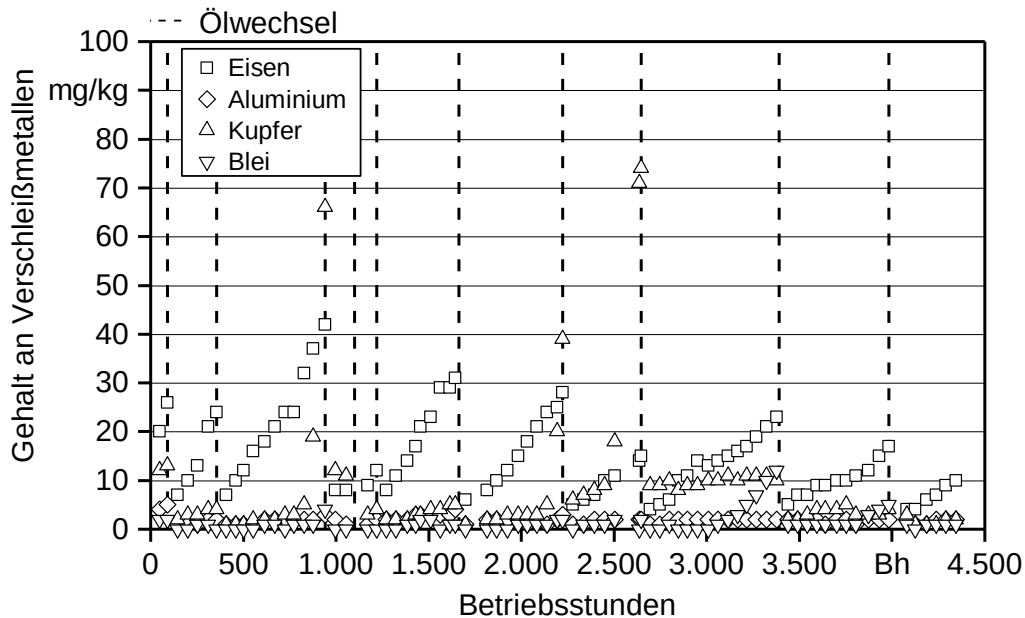
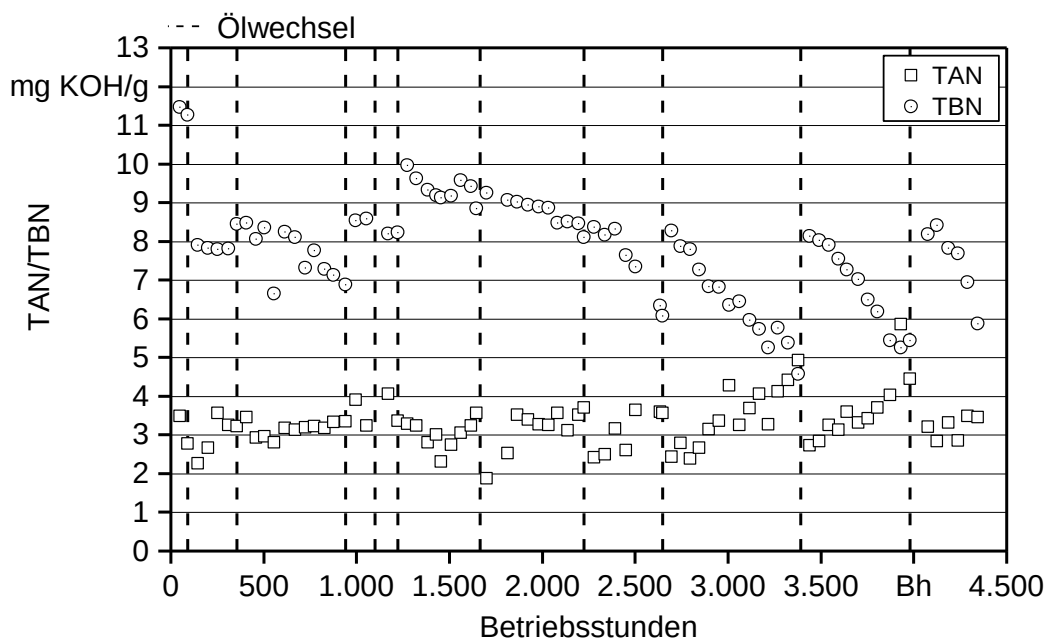
John Deere 6630 Premium und 7830 Premium (JD7-G, JD-B, JD-O)

Anhang A 11: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls der Traktoren JD7-G, JD-B und JD-O



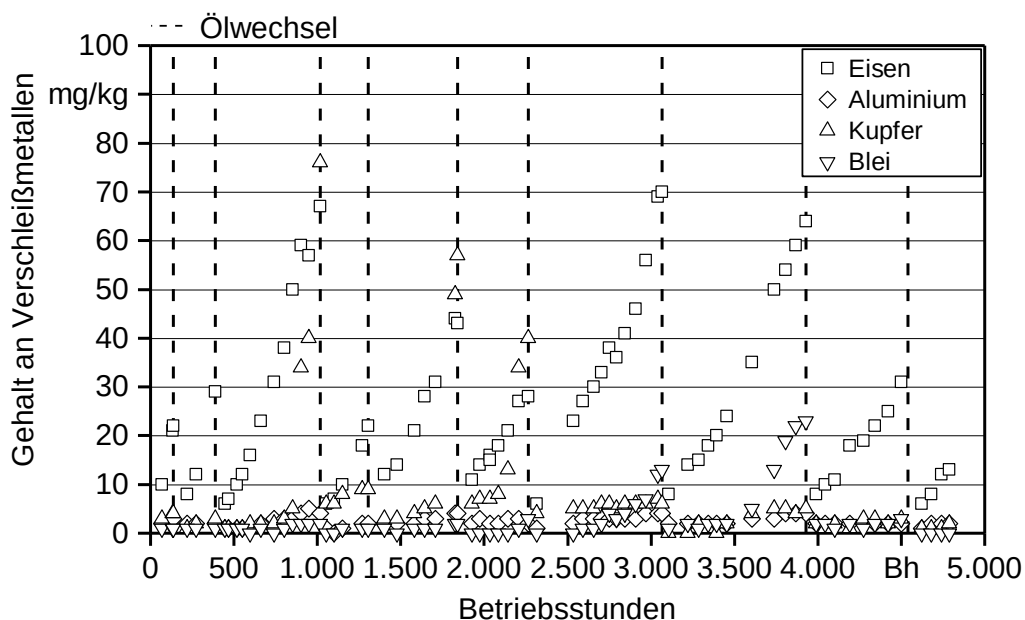
Anhang A 12: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls der Traktoren JD7-G, JD-B und JD-O



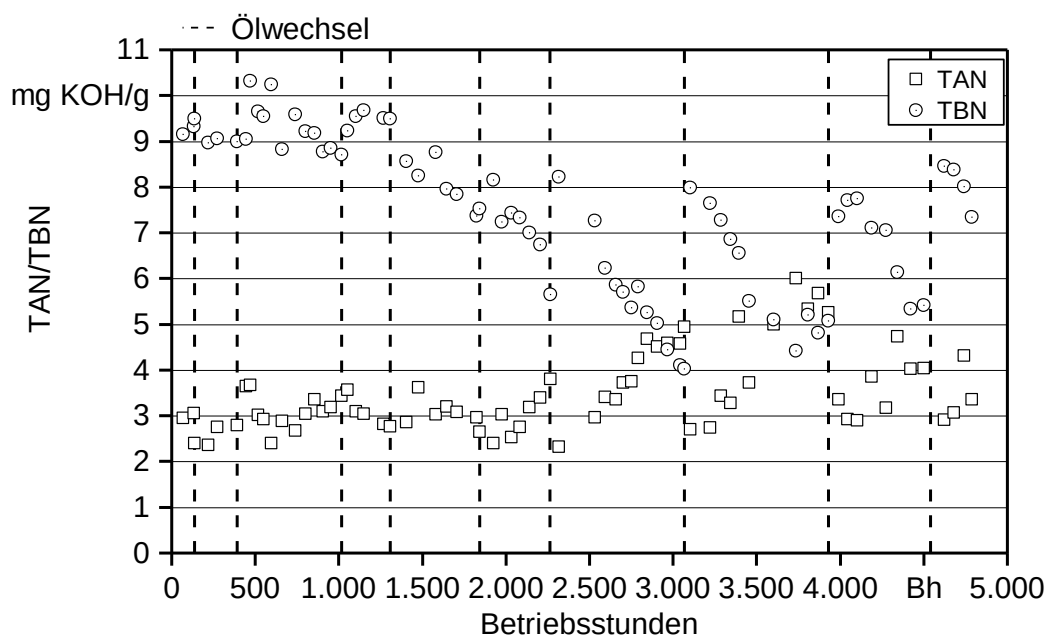
John Deere 6930 Premium (JD-G)*Anhang A 13: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-G**Anhang A 14: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-G*

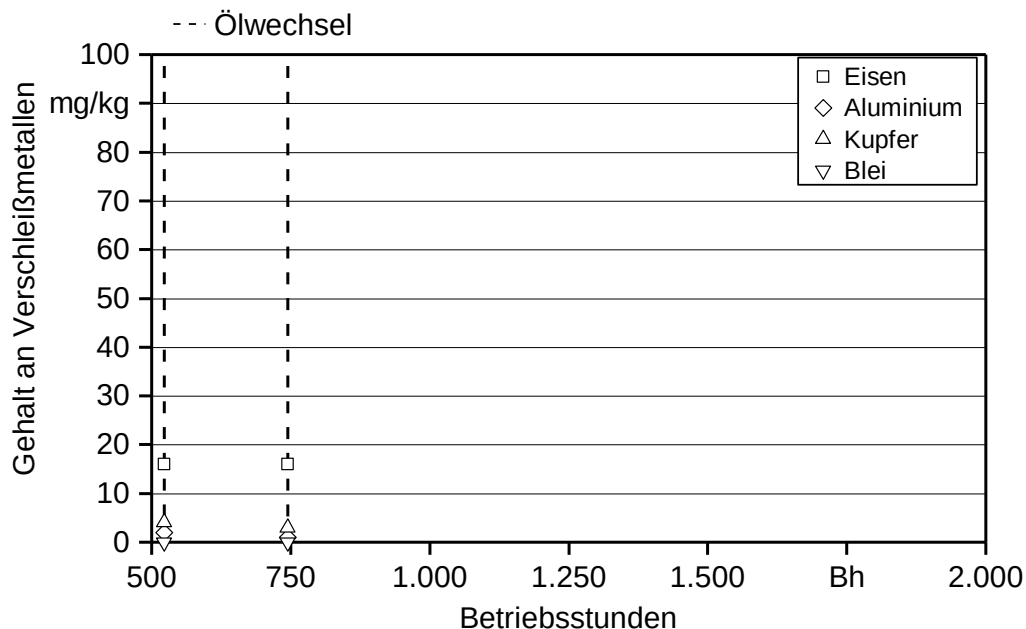
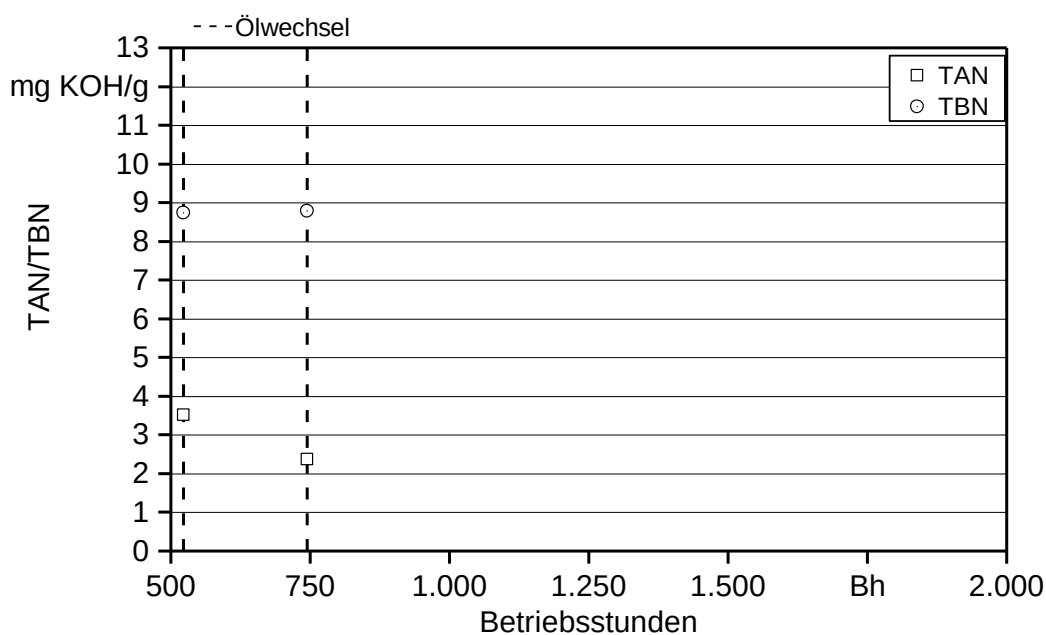
John Deere 6930 Premium (JD-K)

Anhang A 15: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-K



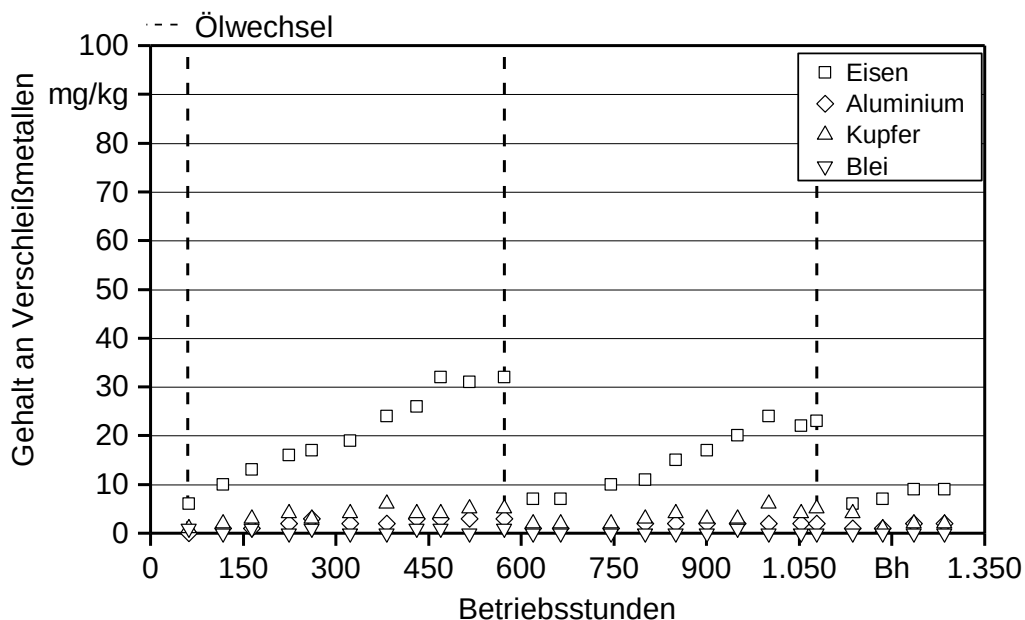
Anhang A 16: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-K



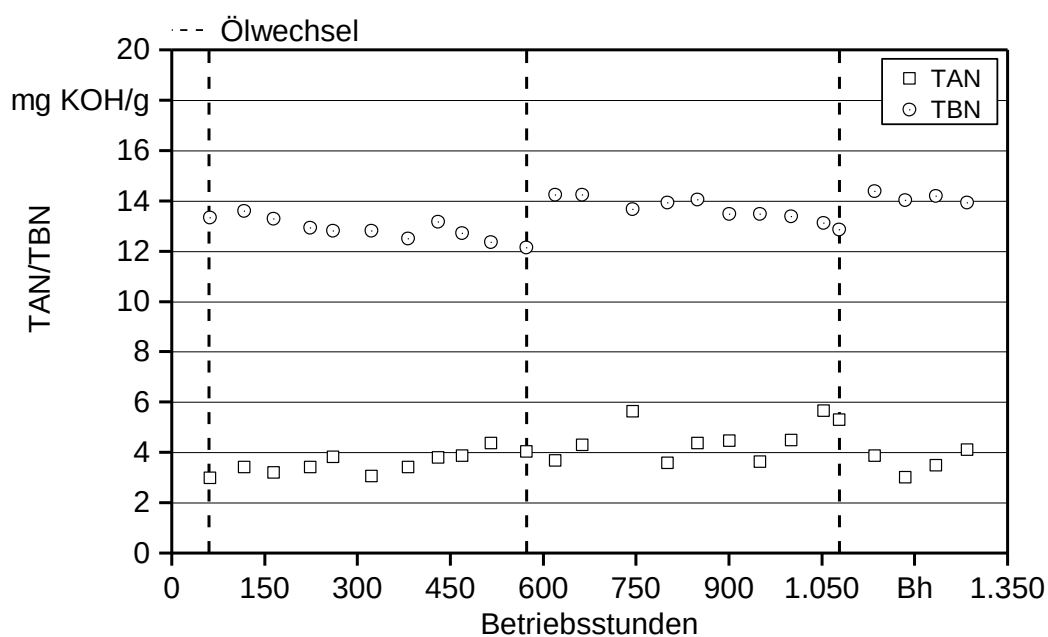
John Deere 5080R (JD5-O)*Anhang A 17: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD5-O**Anhang A 18: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD5-O*

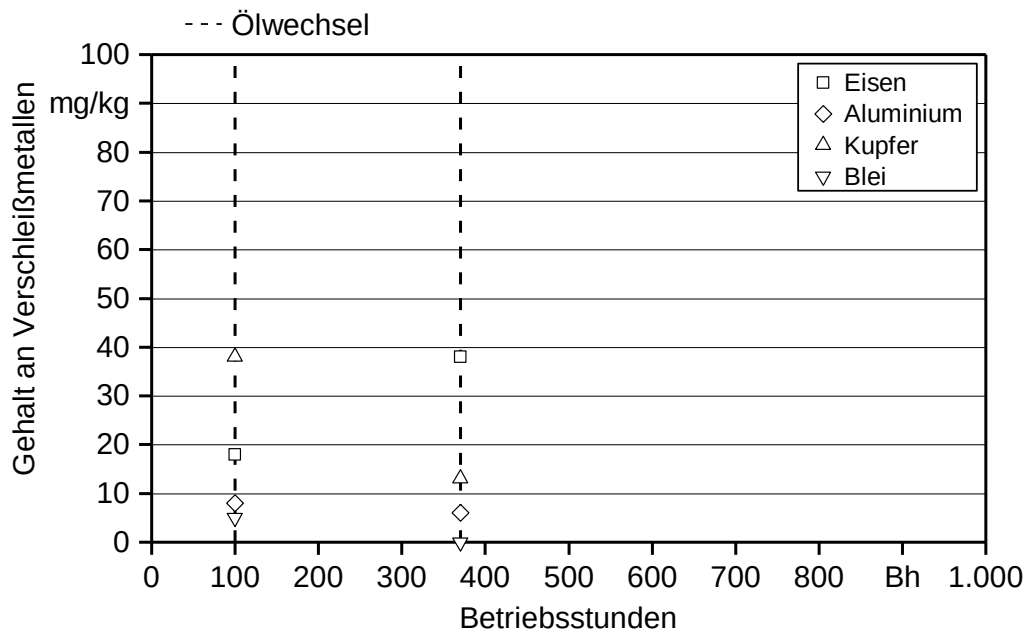
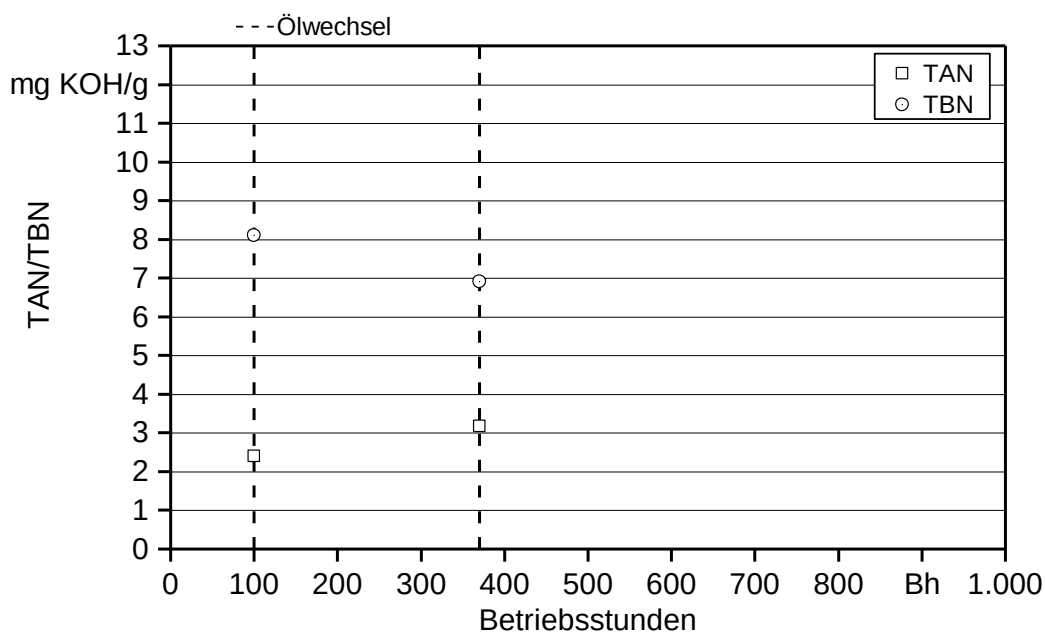
Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka)

Anhang A 19: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-Ka



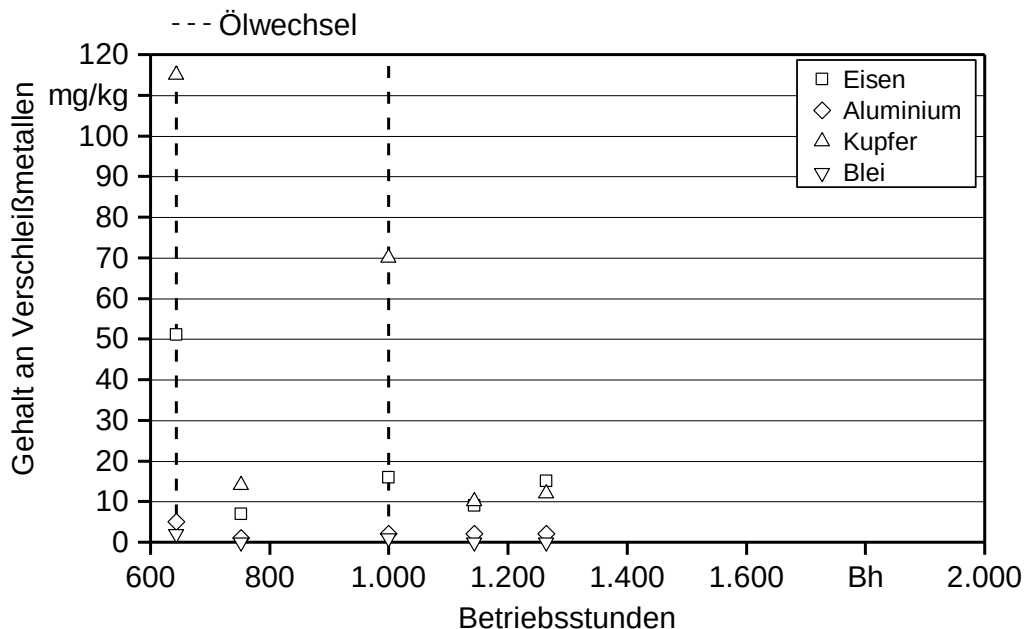
Anhang A 20: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-Ka



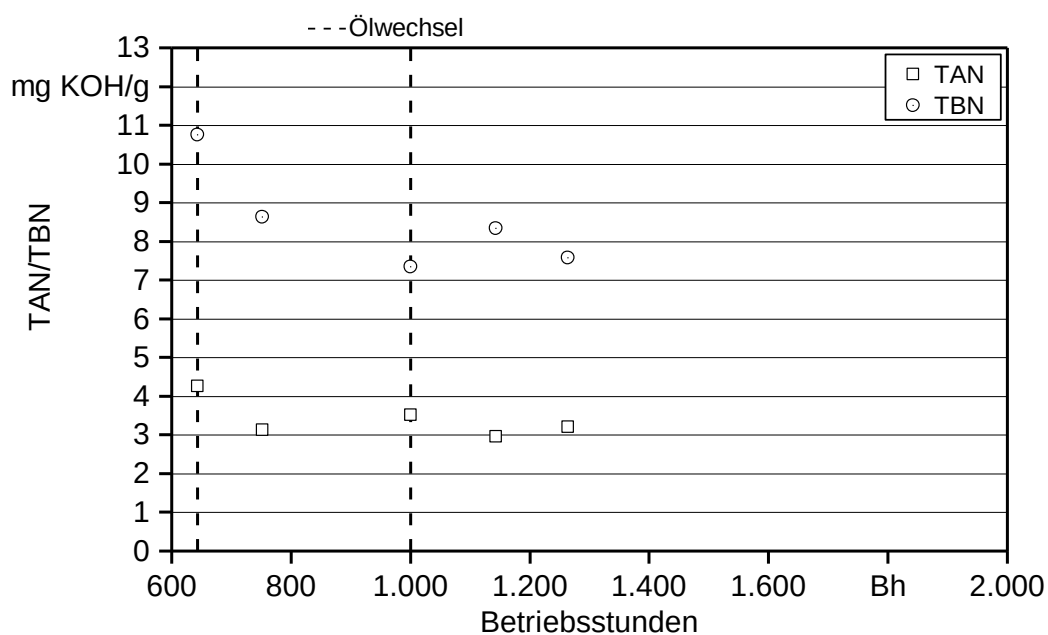
John Deere 6115R (JD6R-B)*Anhang A 21: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD6R-B**Anhang A 22: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD6R-B*

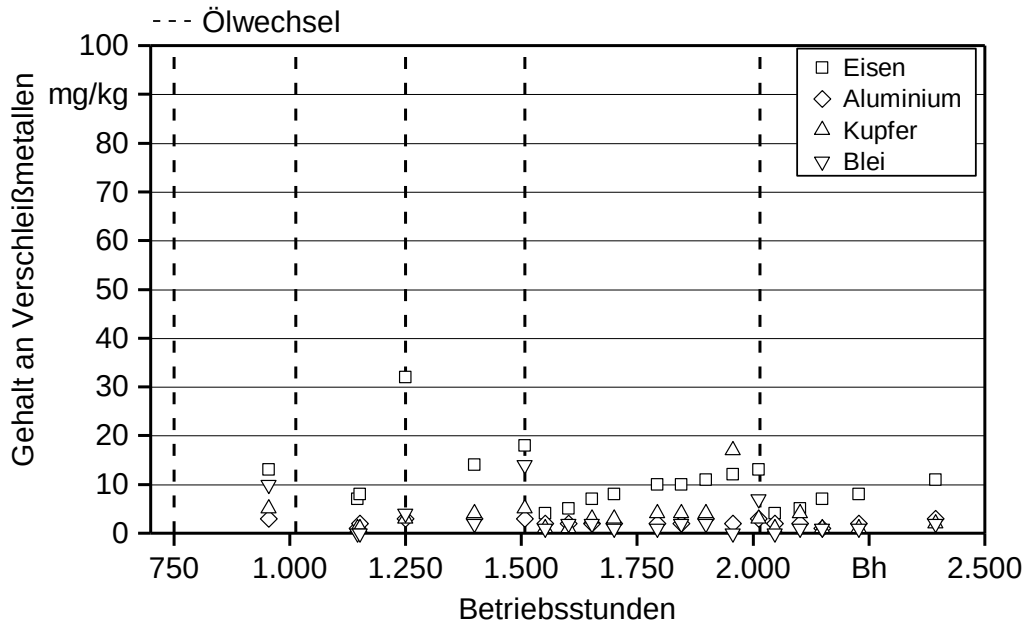
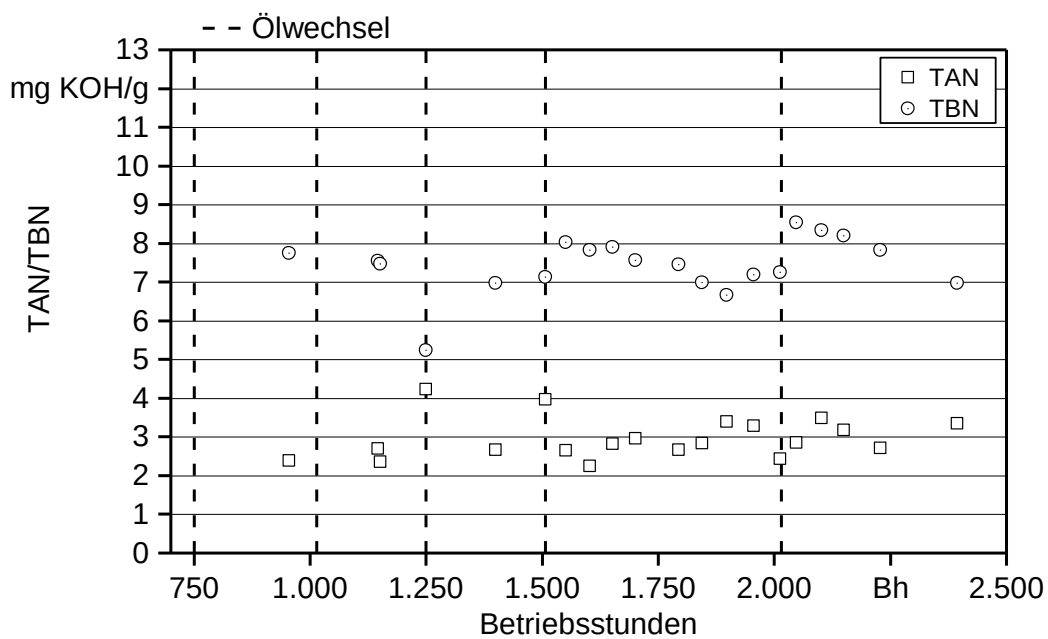
John Deere 6100RC (JD-Pu)

Anhang A 23: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-Pu



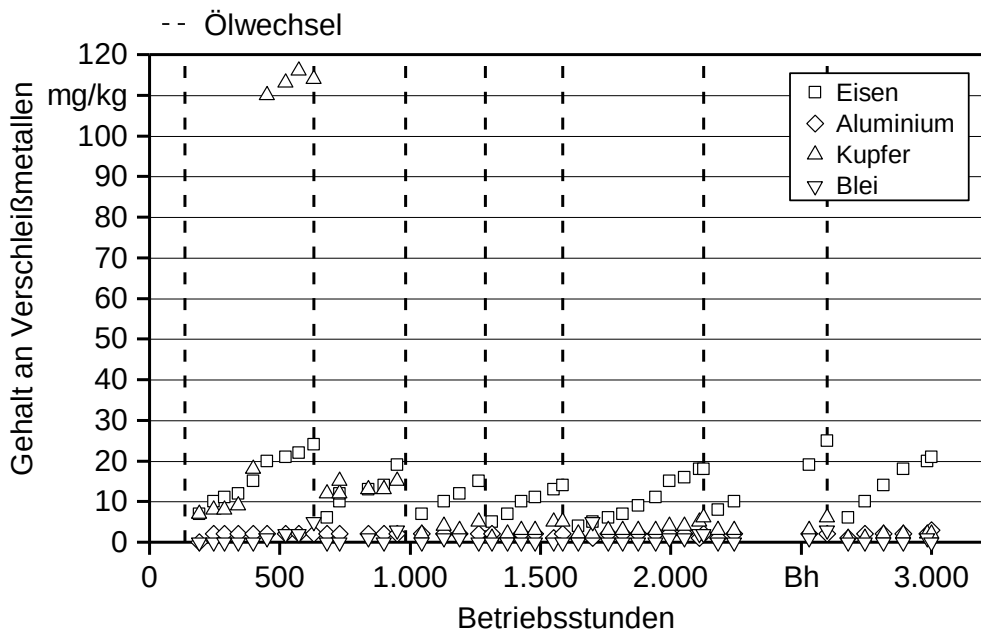
Anhang A 24: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-Pu



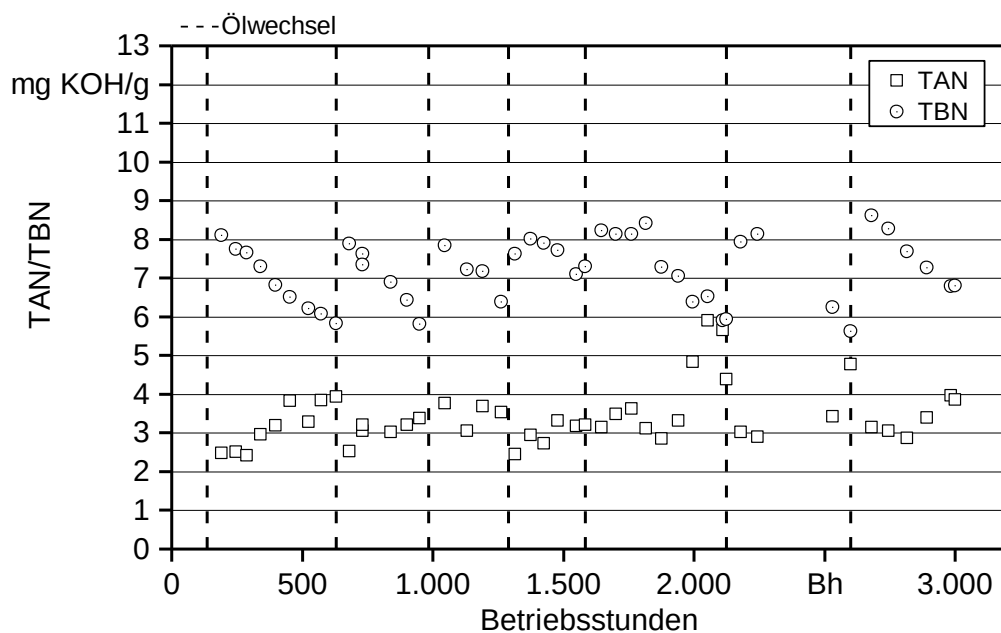
John Deere 6125R (JD-N)*Anhang A 25: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-N**Anhang A 26: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-N*

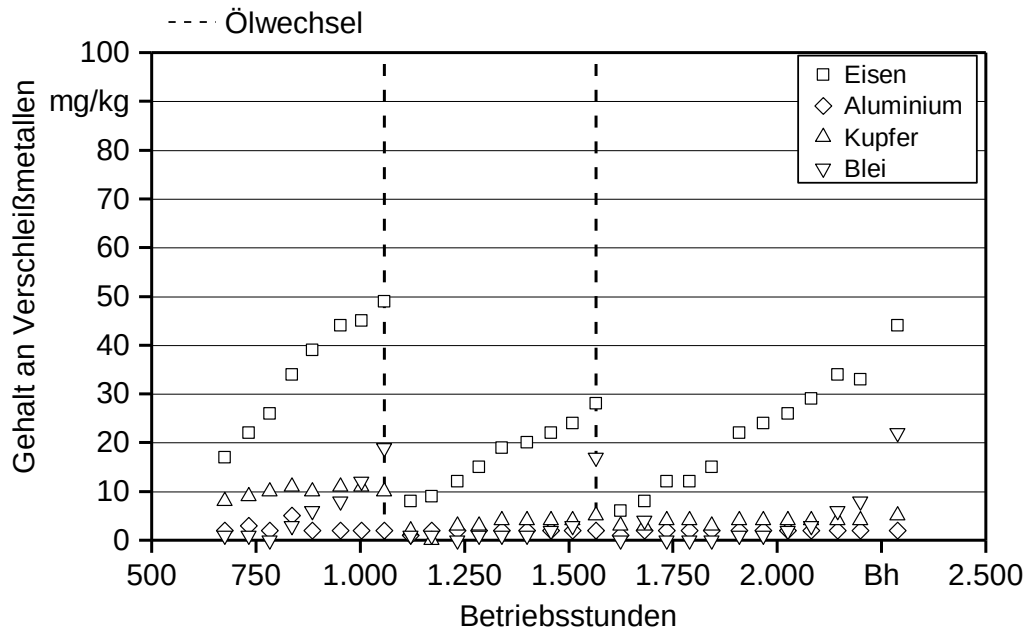
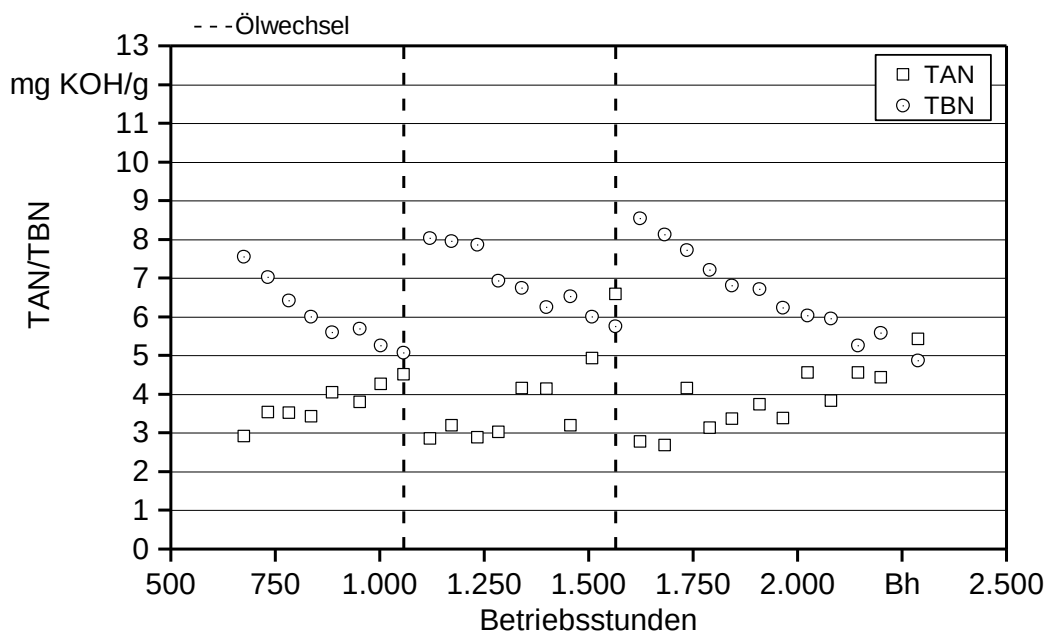
John Deere 6210R (JD-P)

Anhang A 27: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-P



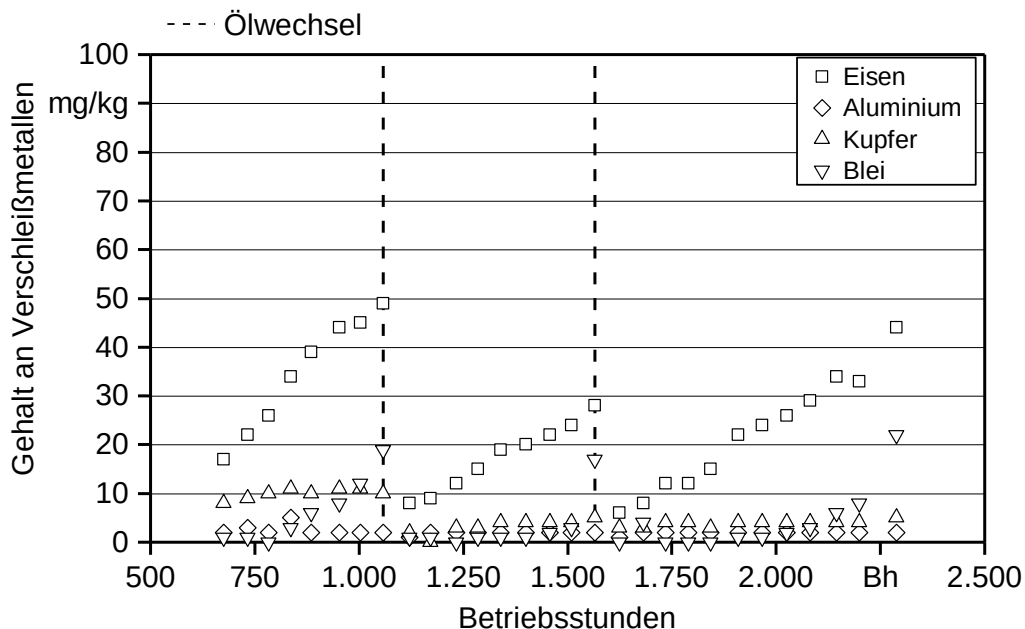
Anhang A 28: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-P



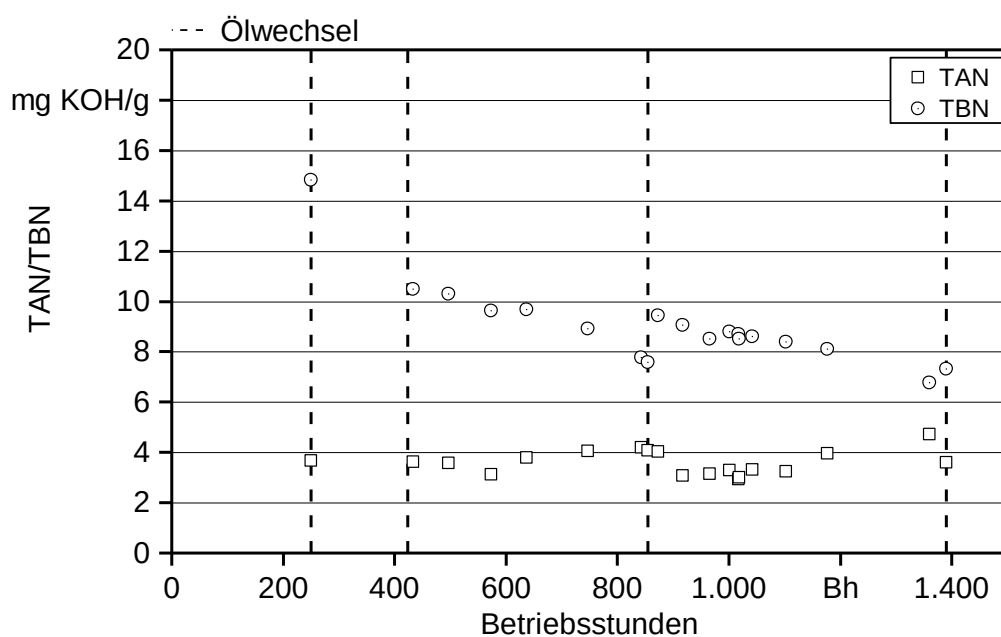
John Deere 6210R (JD-P4)*Anhang A 29: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors JD-P4**Anhang A 30: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors JD-P4*

Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Anhang A 31: Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motoröls des Traktors FE-S

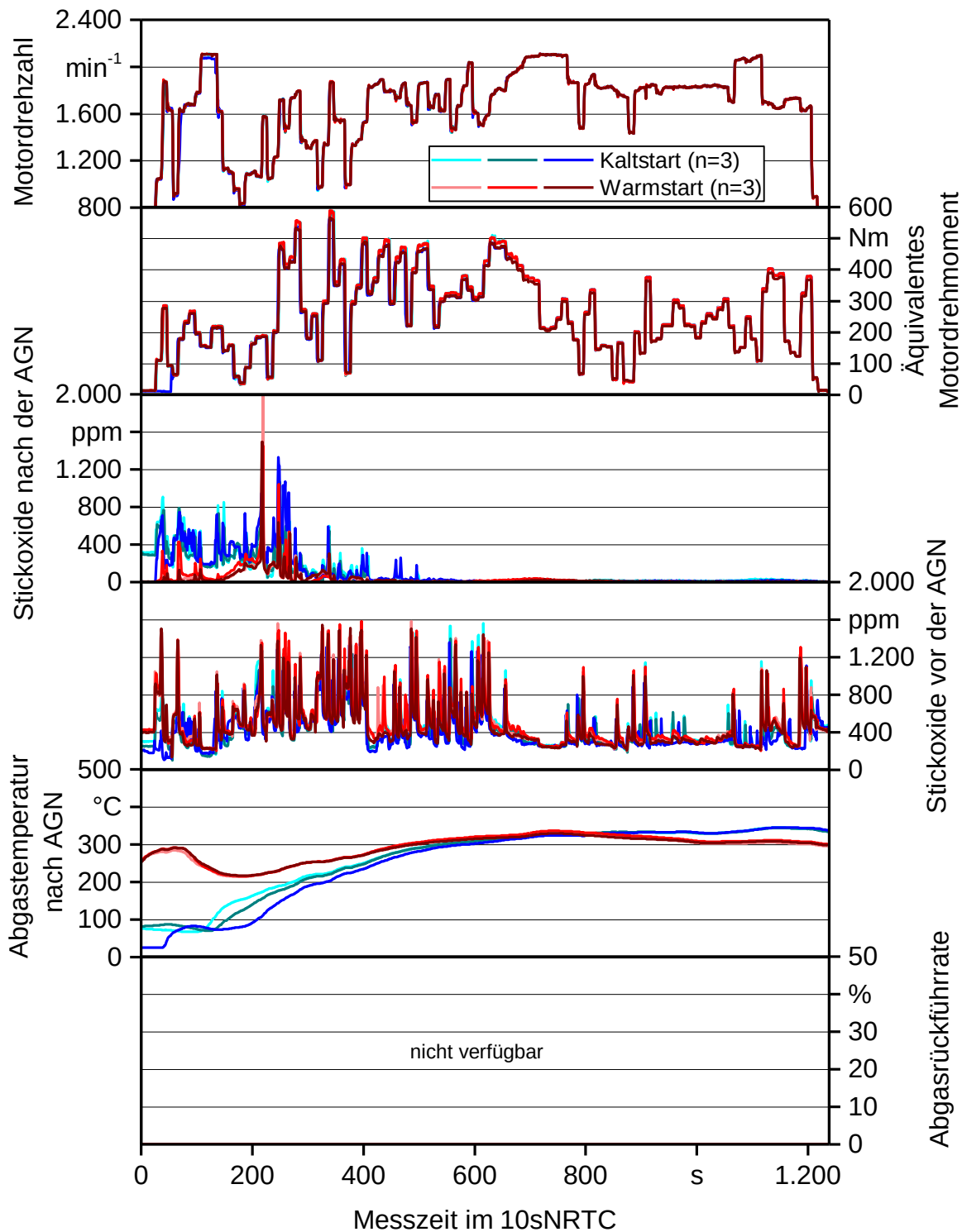


Anhang A 32: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motoröls des Traktors FE-S

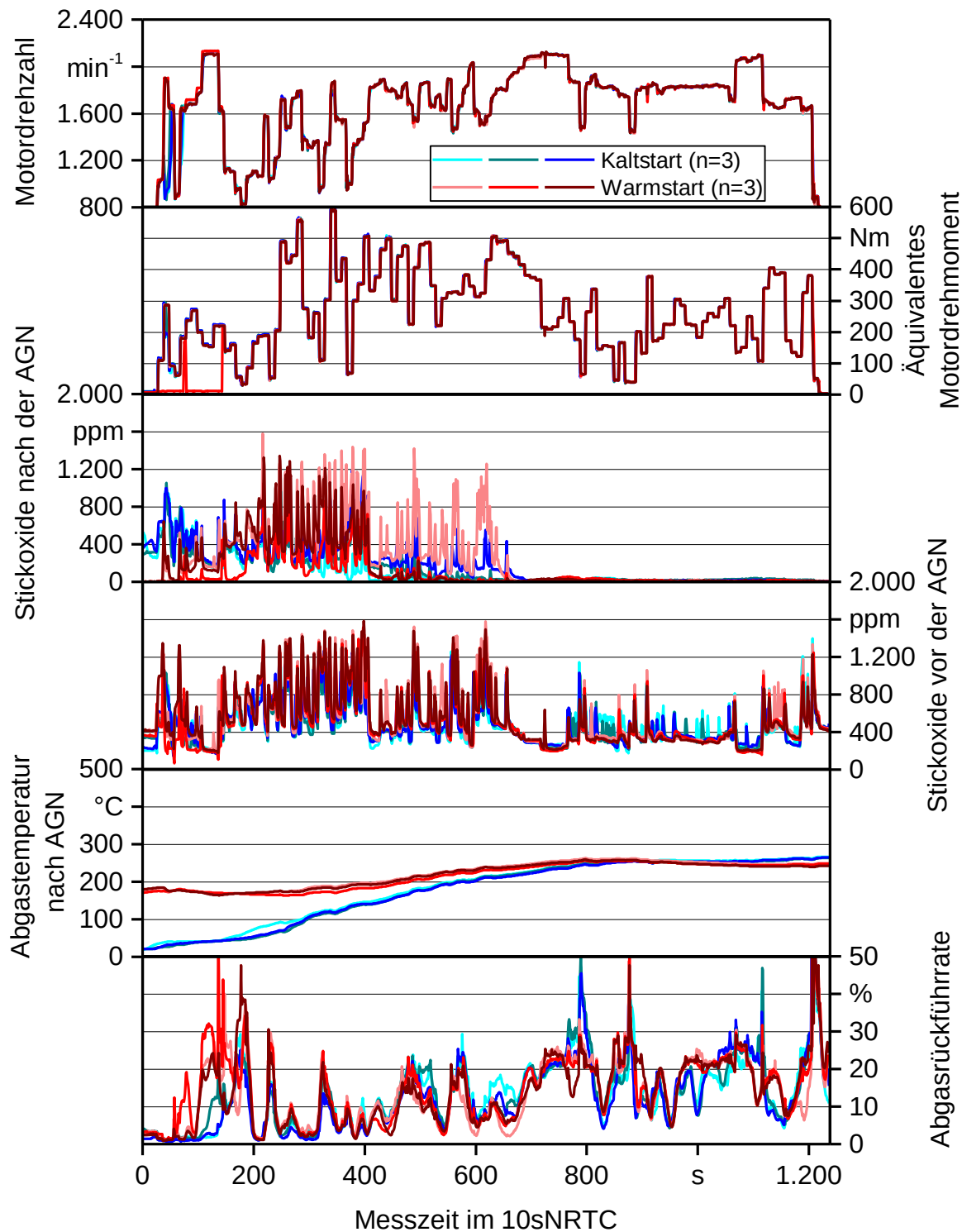


Anhang B

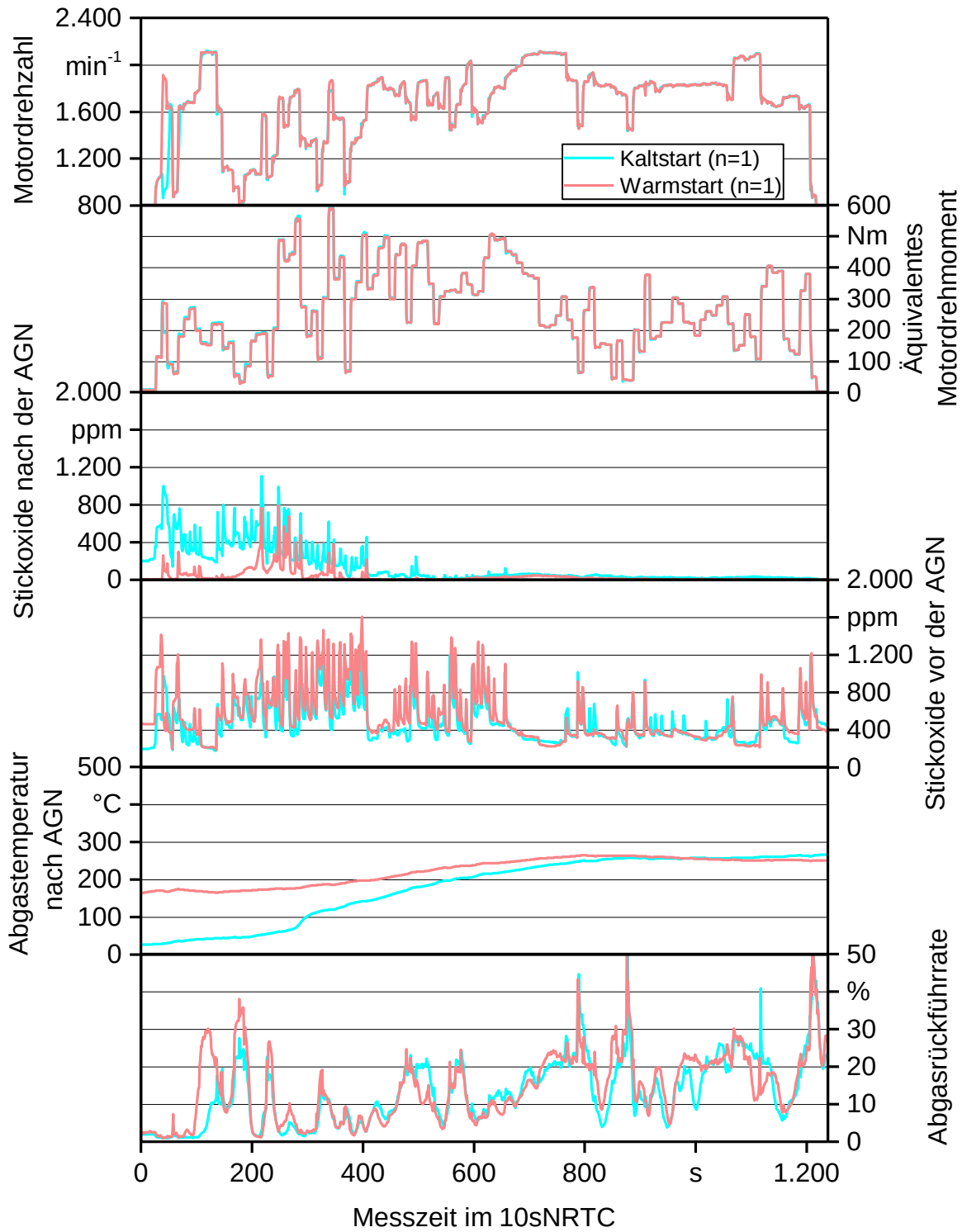
Anhang B 1: NO_x-Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 479 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)



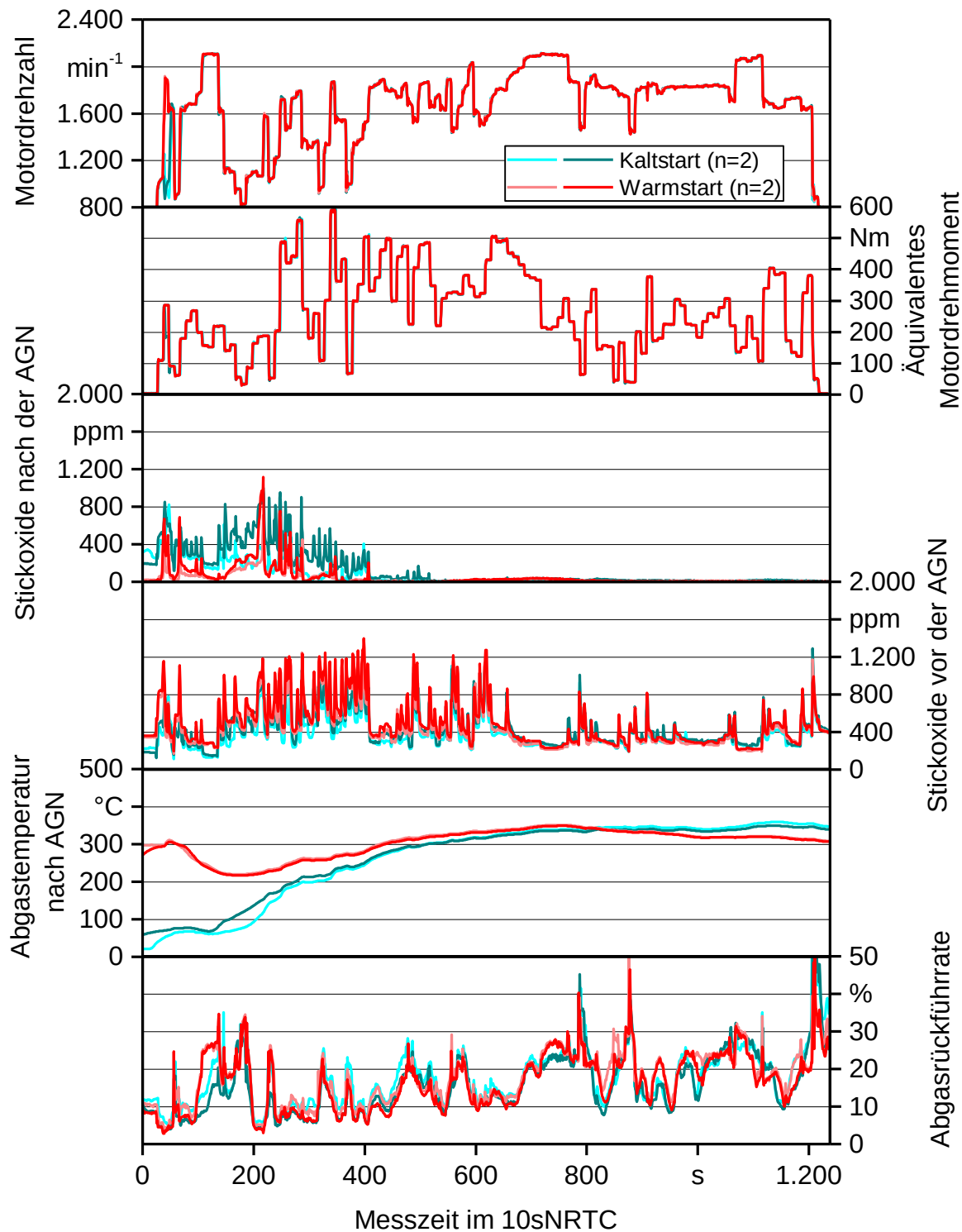
Anhang B 2: NO_x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1000 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)



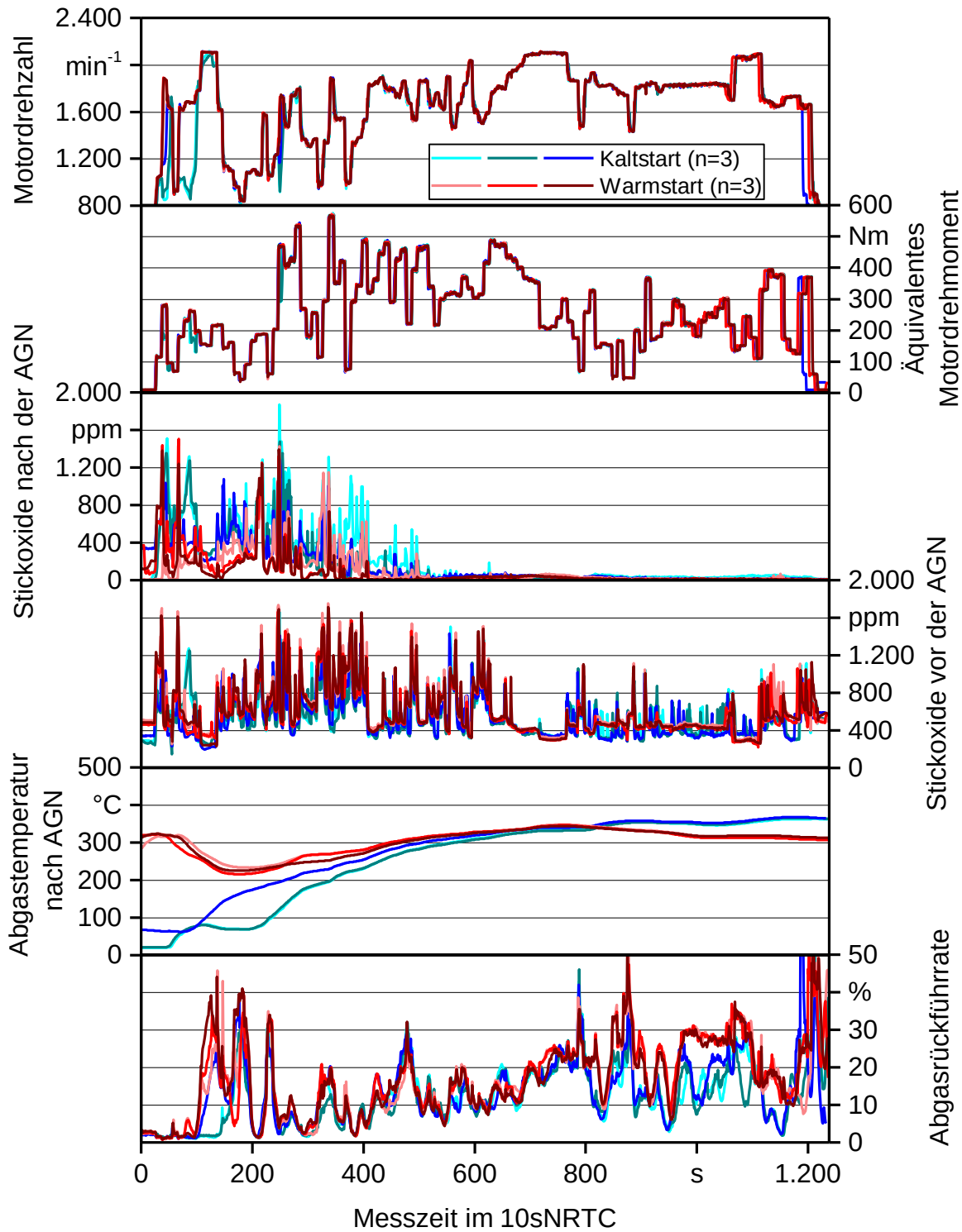
Anhang B 3: NO_x-Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1013 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)



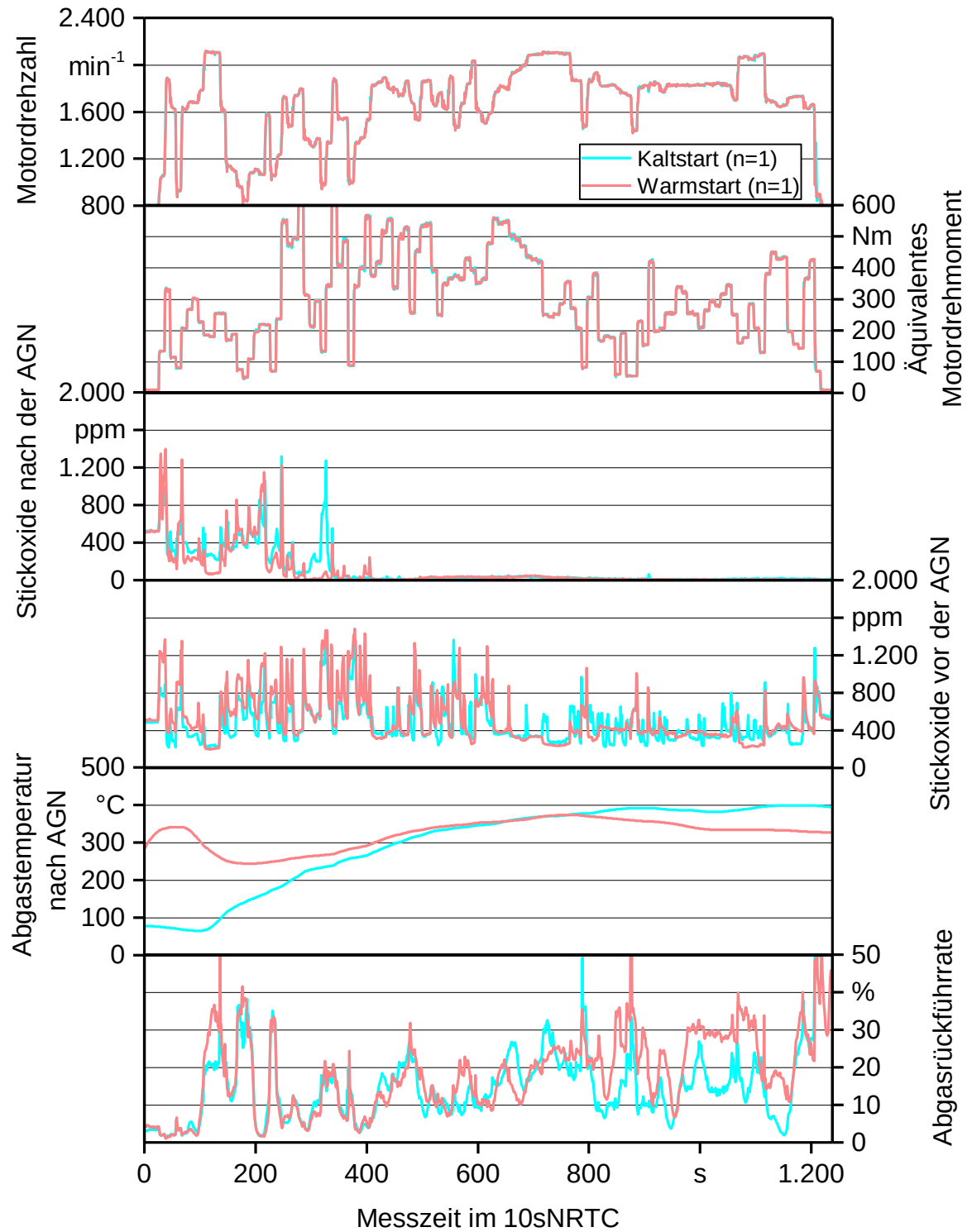
Anhang B 4: NO_x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1020 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)



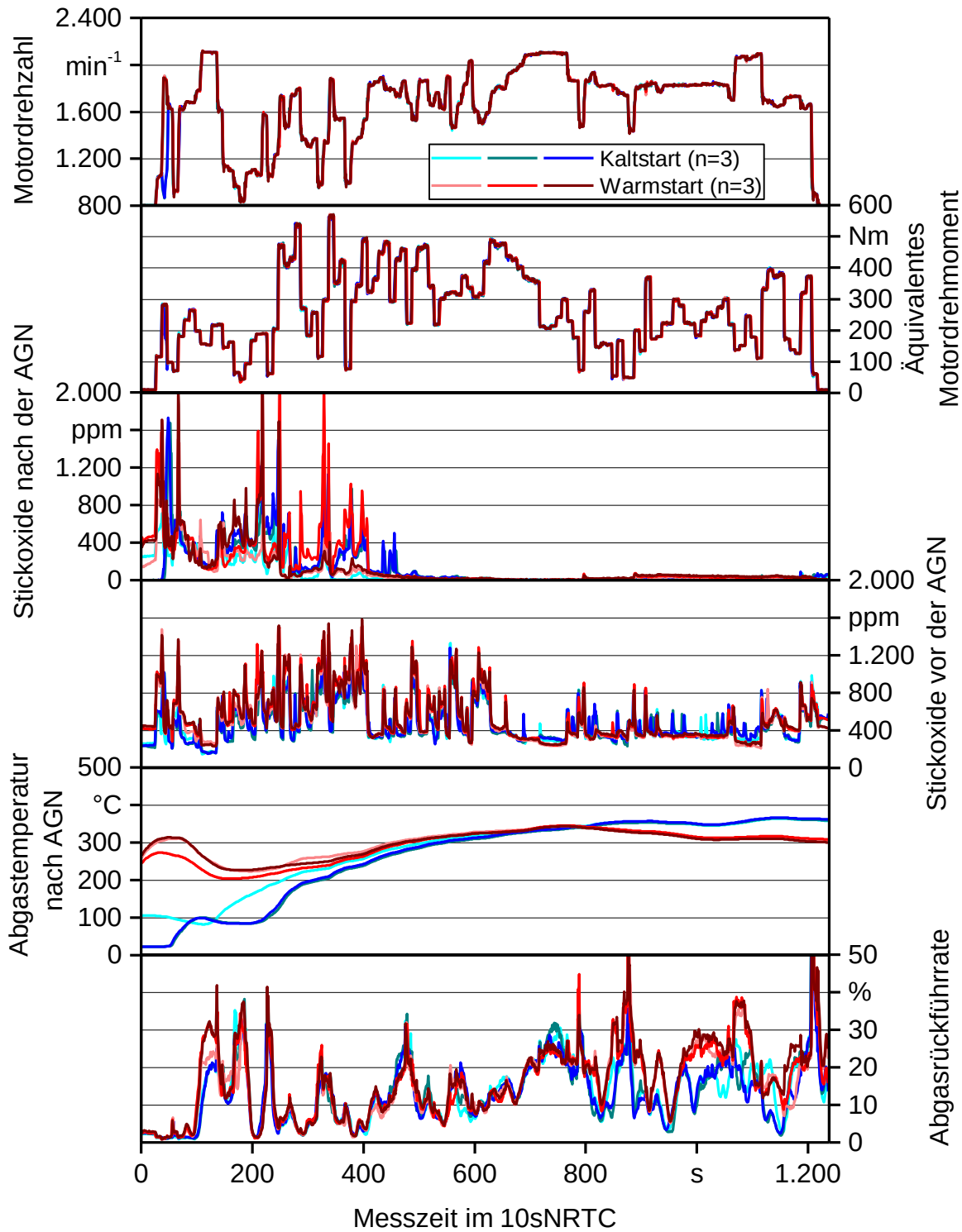
Anhang B 5: NO_x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1460 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)



Anhang B 6: NO_x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Diesel bei 1475 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)



Anhang B 7: NO_x -Emissionen, Abgastemperatur und AGR-Rate des Traktors FE-S im 10sNRTC mit Rapsöl bei 1490 Bh (Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz)



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	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsverfahren
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 – 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 Anbauszzenarien
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
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 Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat

38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinf Feuerungsanlagen
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
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpRessBio – Methoden
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
47	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für baye- rische Anbaubedingungen
49	Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
50	Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpRessBio-Methode
51	Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor
52	Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
53	Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
54	Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
55	Lagerung von Holzhackschnitzeln
56	Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
57	Optimierungspotentiale bei Kaminöfen - Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
58	Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
59	Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern
60	Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV

