

47

Berichte aus dem TFZ

Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB

Kooperationspartner:



Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB



Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB

Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöлтаuglicher
Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern

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

Kooperationspartner:



Straubing, März 2016

Titel: Pflanzöläugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
Autoren: Johannes Ettl, Dr.-Ing. Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke,
Dr. Edgar Remmele
Projektleiter: Dr. Edgar Remmele
Bearbeiter: Johannes Ettl, Sebastian Kirner

in Kooperation mit: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
John Deere - European Technology Innovation Center
BayWa AG

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie unter dem Förderkennzeichen EW/12/20 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2016
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

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

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

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Johannes Ettl, Dr. Klaus Thuneke, Ulrich Eidenschink
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2016
Gestaltung: Johannes Ettl

Fotonachweis: Johannes Ettl, Dr.-Ing. Peter Emberger, Matthias Plank, Sebastian Kirner, Georg Huber, Matthias Ruperti, Herbert Sporrer, Fa. reengineering GmbH (in Unterkapitel 6.4, Seite 144)

Danksagung

Beim Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie bedanken wir uns für die Finanzierung des Vorhabens. Insbesondere bei Herrn Ltd. MR Dr. Rupert Schäfer möchten wir uns für die stets sehr gute Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

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

- Herr Dr. Christoph Härle, 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 Achselschwang,
- Herr Helmut Konrad, Herr Andreas Kiener und Herr Wolfgang Stahl vom Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Milchviehhaltung Almesbach,
- Herr Johann Blöchinger und Herr Wolfgang Löw vom Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau 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.

Bedanken möchten wir uns weiterhin beim John Deere European Technology Innovation Center in Kaiserslautern, insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel und Herrn Dr.-Ing. Christian Düsseldorf für die vorbildliche Zusammenarbeit und die Bereitstellung mehrerer Pflanzenöltraktoren für Feld- und Prüfstandsversuche.

Ein herzlicher Dank gilt der BayWa AG, besonders Herrn Siegfried Mayer, Herrn Joachim Reisinger und Herrn Hermann Schwankner für die Unterstützung des Forschungsvorhabens durch Bereitstellung eines Pflanzenöltraktors, für den regen Erfahrungsaustausch und die sehr gute Kooperation.

Bedanken möchten wir uns außerdem bei Herrn Stefan Innerhofer und Herrn Tino Wunderlich von der regineering GmbH Denkendorf für die hervorragende Beratungsleistung bei verschiedenen Fragestellungen und insbesondere für die Durchführung der Motorbefundung.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	15
Abkürzungsverzeichnis	17
1 Einleitung.....	19
2 Problemstellung	21
3 Zielsetzung.....	23
4 Stand des Wissens.....	25
4.1 Pflanzenölkraftstoff in Traktoren	25
4.2 Abgasgesetzgebung für Traktoren.....	28
5 Material und Methoden	31
5.1 Pflanzenöltraktoren und Versuchsstandorte.....	31
5.1.1 Abgasstufen I und II.....	35
5.1.2 Abgasstufe IIIA	36
5.1.3 Abgasstufe IIIB	41
5.2 Feldtest	44
5.2.1 Betriebsdaten.....	44
5.2.1.1 Betriebstagebücher.....	45
5.2.1.2 Datenlogger	46
5.2.2 Motorölqualität	47
5.2.3 Kraftstoffqualität.....	48
5.3 Traktorenprüfstand.....	49
5.3.1 Motorleistungs-, Motordrehzahl- und Verbrauchsmessung	49
5.3.2 Gasanalysen.....	50
5.3.3 Partikelmassebestimmung (PM)	51
5.3.4 Partikelanzahlbestimmung (PN).....	52
5.3.5 Prüfzyklen nach ISO 8178	56
5.3.5.1 Stationäre Emissionsmessung.....	56
5.3.5.2 Transiente Emissionsmessung	58
5.3.6 Versuchskraftstoffe	60
5.4 Variation von Motorparametern.....	62
5.5 Motorbegutachtung	64
6 Ergebnisse und Diskussion	67
6.1 Feldtest.....	67
6.1.1 Einsatzbedingungen	67
6.1.1.1 Betriebsstunden	67

6.1.1.2	Durchgeführte Arbeiten	72
6.1.1.3	Startverhalten	74
6.1.1.4	Betriebsstoffe	75
6.1.1.5	SCR-System und Harnstoffverbrauch im Feldtest	78
6.1.2	Kraftstoffqualität	81
6.1.3	Motorölqualität.....	83
6.1.4	Störungen und Reparaturen	87
6.1.5	Umweltwirkung des Pflanzenöleinsatzes.....	94
6.2	Traktorenprüfstand	96
6.2.1	Abgasstufen I und II	96
6.2.1.1	Fendt Farmer Vario 412 (FE-K).....	96
6.2.1.2	Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K)	99
6.2.2	Abgasstufe IIIA.....	103
6.2.2.1	John Deere 6930 Premium (JD-K)	103
6.2.2.2	John Deere 6930 Premium (JD-G).....	109
6.2.2.3	New Holland T6080 (NH-W).....	113
6.2.3	Abgasstufe IIIB.....	115
6.2.3.1	Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka).....	116
6.2.3.2	John Deere 6125R (JD-N).....	128
6.2.4	Vergleich Abgasstufen I bis IIIB.....	135
6.3	Variation von Motorparametern	136
6.4	Motorbegutachtung (Co-Autoren: Wunderlich T., Innerhofer S.)	144
6.4.1	Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K)	144
6.4.2	John Deere 6930 und 7830 (JD-G, JD-K und JD7-G)	149
6.5	Fazit der Ergebnisse	163
	Zusammenfassung	165
	Abstract	169
	Quellenverzeichnis	171
	Anhang... ..	179

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Konzepte der Emissionsminderung der untersuchten Pflanzenöltraktoren	34
Abbildung 2:	Fendt Farmer Vario 412 (FE-K, links) und Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K, rechts) am LVFZ Kringell	35
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)	37
Abbildung 4:	John Deere 6930 auf der Versuchsstation Grub (JD-G, links oben) und am LVFZ Kringell (JD-K, rechts oben) sowie John Deere 6630 am Versuchsgut Osterseeon (JD-O, links unten) und Baumannshof (JD-B, rechts unten)	38
Abbildung 5:	John Deere 7830 Premium der Versuchsstation Grub (JD7-G).....	39
Abbildung 6:	Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) der Versuchsstation Karolinenfeld.....	41
Abbildung 7:	Kraftstoffumschaltung mit Füllanzeige für den Dieseltank (links oben), Umschalteinheit mit Gegenstromwärmetauscher (rechts oben) und zusätzliche Zahnradpumpen für Pflanzenölkraftstoff (links und rechts unten)	42
Abbildung 8:	John Deere 6210R (JD-P) am LVFZ Achselschwang und John Deere 6125R (JD-N) an der Versuchsstation Neuhof.....	44
Abbildung 9:	Auszug aus dem Betriebstagebuch der Pflanzenöltraktoren	45
Abbildung 10:	Schematischer Aufbau (oben) und Foto (unten) des Traktorenprüfstands mit Wirbelstrombremse (1), Gasanalysatoren (2), Kraftstoffverbrauchsmessung (3) und Partikelprobenahme (4)	49
Abbildung 11:	Schematischer Aufbau der zweistufigen Verdünnung des DMS-500-Probenahmesystems nach Cambustion Ltd. [9]	53
Abbildung 12:	Schematischer Aufbau des DMS-500-Partikelgrößen-Klassierers nach Cambustion Ltd. [10]	54
Abbildung 13:	DMS 500 mit Messleitung	55
Abbildung 14:	DSA mit 2 Messleitungen	55
Abbildung 15:	Sonde vor der Abgasnachbehandlung	55
Abbildung 16:	Sonde nach der Abgasnachbehandlung (isoliert)	55
Abbildung 17:	Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4	57
Abbildung 18:	Verlauf von Drehzahl (oben) und Drehmoment (unten) im NRTC nach ISO 8178-11(links) und dem „10s NRTC“ für den Traktorenprüfstand (rechts).....	60

Abbildung 19: Betriebsstunden der Rapsöltraktoren der Abgasstufen I bis IIIB in den Feldtestjahren 2013 und 2014 sowie Gesamtlaufzeit der Traktoren	67
Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung des Drehzahl- und Lastsignals aus dem CAN-Bus des Pflanzenöltraktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) im Feldtestjahr 2014 (Anzahl Datenpunkte n = 1.812.984)	69
Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der Kühlwassertemperatur gemäß den CAN-Bus-Daten des Pflanzenöltraktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) im Feldtestjahr 2014 (n = 1.812.984).....	70
Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung des Kraftstoffdrucks vor der Hochdruckpumpe gemäß den CAN-Bus-Daten des Pflanzenöltraktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) im Feldtestjahr 2014 (n = 1.812.984).....	71
Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Umgebungstemperatur gemäß den CAN-Bus-Daten des Pflanzenöltraktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) im Feldtestjahr 2014 (n = 1.812.984).....	71
Abbildung 24: Art und Häufigkeit des Einsatzes der Rapsöltraktoren 2009–2014 (JD-G, JD-K), 2010–2014 (FE-A) und 2013–2014 (FE-K, DE-K, DE-N, FE-AI, JD7-G, JD-B, JD-O, FE-Ka, JD-P, JD-N)	73
Abbildung 25: Gesamtbewertung des Startverhaltens der Pflanzenöltraktoren in den Feldtestjahren 2013 und 2014	75
Abbildung 26: Durchgeführte Arbeiten sowie Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch des Traktors FE-Ka in den Feldtestjahren 2013 und 2014.....	79
Abbildung 27: Durchgeführte Arbeiten sowie Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch der Traktoren JD-G und JD-K im Feldtestjahr 2013.....	80
Abbildung 28: Lineare Regression des Pflanzenölgehalts im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls für verschiedene Motoren mit unterschiedlichen Einspritzsystemen und Abgasstufen	83
Abbildung 29: Gehalte der Verschleißelemente Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei des Motoröls des Traktors FE-AI über den Versuchszeitraum	85
Abbildung 30: Gehalte der Verschleißelemente Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei des Motoröls des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum.....	86
Abbildung 31: Gehalte der Verschleißelemente Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei des Motoröls des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum	86
Abbildung 32: Bewertung des Startverhaltens des Traktors DE-K in den Jahren 2013 und 2014 (Mittelwerte aus n Eintragungen je Monat).....	89
Abbildung 33: Ablagerungen infolge ausgetretener wässriger Harnstofflösung an der AdBlue [®] -Leitung (links) und an der Außenseite der Abgasnachbehandlung (rechts) des JD-K	90
Abbildung 34: Defekte Verkabelung an der Förderpumpe des Niederdruckkraftstoffsystems des Traktors JD-K.....	91

Abbildung 35:	Beispielrechnung zu den Stoffströmen aus dem Rapsanbau zur Gewinnung von 336.000 l Rapsölkraftstoff für die Rapsöltraktoren auf den bayerischen staatlichen Versuchsgütern	95
Abbildung 36:	Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung und des Kraftstoffverbrauchs des Traktors FE-K beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff über 6.100 Bh [23][64].....	97
Abbildung 37:	Mittelwerte und Spannweiten der limitierten Abgasemissionen bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle des Traktors FE-K Abgasstufe I im stationären C1-Zyklus nach ISO 8178-4 für Rapsöl- und Dieseldkraftstoff über die Laufzeit [23][64]	98
Abbildung 38:	Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung und des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle des Traktors DE-K beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieseldkraftstoff über 4.460 Bh (n = Anzahl der Messungen) [23][64]	100
Abbildung 39:	Mittelwerte und Spannweiten der limitierten Abgasemissionen bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle des Traktors DE-K im stationären C1-Zyklus nach ISO 8178-4 für Rapsöl- und Dieseldkraftstoff über die Laufzeit [23][64]	101
Abbildung 40:	Mittelwerte und Spannweiten der limitierten Abgasemissionen bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle des Traktors DE-K im Zyklus 10s NRTC in Anlehnung an ISO 8178-11 mit Rapsölkraftstoff	102
Abbildung 41:	Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des John Deere 6930 (JD-K) beim Betrieb mit Rapsöl- und Sojaölkraftstoff	104
Abbildung 42:	Mittelwerte und Spannweiten der Stickstoffoxid-Emissionen in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl vor und nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN) des John Deere 6930 (JD-K)	106
Abbildung 43:	Mittelwerte und Spannweiten der Effizienz der Stickstoffoxid-Reduktion (SCR-Effizienz) in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl des John Deere 6930 (JD-K)	106
Abbildung 44:	Mittelwerte und Spannweiten der Kohlenstoffmonoxid-Emissionen in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN) des John Deere 6930 (JD-K)	107
Abbildung 45:	Mittelwerte und Spannweiten der Kohlenwasserstoff-Emissionen in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN) des John Deere 6930 (JD-K)	107
Abbildung 46:	Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse-Emissionen in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN) des John Deere 6930 (JD-K).....	108

Abbildung 47: Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 (nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung) für Rapsöl und Sojaöl des John Deere 6930 (JD-K) 108

Abbildung 48: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des John Deere 6930 (JD-G) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff mit Abgasnachbehandlung (AGN) [24] 110

Abbildung 49: Mittelwerte und Spannweiten des Abgasgegendrucks zwischen Motor und AGN und Zapfwellenleistung nach 1416 und 2005 Bh mit Rapsölkraftstoff..... 111

Abbildung 50: Mittelwerte und Spannweiten der limitierten Abgasemissionen des Traktors JD-G im stationären C1-Zyklus nach ISO 8178-4 für Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK) über die Laufzeit [24] 112

Abbildung 51: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des New Holland T6080 (NH-W) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff 114

Abbildung 52: Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus nach ISO 8178 für Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK) des Versuchstraktors NH-W ... 115

Abbildung 53: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Harnstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff..... 117

Abbildung 54: Mittelwerte und Spannweiten der pro Hub zugeführten Brennstoffmenge des Fendt Vario 718 beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff 119

Abbildung 55: Mittelwerte und Spannweiten der Stickoxid-Emissionen des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (Reingas) 120

Abbildung 56: Mittelwerte und Spannweiten des gravimetrischen Verbrauchs wässriger Harnstofflösung des SCR-Systems über die einzelnen Prüfphasen des Versuchstraktors Fendt 718 SCR 121

Abbildung 57: Mittelwerte und Spannweiten der Ammoniak-Emissionen (NH₃) des Fendt 718 nach dem SCR-System in den einzelnen Prüfphasen 122

Abbildung 58: Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC) des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung 123

Abbildung 59: Kohlenstoffmonoxid-Emissionen (CO) des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung 123

Abbildung 60:	Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse-Emissionen (PM) des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK) nach der Abgasnachbehandlung (AGN) bei 10, 50, 250 und 520 Bh.....	124
Abbildung 61:	Kühlwasser-, Motoröl- und Abgastemperatur sowie die Konzentrationen von CO und HC vor der Abgasnachbehandlung im Abgas des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den Prüfphasen 6 bis 8 der Messung mit Rapsölkraftstoff (Wiederholung II bei 50 Bh).....	126
Abbildung 62:	Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 nach der Abgasnachbehandlung (im Reinabgas) für Rapsöl- und Dieselkraftstoff.....	127
Abbildung 63:	Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Abgasgedrucks sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des John Deere 6125R (JD-N) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff	130
Abbildung 64:	Mittelwerte und Spannweiten der pro Hub zugeführten Brennstoffmenge des John Deere 6125R (JD-N) im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff	131
Abbildung 65:	Stickstoffoxid-Emissionen des John Deere 6125R in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach der Abgasnachbehandlung	133
Abbildung 66:	Partikelmasse-Emissionen (PM) des John Deere 6125R in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach der Abgasnachbehandlung	133
Abbildung 67:	Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC) des John Deere 6125R in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach der Abgasnachbehandlung	134
Abbildung 68:	Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 (vor und nach der Abgasnachbehandlung) des John Deere 6125R (JD-N) für Rapsöl- und Dieselkraftstoff	135
Abbildung 69:	Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 mit Rapsöl-, Sojaöl- und Dieselkraftstoff von Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB	136
Abbildung 70:	Variation des Einspritzzeitpunkts, der Abgasrückführrate und des Einspritzdrucks im Betriebspunkt P6S (Motordrehzahl: 1.575 min^{-1} , Leistung an der Zapfwelle: 75 %, Kennfeld S).....	138
Abbildung 71:	Variation des Einspritzzeitpunkts, der Abgasrückführrate und des Einspritzdrucks im Betriebspunkt P4S (Motordrehzahl: 2.100 min^{-1} , Leistung an der Zapfwelle: 10 %, Kennfeld S).....	139
Abbildung 72:	Variation des Einspritzzeitpunkts, der Abgasrückführrate und des Einspritzdrucks im Betriebspunkt P4W (Motordrehzahl: 2.100 min^{-1} , Leistung an der Zapfwelle: 10 %, Kennfeld W zum Aufheizen der Abgasnachbehandlung)	140

Abbildung 73: Kolbenboden, Zylinderkopf, Ein- und Auslassventile und Zylinderwände des Traktors DE-K bei 4.460 Bh von Zylinder Nr. 1 bis 6 (v. l. n. r.).....	145
Abbildung 74: Turbinenrad des Abgasturboladers am Traktor DE-K bei 1.771, 3.300 und 4.460 Betriebsstunden (v. l. n. r.)	147
Abbildung 75: Detail Düsenkuppen der Zylinder Nr. 1 bis 6 (v. l. n. r.) bei 1.171 (Foto: TFZ) und 4.460 Betriebsstunden (Foto: regineering GmbH).....	148
Abbildung 76: Beispiele für unterschiedliche Ablagerungsformationen am Einspritzlochaustritt (Foto: regineering GmbH)	148
Abbildung 77: Nahaufnahme des Honbils der Zylinderwände der Traktoren JD-K (oben) und JD-G (unten) des jeweils dritten Zylinders	149
Abbildung 78: Kolbenböden, Zylinderköpfe und Zylinderwände der Traktoren JD-K und JD-G bei der Motorbefundung	151
Abbildung 79: Abdrücke bzw. Ablagerung auf der Oberfläche von Kolbenboden Nr. 5 (links oben) und raue Oberfläche in der Kolbenmulde (mittig) am Traktor JD-G.....	152
Abbildung 80: Ein- und Auslassseite des AGR-Kühlers der Traktoren JD-G und JD-K	154
Abbildung 81: Ein- und Auslassventile der Traktoren JD-G und JD-K.....	156
Abbildung 82: Abgas- und Ansaugseite des Turboladers am Traktor JD-G und Abgasseite des Traktors JD-K.....	157
Abbildung 83: Injektorspitzen der Traktoren JD-K, JD-G und JD7-G bei einer Ansicht von vier Seiten (0°, 90°, 180° und 270°).....	158
Abbildung 84: Im Zylinderkopf eingebaute Injektoren in der Draufsicht	159
Abbildung 85: Einspritzvolumen bei verschiedenen Ansteuerzeiten und variierenden Einspritzdrücken der Injektoren der pflanzenöлтаuglichen Traktoren JD-K und JD-G im Vergleich zu einem neuen Injektor (Referenz)	160
Abbildung 86: Mengenkennfeld der Injektoren 3 und 5 des Traktors JD-G sowie des Referenzinjektors bei je zwei Druckvarianten (n = 2)	161
Abbildung 87: Komponenten der Prototyp-Abgasnachbehandlung am Traktor JD-G	162

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Literaturübersicht von Untersuchungen an Pflanzenöltraktoren	25
Tabelle 2:	Emissionsgrenzwerte nach EU-Richtlinie 97/68/EG [28] (zuletzt geändert durch 2012/46/EU [30]) für Dieselmotoren in Arbeitsmaschinen (Abgasstufen I bis IV) und Vorschlag der EU-Kommission für Abgasstufe V [27]	29
Tabelle 3:	Standort, Kurzbezeichnung und Abgasstufe der Pflanzenöltraktoren	31
Tabelle 4:	Wesentliche zusätzliche Installationen und Maßnahmen zur Realisierung pflanzenöлтаuglicher Traktoren im Vergleich zu konventionellen Modellen für Dieselkraftstoff	33
Tabelle 5:	Technische Daten des Fendt Farmer Vario 412 und des Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160.....	36
Tabelle 6:	Technische Daten des Fendt 820 Vario ^{greentec} (FE-A, FE-AI) und des Deutz-Fahr Agrotron M 650 Natural Power (DE-N)	37
Tabelle 7:	Technische Daten des Prototyps John Deere 6930 Premium (JD-G, JD-K) und des John Deere 6630 Premium (JD-B, JD-O)	39
Tabelle 8:	Technische Daten des John Deere 7830 Premium (JD7-G).....	40
Tabelle 9:	Technische Daten des New Holland T6080 (NH-W)	40
Tabelle 10:	Technische Daten des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka)	42
Tabelle 11:	Technische Daten des John Deere 6210R (JD-P) und des John Deere 6125R (JD-N)	44
Tabelle 12:	Parameter im Betriebstagebuch zur Dokumentation des Praxiseinsatzes auf den LfL-Versuchsgütern	46
Tabelle 13:	Verwendete Motoröle in den Pflanzenöltraktoren und deren Probenahmeintervalle in Betriebsstunden (Bh)	47
Tabelle 14:	Ausgewählte Untersuchungsparameter zur Beurteilung der Motorölqualität und verwendete Analyseverfahren.....	48
Tabelle 15:	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)	51
Tabelle 16:	C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4	57
Tabelle 17:	Eingestellte Drehzahl, Stabilisierungsphase vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren in acht Prüfphasen	58
Tabelle 18:	Prüfphasen nach ISO 8178-11 und 97/68/EG	58
Tabelle 19:	Kenngößen des Rapsölkraftstoffs der Chargen RK I, RK II und RK III für Messungen am Traktorenprüfstand.....	61

Tabelle 20:	Kenngößen des Sojaölkraftstoffs für Messungen am Traktorenprüfstand	62
Tabelle 21:	Prüfphasen, Betriebsmodi, Parameter und Abstufungen der Variation im Rapsölbetrieb	63
Tabelle 22:	Einordnung der Ergebnisse der Parametervariation in Kategorien	64
Tabelle 23:	Durchgeführte Maßnahmen bei den Befundungen der Traktoren DE-K, JD-G, JD-K und JD-7G.....	65
Tabelle 24:	Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen im Feldtestjahr 2013	76
Tabelle 25:	Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen im Feldtestjahr 2014	77
Tabelle 26:	Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen der Traktoren auf den LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2013 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)	81
Tabelle 27:	Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen der Traktoren auf den LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2014 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)	82
Tabelle 28:	Regressionsanalyse des Anstiegs des Eisengehalts im Motoröl der Traktoren JD-K und JD-G im Vergleich zum Warnwert.....	87
Tabelle 29:	Kurzübersicht an Störungen an den Pflanzenöltraktoren im Berichtszeitraum	88
Tabelle 30:	Qualitative Darstellung der Abgasrückführaten-Variation und die Auswirkungen auf die Emissionen (NO _x , PM, PN, CO, HC) und den Kraftstoffverbrauch (b _e) im Vergleich zu Literaturangaben mit Diesel [7][3]	141
Tabelle 31:	Qualitative Darstellung der Einspritzzeitpunkt-Variation und die Auswirkungen auf die Emissionen (NO _x , PM, PN, CO, HC) und den Kraftstoffverbrauch (b _e) im Vergleich zu Literaturangaben mit Diesel [7][3]	142
Tabelle 32:	Qualitative Darstellung der Einspritzdruck-Variation und die Auswirkungen auf die Emissionen (NO _x , PM, PN, CO, HC) und den Rapsölverbrauch (b _e) im Vergleich zu Literaturangaben mit Diesel [7][3]	144
Tabelle 33:	Zusammensetzung der Ablagerungen im Brennraum sowie entsprechende Elementgehalte im Motoröl und Rapsöl.....	146

Abkürzungsverzeichnis

AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
Bh	Betriebsstunden
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CR	Common-Rail
DHK	Düsenhalterkombination
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DK	Dieselmotortreibstoff
DOC	Diesel Oxidation Catalyst (Oxidationskatalysator)
DPF	Dieselpartikelfilter
DS	Druckseite
ECU	Electronic Control Unit (Motorsteuergerät)
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ETIC	John Deere European Technology and Innovation Center
GDS	Gegendruckseite
HC	Kohlenwasserstoffe
ISO	International Organization for Standardization
°KW	Grad Kurbelwelle
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
OT	Oberer Totpunkt
PLD	Pumpe-Leitung-Düse
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RK	Rapsölkraftstoff
SCR	Selective Catalyst Reduction (selektive katalytische Reduktion)
TFZ	Technologie- und Förderzentrum

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende soll die überwiegend auf fossilen und nuklearen Energieträgern basierende Ökonomie auf erneuerbare Energieträger umgestellt werden. Vorrangige Ziele sind der Klimaschutz und die Ressourcenschonung. Die Energiewende umfasst die Bereiche Elektrizität, Wärme und Mobilität. Der Mobilitätssektor stellt dabei die größte Herausforderung dar. Insbesondere bei Offroad-Nutzfahrzeugen kann auf den Einsatz flüssiger Energieträger nach heutigem Stand auch auf lange Sicht nicht verzichtet werden. Rein elektrische oder auf gasförmigen Kraftstoffen basierende Antriebskonzepte werden aufgrund der zu geringen Speicherdichte des Energieträgers, wenn überhaupt, dann zunächst nur in Nischen Anwendung finden.

Die Landwirtschaft, die von den Folgen des Klimawandels selbst stark betroffen ist, hat sich zum Ziel gesetzt, den Treibhausgasausstoß zu reduzieren. Für land- und forstwirtschaftliche Arbeitsgeräte ist die Einführung einer gesetzlichen Begrenzung des CO₂-Ausstoßes in Diskussion. Daneben dient der CO₂-Fußabdruck auch mehr und mehr zur Bewertung von Produkten aus Agrarrohstoffen. Jährlich werden in Deutschland etwa 1,6 Mio. t fossiler Dieselkraftstoff im Agrarsektor [45] verbraucht. Damit ist die heimische landwirtschaftliche Produktion überwiegend auf Rohölimporte angewiesen, was zu einer hohen Abhängigkeit von Lieferstaaten und zum Abfluss von Geldmitteln aus den Regionen führt.

Vor diesem Hintergrund drängt sich die Frage auf, welche Antriebe für Landmaschinen nachhaltig, ökonomisch und kurzfristig verfügbar sind. In einem Workshop wurden 24 Experten aus Industrie, Wissenschaft und Verbänden hinsichtlich ihrer Einschätzung der Vorzüge verschiedener regenerativer Antriebe für Landmaschinen befragt. Mit großer Übereinstimmung wurden effiziente Verbrennungsmotoren, die mit Rapsölkraftstoff oder Biodiesel angetrieben werden, als aussichtsreichste Alternativen zu dieselbetriebenen Motoren angesehen [56][57]. Mit dem Einsatz von Rapsölkraftstoff in dafür geeigneten Traktoren lässt sich mit überschaubarem Entwicklungsaufwand bereits kurzfristig der Treibhausgasausstoß eines Traktors, je nach Berechnungsmethode, um ca. 57 bis 80 % reduzieren [26].

Die regionale Erzeugung von Rapsöl und anderen heimischen Pflanzenölen in dezentralen Ölmühlen fördert die Wertschöpfung in der Landwirtschaft und trägt zur inländischen Versorgung mit wertvollen Speiseölen, Eiweißfuttermitteln, Rohstoffen und nicht zuletzt Energieträgern bei. Daneben ist Rapsölkraftstoff als nicht wassergefährdend eingestuft, wodurch ein Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz geleistet wird [67].

Auf den Lehr-, Versuchs- und Fachzentren sowie den Versuchsstationen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft werden seit mehreren Jahren mit Rapsölkraftstoff betriebene Traktoren unterschiedlicher Hersteller und Abgasstandards eingesetzt. Dabei konnte deren Alltagstauglichkeit demonstriert werden. Begleitende Forschungsarbeiten belegen einen effizienten und emissionsarmen Betrieb [23][24][64].

2 Problemstellung

Obwohl die Anwendung von Pflanzenölkraftstoff in Dieselmotoren bereits einen Stand hoher technischer Reife erreicht hat [64][63][23][24][62][35][44], bedarf es noch der Klärung verschiedener Fragen. Die Technik pflanzenöлтаuglicher Traktoren muss mit der Entwicklung neuer Traktormotoren und Abgasnachbehandlungssysteme Schritt halten, um am Markt verfügbar bleiben zu können.

So erfordert der Einsatz von Rapsölkraftstoff in manchen Traktoren derzeit noch ein angepasstes Wartungsmanagement mit häufigeren Servicearbeiten. Jedoch hat sich gezeigt, dass Motoren mit moderneren Common-Rail-Einspritzsystemen einen geringeren Eintrag von Pflanzenöl ins Motoröl aufweisen als frühere Motorgenerationen [24]. Ob zukünftig Ölwechsel weniger häufig durchgeführt werden können und damit die bei Dieselmotoren üblichen Wartungsintervalle auch bei pflanzenölbetriebenen Traktoren ausreichen, bedarf noch weiterer Beobachtung.

Eine Grundvoraussetzung für den störungsfreien Betrieb ist die Einhaltung der Qualitätsanforderungen an den Pflanzenölkraftstoff. Seit Januar 2012 gelten gemäß der Norm DIN 51605 für Rapsölkraftstoff neue, deutlich herabgesetzte Grenzwerte für den Gehalt an Phosphor, Calcium und Magnesium. Damit wird dem Einsatz von Abgasnachbehandlungstechnologien (z. B. Partikelfilter) Rechnung getragen, die zur Erfüllung der Grenzwerte der Abgasstufen IIIB bzw. IV erforderlich sind. Aufgrund des massiven Einbruchs der Nachfrage nach Rapsölkraftstoff, auch infolge der Erhöhung der steuerlichen Begünstigung fossilen Agrar-Dieselmotorkraftstoffs im Jahr 2008, sind die Produktionskapazitäten schlecht ausgelastet [31]. Unabhängig davon gilt es, den geforderten hohen Qualitätsstandard gemäß DIN 51605 für nachhaltig zertifizierten Rapsölkraftstoff einzuhalten.

Zur Verbreiterung der Rohstoffbasis für die Erzeugung von Pflanzenölkraftstoffen gewinnen derzeit neben Raps auch Leindotter, Sonnenblume und Soja an Bedeutung. Der Sojaanbau wird im Rahmen des Bayerischen „Aktionsprogramms Heimische Eiweißfuttermittel“ [2] als Option zur stärkeren Unabhängigkeit von Futtermittelimporten in Feldversuchen getestet. Daher lautet die Frage, ob auch das bei der Sojaverarbeitung gewonnene Sojaöl als Kraftstoff über einen längeren Zeitraum in Traktoren eingesetzt werden kann.

Die langfristige Erhebung von Motor- bzw. Zapfwellenleistung, Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen gibt Aufschluss über das Langzeitbetriebsverhalten der pflanzenöлтаuglichen Traktoren. Darüber hinaus können durch Prüfstandsuntersuchungen technische Beeinträchtigungen (z. B. Bildung von Ablagerungen) rechtzeitig erkannt werden, um gegebenenfalls Gegenmaßnahmen einzuleiten (z. B. Einspritzdüsenwechsel). Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Motoren im Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff ist bei neueren Motorgenerationen der Kenntnisstand noch unzureichend.

Anhand der limitierten Abgaskomponenten (Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Partikelmasse) lassen sich unter anderem die Umweltwirkungen pflanzenölbetriebener Traktoren untereinander und gegenüber dieselmotorkraftstoffbetriebenen Traktoren vergleichen.

Die bisherigen Einsatzerfahrungen mit Abgasnachbehandlungssystemen bei Pflanzenölbetrieb sind vielversprechend, wenngleich auch hier der Kenntnisstand hinsichtlich erforderlicher Wartungsintervalle und langfristiger Umsetzungsraten aufgrund der gerade erst stattfindenden Praxiseinführung noch gering ist.

Der Gesetzgeber zeigt steigendes Interesse an der Ermittlung der realen Emissionen von Traktoren. Die Einführung transienter Prüfzyklen mit schneller Drehzahl- und Drehmomentvariation und zusätzlicher Messung von Kaltstartemissionen sowie mobiler Emissionsmesstechnik verdeutlicht die steigende Bedeutung. Wie sich die dynamischen Drehzahl- und Drehmomentsprünge auf die Abgasemissionen pflanzenölbetriebener Traktoren auswirken, ist bisher wenig erforscht. Ferner ist unklar, ob Traktoren im Realbetrieb vergleichbare Drehzahl-Last-Verläufe leisten müssen, wie sie der transiente Zyklus vorgibt.

Die Innovationen in der Dieselmotoren- und Abgasnachbehandlungstechnik in mobilen Arbeitsmaschinen schreiten stetig voran. Für den Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff in der Landwirtschaft ist daher wichtig, mit dieser Entwicklung schrittzuhalten. Die kraftstoffspezifische Einstellung der Motorsteuerung verbessert die Performance des Motors. Eine Feinjustierung zur Erzielung des höchstmöglichen Wirkungsgrads bei gleichzeitiger Minimierung der Abgasemissionen erfolgt üblicherweise noch nicht. Somit ist auch das weitere Optimierungspotenzial pflanzenöлтаuglicher Traktoren weitgehend unbekannt.

3 Zielsetzung

Die Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöлтаuglicher Traktoren soll dazu beitragen, den Stand der Technik und das Emissionsverhalten pflanzenöлтаuglicher Traktoren zu beschreiben sowie Möglichkeiten der technischen Optimierung und Minderung umweltschädlicher und gesundheitlich relevanter Emissionen aufzuzeigen. Die Untersuchung beinhaltet mehrere Arbeitspakete.

Demonstration und Langzeitbegleitforschung pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I, II, IIIA und IIIB auf den Versuchsgütern der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL):

- Betriebsüberwachung der Traktoren (Kraftstoff- und Motorölqualität, Betriebsdaten) zur Dokumentation der Betriebssicherheit und Optimierung des Wartungsaufwands
- Erhebung des Langzeitbetriebsverhaltens pflanzenöлтаuglicher Traktoren mit Abgasnachbehandlung als Grundlage für deren Weiterentwicklung (z. B. Störanfälligkeit und Wartungsaufwand)
- Untersuchung zum Einsatz von Sojaölkraftstoff über zwei Feldtestjahre zur Erweiterung des Rohstoffspektrums
- Unterstützung der Versuchsbetriebe bei der Beschaffung und Lagerung von Pflanzenölkraftstoffen sowie Beschaffung von Pflanzenöltraktoren

Ermittlung von Leistung, Verbrauch und Emissionen pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I, II, IIIA und IIIB am Traktorenprüfstand des TFZ:

- Ermittlung des Langzeitverhaltens von Leistung und Verbrauch durch wiederkehrende Messungen
- Ermittlung des Emissionsverhaltens (limitierte und nicht limitierte Komponenten) in Anlehnung an gültige Prüfzyklen und unter ausgewählten Betriebsbedingungen (z. B. Kaltstart, Lastwechsel)
- Erhebung von Grundlagen zur Optimierung der Dosierung von Harnstofflösung (Ad-Blue®) hinsichtlich des Verbrauchs und der Abgasemissionen
- Erweiterung der Datengrundlage für die Treibhausgasbilanzierung
- Emissionen, Verbrauch und Feldtest pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufe IIIB

Ein weiteres Arbeitspaket hat das Ziel, einen Traktor der Abgasstufe IIIB hinsichtlich seines Verbrauchs und seiner Emissionen durch Variation von Einspritzparametern und AGR-Rate zu optimieren.

4 Stand des Wissens

Nachfolgend soll ein Kurzüberblick über bisherige Arbeiten, den Stand der Entwicklung und gesetzliche Emissionsanforderungen gegeben werden. Der Stand des Wissens zum Einsatz von Pflanzenölkraftstoff in Traktoren wurde bereits in den TFZ-Berichten 17, 32 sowie 33 beschrieben [64][23][24].

4.1 Pflanzenölkraftstoff in Traktoren

Das Betriebsverhalten von Pflanzenöltraktoren wurde bisher primär für die Abgasstufen I, II und IIIA untersucht. In Tabelle 1 sind Vorhaben aufgelistet, die sich mit Forschung und Demonstration von Rapsöl als Kraftstoff in Traktoren beschäftigen.

Tabelle 1: Literaturübersicht von Untersuchungen an 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) [35]	Betriebserfahrungen mit pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren (Natur- und Biodiesel).
HASSEL et al. (2005) [32]	Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöлтаuglichen Traktoren
DÖNGES et al. (2006) [18]	Felderprobung Rapsöl pur
RATHBAUER et al. (2008) [51]	Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft
SY et al. (2009) [60]	Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz
THUNEKE et al. (2009) [64]	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
THE 2 ND VEGOIL CONSORTIUM (2011) [62]	Demonstration of 2 nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines
EMBERGER et al. (2013) [23]	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
EMBERGER et al. (2013) [24]	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA

Ein einwandfreies Betriebsverhalten ist bei einzelnen Traktoren mit Pflanzenöltechnik bis ca. 7.000 Betriebsstunden (Bh) dokumentiert. Das Emissionsverhalten von Rapsöltraktoren ab 5.000 Bh ist hingegen weniger erforscht. Begleitende Untersuchungen an Pflan-

zenöltraktoren 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 Einspritzungsparameter (z. B. Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem, kurz PLD) hin zur elektronisch angesteuerten Einspritzung erhöht 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, was vielfach höhere Einspritzmengen und eine höhere Leistung als im Dieselmotorbetrieb zur Folge hat [64]. Bei Common-Rail-Motoren ist hingegen bei gleichen Motoreinstellungen mit Pflanzenölkraftstoff häufig eine geringere Motorleistung festzustellen als mit Dieselmotorkraftstoff, da bei einem Common-Rail-System der Kraftstoff nach definierten Vorgaben unabhängig von der Motordrehzahl und Kurbelwellenposition injiziert wird. Die Einspritzmenge wird primär durch die Bestromungsdauer des Injektoröffnungsventils bestimmt [54][46]. Im Pflanzenölbetrieb kann die Durchflussrate im Injektor geringer sein als mit Dieselmotorkraftstoff, was einen insgesamt geringeren Masseneintrag in den Brennraum verursacht [40]. Der zusätzlich geringere Energiegehalt von Rapsölkraftstoff führt zu einer Minderleistung um bis zu 20 % [63], die allerdings durch Anpassungen in der Motorsteuersoftware ohne mechanische Eingriffe ausgeglichen werden kann [62].

Ein Beleg für die Eignung von CR-Motoren ist die Markteinführung von Rapsöltraktoren der Abgasstufe IIIA durch die Hersteller Fendt und Deutz-Fahr ab 2008. Flottenversuche mit CR-Motoren der Abgasstufe IIIA zeigen die Zuverlässigkeit dieser Einspritztechnologie mit Pflanzenölkraftstoff in Traktoren. Dabei wurden in Summe über 20.000 Bh Gesamtlaufzeit aller Abgasstufe-IIIA-Traktoren im Feldeinsatz mit wissenschaftlicher Begleitung nachgewiesen. Die meisten Erfahrungen pro Traktoreinheit beliefen sich auf bis ca. 3.000 Bh Einsatzzeit [62][64][24][23].

Ab der Abgasstufe IIIB führte die zunehmende Absenkung der Abgasemissionsgrenzwerte von Partikelmasse (PM) sowie der Stickoxide (NO_x) zu neuen Motorgenerationen mit komplexer Abgasnachbehandlung (AGN). 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. Emissionen von Kohlenwasserstoff (HC) und Kohlenmonoxid (CO) sind größtenteils durch den Einsatz von Oxidationskatalysatoren, unabhängig vom Kraftstoff, mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand reduziert worden. Die Erfüllung der Abgasstufe IIIB für NO_x und PM wurde im Wesentlichen mittels zweier Strategien zur Emissionsminderung auch für Pflanzenöltraktoren ermöglicht.

(1) Einige Hersteller bevorzugen eine Motoroptimierung mit einer vorwiegend partikelarme Verbrennung, was jedoch die Entstehung von NO_x -Emissionen begünstigen kann. Die NO_x -Konzentration im Abgasstrang mit hinzudosierter wässriger Harnstofflösung in einem Katalysator wird mittels der selektiven katalytischen Reduktion gemindert. Der Katalysator arbeitet erst ab Betriebstemperaturen deutlich über 200 °C op-

timal, was höhere NO_x -Emissionen im Kaltstart zur Folge haben kann. Grundsätzlich können thermische Alterung, Verschmutzung oder Katalysatorgifte die reaktive Schicht und somit die Umsetzrate beeinträchtigen. Ein Langzeittest mit Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIB mit einem SCR-System wurde bisher noch nicht durchgeführt.

(2) 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 AGR die NO_x -Emissionen durch Absenkung des Sauerstoffanteils und der Verbrennungstemperatur im Brennraum reduzieren. Der dadurch tendenziell höhere Partikelaustritt wird durch den DPF abgeschieden. Dieser muss je nach Beladungszustand kontinuierlich oder in Intervallen von mehreren Hundert Betriebsstunden regeneriert werden, da sonst der Druckverlust durch den Filter die Motorleistung drosselt. Üblicherweise erfolgt diese thermische Reinigung bei hohen Abgastemperaturen von 550 bis 650 °C, die im täglichen Fahrzeugbetrieb nur mit einer zusätzlich dosierten Dieselkraftstoffmenge in den Brennraum oder in das Abgas erreicht werden können. Pflanzenölkraftstoff ist aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften nur bedingt zur Kraftstoffnacheinspritzung nutzbar.

Jedoch zeigt sich im Rapsölbetrieb in einer Versuchsreihe eine geringere Differenzdruckzunahme von ca. 54 % im Vergleich zum Dieselbetrieb [34]. Der Pflanzenölruss oxidiert bei einer Abgastemperatur ab ca. 315 °C, im Gegensatz zum Dieseleruss, der sich erst ab etwa 375 °C verbrennt [34]. Eine niedrige Rußoxidationstemperatur bzw. ein niedriger Druckanstieg sind günstige Bedingungen, um die passive Regeneration auch ohne aktive Temperaturerhöhung zu ermöglichen. Dabei soll ein Fließgleichgewicht von abgeschiedener und oxidierender Rußmenge im DPF erreicht werden. Ein dem DPF vorgeschalteter DOC wandelt einen Teil des Stickstoffmonoxids (NO) des Abgases zu Stickstoffdioxid (NO_2) um, was die Oxidation des Pflanzenölrusses zusätzlich begünstigt. Das Prinzip der passiven Regeneration kommt bereits bei Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IIIB mit DPF zum Einsatz [19][37].

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

Der Landmaschinenhersteller John Deere hat eigene Entwicklungen erprobt, um pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IV serienreif anbieten zu können [39]. 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 Niederdruckkraftstoff- sowie Schmiersystem moderner Abgasstufe-IV-Pflanzenöltraktoren [19][37].

4.2 Abgasgesetzgebung für Traktoren

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. Für landwirtschaftliche Traktoren gilt die Richtlinie 2000/25/EG [29] bzw. die hierfür inhaltlich analoge Richtlinie 97/68/EG [28], die zuletzt durch Richtlinie 2012/46/EU [30] geändert wurde. Tabelle 2 zeigt die Grenzwerte der darin limitierten Emissionskomponenten Stickoxide (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM). Insbesondere für die NO_x - und Partikelmasse-Emissionen wurden die gesetzlichen Vorgaben in den letzten Jahren erheblich verschärft.

Die Richtlinie 97/68/EG wird derzeit überarbeitet. In einem Vorschlag der EU Kommission sind mögliche Änderungen in Hinblick auf die kommende Abgasstufe V aufgezeigt, welche ab dem Jahr 2019 in Kraft treten können. Neben einer Ausweitung auf leistungsschwächere (Nennleistung < 19 kW) und leistungstärkere Motorenklassen (Nennleistung > 560 kW) umfasst der Entwurf unter anderem die zusätzliche Limitierung des Ausstoßes der Partikelanzahl (PN) und eine weitere Verschärfung der PM-Emissionen im Vergleich zur Abgasstufe IV [27].

In der Richtlinie 97/68/EG 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 unterschiedlich gewichtet werden. Ab der Abgasstufe IIIB ist zusätzlich der NRTC (Non-Road-Transient-Cycle) mit sekundlich wechselnden Drehzahl- und Drehmomentvorgaben im Kalt- und Warmstart vorgeschrieben.

Die bei der gesetzlichen Prüfung ermittelten Emissionen am Motorenprüfstand weichen von den tatsächlichen Emissionen einer Arbeitsmaschine in der Praxis ab. Unterschiedliche Umweltbedingungen (z. B. Luftdruck und -temperatur), Betriebsprofile des Motors im Alltagsbetrieb und der Einfluss zusätzlicher Hilfs-/Nebenaggregate sowie fahrzeugspezifische Getriebeverluste können hierfür ursächlich sein. Der Gesetzgeber erwägt daher die Erfassung der Emissionen im realen Fahrzeugbetrieb (engl. Real Driving Emissions, kurz RDE) mit mobiler Messtechnik. Für schwere Nutzfahrzeuge der Abgasstufen Euro V und VI ist die Erfassung von Realemissionen bereits nach EU-Verordnungen 582/2011 und 64/2012 geregelt. Messgeräte und Prüfmethode zu gesetzlichen Reglementierungen von Realemissionen werden derzeit auch für Non-Road-Maschinen (wie z. B. für Traktoren) in einem Pilotprogramm erprobt [5].

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte nach EU-Richtlinie 97/68/EG [28] (zuletzt geändert durch 2012/46/EU [30]) für Dieselmotoren in Arbeitsmaschinen (Abgasstufen I bis IV) und Vorschlag der EU-Kommission für Abgasstufe V [27]

Nennleistung P _N in kW	NO _x g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	Partikel- masse g/kWh	Partikel- anzahl #/kWh	Gültig ab
<i>Stufe I</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
<i>Stufe II</i>						
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
<i>Stufe IIIA</i>						
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
<i>Stufe IIIB</i>						
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
<i>Stufe IV</i>						
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
<i>Vorschlag der EU Kommission für Stufe V [27]</i>						
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

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 wird. Schließlich werden das Vorgehen bei Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand sowie die Durchführung von Motorbegutachtungen beschrieben.

5.1 Pflanzenöltraktoren und Versuchsstandorte

Im Rahmen der Untersuchung werden 14 pflanzenölaugliche Traktoren wissenschaftlich begleitet. 13 Traktoren werden auf insgesamt acht Versuchsgütern der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) betrieben. Ein weiterer Traktor des Herstellers New Holland wird nicht im Zuständigkeitsbereich der LfL betrieben, dieser wurde zwar am Prüfstand des TFZ, jedoch nicht im Feldtest untersucht. Die Bezeichnungen und Standorte der einzelnen Traktoren können Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Standort, Kurzbezeichnung und Abgasstufe der Pflanzenöltraktoren

Pflanzenöltraktoren	Kurzbezeichnung	Abgasstufe	LfL-Versuchsgut
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	JD7-G	IIIA	Versuchsstation Grub
John Deere 6630 ¹⁾	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	JD-O	IIIA	Versuchsstation Osterseeon
New Holland T6080	NH-W	IIIA	–
Fendt Vario 718 SCR ²⁾	FE-Ka	IIIB	Versuchsstation Karolinenfeld
John Deere 6125R ³⁾	JD-N	IIIB	Versuchsstation Neuhof und Versuchsstation Straßmoos
John Deere 6210R ⁴⁾	JD-P	IIIB	LVFZ Achselschwang

¹⁾ ab März 2013

²⁾ ab Juni 2013

³⁾ ab Juli 2014

⁴⁾ ab Januar 2014

Neun der 13 Traktoren erfüllen die Abgasstufe IIIA und drei Traktoren die Abgasstufe IIIB. Mitte des Jahres 2014 wurde noch ein weiterer John-Deere-Traktor der Abgasstufe IIIB in die Untersuchung miteinbezogen.

Zu einigen Pflanzenöltraktoren liegen bereits Erfahrungen aus vorangegangenen Forschungsprojekten vor [64][23][24][37]. Diese Ergebnisse werden teilweise in die Auswertung miteinbezogen, um das Langzeitbetriebsverhalten der Traktoren bewerten zu können.

Die Traktoren unterscheiden sich in den technischen Konzepten zur Realisierung der Pflanzenöлтаuglichkeit. 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). Vier Traktoren besitzen ein Zwei-Tank-System, bei dem der Kaltstart und zum Teil der Schwachlastbetrieb mit Dieselmkraftstoff erfolgen.

Beim Zwei-Tank-System wird ein komplettes Niederdruck-Kraftstoffsystem inklusive Tank, Leitungen, Filter und Pumpe ergänzt. Das zentrale Element ist dabei die Kraftstoffumschaltung, die auf unterschiedliche Weise ausgeführt sein kann. Halbautomatische Umschalteinrichtungen aktivieren den Pflanzenölbetrieb, wenn das Motoröl, das Kühlwasser oder der Kraftstoff die vorgegebene Betriebstemperatur erreicht. Der Pflanzenölmodus bleibt aktiv, bis der Bediener einschreitet. Eine automatische Umschaltung ermöglicht hingegen den temperatur- und lastabhängigen Wechsel zwischen Diesel- und Pflanzenölbetrieb ohne Eingriff des Fahrers. Die manuelle Umschaltung zwischen den Kraftstoffen ist durch den Fahrer bei beiden Varianten gegeben.

Beim Ein-Tank-System wird einzig das bereits vorhandene Dieselmkraftstoffsystem für das Pflanzenöl genutzt. Dabei werden Anpassungen, z. B. an den Leitungsquerschnitten, den Kraftstoffpumpen oder dem Kraftstofffilter erforderlich. Ferner haben Traktoren mit einem Ein-Tank-System üblicherweise ein Kühlwasservorwärmesystem installiert, das an eine Netzsteckdose (ggf. mit Zeitschaltuhr) angeschlossen werden kann und dadurch ein besseres Kaltstartverhalten ermöglicht.

Alle Traktoren besitzen ein angepasstes Thermomanagement im Kraftstoffsystem, d. h. die Kraftstofftemperatur wird mittels Wärmetauscher oder elektrischer Heizelemente geregelt.

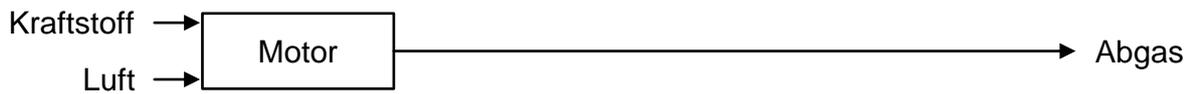
Die Umrüstung von Motoren bis Abgasstufe II wurde zumeist nur mit mechanischen Maßnahmen durchgeführt, wie beispielsweise Veränderungen an den Düsen oder der Ein- und Auslassventile. Während die Hersteller bzw. Umrüster bei Traktoren der Abgasstufen I, II und (teilweise) IIIA die Pflanzenöлтаuglichkeit 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.

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

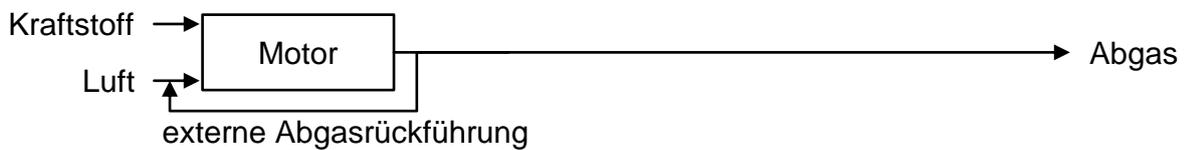
Abgasstufe/Traktorkurzbezeichnung	I	II	IIIA	IIIA	IIIB	IIIB
Maßnahme	FE-K	DE-K	FE-A	JD-G	FE-Ka	JD-P
■ = durchgeführt			FE-AI	JD-K		JD-N
□ = nicht durchgeführt			DE-N	JD7-G		
				JD-O		
				JD-B		
Maßnahmen am Niederdruckkraftstoffsystem						
zusätzliches Kraftstoffsystem	□	□	■	□	■	□
zusätzliche Kraftstoffpumpen (Anzahl)	□	□	■ (1)	□	■ (2)	□
halbautomatische/automatische Umschaltung zwischen Rapsöl- und Diesel	□/□	□/□	■/■	□/□	■/□	□/□
höhere Leitungsquerschnitte	□	□	□	□	■	■
Zusatz-Entlüftung des Kraftstoffsystems	■	■	□	□	□	□
verändertes Thermomanagement	■	■	■	■	■	■
elektrische Kraftstoffvorwärmung	□	□	□	□	■	□
angepasste Kraftstofffilterung	□	□	■	■	■	■
Maßnahmen am Kühlwasser- und Motorölkreislauf						
Kühlwasservorwärmesystem (230 V)	■	■	□	■	□	■
Nebenstrom-Motorölfilter	□	■	□	□	□	□
Maßnahmen am Motor und an der Abgasnachbehandlung						
erhöhter Düsenadelöffnungsdruck	□	■	□	□	□	□
getauschte Einspritzdüsen/Injektoren	■	■	□	□	□	□
geänderte Ein- und Auslassventile	□	■	□	□	□	□
Düsenstock- oder Injektorvorwärmung	□	■	□	■	□	■
angepasste Einspritzparameter in der Motorsteuerungssoftware	□	□	□	■	□	■
angepasste Abgasrückführung	□	□	□	■	□	■
passive Partikelfilterregeneration	□	□	□	□	□	■

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

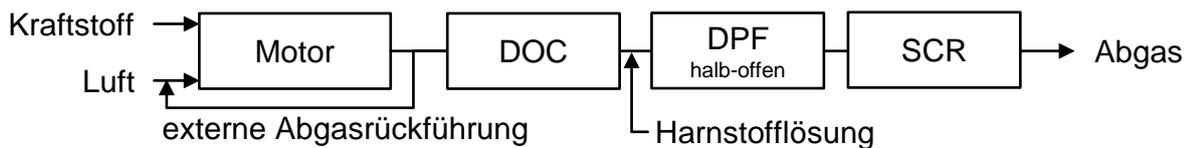
Abgasstufen I und II (FE-K, DE-K)



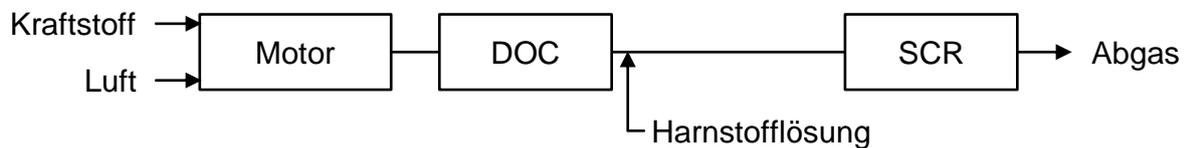
Abgasstufe IIIA (DE-N, FE-AI, FE-A, JD7-G, JD-B, JD-O)



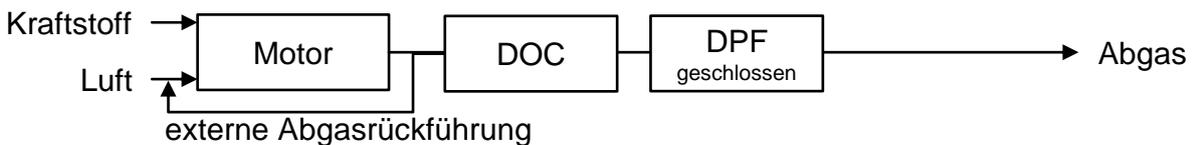
Abgasstufe IIIA (JD-K und JD-G mit Prototyp Abgasnachbehandlung)



Abgasstufe IIIB (FE-Ka)



Abgasstufe IIIB (JD-N, JD-P)



DOC = Diesel Oxidation Catalyst, Oxidationskatalysator
 SCR = Selective Catalytic Reduction, selektive katalytische Reduktion
 DPF = Dieselpartikelfilter

Abbildung 1: Konzepte der Emissionsminderung der untersuchten Pflanzenöltraktoren

5.1.1 Abgasstufen I und II

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

Der Fendt Farmer Vario 412 (FE-K) und der Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 (DE-K) waren bereits Bestandteil vorangegangener Untersuchungen [64][23]. 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 Agrotron TTV 1160 (DE-K, rechts) am L VFZ 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. 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 und des Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160

Traktortyp	Fendt Farmer Vario 412	Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160
Abgasstufe	I	II
Motortyp	Deutz BF4M2013C	Deutz BF6M1013EC
Anzahl der Zylinder/ Hubraum in cm ³	4/3.802	6/7.146
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 Ecom
Kraftstoffsystem	Ein-Tank-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	innermotorische Maßnahmen	innermotorische Maßnahmen

5.1.2 Abgasstufe IIIA

Fendt 820 Variogreentec (FE-A, FE-AI) und Deutz-Fahr Agrottron M 650 (DE-N)

Bei den Traktoren Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-A, FE-AI) und Deutz-Fahr Agrottron 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 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 sind ein Tank für Dieselkraftstoff mit einem Fassungsvermögen von 100 l und ein Tank für Rapsölkraftstoff mit 340 l Fassungsvermögen installiert. In Abhängigkeit von Rapsölkraftstofftemperatur und Motordrehmoment/-drehzahl schaltet das integrierte Kraftstoffmanagementsystem zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoffbetrieb um. Für besondere Betriebssituationen, z. B. bei leerem Dieseltank, besteht die Möglichkeit, das Kraftstoffmanagementsystem zu deaktivieren und unabhängig vom Motorbetriebszustand mit Rapsölkraftstoff 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 des Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-A, FE-AI) und des 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 cm ³	6/6.057	6/6.057
Nennleistung in kW/PS	152/207	135/184
Einspritzsystem	Common-Rail- Hochdruckeinspritzung	Common-Rail- Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2008 (FE-A), 2009 (FE-AI)	2010
Abgasstufe	IIIA	IIIA
Getriebe	stufenlos, Vario-Getriebe	stufenlos, ZF Eccom
Kraftstoffsystem	Zwei-Tank-System	Zwei-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)

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

Die John-Deere-Traktoren (Abbildung 4 und Abbildung 5) 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 Nennleistung der Traktoren erstreckt sich über den unteren, mittleren und oberen Leistungsbereich von 94 bis 180 kW des 6-Zylinder-Motors. Die technischen Daten sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 aufgelistet.



Abbildung 4: John Deere 6930 auf der Versuchsstation Grub (JD-G, links oben) und am LVFZ Kringell (JD-K, rechts oben) sowie John Deere 6630 am Versuchsgut Osterseeon (JD-O, links unten) und Baumannshof (JD-B, rechts unten)

Die Traktoren John Deere 6930 Premium (JD-K, JD-G) sind Prototypen, die direkt vom Hersteller auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst wurden. Diese Prototypen haben noch zusätzlich ein Prototyp-Abgasnachbehandlungssystem (AGN) installiert. Die Traktoren dienen als Versuchsträger im EU-Projekt „2nd VegOil“ [62] und wurden im Anschluss daran ab 2009 zum Feldtest den Versuchsbetrieben zur Verfügung gestellt und im Rahmen eines vorangegangenen Forschungsvorhabens [24] wissenschaftlich begleitet.

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



Abbildung 5: John Deere 7830 Premium der Versuchsstation Grub (JD7-G)

Tabelle 7: Technische Daten des Prototyps John Deere 6930 Premium (JD-G, JD-K) und des John Deere 6630 Premium (JD-B, JD-O)

Traktortyp	John Deere 6930 Premium	John Deere 6630 Premium
Abgasstufe	IIIA	IIIA
Motortyp	PowerTech PLUS	PowerTech PLUS
Anzahl der Zylinder/ Hubraum in cm ³	6/6.788	6/6.788
Nennleistung in kW/PS	134/182	114/155
Einspritzsystem	Common-Rail- Hochdruckeinspritzung	Common-Rail- Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2008 JD-K, 2009 JD-G	2010 JD-O, 2011 JD-B
Getriebe	Lastschaltgetriebe AutoQuad Plus	Lastschaltgetriebe
Kraftstoffsystem	Ein-Tank-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Prototyp-AGN: SCR-System, Partikelfilter und Oxidationskatalysator	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)

Tabelle 8: Technische Daten des John Deere 7830 Premium (JD7-G)

Traktortyp	John Deere 7830 Premium
Abgasstufe	IIIA
Motortyp	PowerTech PLUS
Anzahl der Zylinder/Hubraum in cm ³	6/6.788
Nennleistung in kW/PS	173/235
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2008
Getriebe	Lastschaltgetriebe AutoQuad Plus
Kraftstoffsystem	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung/Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR)

New Holland T6080 (NH-W)

Der New Holland T6080 wurde am Prüfstand Leistungs- und Emissionstests unterzogen, aber nicht im Feldtest betreut. Tabelle 9 zeigt die technischen Daten des Traktors.

Tabelle 9: Technische Daten des New Holland T6080 (NH-W)

Traktortyp	New Holland T6080
Abgasstufe	IIIA
Motortyp	IVECO BVEXL06.7DCB
Anzahl der Zylinder/Hubraum in cm ³	6/6.728
Nennleistung in kW/PS	135/184
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2009
Getriebe	Lastschaltgetriebe
Kraftstoffsystem	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung	innermotorische Maßnahmen

Der Traktor besitzt ein Ein-Tank-System, einen IVECO 6-Zylinder-Motor mit 135 kW Leistung und wurde von der Firma Öl und BioEnergie GmbH Friedersbach (Österreich) für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst. Die Emissionen werden durch innermotorische Maßnahmen reduziert.

5.1.3 Abgasstufe IIIB

Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka)

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



Abbildung 6: Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) der Versuchsstation Karolinenfeld

Die technischen Daten des Fendt Vario 718 SCR sind in Tabelle 10 aufgelistet. Der Traktor wurde von der BayWa AG für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Hierzu wurde ein Zwei-Tank-System eingebaut. Dabei wird der Dieselmotorkraftstoff 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, das es dem Fahrer ermöglicht, zwischen Diesel- und Rapsölbetrieb zu wählen.

Im Rapsölkreislauf 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 Dieselmotorkraftstoffbetrieb. Damit soll eine ausreichende Kraftstoffversorgung des Einspritzsystems gewährleistet werden. In Abbildung 7 sind einige Bauteile der Umrüstung dargestellt.

Tabelle 10: 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 cm ³	6/6.056
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS)	133/181
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2012
Abgasstufe	IIIB
Getriebe	stufenloses Vario-Getriebe ML 180
Kraftstoffsystem	Zwei-Tank-System
Abgasnachbehandlung	Oxidationskatalysator und SCR-System



Abbildung 7: Kraftstoffumschaltung mit Füllanzeige für den Dieseltank (links oben), Umschalteinheit mit Gegenstromwärmetauscher (rechts oben) und zusätzliche Zahnradpumpen für Pflanzenölkraftstoff (links und rechts unten)

Ein Gegenstromwärmetauscher zwischen Rapsölkraftstoff-Niederdrucksystem und Kühlwasserkreislauf erhöht die Temperatur 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. Die Motorsteuerungssoftware wird im Werkzustand belassen und ist auf den konventionellen Dieselpetrieb optimiert.

John Deere 6125R und 6210R (JD-N und JD-P)

Der John Deere 6210R (JD-P) ist ein Prototyp, der direkt vom Hersteller auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst wurde. Der Traktor ist in Abbildung 8 zu sehen und die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 11 dargestellt.

Der 4-Zylinder-Pflanzenöltraktor John Deere 6125R (JD-N) befindet sich im Prototyp-Status und besitzt ebenso wie der Traktor JD-P die Abgasstufe IIIB. Das Abgas wird mit einem Oxidationskatalysator und geschlossenem Dieselpartikelfilter nachbehandelt. Anpassungen für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurden vom Hersteller im Juli 2014 bei ca. 840 Betriebsstunden durchgeführt und anschließend wurde der Traktor in die Begleitforschung aufgenommen. Der Traktor ist in Abbildung 8 zu sehen und die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Mit einem Oxidationskatalysator und geschlossenem Dieselpartikelfilter erfüllt der Traktor gemäß der Typgenehmigungsprüfung die Abgasstufe IIIB. Der Traktor diente zunächst als Versuchsträger im Forschungsprojekts „Herstellung der Praxistauglichkeit eines Tier-4-Pflanzenölmotors/-traktors (PraxTrak)“, gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) [39] [37], und wurde 2014 zum Feldtest auf den LfL-Versuchsbetrieben zur Verfügung gestellt.



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

Tabelle 11: Technische Daten des John Deere 6210R (JD-P) und des John Deere 6125R (JD-N)

Traktortyp	John Deere 6210R	John Deere 6125R
Motortyp	John Deere PowerTech PVX	John Deere PowerTech PVX
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/6,8	4/4,5
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS)	154/210	92/128
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2012	2013
Abgasstufe	IIIB	IIIB
Getriebe	AutoQuad Plus	AutoPowr
Kraftstoffsysteme	Ein-Tank-System	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter (geschlossen)	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter (geschlossen)

5.2 Feldtest

5.2.1 Betriebsdaten

Der Betrieb der Pflanzenöltraktoren im Feldtest wird durch die Auswertung von Maschinentagebüchern, CAN-BUS-Daten sowie Motoröl- und Kraftstoffanalysen dokumentiert und bewertet.

5.2.1.1 Betriebstagebücher

Regelmäßige Aufzeichnungen in Maschinentagebüchern erfolgen, um Einsatzbedingungen, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie gegebenenfalls Störungen zu dokumentieren. Anhand von Gesprächen mit den Betreibern werden die Erfahrungen aus dem täglichen Einsatz ermittelt, 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 9 zeigt das Layout des Betriebstagebuchs und in Tabelle 12 werden die Dokumentationsvorgaben näher erläutert.

Betriebstagebuch 2013		Traktor: Fendt 820 Vario		Ort: LVFZ Achselshwang			
Vor der Benutzung		Betrieb		Ereignisse und Besonderheiten			
Datum	Betriebsstunden	Ölstand min über 80%	Arbeitsvorgang Nr. vertragen	Startverhalten gut mittel schlecht kein Start	Motoröl (Liter) verbraucht aufgef.	Getriebeölmenge (Liter) Rasen Diesel Harstoff	Vollständiges Wartungsprotokoll - Reparaturen Sonstiges
04.02 (Mo)	_____h	_____mm	a. _____ b. _____ c. _____	gut mittel schlecht kein Start	1,1h 1,1h		_____
05.02 (Di)	_____h	_____mm	a. _____ b. _____ c. _____	gut mittel schlecht kein Start	1,1h 1,1h		_____
06.02 (Mi)	_____h	_____mm	a. _____ b. _____ c. _____	gut mittel schlecht kein Start	1,1h 1,1h		_____
07.02 (Do)	_____h	_____mm	a. _____ b. _____ c. _____	gut mittel schlecht kein Start	1,1h 1,1h		_____
08.02 (Fr)	_____h	_____mm	a. _____ b. _____ c. _____	gut mittel schlecht kein Start	1,1h 1,1h		_____
09.02 (Sa)	_____h	_____mm	a. _____ b. _____ c. _____	gut mittel schlecht kein Start	1,1h 1,1h		_____
10.02 (So)	_____h	_____mm	a. _____ b. _____ c. _____	gut mittel schlecht kein Start	1,1h 1,1h		_____

Abbildung 9: Auszug aus dem Betriebstagebuch der Pflanzenöltraktoren

Für das Datenmanagement der Traktoren wurde ein Programm auf Basis von Microsoft Excel mit VBA (Visual Basic for Applications) erarbeitet, in das sämtliche Informationen aus den Feldtests eingegeben und in dem sie verwaltet werden. Dabei ist auch eine Abfrage zum aktuellen Stand des Vorhabens (z. B. Traktor-Betriebsstunden, aktuell verwendete Kraftstoffchargen) möglich. In das Excel-Tool werden die Eintragungen der Betriebstagebücher sowie die Ergebnisse der Motoröl- und Kraftstoffanalysen übertragen. Ferner werden die technischen Spezifikationen der Pflanzenöltraktoren, die Betriebserfahrungen (Mitteilungen der LfL-Mitarbeitern) und der Projektstatus (durchgeführte Arbei-

ten) erfasst und verglichen. Die automatisierte Auswertung ermöglicht es, schneller auf Unstimmigkeiten oder Probleme aufmerksam zu werden und darauf zu reagieren. Das Excel-Tool ist beliebig für weitere Traktoren erweiterbar.

Tabelle 12: 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 Traktorarbeitszeit 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 Pflanzenöl-, Dieselkraftstoff- und Harnstoffmengen dokumentieren den Verbrauch des Traktors oder geben bei vorhandenem SCR-System Aufschluss über dessen Funktion.
Fehlermeldungen Wartungsarbeiten Reparaturen Sonstiges	Auffälligkeiten, Reparaturen, Fehlermeldungen und Wartungsarbeiten werden dokumentiert und dienen hauptsächlich zur Ursachenforschung von Störungen.

5.2.1.2 Datenlogger

Die Dokumentation des Betriebsverhaltens erfolgt auch durch kontinuierliche Online-Aufzeichnung am Traktor FE-Ka 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).

Es werden die CAN-BUS-Parameter 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 hinsichtlich der absoluten Höhe des Kraftstoffverbrauchs 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 mehrmals wiederkehrend untersucht, um Aussagen zum Motorölzustand treffen zu können. Darüber hinaus können anhand der Analysen Rückschlüsse auf übermäßigen Verschleiß gezogen werden. Wie in Tabelle 13 ersichtlich werden die Traktoren mit unterschiedlichen Motorölsorten, Wartungs- und Probenahmeintervallen betrieben.

Tabelle 13: Verwendete Motoröle in den Pflanzenöltraktoren und deren Probenahmeintervalle in Betriebsstunden (Bh)

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

Ein Motorölwechsel erfolgt bei den Traktoren, die in einem Intervall von 50 Bh beprobt werden (DE-N, FE-AI, JD-G, JD-K, JD-P, FE-Ka, JD-N), nach Bedarf. Ist das Motoröl laut Analyse nicht mehr in einem betriebsstauglichen 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 14 dargestellt. Die Probenahme erfolgt durch die Öffnung des Ölstandmessstabs oder des Motoröleinfüllstutzens mit einer Handpumpe und einem Schlauch.

Tabelle 14: 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 Rapsölkraftstofflieferungen an die Versuchsbetriebe werden hinsichtlich Gesamtverschmutzung, Säurezahl, Oxidationsstabilität, Wasser-, Schwefel-, Phosphor-, Calcium- und Magnesiumgehalt gemäß DIN 51605 [14] untersucht. Die Proben wurden 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, JD-O und JD-P werden deshalb 1.000 ppm John-Deere-Biodiesel Protect 100 dem Pflanzenölkraftstoff hinzudosiert, hauptsächlich um Ablagerungen im Motor zu vermeiden.

In den Kraftstoff für die Traktoren mit der Deutz Natural Fuel Engine® (DE-N, FE-A, FE-Al) werden 2.500 ppm Deutz-Clean-Diesel InSyPro beigemischt, das zusätzlich zum Reinigungsadditiv auch einen Oxidationsstabilisator enthält.

Die Praxiserprobung nicht rapsölstämmiger Pflanzenölkraftstoffe erfolgt am John-Deere-Traktor 6930 (JD-K) am LVFZ in Kringell mit Sojaöl. Die Qualität wird gemäß DIN SPEC 51623 [15] kontrolliert. Die Beimischung von 1.000 ppm Baynox Plus der Firma Lanxess im ersten Feldtestjahr sollte die Oxidationsstabilität verbessern. Im zweiten Feldtestjahr wurde Baynox Plus nicht eingesetzt.

Bei den pflanzenöлтаuglichen Traktoren FE-K, DE-K, JD-N und FE-Ka werden keine Additive 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 von Prüfstandsbestandteilen entsprechen bei den durchgeführten Emissionsmessungen in vielen Punkten denen der Vorgängerprojekte. Die Versuchsaufbauten sind ausführlich beschrieben in EMBERGER et al. (2013) [23] und THUNEKE et al. (2009) [64]. Abbildung 10 zeigt eine Übersicht des Prüfstands.

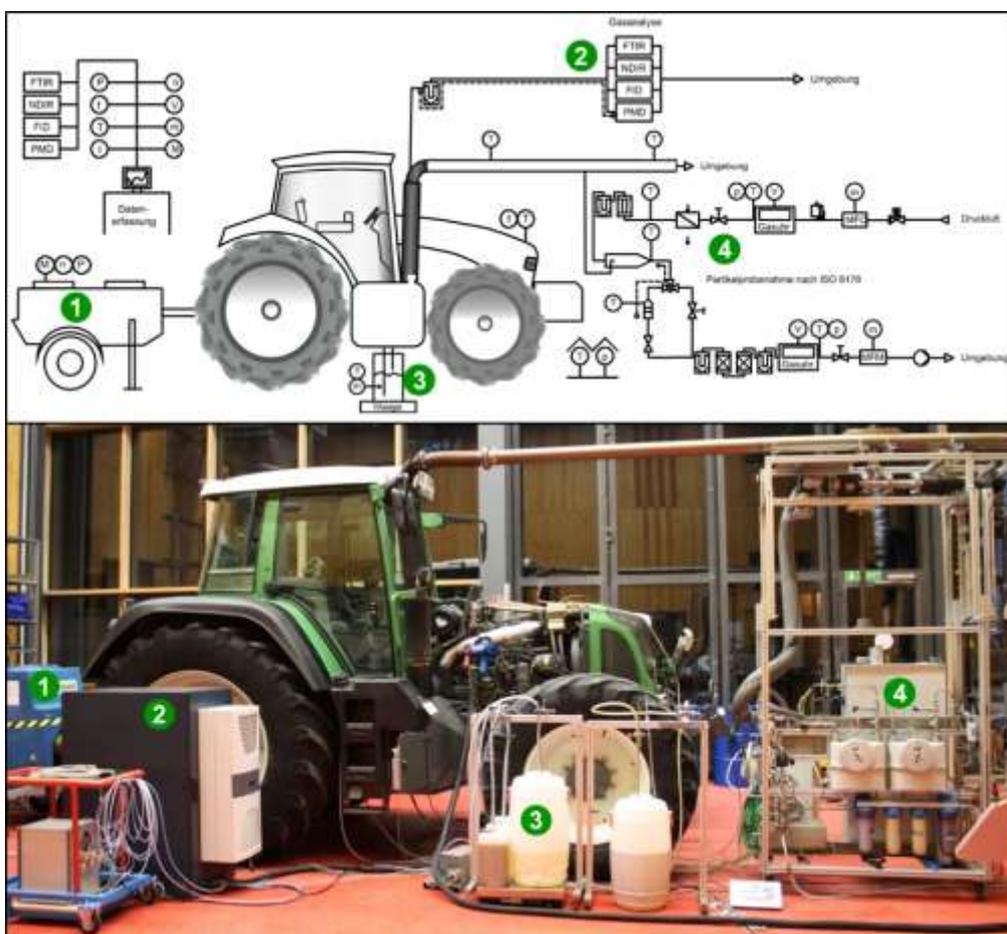


Abbildung 10: Schematischer Aufbau (oben) und Foto (unten) des Traktorenprüfstands mit Wirbelstrombremse (1), Gasanalytoren (2), Kraftstoffverbrauchs- und Drehmomentmessung (3) und Partikelprobenahme (4)

5.3.1 Motorleistungs-, Motordrehzahl- und Verbrauchsmessung

Die Bestimmung der Motorleistung und Motordrehzahl nach Richtlinie 2000/25/EG bzw. ISO 8178 erfolgt an einem Motorenprüfstand direkt an der Kurbelwelle. Dabei ist der Motor nicht im Fahrzeug verbaut [13].

Da bei diesem Vorhaben vor allem die Abgasemissionen von Traktormotoren während des Praxiseinsatzes getestet werden, ist eine Bestimmung der Motorleistung im ausgebauten Zustand weder praktikabel noch beabsichtigt. Daher sind Abweichungen zum Vorgehen im Vergleich zum Typprüfungsverfahren erforderlich.

Am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums wird die Zapfwellenleistung nach OECD Code 2 bestimmt. Nach dieser Richtlinie wird die Zapfwellenleistung nicht hinsichtlich Atmosphärendruck und Umgebungstemperatur korrigiert. Auch nach Richtlinie 2000/25/EG bzw. ISO 8178 ist die unkorrigierte Motorenleistung bei der Auswertung der Ergebnisse heranzuziehen, jedoch werden Bedingungen für die Gültigkeit der Prüfung gestellt. Nach ISO 8178 wird der Faktor f_a (1) zur Überprüfung der Gültigkeit der Umgebungsbedingungen definiert:

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

p_s atmosphärischer Druck in kPa

T_a Umgebungstemperatur in K

Nach ISO 8178 ist eine Prüfung der Abgasemissionen gültig, wenn die Bedingung $0,93 \leq f_a \leq 1,07$ erfüllt wird. Alle Messungen im Rahmen dieses Projekts bewegten 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 Waage (Mettler-Toledo 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 an 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 des Versuchsaufbaus minimiert.

5.3.2 Gasanalysen

Für die Bestimmung der gasförmigen Emissionen wurde ein System bestehend aus einer Kombination von Analysatoren verwendet. Eine Übersicht über die technischen Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile gibt Tabelle 15. Alle Messwerte werden kontinuierlich mit einer Frequenz von einem Hertz erfasst und mithilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW™) aufgezeichnet.

Tabelle 15: 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	Messprinzip/Messverfahren
Messstelle vor AGN		
CO ₂	AO 2020 Fa. ABB	Nicht-Dispersives-Infrarot-Spektroskop (NDIR)
CO	AO 2020 Fa. ABB	Nicht-Dispersives-Infrarot-Spektroskop (NDIR)
NO _x ¹⁾	CLD 822 Mhr Fa. EcoPhysics	Chemolumineszenz-Detektor (CLD)
O ₂	AO 2020 Fa. ABB	Paramagnetischer Detektor (PMD)
HC ²⁾	ThermoFID Fa. M & A GmbH	Flammenionisations-Detektor (FID)
Messstelle nach AGN oder ohne AGN		
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 Richtlinie 97/68/EG bzw. ISO 8178 im verdünnten Abgas erfasst. Bei der Messung nach Richtlinie 97/68/EG, die im Wesentlichen auf der ISO 8178 beruht, wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasstrom entnommen und über ein Übertragungsrohr in den Verdünnungstunnel geleitet. Über die Zufuhr von Verdünnungsluft wird der verdünnte Abgasstrom unmittelbar über dem Filterhalter auf Temperaturen zwischen 42 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 Prüf-

standssoftware 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 einen Mikrofilter (Riegler, FM 33 K, Borosilikat-POM, Filterfeinheit 0,01 µm, Wirkungsgrad 99,999 %) weiter aufbereitet.

Die Partikelabscheidung erfolgt in einem Filtergehäuse durch ein im Abstand von 17 mm hintereinander angeordnetes Filterpaar (Hauptfilter und Nachfilter). Zur Abscheidung dienen teflonbeschichtete Glasfaserfilter (Pall Life Sciences, Emfab™ Filters, TX40HI20WW, 44 mm Durchmesser) mit einem Abscheidegrad von 99,9 % 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 (LabVIEW™) aufgezeichnet.

5.3.4 Partikelanzahlbestimmung (PN)

Die Partikelanzahl wird mit einem Differential Mobility Spectrometer DMS 500 der Firma Cambustion Ltd. gemessen. Bei dem Messgerät handelt es sich um ein „electrical-sensing mobility spectrometer“ [41]. Mit dem Spektrometer kann die Partikelgrößenverteilung von Dieselmotorabgasen gemessen und daraus die Partikelanzahl bestimmt werden. Erfasst werden die für Dieselmotorenabgas relevanten Partikel im Bereich von 5 nm bis 1000 nm. Für diesen Bereich werden Partikelanzahlkonzentrationen $dN/d\log D_p$ für 38 Partikelgrößen ausgegeben. Die Auswertungssoftware des Messgeräts ermöglicht zudem die Unterscheidung von Nukleations- und Akkumulationspartikeln. Eine ausführliche Beschreibung der Funktionsweise findet sich in REAVELL et al. (2002) [52], BISKOS et al. (2005) [4] und SYMONDS et al. (2007) [61]. Im Folgenden erfolgt eine kurze Beschreibung der grundsätzlichen Funktionen des Messgeräts.

Dem Spektrometer ist eine zweistufige Verdünnung vorgeschaltet. In der ersten Stufe wird das Abgas in unmittelbarer Nähe zur Entnahmestelle im Verhältnis 5:1 verdünnt, um primär die Kondensation von Wasserdampf zu vermeiden. Mittels eines Zyklons werden nachfolgend Partikel größer 1 µm abgeschieden. Anschließend wird das verdünnte Abgas über eine überkritisch betriebene Düse geleitet, um einen konstanten Druck von 250 mbar und einen Volumenstrom von $480 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ einzustellen. Dadurch ergibt sich eine weitere Absenkung der Partikelanzahlkonzentration auf ein Niveau von 20:1. Über eine beheizte Leitung wird das Abgas zur zweiten Verdünnungsstufe, einem Rotationsverdünner, geleitet, mit dem Verdünnungsverhältnisse von 12:1 bis 500:1 eingestellt werden können. Bei sehr geringen Partikelanzahlkonzentrationen im Abgas kann diese zweite Verdünnungsstufe im Bedarfsfall über einen Bypass umgangen werden. Abbildung 11 zeigt den schematischen Aufbau des vorgeschalteten Verdünnungssystems.

ne Unterbrechung durch Umsetzen einer Messsonde durchgeführt werden kann. Die beiden Messleitungen werden ausgehend von den Messstellen direkt mit dem DSA verbunden, das wiederum den Probenstrom mit einer zusätzlichen beheizten Verbindungsleitung zum DMS 500 weiterleitet. Zur Ansteuerung der Messkanäle im DSA wird über Magnetventile entweder auf die eine oder andere Messstelle geschaltet. Die Umschaltung wird von der Prüfstandssteuerung automatisch durchgeführt.

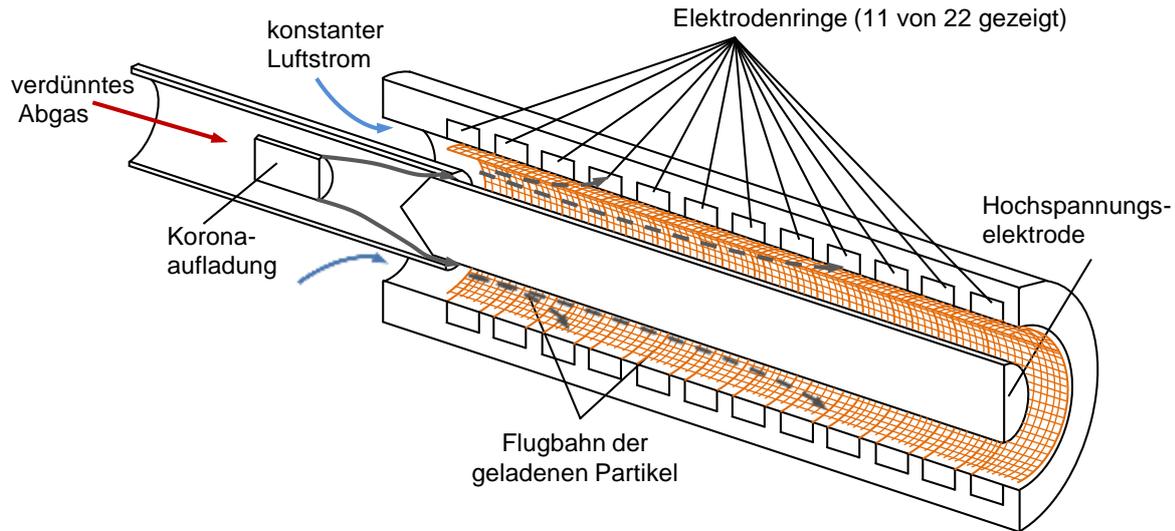


Abbildung 12: Schematischer Aufbau des DMS-500-Partikelgrößen-Klassierers nach Cambustion Ltd. [10]

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen das DMS 500 und DSA im aktiven und messbereiten Zustand. In Abbildung 15 und Abbildung 16 werden die angeschlossenen Messsonden vor und nach Abgasmachbehandlung mit und ohne Wärmeisolierung dargestellt.



Abbildung 13: DMS 500 mit Messleitung

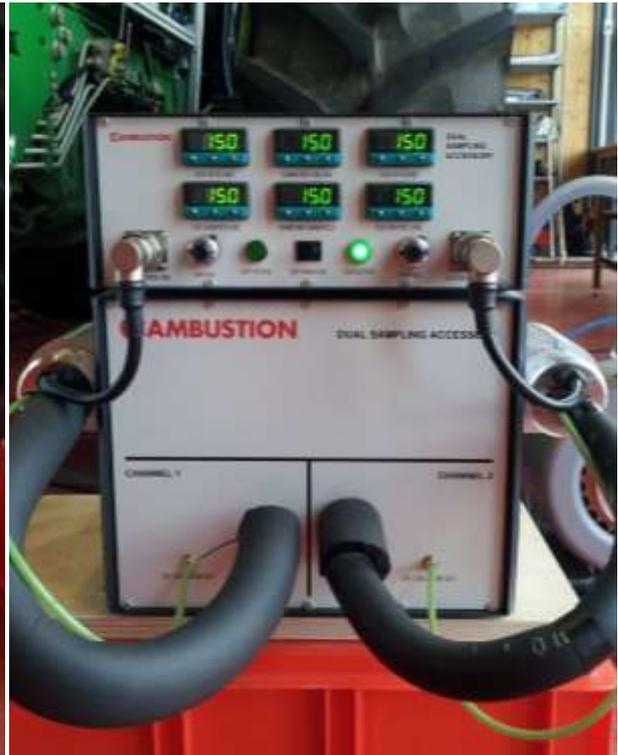


Abbildung 14: DSA mit 2 Messleitungen



Abbildung 15: Sonde vor der Abgasnachbehandlung



Abbildung 16: Sonde nach der Abgasnachbehandlung (isoliert)

Berechnung der spezifischen Partikelanzahl Emissionen

Zur Berechnung der spezifischen Partikelanzahlemissionen werden die Partikelanzahlkonzentrationen der Nukleations- und Akkumulationspartikel in Summe herangezogen. Die spezifischen Partikelanzahlemissionen werden mithilfe dieser Partikelanzahlkonzentrationen nach folgender Gleichung berechnet. Dabei ist zu beachten, dass sämtliche Messwerte zuvor auf Normbedingungen umgerechnet werden.

$$PN_s = \frac{c_N \cdot \dot{m}_{AG}}{\rho_{AG} \cdot P_{ZW}} \quad (2)$$

PN_s	spezifische Partikelanzahl in 1 kWh^{-1}
c_N	Partikelanzahlkonzentration in 1 m^{-3}
\dot{m}_{AG}	Abgasmassenstrom in kg h^{-1}
ρ_{AG}	Abgasdichte in kg m^{-3}
P_{ZW}	Zapfwellenleistung in kW

5.3.5 Prüfzyklen nach ISO 8178

Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Messungen in Anlehnung an ISO 8178-1 unter Verwendung des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 durchgeführt. 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 [38] zu absolvieren, der dem Non-Road-Transient-Cycle (kurz NRTC) gemäß 97/68/EG [28] entspricht. Die Grenzwerte nach 97/68/EG gelten für beide Zyklen gleichermaßen.

5.3.5.1 Stationäre Emissionsmessung

Der Prüfzyklus besteht aus acht Prüfphasen, die in einer festgelegten Reihenfolge einzustellen sind. Bei den ersten vier Prüfphasen wird die vom Hersteller angegebene Nenndrehzahl angefahren und verschiedene Leistungen eingestellt. Für drei weitere 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, 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 16 gibt einen Überblick zu den Vorgaben des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178, in Abbildung 17 sind die Prüfphasen schematisch im Motorenkennfeld eingezeichnet.

Tabelle 16: C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4

Prüfphase	1	2	3	4	5	6	7	8
Drehzahl	Nenn- drehzahl	Nenn- drehzahl	Nenn- drehzahl	Nenn- drehzahl	Zwischen- drehzahl	Zwischen- drehzahl	Zwischen- drehzahl	Leer- lauf
Last	100 %	75 %	50 %	10 %	100 %	75 %	50 %	0 %
Gewich- tungsfaktor	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15

Für die Verweildauer auf der jeweiligen Prüfphase wird nach ISO 8178-4 ein Mindestzeitraum von zehn Minuten angegeben. Bei Emissionsmessungen am Gesamtsystem Traktor reicht dieser Mindestzeitraum allerdings nicht aus, um in allen Prüfphasen ein stabiles Emissionsniveau zu erreichen [22].

Aus diesem Grund wird bei der Durchführung der Messungen eine einheitliche Stabilisierungsphase definiert, bevor mit der Partikelprobenahme (Einzelfiltermethode für jede Prüfphase nach ISO 8178-1) begonnen wird. Die Partikel werden über einen Zeitraum von zehn Minuten pro Prüfphase gesammelt, um die für jede Prüfphase nach ISO 8178-1 empfohlene Filterbelastung zu erreichen.

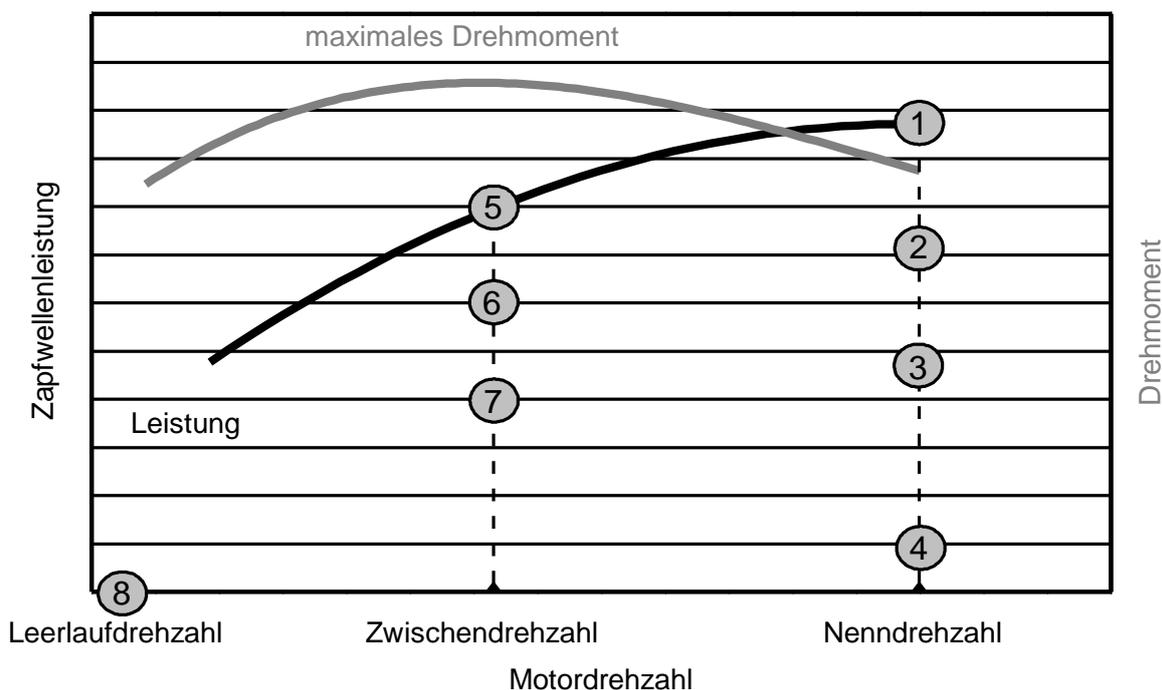


Abbildung 17: Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4

In Tabelle 17 sind für jede Prüfphase die angefahrenen Drehzahlen sowie die Verweildauer auf den einzelnen Prüfphasen vor den Partikelprobenahmen und die Partikelpro-

benahmedauer aufgeführt. Zur Auswertung der gasförmigen Abgasbestandteile werden gemäß den Vorgaben der ISO 8178 die Messwerte der letzten drei Minuten der jeweiligen Prüfphase herangezogen.

Tabelle 17: Eingestellte Drehzahl, Stabilisierungsphase vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren in acht Prüfphasen

Prüfphase	Stabilisierungsphase vor der 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

5.3.5.2 Transiente Emissionsmessung

Beim Non-Road-Transient-Cycle (kurz NRTC) ändern sich Drehzahl- und Drehmomentverhältnisse des Motors sekundlich in unterschiedlichem Ausmaß. Der Prüfzyklus besteht aus einer Kaltstart- und Warmstartphase inklusive einer dazwischenliegenden Abkühlungsphase. Eine Abfolge dieser Phasen entspricht einer Wiederholung. Die einzelnen Phasen dauern jeweils 20 Minuten und werden in der Auswertung unterschiedlich gewichtet, wie in Tabelle 18 ersichtlich ist.

Tabelle 18: Prüfphasen nach ISO 8178-11 und 97/68/EG

Prüfphase	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 konditioniert werden. Die Temperatur des Motoröls, des Kühlmittels und der Abgasnachbehandlung muss für 15 Minuten konstant zwischen 20 und 30 °C betragen. Wird der Motor gestartet, beginnt eine 20 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.

Bei der Berechnung des Zyklusergebnisses werden die Emissionen im Kaltstart zu 10 % und im Warmstart zu 90 % gewichtet. Das gewichtete Ergebnis der limitierten Abgas-komponenten kann wie beim C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 mit den gesetzlichen Grenzwerten verglichen werden.

Die Typgenehmigungsprüfung erfolgt üblicherweise am ausgebauten Motor am Moto-renprüfstand. Der NRTC basiert größtenteils auf hochtransienten Baumaschinenarbei-ten. Aufgrund schneller Drehzahl und Lastwechsel ist dieser Zyklus am eingebauten Traktormotor ohne Anpassungen nicht anwendbar. Dies bedeutet damit auch, dass der Prüfzyklus zur Typenzulassung von Traktormotoren zumindest phasenweise nur unzu-reichend das tatsächliche Einsatzprofil eines Traktors widerspiegelt. Die größte Heraus-forderung stellen hohe Trägheitsmomente dar, die bei schnellen Drehmoment- oder Drehzahlvariationen an der Zapfwelle überwunden werden müssen. Diese Trägheits-momente werden durch die Nebenaggregate und das Getriebe sowie je nach Bauart auch von der Wirbelstrombremse verursacht. Aus diesem Grund ist eine Anpassung nö-tig, um den Zyklus auch an Traktoren anwenden zu können. LANDIS (2012) [43] be-schreibt eine Methode, die einen Betrieb am Traktorenprüfstand ermöglicht. Dabei wer-den die Drehzahl- und Drehmomentvorgaben des NRTC alle 10 Sekunden gemittelt. Durch diese Glättung bleibt die mittlere Zyklusarbeit unverändert, jedoch ist die Dynamik reduziert. In Abbildung 18 werden der NRTC und die modifizierte Version (10s NRTC) dargestellt. Die sonstige Durchführung und Auswertung erfolgt gemäß der Richtlinie ISO 8178-11.

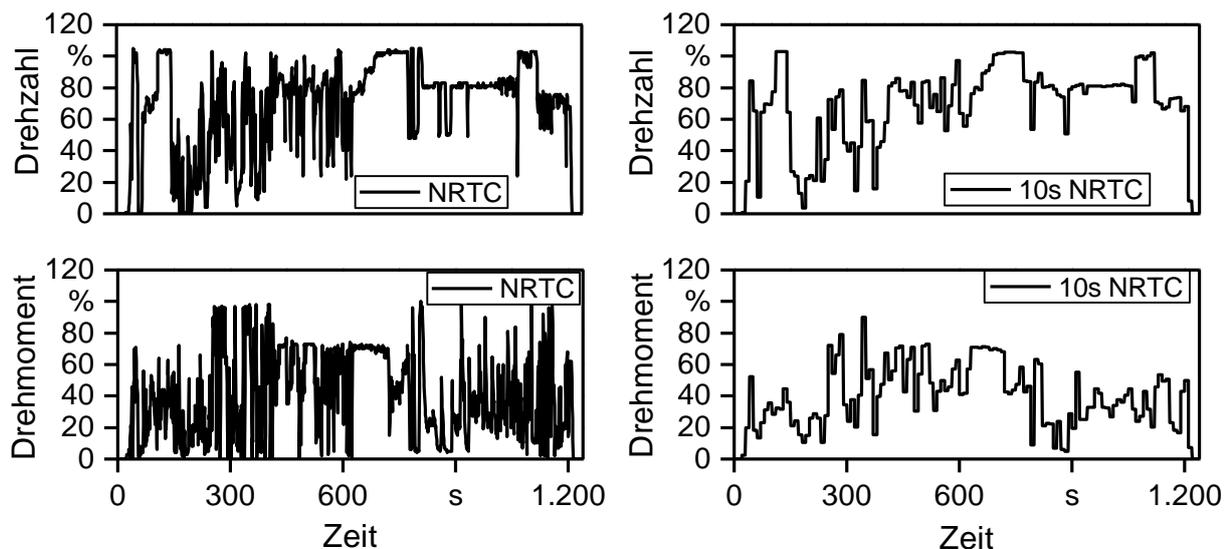


Abbildung 18: Verlauf von Drehzahl (oben) und Drehmoment (unten) im NRTC nach ISO 8178-11(links) und dem „10s NRTC“ für den Traktorenprüfstand (rechts)

Aufgrund der längeren Verweildauer von 10 s auf den gemittelten Betriebspunkten ist eine manuelle Steuerung beim Wechsel von Drehzahl und Drehmoment möglich: Dabei wird die Drehzahl über die Gaspedalstellung (meist am Handgas) des Traktors sowie das Drehmoment über das Potentiometer der Bremse durch zwei Personen manuell eingestellt. Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Einstellung sind gut. Die Drehzahl- und Drehmomentverläufe sind aufgrund der verschiedenen Ansprechzeiten der Wirbelstrombremse und des Drehzahlreglers des Motors um wenige Sekunden versetzt.

Für eine schnellere und genauere Einstellung der Betriebspunkte wird die Ansteuerung von Drehzahl und Drehmoment automatisiert. So erfolgt die Einstellung des Gaspedals mittels eines elektrischen Stellzylinders und das Drehmoment wird durch eine Vorgabe des Erregerstroms der Wirbelstrombremse bestimmt. Die beiden Stellgrößen werden mit der Prüfstandssoftware sekundlich vorgegeben. Damit können die Betriebspunkte schneller und präziser angesteuert werden und es sind zukünftig auch kürzere Zeiten zwischen einem Betriebspunktwechsel realisierbar. Die teils betriebspunktspezifischen Abweichungen der Messwerte von den Sollwerten können dank der automatisierten Ansteuerung durch korrigierte Vorgabewerte in wenigen Iterationen minimiert werden.

5.3.6 Versuchskraftstoffe

Am Traktorenprüfstand werden im Rahmen des Vorhabens Rapsöl-, Sojaöl- und Dieselmotorkraftstoff eingesetzt.

Die Eigenschaften der verwendeten Rapsölkraftstoffe (ohne Additive) sind in Tabelle 19 aufgelistet. Die Charge RK I wurde bei den Leistungs- und Emissionsmessungen bei den Traktoren DE-K (4.460 Bh), JD-K (2.326 Bh), JD-G (2.005 Bh), NH-W und FE-Ka (50 Bh) eingesetzt. Mit Ausnahme der Oxidationsstabilität und des Gehalts an Calcium werden

die Anforderungen der DIN 51605 eingehalten. Die Oxidationsstabilität in Höhe von 5,9 h unterschreitet den Grenzwert von 6,0 h nur geringfügig, liegt aber noch deutlich über dem Ablehnungsgrenzwert von 4,9 h, bei dem die Präzision des Prüfverfahrens berücksichtigt wird. Der Gehalt an Calcium in Höhe von 2,1 mg/kg überschreitet den seit 01.01.2012 gültigen Grenzwert von 1,0 mg/kg. Die Vergleichbarkeit des Prüfverfahrens DIN 51627-6 betrug im Ringversuch 2012 bei der Probe A 0,3 mg/kg und bei einer zweiten Probe B 1,5 mg/kg. Ablehnungsgrenzwerte wurden bisher noch nicht veröffentlicht. Aufgrund der geringfügigen Abweichungen von der Normqualität ist mit keinem Einfluss auf die Prüfstandsergebnisse zu rechnen.

Tabelle 19: Kenngrößen des Rapsölkraftstoffs der Chargen RK I, RK II und RK III für Messungen am Traktorenprüfstand

Kenngröße	Methode	RK I	RK II	RK III	Einheit
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	920,6	919,8	920,4	kg/m ³
Flammpunkt (Pensky-Martens)	DIN EN ISO 2719	> 101	> 101	> 101	°C
Kinematische Viskosität (40 °C)	DIN EN ISO 3104	34,5	34,6	34,5	mm ² /s
Heizwert	DIN 51 900-2	37,7	36,7	37,4	MJ/kg
Zündwilligkeit (Abgeleitete Cetanzahl)	DIN EN 15195	49,9	45,8	40,7	–
Iodzahl	DIN EN 14111	114	111	114	g Iod/100g
Gesamtverschmutzung	DIN EN 12662	10	11	5	mg/kg
Säurezahl	DIN EN 14104	0,15	0,41	0,50	mg KOH/g
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112	5,9	7,2	6,9	h
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	341	529	515	mg/kg
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	2,3	< 1	< 2	mg/kg
Phosphorgehalt	DIN 51627-6	1,7	0,5	< 3	mg/kg
Calciumgehalt	DIN 51627-6	2,1	0,7	< 1	mg/kg
Magnesiumgehalt	DIN 51627-6	< 0,5	0,1	< 1	mg/kg

Die Charge RK II erfüllt die Anforderungen nach DIN 51605 und wurde bisher in den Traktoren FE-K (6089 Bh) und FE-Ka (250 Bh) eingesetzt.

Die Emissions- und Leistungsmessungen an den Traktoren JD-N (855 und 1110 Bh) und FE-Ka (520 Bh) wurden mit der Charge RK III durchgeführt.

Am Traktor JD-K erfolgten die Leistungs- und Emissionsmessungen bei ca. 2335 und 2920 Bh mit Sojaölkraftstoff nach DIN SPEC 51623. Die Eigenschaften des verwendeten Sojaölkraftstoffs sind in Tabelle 20 aufgelistet.

Tabelle 20: Kenngrößen des Sojaölkraftstoffs für Messungen am Traktorenprüfstand

Kenngröße	Methode	Sojaölkraftstoff	Einheit
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	923,5	kg/m ³
Flammpunkt (Pensky-Martens)	DIN EN ISO 2719	266	°C
Kinematische Viskosität (40 °C)	DIN EN ISO 3104	23,4	mm ² /s
Heizwert	DIN 51 900-2	37,0	MJ/kg
Zündwilligkeit (Abgeleitete Cetanzahl)	DIN EN 15195	40,6	–
Iodzahl	DIN EN 14111	128	g Iod/100g
Gehalt an Linolensäure	DIN EN 14104	6	
Gesamtverschmutzung	DIN EN 12662	7	mg/kg
Säurezahl	DIN EN 14104	0,037	mg KOH/g
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112	6,2	h
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	344	mg/kg
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	< 1,0	mg/kg
Phosphorgehalt	DIN 51627-6	1,3	mg/kg
Calciumgehalt	DIN 51627-6	< 0,1	mg/kg
Magnesiumgehalt	DIN 51627-6	0,1	mg/kg

Der verwendete Referenzdieselmotorkraftstoff mit der Qualität CEC RF 06 03 genügt den Anforderungen nach 97/68/EG für Typgenehmigungen für Motoren der Abgasstufen IIIB und IV.

5.4 Variation von Motorparametern

Die Variation von Motorparametern wurde am Pflanzenöltraktor John Deere 6125R (JD-N) mit der Abgasstufe IIIB am Traktorenprüfstand des TFZ in Zusammenarbeit mit dem John Deere ETIC (European Technology Innovation Center) durchgeführt.

Die Ausgangskonfiguration der Motorsteuerungssoftware ist nicht auf den Pflanzenölbetrieb optimiert worden und entspricht den serienmäßigen Einstellungen für Dieselmotorkraftstoff. Die Parameter für den Einspritzzeitpunkt, der Einspritzdruck sowie die Abgasrückführrate wurden in der Motorsteuerung stufenweise variiert und der Effekt auf die Abgasemissionen und den Kraftstoffverbrauch ermittelt. Die Variation der Motorparameter bezieht sich auf die Haupteinspritzung. Vor- und Nacheinspritzungen wurden nicht modi-

fiziert. Tabelle 21 zeigt die zwei für die Untersuchung ausgewählten Prüfphasen 6 und 4 in Anlehnung an ISO 8178-4 mit hoher und niedriger Last (P6S und P4S) und die vorgenommenen Abstufungen. Die einzelnen Abstufungen werden ausgehend von der Standardkonfiguration (mit „0“ gekennzeichnet) durchgeführt. Die Variation enthält zudem keine Kombinationen, d. h., es weicht immer nur ein Parameter von der Standardkonfiguration „0“ ab. Die Messungen in der Prüfphase 4 fanden in zwei Kennfeldvarianten (P4S und P4W) statt, um verschiedene Grundeinstellungen desselben Betriebspunkts betrachten zu können: Neben den Standardeinstellungen (P4S) wurde eine alternative Kennfeldkonfiguration (P4W) ausgewählt, die höhere Abgastemperaturen zur Anwärmung des Motors und der Abgasnachbehandlung erzeugt und sich deutlich von der regulären Konfiguration unterscheidet.

Tabelle 21: Prüfphasen, Betriebsmodi, Parameter und Abstufungen der Variation im Rapsölbetrieb

Motoreinstellungen	P6S	P4S	P4W
<u>Betriebspunkt und Kennfeld</u>			
Prüfphase ISO 8178-4	6	4	4
Drehzahl in min ⁻¹	1.575	2.100	2.100
Last in %	75	10	10
Kennfeldeinstellungen	S Standard	S Standard	W Anwärmen des Motors und der Abgasnachbehandlung
<u>Parameter</u>			
	<u>Abstufung der Parameter</u>		
Δ Einspritzzeitpunkt in °KW ¹⁾	-4 / -2 / 0 / 2 / 4	-4 / 0 / 4	-6 / -4 / -2 / 0 / 2
Δ Abgasrückführrate in %	-8 / -4 / 0 / 4 / 8	-16 / -8 / 0	0 / 5 / 10 / 15 / 20
Δ Einspritzdruck in 100 bar	-2 / -1 / 0 / 1 / 2	-2 / 0 / 2	-2 / -1 / 0 / 1 / 2

¹⁾ °KW = Grad Kurbelwelle

Rußpartikelfilter und Oxidationskatalysator wurden demontiert und der Traktor während der Versuche ohne Abgasnachbehandlung betrieben, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu eliminieren. Die Rohemissionen wurden hinsichtlich limitierter Abgaskomponenten (NO_x, HC, CO und PM) sowie Partikelanzahl (PN) untersucht.

Als Versuchskraftstoff diente Rapsöl nach DIN 51605. Die untersuchten Qualitätsparameter sind in Abschnitt 5.3.6 bei Charge RK III zu finden.

Änderungsrichtung und -intensität der Emissionen und des Verbrauchs werden mithilfe von Pfeilen veranschaulicht. Tabelle 22 zeigt die Zuordnung der Resultate in die Kategorien „steigt stark“ bis „sinkt stark“ für die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch. Ist kein eindeutiger Trend über mehrere Abstufungen erkennbar, wird dies mit einem Strich gekennzeichnet. Für Angaben aus der Literatur für Dieselkraftoff sind keine Abgrenzungen für die Kategorien definiert.

Tabelle 22: Einordnung der Ergebnisse der Parametervariation in Kategorien

Symbol	Bedeutung	Δ Emissionen (ΔE) Änderung im Vergleich zur Standardkonfiguration „0“	Δ Verbrauch (Δb_e) Änderung im Vergleich zur Standardkonfiguration „0“
	steigt stark	$\Delta E > 15 \%$	$\Delta b_e > 2 \%$
	steigt	$15 \% \geq \Delta E > 2 \%$	$2 \% \geq \Delta b_e > 1 \%$
	gleichbleibend	$2 \% \geq \Delta E > -2 \%$	$1 \% \geq \Delta b_e > -1 \%$
	sinkt	$-2 \% \geq \Delta E \geq -15 \%$	$-1 \% \geq \Delta b_e \geq -2 \%$
	sinkt stark	$\Delta E < -15 \%$	$\Delta b_e < -2 \%$
	nicht eindeutig	kein eindeutiger Trend mehrerer Abstufungen	kein eindeutiger Trend mehrerer Abstufungen

5.5 Motorbegutachtung

Die Motorbegutachtungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Firma regineering GmbH Denkendorf (www.regineering.de). Die Ergebnisdarstellung beruht im Wesentlichen auf den Berichten der Firma regineering GmbH, ergänzt um eigene Abbildungen und Einschätzungen.

Die Untersuchungen erfolgten am Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K) bei 4.460 Bh und an zwei John Deere 6930 (JD-G, JD-K) bei 2.821 und 3.454 Bh. Am Traktor John Deere 7830 (JD7-G) wurden bei 1.183 Bh die Injektoren getauscht und dabei die Injektorspitzen fotografiert. In Tabelle 23 sind die durchgeführten Maßnahmen aufgelistet.

Benennung der Bauteile und Nummerierung

Die Zylinderzählweise erfolgt längs des Reihenmotors beginnend mit dem Zylinder 1 an der Frontseite des Traktors bis Zylinder 6 nahe der Traktorkabine. Analog wurden alle Bauteile ihrem Zylinder zugehörig mit 1 bis 6 nummeriert. Aufgrund der Drehrichtung der Kurbelwelle befindet sich die Druckseite (DS) der Motorzylinder rechts und die Gegen-druckseite (GDS) links in Fahrtrichtung, entsprechend sind die Bezeichnungen von Kolben und Zylinderwänden gewählt.

Tabelle 23: Durchgeführte Maßnahmen bei den Befundungen der Traktoren DE-K, JD-G, JD-K und JD-7G

Maßnahme	DE-K	JD-G	JD-K	JD7-G
<u>Allgemeinzustand und Verschleiß</u>				
Laufzeit des Traktormotors (Bh)	4.460	2.821	3.454	1.183
Zylinderwand und Honriefen	✓	✓	✓	–
Kolbenboden	✓	✓	✓	–
Zylinderkopf	–	–	–	–
Ventile und Ventilsitze	✓	✓	✓	–
Ein- und Auslasskanäle (EL, AL)	✓	✓	✓	–
Abgasrückführung (AGR)	–	✓	✓	–
Abgasturbolader	✓	✓	✓	–
REM-EDX-Analyse	✓	–	–	–
Auslesen des Steuergeräts	–	–	✓	–
Endoskopie der Abgasnachbehandlung	–	✓	–	–
<u>Injektoren bzw. Einspritzdüsen</u>				
Fotodokumentation der Düsenspitzen	✓	✓	✓	✓
Durchflussmessung an den Injektoren	✓	✓	✓	–
Mengenkennfeld für zwei Einspritzdrücke	–	✓	–	–
Vergleich mit neuen Injektor (Referenzinjektor)	–	✓	✓	–
Auflichtmikroskopie der Düsen	✓	–	–	–

✓ Maßnahme durchgeführt – Maßnahme nicht durchgeführt

Allgemeinzustand und Verschleiß

Der Fokus wurde auf die Ablagerungsbildung durch den Einsatz von Pflanzenölkraftstoffen im Brennraum sowie Peripheriebauteilen gerichtet. Dies betrifft sowohl das Auftreten, das Erscheinungsbild als auch die Art der Ablagerungen. Die Bauteile wurden optisch begutachtet und der Allgemeinzustand zum Zeitpunkt der Demontage dokumentiert.

Am Traktor DE-K wurden selektiv am 1. und 5. Zylinder Proben für eine REM-EDX-Analyse entnommen, um die Zusammensetzung der Ablagerungen zu untersuchen.

Das Auslesen und Prüfen des Motorsteuergeräts am Traktor JD-K erfolgte mithilfe des Programms John Deere Service Advisor. Die Prüfung auf Fehlzündungen ist im kalten und warmen Zustand durchgeführt worden.

Injektoren bzw. Einspritzdüsen

Die Injektoren wurden mit dem Prüfgerät Bosch EPS 200 geprüft. Die fördermengenbasierte Injektorüberprüfung umfasst die Prüfung des Öffnungsdrucks, der Kombinationsdichtheit (innere Leckagen), Sitzdichtheit und Schnarrprüfung. Ferner ist das Strahlbild ersichtlich. Zu beachten ist, dass das bei der Düsenprüfung verwendete Prüfmedium eine reinigende Spülwirkung haben kann. Aufgrund der kurzen Einwirkzeit sowie der geringen Prüfdrücke kann die Reinigungswirkung auf die Düsen erfahrungsgemäß jedoch vernachlässigt werden.

Bei den am Traktor DE-K verwendeten Injektoren handelt es sich um Düsenhalterkombinationen (DHK). Die DHK wurden demontiert, um die Düsennadeln sowie Düsenkörper mittels Auflichtmikroskopie sowie REM-EDX-Analyse eingehender zu untersuchen.

Für die hydraulische Vermessung der Traktoren JD-G und JD-K wurden verschiedene Betriebspunkte des Injektors eingestellt. Es wurden ein Volllastpunkt mit 880 μ s Ansteuerdauer und 160 MPa Injektor-Einspritzdruck, ein Teillastpunkt (850 μ s, 25 MPa) sowie eine Voreinspritzung (360 μ s, 80 MPa) geprüft.

Eine zusätzliche Untersuchung wurde mit den beiden ausgewählten Injektoren 3 und 5 des JD-G durchgeführt und die Ergebnisse einem neuen Referenzinjektor übereinstimmender Bauart gegenübergestellt. Für diese drei Injektoren wurden Mengenkennfelder bei 90 MPa und 160 MPa Einspritzdruck sowie 200, 400, 600, 800, 1.000, 1.500, 2.000, 2.500 und 3.000 μ s Ansteuerdauer erstellt.

6 Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungen an den Pflanzenöltraktoren fanden im Praxiseinsatz auf den Versuchsgütern und am TFZ-Traktorenprüfstand vom 1. Juli 2012 bis 31. März 2015 statt.

6.1 Feldtest

In den folgenden Abschnitten werden die Einsatzbedingungen und die Qualität von Motoröl und Kraftstoff der Traktoren aufgezeigt. Ferner erfolgt eine Darstellung von Störungen und Reparaturen.

6.1.1 Einsatzbedingungen

6.1.1.1 Betriebsstunden

Abbildung 19 zeigt die geleisteten Betriebsstunden der Traktoren in den Jahren 2013 und 2014 sowie die Gesamtlaufzeit. Üblicherweise werden Standardtraktoren mit einer Nutzungsdauer von zwölf Jahren und einer jährlichen Abschreibungsschwelle von 833 Bh veranschlagt [42]. Daraus errechnet sich eine theoretische Lebensdauer von ca. 10.000 Bh. Auf Grundlage dieser Lebensdauer haben die Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe I und II 65 % bzw. 47 %, die der Abgasstufe IIIA zwischen 7 % und 41 % und die Traktoren der Abgasstufe IIIB 5 % bis 11 % ihrer theoretischen Lebensdauer erreicht.

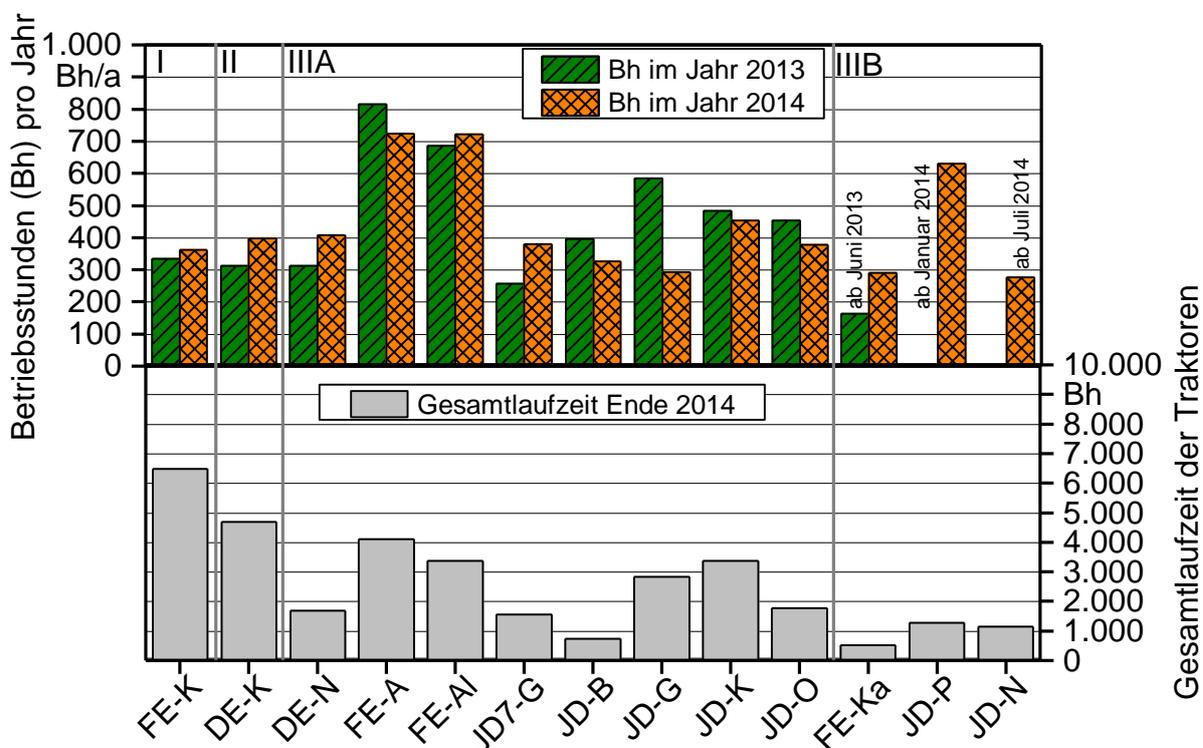


Abbildung 19: Betriebsstunden der Rapsöltraktoren der Abgasstufen I bis IIIB in den Feldtestjahren 2013 und 2014 sowie Gesamtlaufzeit der Traktoren

Im Mittel absolvierten die Traktoren in beiden Feldtestjahren 407 Bh im Jahr 2013 und 437 Bh im Jahr 2014. Das Spektrum der jährlichen Einsatzdauer von rund 210 bis 820 Bh je Traktor ist groß, aber durchaus praxisüblich. Der Traktor FE-Ka mit der geringsten Auslastung startete den Feldtest erst Mitte des Jahres 2013 direkt nach der Umrüstung. Die beiden Fendt 820 Vario^{greentec} weisen mit über 800 (FE-A) und 700 Bh (FE-AI) die höchsten jährlichen Einsatzzeiten auf.

Für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff ist die jährliche Einsatzzeit zu beachten. Je höher der Kraftstoffbedarf pro Jahr desto kürzer die Amortisationszeit bei höheren Dieselskosten im Vergleich zu den Rapsölkosten. Die jährliche Einsatzzeit hat somit direkte Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit.

Ergänzend zu den Aufzeichnungen im Betriebstagebuch wurde der Pflanzenöltraktor Fendt 718 SCR mit einer elektronischen Betriebsdatenerfassung ausgestattet. Die Aufzeichnungen wurden im Feldtestjahr 2014 durchgeführt und umfassen knapp 291 Bh.

In Abbildung 20 ist die Verteilung des Drehzahl- und Lastsignals aus dem CAN-Bus im Feldtestjahr 2014 dargestellt. Überwiegend wurde der Traktor bei hoher Last z. B. beim Pflügen oder Grubbern eingesetzt. 45 % aller Werte des Lastsignals liegen zu über 80 % in einem Motordrehzahlbereich überwiegend zwischen 1.600 und 1.900 min^{-1} . EMBERGER et al. (2013) [24] ermittelten eine ähnliche Drehzahl- und Lastverteilung eines Abgasstufe-III A-Pflanzenöltraktors. Parallelen ergeben sich insbesondere bei hoher Last. Rund 44 % aller Messwerte bewegten sich dabei bei über 75 % Motorauslastung und damit in einem ähnlichen Bereich wie beim Traktor FE-Ka. Ebenso konzentrieren sich diese Messwerte unter hoher Last im Drehzahlbereich von 1.800 bis 1.900 min^{-1} . Im stationären Prüfzyklus nach Richtlinie ISO 8178-C1 (NRSC) wird dieser Bereich allerdings nicht berücksichtigt.

Rüst- und Wegezeiten bei den Traktorarbeiten des Pflanzenöltraktors FE-Ka führen zu einem Niedriglastanteil von 33 % (bei einem Lastsignal unter 40 %).

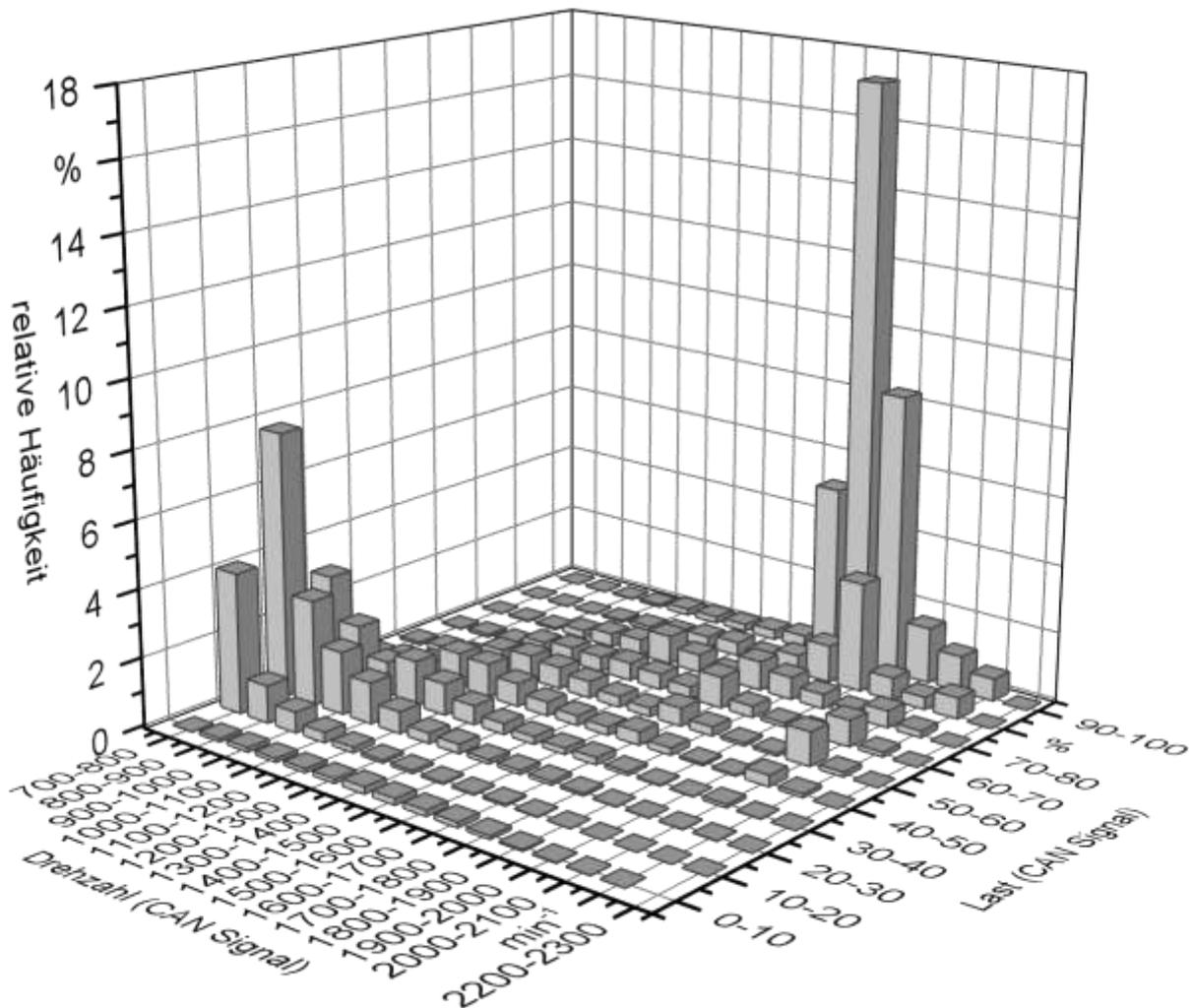


Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung des Drehzahl- und Lastsignals aus dem CAN-Bus des Pflanzenöltraktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) im Feldtestjahr 2014 (Anzahl Datenpunkte $n = 1.812.984$)

Abbildung 21 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Kühlwassertemperatur. Die überwiegende Zeit (86 %) wird der Motor bei Kühlwassertemperaturen zwischen 83 und 87 °C betrieben. Anwärm- und Abkühlphasen, in denen das Kühlwasser nicht über den Kühler geleitet wird, sind vergleichsweise selten. Der Traktor besitzt ein Zwei-Tank-System, das temperaturabhängig Diesel als Hilfskraftstoff verwendet. Ab einer Kühlmitteltemperatur von 70 °C sorgt ein Thermoventil im Kühlwasserkreislauf für die automatische Umstellung in den Rapsölbetrieb. Dieses Kriterium war zu 89 % der Gesamteinsatzdauer erfüllt.

Die Einsatzdauer des Traktors FE-Ka beträgt im Mittel ca. 35 Minuten. Längere Einsatzfahrten von über drei Stunden wurden 32 Mal durchgeführt und machten rund 60 % der gesamten Einsatzzeit aus. 306 Mal wurde der Traktor für Kurzeinsätze verwendet, die weniger als 10 Minuten andauerten und rund 4 % der Einsatzzeit betragen. EMBERGER et al. (2013) [24] ermittelten einen ähnlichen Anteil von 3 bzw. 5 % bei zwei Traktoren. RATHBAUER et al. (2008) [51] stellten in ihrer Untersuchung mit 7 % einen etwas höheren Anteil an Kurzeinsätzen fest. Der Solldruck des Niederdruckkraftstoffsystems von 6 bar

vor der Hochdruckpumpe war im Feldtestjahr 2014 zu ca. 25 % der Einsatzzeit gegeben, wie in Abbildung 22 dargestellt ist. Druckschwankungen von $\pm 0,6$ bar verursachten keine Störungen im Feldtestjahr 2014. Im Feldtest 2013 bewirkten auf Undichtigkeiten im Niederdruckkraftstoffsystem zurückzuführende Druckschwankungen vereinzelt Fehlermeldungen (siehe Abschnitt 6.1.4).

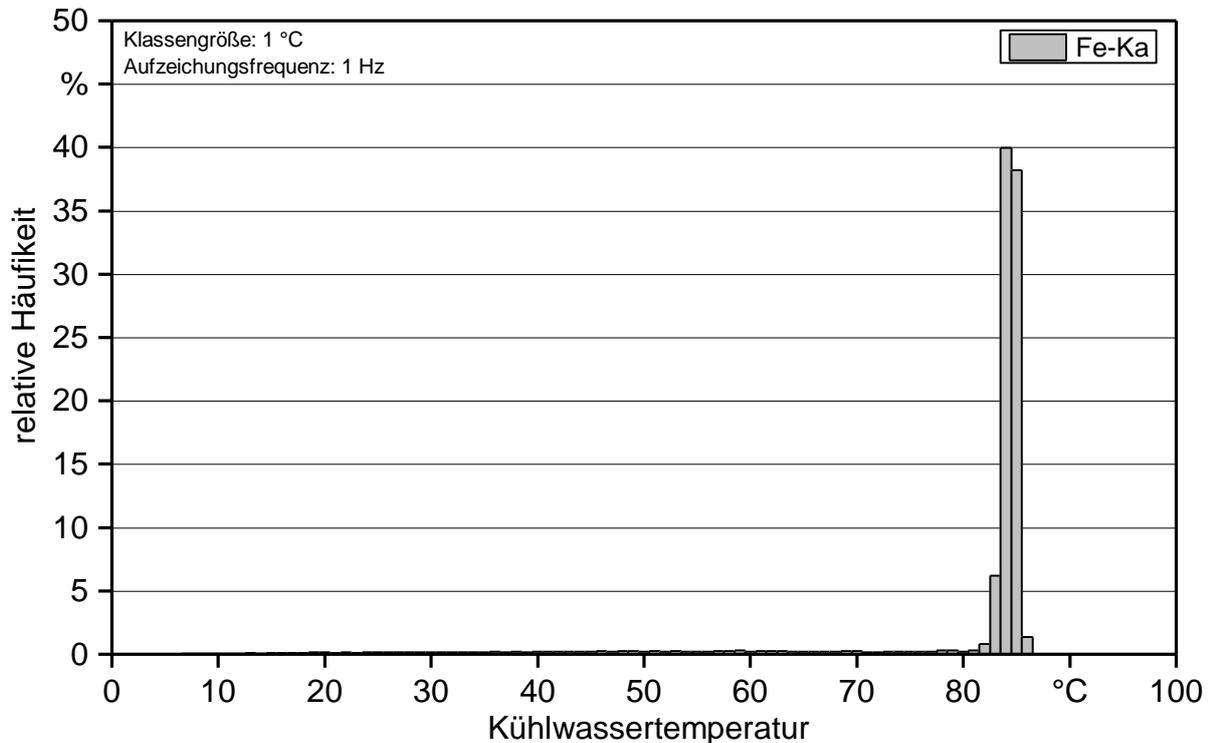


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der Kühlwassertemperatur gemäß den CAN-Bus-Daten des Pflanzenöltraktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) im Feldtestjahr 2014 ($n = 1.812.984$)

Abbildung 23 zeigt, dass der Pflanzenöltraktor FE-Ka bei Umgebungstemperaturen von -3 bis 34 °C betrieben wurde. Dabei gab es weder beim Startvorgang bei niedrigen Temperaturen (siehe Abschnitt 6.1.1.5) noch mit einer zu hohen Kraftstoff- oder Kühlwassertemperatur in den Sommermonaten Probleme. Über knapp die Hälfte der Arbeitszeit (ca. 51 %) betragen die Umgebungstemperaturen zwischen 20 und 30 °C. Dies entspricht in etwa dem gültigen Temperaturfenster bei Prüfstandsmessungen nach OECD Code 2 und ISO 8178. Rund ein Drittel der Einsatzzeit entfallen auf Umgebungstemperaturen zwischen 10 und 20 °C.

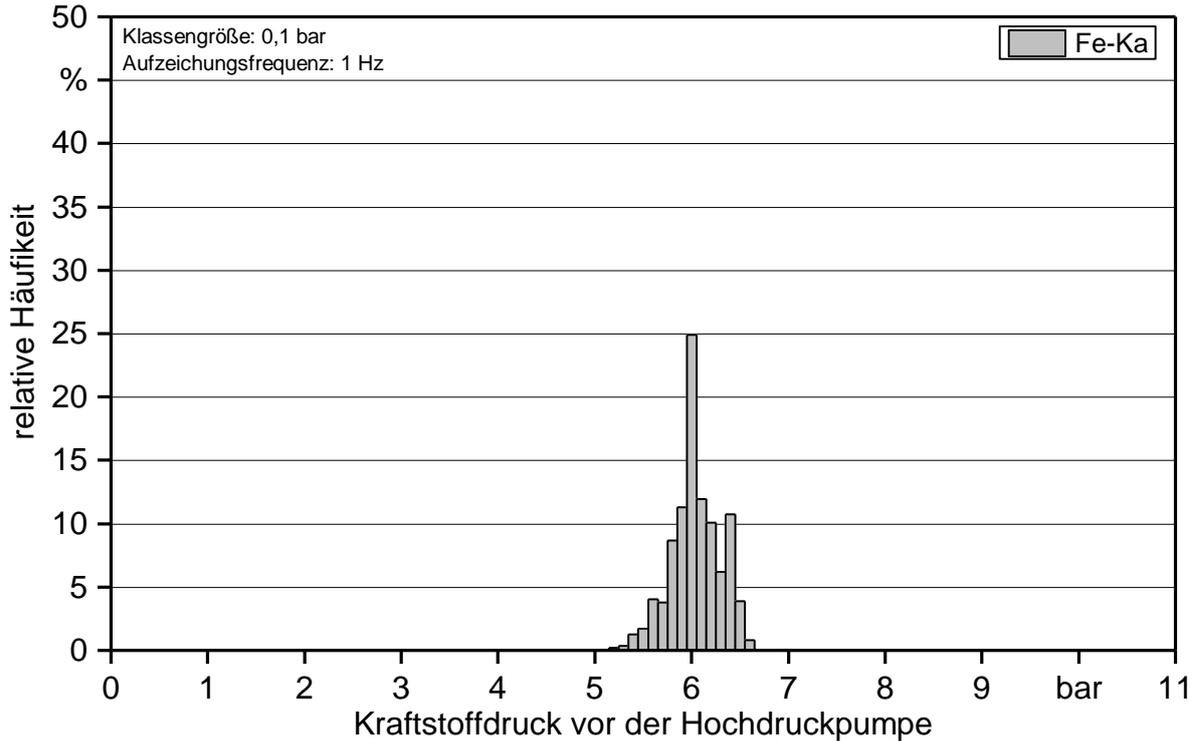


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung des Kraftstoffdrucks vor der Hochdruckpumpe gemäß den CAN-Bus-Daten des Pflanzenöltraktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) im Feldtestjahr 2014 ($n = 1.812.984$)

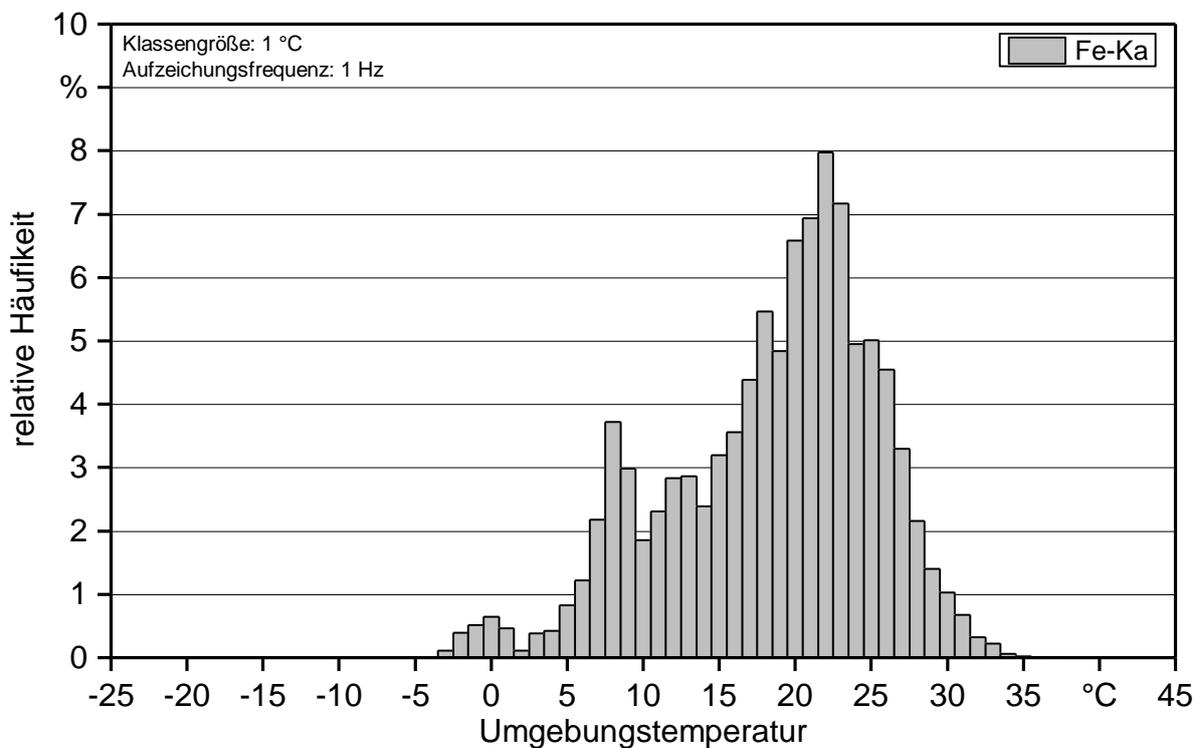


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Umgebungstemperatur gemäß den CAN-Bus-Daten des Pflanzenöltraktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) im Feldtestjahr 2014 ($n = 1.812.984$)

6.1.1.2 Durchgeführte Arbeiten

Fast alle Traktoren werden überwiegend zum Transport oder zur Bodenbearbeitung und Bodenbestellung eingesetzt. Der Traktor FE-K hingegen bildet mit einem hohen Anteil an Arbeiten mit Frontlader, Schwader und Wender und kaum Bodenbearbeitungsanteil eine Ausnahme. Die Verteilung der Arbeiten ist aus Abbildung 24 ersichtlich. Die Traktoren werden meist auf der Straße und bei Feldarbeiten mit hohem Zugleistungsbedarf eingesetzt. Anwendungen mit hohen Anteilen an Zapfwellenarbeit werden weniger häufig durchgeführt.

Pflügen und Grubbern haben mit durchschnittlich 18 % und 12 % ebenso einen hohen Anteil aller durchgeführten Arbeiten. Nur bei den Traktoren FE-K, DE-K, FE-AI, JD-K und JD-O liegt der Anteil von Grubbern und Pflügen unter 30 %. Hierbei handelt es sich um reine Zugarbeiten, die bei überwiegend stationärer Drehzahl und hoher Last durchgeführt werden. Geringe dynamische Lastphasen sind nur im Vorgewende und bei stark wechselnden Bodenbeschaffenheiten zu erwarten.

Der Anteil von Arbeiten, die eine hohe Leistungsabgabe über die Zapfwelle erfordern, ist mit 11 % vergleichsweise gering. Dazu zählen Mähen, Schwaden, Wenden, Saatbettbereitung mit der Kreiselegge und Ballen pressen. Im Mittel über alle dokumentierten Arbeiten sind der Straßentransport mit 24 % und die Gülleausbringung mit rund 15 % am häufigsten. Bei den Traktoren DE-K, FE-AI, JD-G, JD-K und JD-P haben diese beiden Arbeiten gemeinsam einen Anteil von über 40 %. Unterschiedliche Anhängelasten, Streckenführung sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge lassen auf einen häufigen Wechsel zwischen dynamischer und stationärer Motorbelastung schließen.

Aufgrund der durchschnittlichen Motorleistung der Traktorenflotte von über 130 kW und des hohen Anteils an Marktfrüchten der Versuchsbetriebe werden weitere Arbeiten, wie Eggen, Säen, Futterbereitstellung und Pflege, insgesamt nur zu ca. 19 % ausgeführt. Pflegearbeiten werden auf den Versuchsbetrieben meist mit weniger leistungsstarken (nicht pflanzenöлтаuglichen) Traktoren durchgeführt. Hierbei reicht die Bandbreite von Futterbereitstellung bis zu Dünge- und Pflegemaßnahmen sowie Frontladertätigkeiten. Unter „Sonstige Arbeiten“ werden auch die Prüfstandsmessungen am Traktorenprüfstand des TFZ eingeordnet.

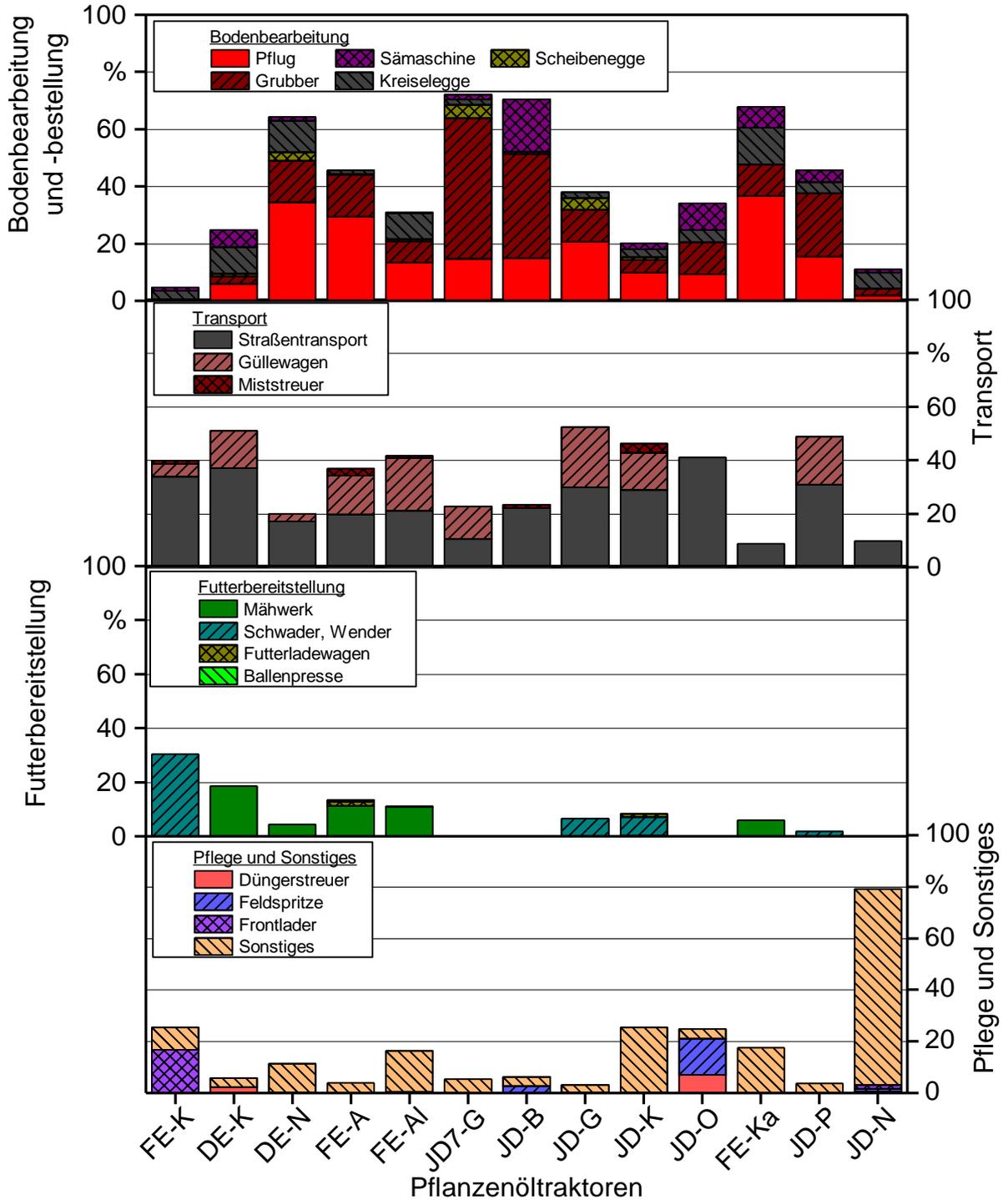


Abbildung 24: Art und Häufigkeit des Einsatzes der Rapsöltraktoren 2009–2014 (JD-G, JD-K), 2010–2014 (FE-A) und 2013–2014 (FE-K, DE-K, DE-N, FE-AI, JD7-G, JD-B, JD-O, FE-Ka, JD-P, JD-N)

6.1.1.3 Startverhalten

Abbildung 25 zeigt, dass die meisten Traktoren ein überwiegend gutes Startverhalten aufweisen, d. h., der Motor startet ohne Verzögerung bereits beim ersten Versuch.

Durchweg positive Resultate waren erwartungsgemäß bei den Traktoren mit Zwei-Tank-Kraftstoffsystem (DE-N, FE-A, FE-Ka und Fe-Al) zu beobachten, da bei diesen der Start mit Dieselmotorkraftstoff erfolgt.

Aber auch die Traktoren FE-K, JD7-G, JD-B, JD-O und JD-G mit einem Ein-Tank-Kraftstoffsystem konnten fast problemlos über die gesamte jährliche Nutzungsdauer mit Pflanzenöl gestartet werden. Bei den Traktoren DE-K, JD-K, JD-P und JD-N wurde das Startverhalten des Motors häufiger auch als mittel und schlecht eingestuft, so waren teils zwei oder mehr Startversuche erforderlich.

Beim Traktor DE-K verbesserte sich nach dem Austausch einer defekten Kraftstoffpumpe das Startverhalten. Seither wurde das Startverhalten wieder als gut eingestuft (siehe auch Abschnitt 6.1.5).

Das schlechtere Abschneiden 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. Laut Aussagen des Betreibers musste bei einem als mittel bewerteten Startvorgang der Schalter der Injektorheizung zweimal betätigt werden, um einen Start zu ermöglichen. Ferner könnten defekte Ventile im Niederdruckkraftstoffsystem bzw. eine beschädigte Verkabelung der Kraftstoffförderpumpe das Startverhalten beeinträchtigt haben (siehe Abschnitt 6.1.4). Ob auch der Einsatz von Sojaölkraftstoff beim Traktor JD-K zu einem schlechteren Startverhalten führt, ist anhand der Aufzeichnungen nicht eindeutig nachzuweisen.

Die Traktoren JD-N und JD-P weisen das schlechteste Startverhalten auf, wenngleich ein Start des Traktors immer möglich war. Als Ursache werden die Einstellungen der Einspritzung beim Startvorgang identifiziert/vermutet. Ein Update der Software zur Verbesserung des Startverhaltens der Traktoren erfolgte gegen Ende der Untersuchung. Wird der Motorblock bzw. das Kühlwasser über eine an einer Netzsteckdose angeschlossene Heizung vorgewärmt, ist ein Start auch bei tiefen Temperaturen ohne Verzögerung möglich.

Das Startverhalten der Pflanzenöltraktoren in den Feldtestjahren 2013 und 2014 verschlechtert sich in den Wintermonaten nicht (siehe auch Anhang 1 auf Seite 179). Auch bei den Traktoren mit Ein-Tank-Kraftstoffsystem ist kein Zusammenhang zwischen Startverhalten und niedrigen Umgebungstemperaturen ableitbar. Einzig der Traktor JD-P verzeichnet zwischen September und November 2013 eine Verschlechterung des Startverhaltens. Dies bestätigt sich jedoch im Folgejahr nicht.

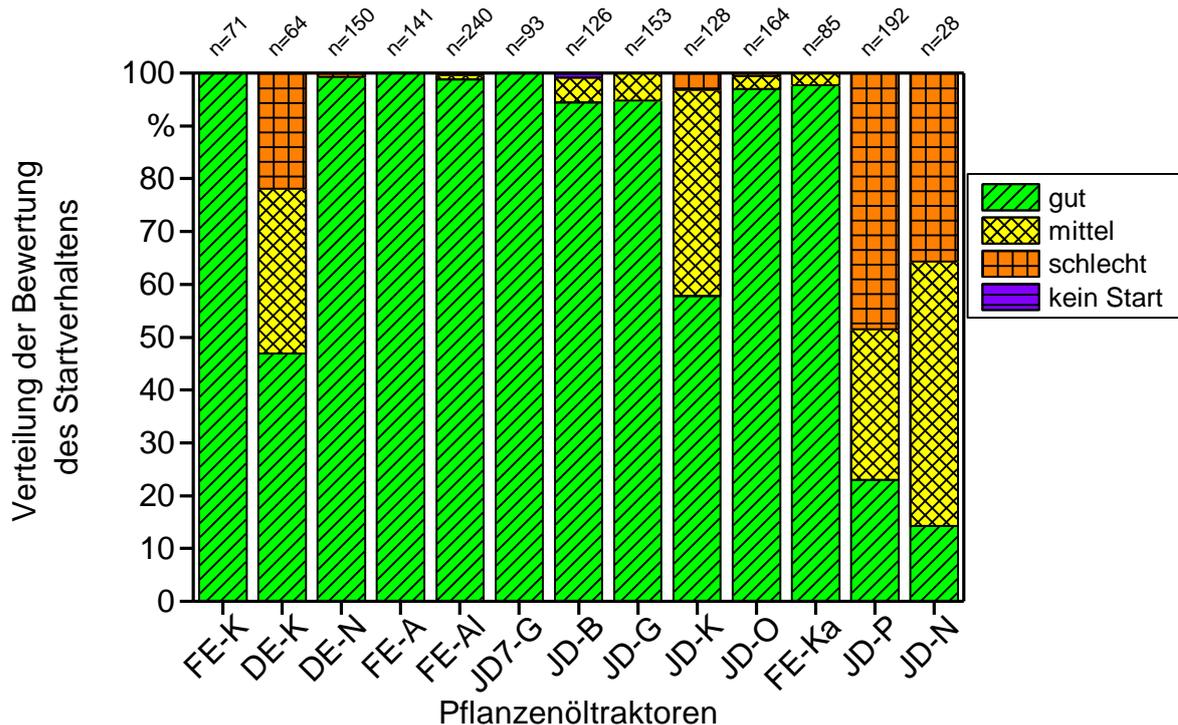


Abbildung 25: Gesamtbewertung des Startverhaltens der Pflanzenöltraktoren in den Feldtestjahren 2013 und 2014

6.1.1.4 Betriebsstoffe

In Tabelle 24 und Tabelle 25 ist der Einsatz von Betriebsmitteln in den Feldtestjahren 2013 und 2014 dargestellt. Der Durchschnittsverbrauch über alle Traktoren im Jahr 2013 lag bei ca. 13,3 l/h bei einem mittleren Pflanzenölanteil von 79 %. Im Jahr 2014 blieb der Durchschnittsverbrauch der Flotte mit 13,6 l/h nahezu unverändert bei einem hohen mittleren Pflanzenölanteil von 90 %.

Die Traktoren JD-B, JD-G, JD-N und JD-P mit einem Ein-Tank-Kraftstoffsystem nutzten überwiegend zwischen 98 % und 100 % der Gesamttreibstoffmenge Pflanzenöl.

Der mit einem Zwei-Tank-Kraftstoffsystem ausgestattete Traktor FE-Ka erreichte 2013 einen vergleichsweise hohen Rapsölanteil von ca. 87 % und entsprechend niedrigen Anteil im Dieselbetrieb (13 %). Im Jahr 2014 war mit 17 % ein etwas höherer Dieselanteil zu verzeichnen. RATHBAUER et al. (2008) [51] stellten im Mittel einen Dieselanteil von 19 % bei einer Bandbreite von 8 bis 33 % bei Zwei-Tank-Kraftstoffsystemen fest. Weitere Rapsöltraktoren im Feldtest, die ebenfalls einen Diesel-Zusatztank (FE-A, DE-N und FE-Al) besitzen, benötigten durchschnittlich 22 bis 25 % Dieselkraftstoff. Einen wesentlich höheren Dieselanteil hat der Traktor FE-A, da die Kraftstoffumschaltung in den beiden Feldtestjahren aufgrund von Undichtigkeiten mehrmals defekt war. Auch beim Traktor JD7-G wurde überdurchschnittlich viel Dieselkraftstoff eingesetzt, um zunächst vermuteten Ablagerungen in den Injektoren entgegenzuwirken. Die Ursachen dieser Störungen werden in Abschnitt 6.1.4 erläutert.

Der Harnstoffverbrauch der Traktoren FE-Ka, JD-K und JD-G, die mit einem SCR-System zur NO_x-Minderung ausgestattet sind, beträgt zwischen 0,02 und 1,1 l/h. Nähere Informationen sind in Abschnitt 6.1.1.5 beschrieben. Im Jahr 2014 ist der Verbrauch aufgrund der defekten Prototyp-AGN an den Traktoren JD-G und JD-K stark gesunken (siehe Abschnitt 6.1.4).

Die Traktorenflotte hat durch die Nutzung von Rapsölkraftstoff in beiden Einsatzjahren im Untersuchungszeitraum Treibhausgasemissionen von über 265.000 kg CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq) eingespart. Als Berechnungsgrundlage dienten Daten nach der Substitutionsmethode von ENGELMANN et al. (2014) [26] mit einer THG-Einsparung durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff von bis zu 80 % im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff.

Tabelle 24: Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen im Feldtestjahr 2013

Traktor	Pflanzenöl in l	Diesel in l	Pflanzenöl- anteil	Kraftstoff- verbrauch in l/h ¹⁾	Harnstoff- verbrauch in l/h	CO ₂ -Äq Einsparung in kg
FE-K	2.790	833	77 %	10,9	–	6.453
DE-K	4.466	882	84 %	17,1	–	10.329
DE-N	4.232	1.224	78 %	17,5	–	9.788
FE-A	3.327	7.777	30 % ²⁾	13,6	–	7.695
FE-AI	7.468	2.306	76 %	14,3	–	17.273
JD7-G	1.928	1.664	54 % ²⁾	14,0	–	4.459
JD-B	4.745	115	98 %	12,3	–	10.975
JD-G	5.702	0	100 %	9,7	0,10	13.188
JD-K	4.554	835	85 %	11,2	0,27	10.533
JD-O	4.065	163	96 %	9,4	–	9.402
FE-Ka	2.135	328	87 %	15,1	1,07	4.938

¹⁾ Bezogen auf Pflanzenöl- und Dieselmotorkraftstoff

²⁾ Erhöhter Dieseleanteil aufgrund von Störungen

Tabelle 25: *Eingesetzte Mengen an Betriebsstoffen im Feldtestjahr 2014*

Traktor	Pflanzenöl in l	Diesel in l	Pflanzenöl- anteil	Kraftstoff- verbrauch in l/h ¹⁾	Harnstoff- verbrauch in l/h	CO ₂ -Äq Einsparung in kg
FE-K	2.735	267	91 %	8,3	–	6.326
DE-K	7.477	245	97 %	19,4	–	17.293
DE-N	5.107	1.482	78 %	16,2	–	11.812
FE-A	6.865	3.180	68 % ²⁾	13,9	–	15.787
FE-AI	8.360	2.723	75 %	15,4	–	19.336
JD7-G	7.323	559	93 %	20,7	–	16.937
JD-B	3.840	89	98 %	12,1	–	8.881
JD-G	3.062	0	100 %	10,5	0,04	7.082
JD-K	4.396	0	100 %	9,7	0,02	10.167
JD-O	2.521	323	89 %	7,5	–	5.831
FE-Ka	4.333	895	83 %	18,0	1,13	10.022
JD-P	10.528	0	100 %	16,7	–	24.350
JD-N	2.639	0	100 %	9,6	–	6.104

¹⁾ Bezogen auf Pflanzenöl- und Dieselmotorkraftstoff²⁾ Erhöhter Dieselanteil aufgrund von Störungen

6.1.1.5 SCR-System und Harnstoffverbrauch im Feldtest

In Abbildung 26 und Abbildung 27 sind die Einsatzbedingungen sowie der Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch der Traktoren FE-Ka, JD-K und JD-G, die mit einem SCR-System zur NO_x-Minderung ausgestattet sind, monatsweise dargestellt. Die gestrichelten Verbindungslinien des spezifischen Harnstoff- und Kraftstoffverbrauchs (Monatsmittelwerte) beschreiben nicht den Verlauf zwischen den erfassten Einzelwerten, sondern dienen der besseren Lesbarkeit des Diagramms.

Beim Traktor FE-Ka war durchgängig über die Einsatzzeit ein Verbrauch an Harnstoff gegeben, während beim Traktor JD-G im Jahr 2013 und beim Traktor JD-K im Jahr 2014 der Harnstoffverbrauch wegen einer defekten Dosiereinheit des Prototyp-SCR-Systems auf nahe null zurückgegangen war (siehe Abschnitt 6.1.5).

Der Harnstoffverbrauch des Traktors FE-Ka schwankt zwischen 3 und 8 Vol.-% der eingesetzten Kraftstoffmenge. Bei höheren Anteilen der Arbeit Pflügen bei hoher Last zeichnet sich ein vergleichsweise hoher Harnstoffverbrauch von über 7 % des Kraftstoffverbrauchs ab. Mit höherer Last des Motors steigt in der Regel wegen der höheren Verbrennungstemperaturen auch die NO_x-Konzentration im Abgas. Die aktive Anpassung der Harnstoffdosierung mithilfe von NO_x-Sensoren scheint somit im Feldtest mit Rapsölkraftstoff problemlos zu funktionieren. Durch die sehr hohen NO_x-Konvertierungsraten bis über 90 % (siehe Abschnitt 6.2.3.1) benötigt der Traktor FE-Ka im Mittel mit ca. 1,1 l pro Bh mehr als die dreifache Menge wässriger Harnstofflösung des Traktors JD-K. Die Auslegung des SCR-Systems und damit auch die hinzudosierte Harnstoffmenge bzw. Konversionsraten richten sich nach dem Emissionsstandard des Traktors sowie weiteren Strategien der Emissionsminderung. So ist beim Traktor FE-Ka mit Abgasstufe IIIB eine stärkere Reduktion der NO_x-Emissionen als bei Abgasstufe-IIIA-Traktoren gefordert. Ferner werden bei den Traktoren JD-K und JD-G durch die zusätzliche Abgasrückführung die NO_x-Emissionen bereits vor der AGN innermotorisch reduziert, wodurch geringere NO_x-Konvertierungsraten im Mittel von ca. 57 % im stationären Zyklus NRSC (siehe Abschnitt 6.2.2.1) notwendig sind.

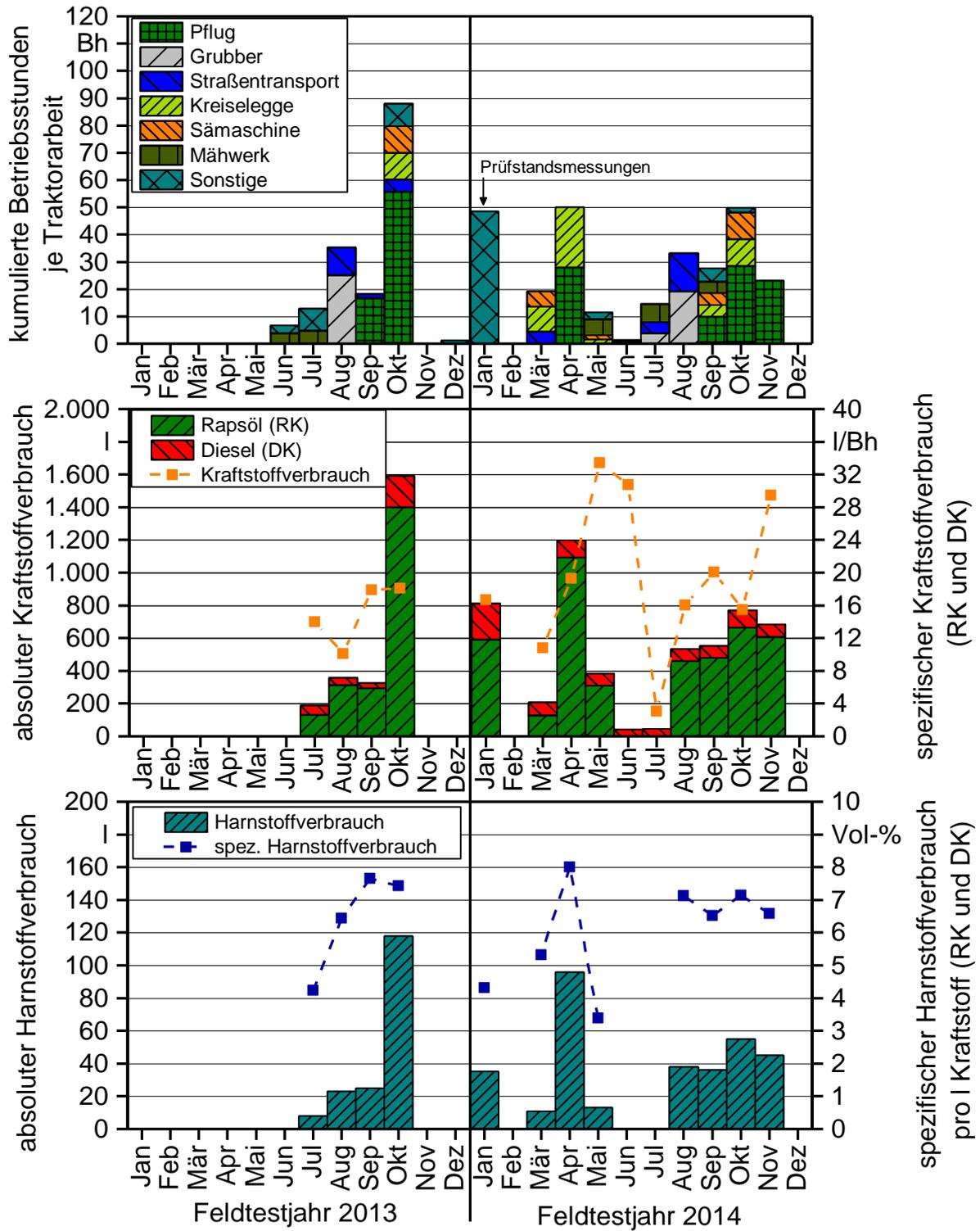


Abbildung 26: Durchgeführte Arbeiten sowie Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch des Traktors FE-Ka in den Feldtestjahren 2013 und 2014

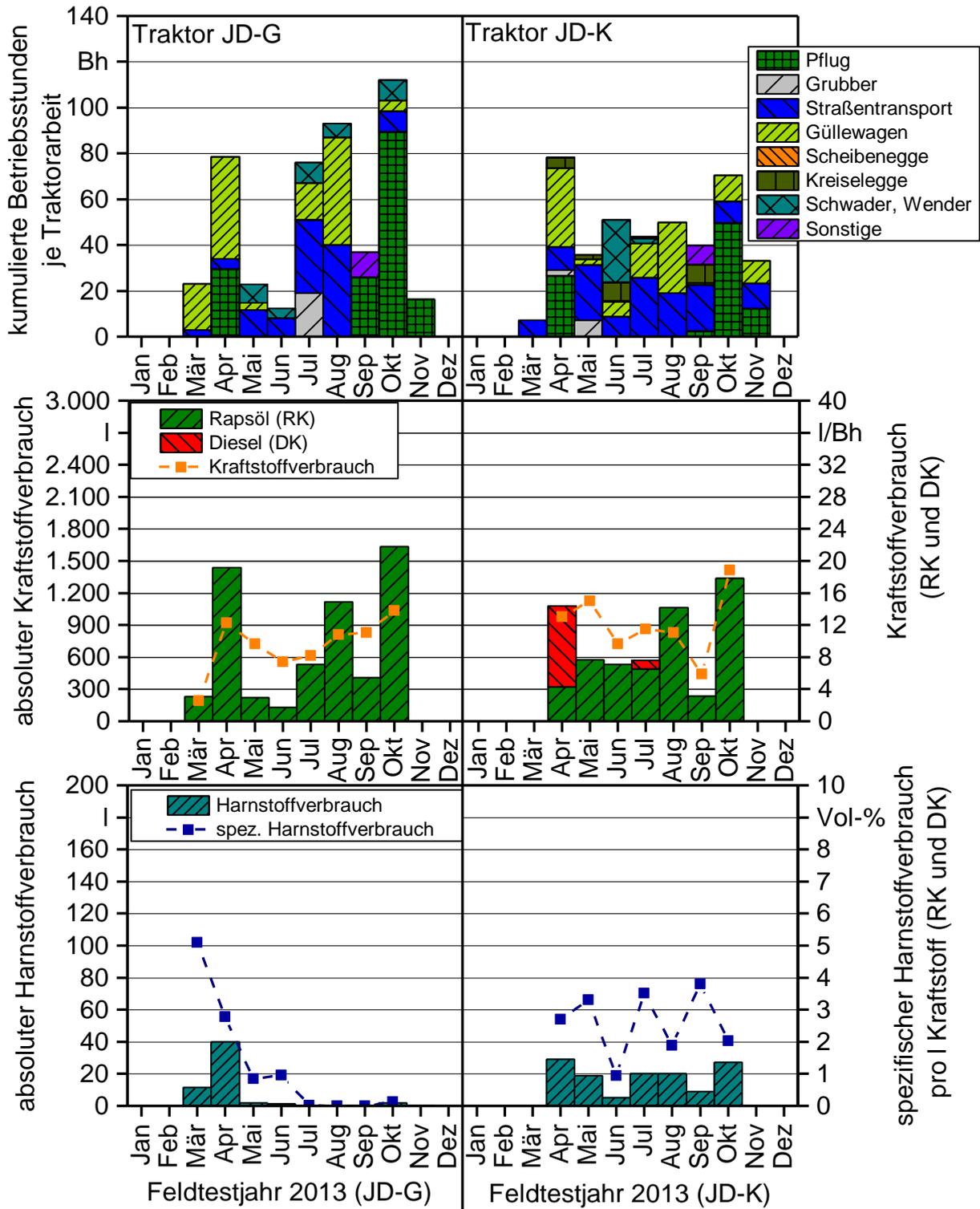


Abbildung 27: Durchgeführte Arbeiten sowie Kraftstoff- und Harnstoffverbrauch der Traktoren JD-G und JD-K im Feldtestjahr 2013

6.1.2 Kraftstoffqualität

Bis auf den Traktor JD-K, der mit Sojaöl getestet wurde, wurden alle Traktoren mit kaltgepresstem Rapsölkraftstoff aus dezentralen bayerischen Ölmühlen betrieben.

Der Traktor JD-K absolvierte zwei Feldtestjahre mit Sojaölkraftstoff nach DIN SPEC 51623 (siehe auch Tabelle 20 auf Seite 62). Die Oxidationsstabilität als Kenngröße der Ölalterung wurde während der Feldtests überwacht. Im Juli 2013 zeigte sich ein deutlicher Rückgang auf 4,7 h von ursprünglich 6,2 h im November 2012. Daraufhin wurde in Absprache mit der Firma John Deere ein Oxidationsstabilisator hinzugegeben. Mit einer Beimischung von 0,1 % Baynox Plus der Firma Lanxess erhöhte sich die Oxidationsstabilität auf 16,8 h und liegt somit deutlich oberhalb der Normanforderungen. Im November, nach weiteren vier Monaten Lagerzeit, war die Oxidationsstabilität des additivierten Sojaöls mit 13,6 h etwas geringer, aber immer noch deutlich über dem Grenzwert von 6,0 h der DIN SPEC 51623.

Die Qualität des Rapsölkraftstoffs wird bei der Lieferung jeder neuen Charge überprüft und aus dem Tankwagen entnommen. Bei den Lieferungen (FE-A) erfolgte die Probenahme aus der Hoftankstelle direkt nach der Anlieferung. In Tabelle 26 sind die Ergebnisse der Analysen aus dem Feldtestjahr 2013 und in Tabelle 27 die Resultate aus dem Feldtestjahr 2014 aufgeführt. Fettgedruckte Werte in den Tabellen kennzeichnen die Nichteinhaltung der Anforderungen nach DIN 51605 für Rapsölkraftstoff.

Tabelle 26: Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen der Traktoren auf den LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2013 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)

Kenngröße	Einheit	Grenzwerte gemäß DIN 51605	Rapsöltraktoren				
			FE-A	FE-AI	FE-Ka	JD-G ¹⁾ JD7-G ¹⁾ JD-B ¹⁾ JD-O ¹⁾	DE-N
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	7	49	16	9	28
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	1,0	1,2	0,4	0,6	2,2
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	6,5	7,2	6,5	6,8	6,9
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	640	520	530	677	430
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	4,0	2,6	< 1	2,9	6,7
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 3	1,1	11,6	1,0	2,7	5,1
Calciumgehalt	mg/kg	max. 1	0,9	17,6	1,4	4,2	8,7
Magnesiumgehalt	mg/kg	max. 1	< 0,5	1,6	< 0,5	< 0,1	0,7

¹⁾ gleiche Liefercharge, dadurch eine Untersuchung

Tabelle 27: Analyseergebnisse untersuchter Rapsölkraftstoffchargen der Traktoren auf den LfL-Versuchsgütern im Feldtestjahr 2014 (fettgedruckte Werte markieren eine Überschreitung des Grenzwerts nach DIN 51605)

Kenngröße	Einheit	Grenzwerte gemäß DIN 51605	Rapsöltraktoren				
			FE-AI	FE-K, DE-K, FE-A, DE-N, JD-G, JD7-G, JD-O, JD-B, FE-Ka, JD-P, JD-N ¹⁾			
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	48	6	9		
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	3,6	0,5	0,6		
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	5,7	6,9	7,4		
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	640	516	525		
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	< 1	< 1	1,1	1,5	1,6
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 3	4,3	0,7	0,5	1,0	0,7
Calciumgehalt	mg/kg	max. 1	8,6	1,3	1,4	2,0	2,0
Magnesiumgehalt	mg/kg	max. 1	0,6	0,7	< 1	0,3	0,3

¹⁾ gleiche Lieferchargen, dadurch mehrfache Stichprobenuntersuchungen

Bei den Pflanzenöltraktoren an den Standorten in Grub (JD-G, JD7-G), Baumannshof (JD-B) und Osterseeon (JD-O) handelt es sich um die gleiche Liefercharge der Ölmühle Hohenbrunn. Bei einer späteren Lieferung im Jahr 2013 von derselben Ölmühle ist eine deutliche Qualitätsverbesserung (FE-Ka) ersichtlich, was auf eine verbesserte Nachbehandlung des Rapsöls zurückzuführen ist. Weitere Versuchsbetriebe sind im Jahr 2014 zu der Liefergemeinschaft hinzukommen, sodass nun bis auf FE-AI alle Traktoren mit der gleichen Charge Rapsölkraftstoff betrieben werden.

Die Qualität des Rapsölkraftstoffs erreicht insgesamt nur bei einer Lieferung (FE-A) die Anforderungen der Norm DIN 51605:2010 [14]. Die kritischen Parameter sind der Gehalt an Calcium und Phosphor sowie die Gesamtverschmutzung des Rapsölkraftstoffs. Eine unzureichende Nachbehandlung kann zu den erhöhten Calcium- und Phosphorgehalten geführt haben. Die Einhaltung des in der Norm zulässigen maximalen Magnesiumgehalts war bis auf eine einmalige geringfügige Überschreitung weniger problematisch. Zu berücksichtigen ist, dass aufgrund steuerrechtlicher Vorgaben viele Ölmühlen während des Berichtszeitraums noch nach der Vornorm DIN V 51605:2006 [12] produzierten. In der DIN V 51605:2006 [12] galten deutlich höhere Grenzwerte für den Phosphorgehalt (12 mg/kg) sowie für den Summengehalt an Calcium und Magnesium (20 mg/kg). Für die Ölmühlenbetreiber sind die Grenzwerte der Norm DIN 51605:2010 [14] aus steuerrechtlicher Sicht erst seit der Novelle der Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) vom 01.12.2014 relevant.

Die Überschreitung der maximal zulässigen Gesamtverschmutzung beim Traktor FE-AI 2013 und 2014 ist vermutlich auf verunreinigte Lagerbehälter zurückzuführen. Die Reinigung des Lagertanks wurde dem Versuchsbetrieb daher empfohlen [55].

Grenzwertüberschreitungen wurden mit Ölmühlen und Traktorenherstellern diskutiert. Knappe Überschreitungen des Phosphor-, Calcium- oder Magnesiumgehalts wurde dabei in Rücksprache mit den Traktorenherstellern in Zusammenhang mit der Versuchsfragestellung zugelassen, um einen Worst Case abzubilden. Die Hersteller von Rapsölkraftstoff wurden hinsichtlich qualitätssichernder Maßnahmen bei Produktion und Abgabe beraten.

6.1.3 Motorölqualität

Die Entnahme von Motorölproben erfolgte bei allen Traktoren bei den Ölwechseln und bei ausgewählten Traktoren mit Common-Rail-Motor auch in Abständen von 50 Bh innerhalb eines Ölwechselintervalls.

Pflanzenölanteil im Motoröl

Abbildung 28 zeigt den Pflanzenölgehalt im Motoröl in Abhängigkeit der Einsatzstunden des verwendeten Motoröls für die untersuchten Traktoren sowie die Regressionsgeraden für die verschiedenen Motortypen.

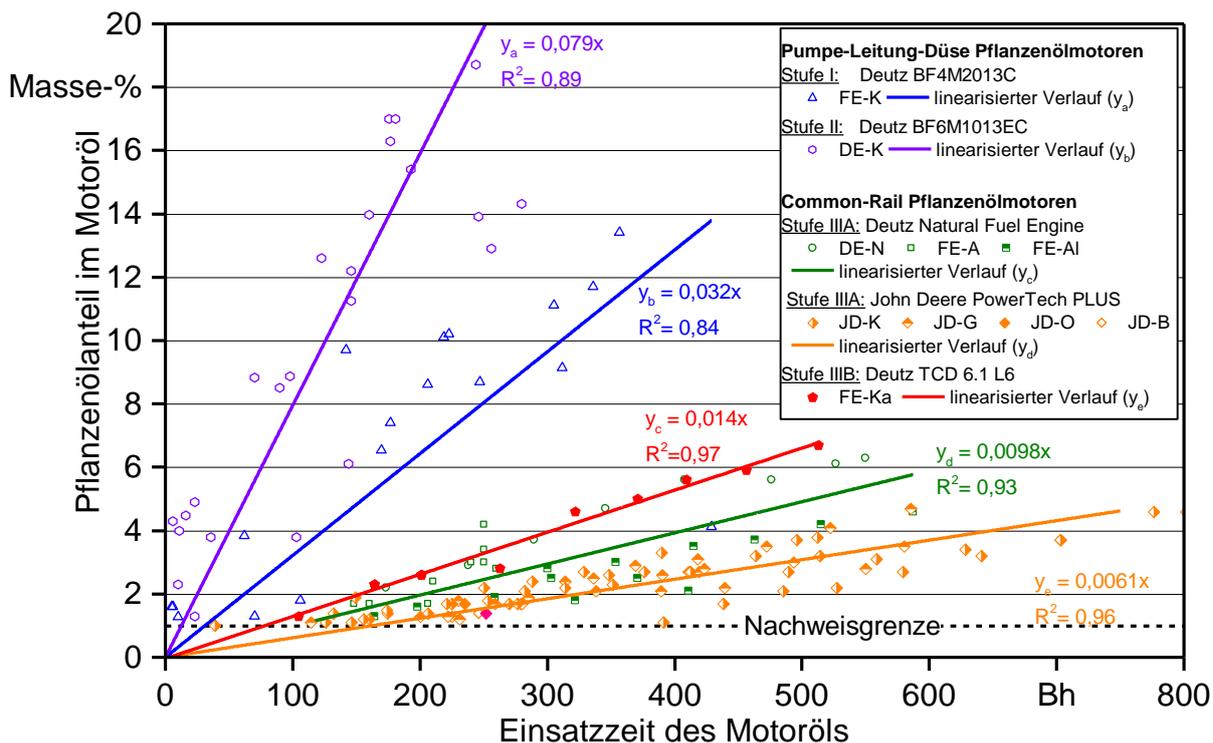


Abbildung 28: Lineare Regression des Pflanzenölgehalts im Motoröl über die Einsatzzeit des Motoröls für verschiedene Motoren mit unterschiedlichen Einspritzsystemen und Abgasstufen

Dabei zeigt für die Traktoren mit Common-Rail-Hochdruck-Einspritzsystem auch nach 500 Bh, also dem für Dieselkraftstoffbetrieb vorgegebenen Ölwechselintervall, ein mit deutlich unter 5 % sehr geringer Gehalt eingetragenen Rapsöl- und Sojaölkraftstoffs. Bis

etwa 150 Bh liegt der Pflanzenölgehalt der Motorölproben meist unterhalb der Nachweisgrenze von 1 % und ist daher auch in Abbildung 28 nicht dargestellt. Darüber hinaus ist ein in etwa linearer Anstieg des Pflanzenölgehalts über die Einsatzzeit zu beobachten.

Bei den älteren Traktoren (FE-K und DE-K) der Abgasstufen I und II mit PLD-Einspritzsystem steigt der Pflanzenölgehalt im Motoröl um 3,2 bzw. 7,6 Prozentpunkte pro 100 Betriebsstunden an.

Bei den Common-Rail-Motoren wurde ein 5- bis 12-fach geringerer Pflanzenöleintrag pro Betriebsstunde gemessen. Der geringste Eintrag ist bei den John-Deere-Motoren mit 0,6 Prozentpunkten pro 100 Bh zu verzeichnen. Die Deutz-Motoren der Abgasstufe IIIA weisen einen Pflanzenöleintrag von ca. 1,1 und bei der Abgasstufe IIIB von 1,4 Prozentpunkte pro 100 Bh auf.

Bisherige Erkenntnisse aus abgeschlossenen Vorhaben haben sich vorerst bestätigt, wonach Common-Rail-Motoren einen deutlich geringeren Pflanzenöleintrag aufweisen als Traktoren mit älteren Einspritztechnologien [24]. Es erscheint möglich, dass das Ölwechselintervall pflanzenölbetriebener Traktoren mit Common-Rail-Einspritzung bei 500 Betriebsstunden (wie bei Dieselkraftstoff) belassen werden kann.

Verschleiß und weitere Qualitätsparameter

Auch die weiteren qualitätsbestimmenden Motoröleigenschaften deuten darauf hin, dass bei Rapsölkraftstoffbetrieb keine häufigeren Ölwechsel erforderlich sind als bei Dieselbetrieb.

Es gab 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. Einzig bei den Traktoren FE-AI, FE-Ka und JD-G wurden erhöhte Gehalte an Verschleißmetallen ermittelt.

Beim Traktor FE-AI erfolgte zwischen ca. 2.642 und 2.705 Betriebsstunden kurzzeitig ein deutlicher Anstieg der Aluminiumkonzentration auf über 20 mg/kg im Motoröl, wie auf Abbildung 29 zu sehen ist. Der Bereich für kritische Konzentrationen an Aluminium beginnt bereits ab 12 mg/kg, während ein Eisengehalt erst über 80 mg/kg als negativ eingestuft wird [47]. Der Traktor wurde zu dieser Zeit im März und April 2014 überwiegend zum Straßen- und Gülletransport, aber auch zum Pflügen und Grubbern eingesetzt und mit nur rund 59 % Rapsölanteil betrieben. Dieser starke Anstieg setzte sich jedoch in den folgenden knapp 100 Bh bis zum Ölwechsel nicht fort.

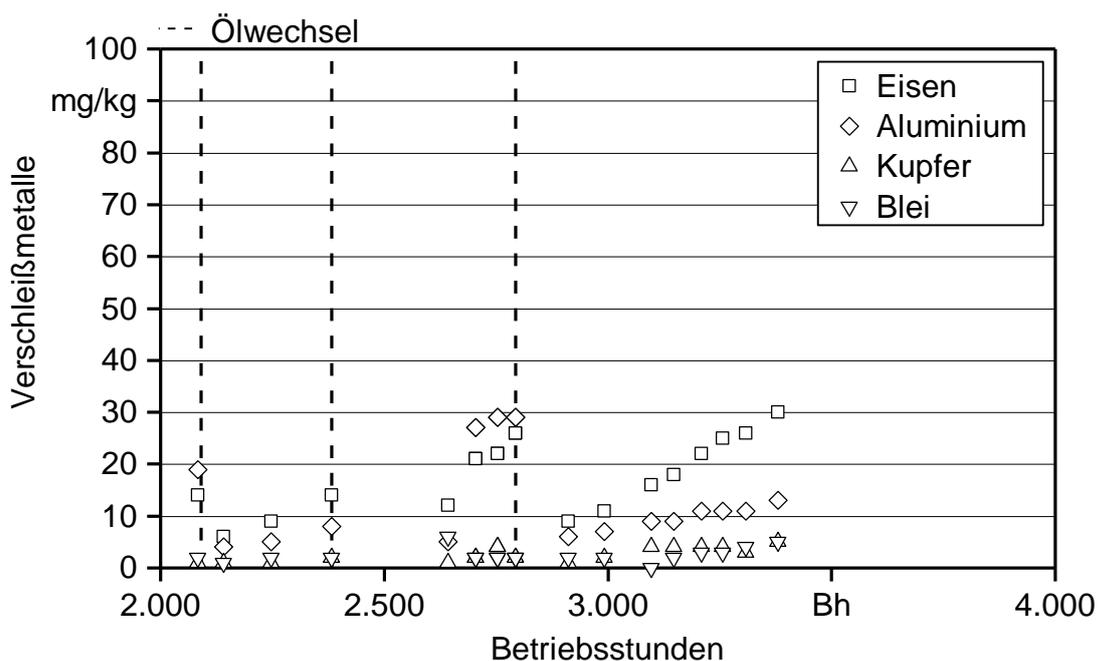


Abbildung 29: Gehalte der Verschleißelemente Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei des Motoröls des Traktors FE-A1 über den Versuchszeitraum

Der Anstieg der Aluminiumkonzentration ging aber weder mit einem erhöhten Eintrag von Pflanzenöl ins Motoröl noch mit anderen auffälligen Qualitätsveränderungen des Motoröls einher. Ursachen für die erhöhten Konzentrationen an Aluminium können ein (einmaliger) Abrieb am Turbolader, Ölkühler, Ölpumpengehäuse, Kolben oder den Gleitlagern sein [47]. Vorsichtshalber wurde das Motoröl nach 411 Bh Motoröllaufzeit gewechselt. Im nachfolgenden Intervall mit einer Motoröleinsatzzeit von ca. 515 Bh hat sich dieser Effekt nicht wiederholt und alle Verschleißmetalle befanden sich auf einem unkritischen Niveau.

In Abbildung 30 und Abbildung 31 ist der Verlauf der Verschleißkomponenten im Motoröl der Traktoren JD-G und JD-K zu sehen. Kurz vor dem dritten, siebten und achten Ölwechsel kam es beim Traktor JD-G und kurz vor dem dritten, fünften und sechsten Ölwechsel beim Traktor JD-K zu erhöhten Kupferkonzentrationen im Motoröl. Dabei war das Motoröl mehr als 500 Bh, in einem Fall beim Traktor JD-K aber auch nur 350 Bh im Einsatz. Der Eintrag könnte z. B. durch Verschleiß an diversen Motokomponenten, aber auch Korrosion von Ölkühler, Rohrleitungen und/oder Dichtscheiben verursacht worden sein [47]. Die Ursache für den Anstieg konnte zwar nicht genau bestimmt werden, wird aber weiterhin beobachtet.

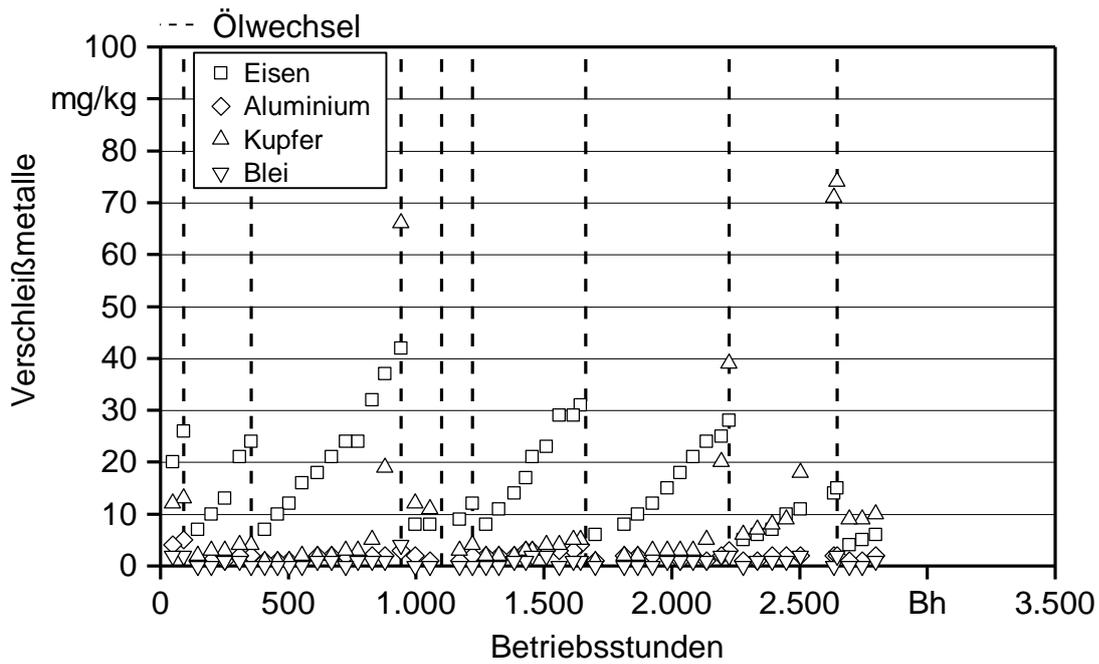


Abbildung 30: Gehalte der Verschleißelemente Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei des Motoröls des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum

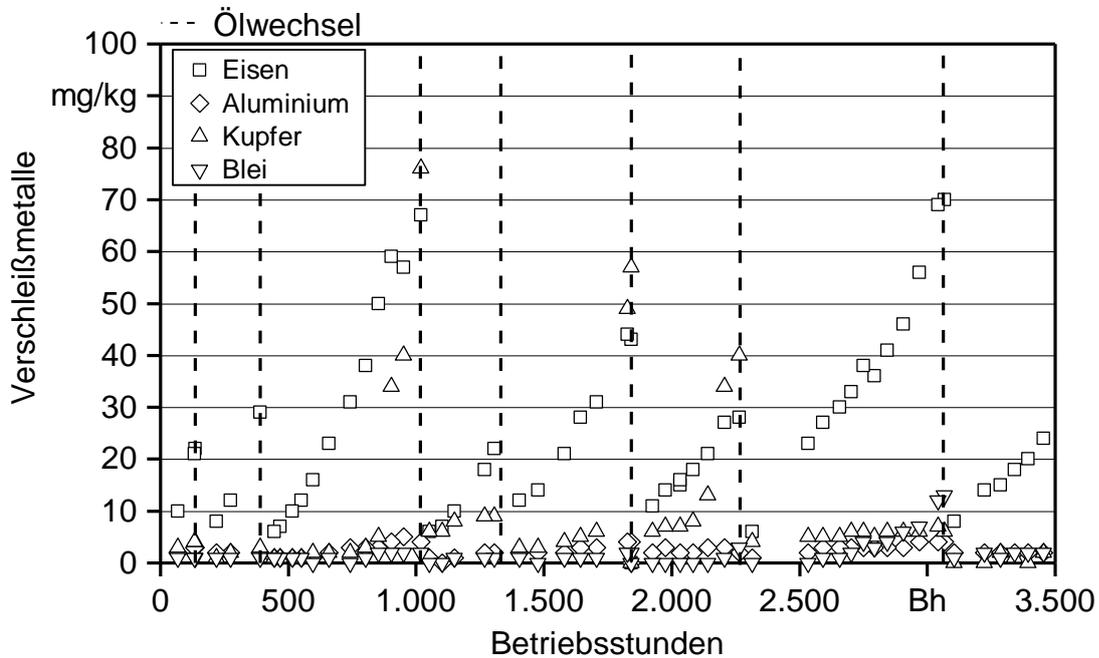


Abbildung 31: Gehalte der Verschleißelemente Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei des Motoröls des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum

Die Konzentrationen an Verschleißmetallen im Motoröl befanden sich trotz teilweise erhöhter Werte immer noch in einem üblichen Rahmen. Die Zunahme der Eisenkonzentration über die Laufzeit des Motoröls lag stets unterhalb des Warnwerts von 0,5 mg/kg und es ist auch keine Zunahme des Anstiegs ersichtlich, wie aus Tabelle 28 hervorgeht.

Tabelle 28: *Regressionsanalyse des Anstiegs des Eisengehalts im Motoröl der Traktoren JD-K und JD-G im Vergleich zum Warnwert*

Traktor	JD-K		JD-G	
	Steigung in mg/(kg × Bh)	Bestimmtheits- maß (R ²) in %	Steigung in mg/(kg × Bh)	Bestimmtheits- maß (R ²) in %
1	0,19	100	0,09	98
2	0,11	98	0,06	97
3	0,11	98	0,07	74
4	0,07	100	0,09	98
5	0,08	96	0,07	97
6	0,08	89	0,05	98
7	0,06	90	0,04	93
Warnwert [48] ¹⁾	0,5	–	0,5	–

¹⁾ Berechnete Steigung zum Erreichen des Warnwerts von 0,5 mg/kg

6.1.4 Störungen und Reparaturen

Tabelle 29 gibt einen Überblick, welche Störungen an den 13 Feldtest-Traktoren während des Berichtszeitraums aufgetreten sind, die möglicherweise in Zusammenhang mit dem Pflanzenölbetrieb oder Testbetrieb der Abgasnachbehandlungssysteme stehen. Grundsätzlich waren während der Testphase an den Traktoren keine schweren Schäden zu verzeichnen. Am häufigsten gab es Probleme im Niederdruckkraftstoffsystem mit Lufteintrag und defekten Kraftstoffumschalt- und Druckbegrenzungsventilen. Im Feldtest war die Einsatzsicherheit der Traktoren durchweg gegeben. Es sind keine längeren Ausfallzeiten aufgrund von Störungen durch den Pflanzenölbetrieb entstanden.

Tabelle 29: Kurzübersicht an Störungen an den Pflanzenöltraktoren im Berichtszeitraum

Traktor	Störung	Zeitpunkt der Reparatur
DE-K	Reduzierte Leistung der Kraftstoffpumpe	4.650 Bh
JD-G/JD-K	Ausfall der Dosierung des Prototyp-SCR-Systems	2.140 Bh/2.950 Bh
JD-K	Defekte Überströmventile im Kraftstoffsystem und defekte Verkabelung der Kraftstoffpumpe	2.239 und 2.315 Bh
JD7-G	Softwarefehler mit Leistungsreduzierung und Tausch der Injektoren	1.186 Bh
FE-A	Undichtigkeit im Kraftstoffsystem und defekte Kraftstoffumschaltung	2.930 Bh
FE-AI	Defekte Kraftstoffumschaltung	2.140 Bh
FE-KA	Undichtigkeit im Kraftstoffsystem	230 Bh

Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K)

Die Kraftstoffpumpe im Niederdruckkraftstoffsystem wurde bei 4.650 Bh durch das LVFZ Kringell getauscht. Hauptgrund für diese Reparatur war eine Verschlechterung des Startverhaltens bei niedrigen Umgebungstemperaturen (unter 0 °C). Vermutlich reichte die Pumpenleistung nicht aus, den kalten hochviskosen Rapsölkraftstoff in ausreichender Menge zu fördern. Es wurde vermutet, dass die Lagerung der Pumpe nicht mehr dicht war und Luft ins Kraftstoffsystem eindringen konnte. In Abbildung 32 wird das Startverhalten des Traktors inkl. Zeitpunkt des Pumpenwechsels dargestellt. Nach dem Tausch der Kraftstoffpumpe konnte der Traktor wieder ohne Beeinträchtigung mit einem verbesserten Startverhalten betrieben werden.

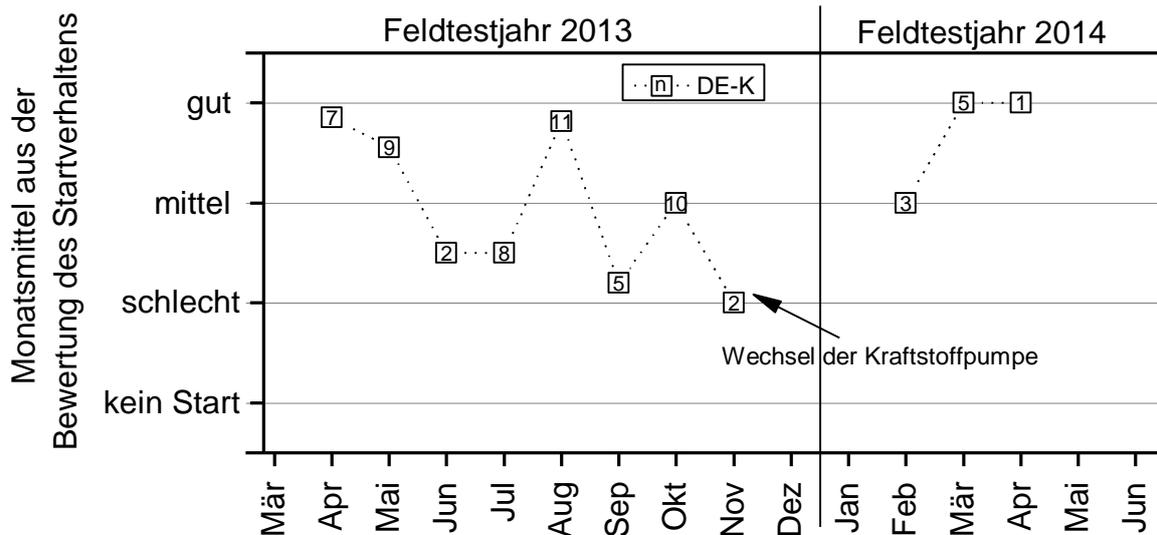


Abbildung 32: Bewertung des Startverhaltens des Traktors DE-K in den Jahren 2013 und 2014 (Mittelwerte aus n Eintragungen je Monat)

John Deere 6930 Premium (JD-G)

Der Traktor JD-G war im Untersuchungszeitraum ohne Ausfallzeit und Störungen am Motor und Kraftstoffsystem im Einsatz. In der beobachteten Laufzeit des Traktors JD-G traten lediglich Störungen am experimentellen Prototyp-Abgasnachbehandlungssystem, das bei ca. 1.100 Bh nachgerüstet wurde, auf. Die Störung zeichnete sich bereits im Vorfeld durch gelegentlichen Ausfall des SCR-Systems ab. Dabei wurde am Display keine Förderleistung angezeigt. Diese Störmeldungen konnten nach einem Neustart des Systems immer wieder behoben werden. Daneben wurde auch eine Undichtigkeit in der Zuleitung der wässrigen Harnstofflösung (AdBlue[®]) festgestellt. Beim Austritt kam es auf den heißen Oberflächen des Abgasnachbehandlungssystems zur Bildung von Rückständen (Abbildung 33).

Im Feldtestjahr 2013 deuteten schwankende Verbräuche wässriger Harnstofflösung des Traktors auf einen temporären Ausfall des Systems hin. Hierbei fiel die Dosiereinheit des Reduktionsmittels AdBlue[®] des SCR-Katalysators aus. Nach ca. 2.140 Bh war kein erkennbarer Verbrauch wässriger Harnstofflösung mehr festzustellen und ein dauerhafter Ausfall eingetreten. Der Traktor war aber trotz des defekten SCR-Systems im landwirtschaftlichen Alltag mit Rapsölkraftstoff einsetzbar.



Abbildung 33: Ablagerungen infolge ausgetretener wässriger Harnstofflösung an der AdBlue®-Leitung (links) und an der Außenseite der Abgasmachbehandlung (rechts) des JD-K

Eine optische Begutachtung bei ca. 2.450 Bh durch den Hersteller des SCR-Systems am JD-G zeigte einen insgesamt guten optischen Zustand. Der Injektor inklusive Flansch und Harnstoffeinspritzlöcher war mit einfach zu entfernenden Harnstoff- und Rußrückständen belegt. Der Harnstofftank, die Pumpe und das Dosiersystem waren weitestgehend frei von äußerlicher Korrosion, Ablagerungen oder mechanischer Beschädigung. Einzig die Verschraubung der Stickoxid-, Druck- und Temperatursensoren waren aufgrund von Korrosion nicht zu lösen. Die Dichtung am Flansch des Injektors wurde vorsorglich erneuert, was aber die Betriebsfähigkeit des SCR-Systems nicht wiederherstellen konnte. Vermutlich lag ein Defekt in der Harnstoffdosiereinheit oder am Steuergerät der Abgasmachbehandlung vor, der unabhängig vom Betrieb mit Rapsölkraftstoff aufgetreten ist.

Eine Reparatur des Systems wurde vom Hersteller der Abgasmachbehandlung geprüft, da es sich aber bei dem System um einen Prototyp handelt, der nicht für die Serienproduktion vorgesehen ist, wurde das AGN-System bei 2.821 Bh vom Fahrzeug entfernt. Die Störungen am nachgerüsteten Abgasmachbehandlungssystem dieses Traktors (JD-G) sind nicht auf den Pflanzenölbetrieb zurückzuführen und wären voraussichtlich auch bei Dieselbetrieb aufgetreten.

John Deere 6930 Premium (JD-K)

Bei 2.239 Bh musste am Traktor JD-K, der am LVFZ Kringell eingesetzt wird, ein Überdruckventil an der Kraftstoffverteilerleiste getauscht werden. Das Überdruckventil öffnete vermutlich verfrüht bei hohen Betriebsdrücken in der Kraftstoffverteilerleiste. Dies hatte zur Folge, dass die Leistungsdrosselung aktiviert und die Fehlermeldung ECU 1347.07

(Druckregelfehler in Kraftstoffverteilerleiste) angezeigt wurde. Nach dem Neustart des Traktors schließt sich das Ventil wieder bis zur nächsten Überschreitung des Betriebsdrucks. Vermutlich könnte eine Materialermüdung der Feder im Überdruckventil zu dieser vorzeitigen Ventilöffnung geführt haben. Nach dem Austausch des Überdruckventils war das Problem dauerhaft behoben. Diese Störung trat auch bei den nahezu baugleichen Traktoren JD-B (733 Bh), JD-O (1.520 Bh) und JD7-G (1.270 Bh) auf. Beim Traktor JD7-G wurde das Ventil getauscht, während bei den Traktoren JD-O und JD-B durch eine Reinigung des Ventils die Störung behoben werden konnte.

Ein weiterer Defekt bei 2.315 Bh betraf das Niederdruckkraftstoffsystem des Traktors. An diesem Traktor trat mehrmals beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff die Fehlermeldung „Kraftstofffilter“ auf, was zur Aktivierung der Leistungsdrosslung führte. Im Dieselpetrieb gab es hingegen keine Probleme. Am Traktorenprüfstand konnte diese Störung bei Nenndrehzahl reproduziert werden. Es wurde beobachtet, dass Rapsölkraftstoff aus der Rücklaufleitung angesaugt wurde. Bei der Fehlersuche wurden defekte Überströmventile im Kraftstoffsystem und eine schadhafte Verkabelung an der Kraftstoffförderpumpe festgestellt (Abbildung 34).



Abbildung 34: Defekte Verkabelung an der Förderpumpe des Niederdruckkraftstoffsystems des Traktors JD-K

Nach Austausch der Ventile und Neuisolierung der Kabel an der Pumpe war die Funktionstüchtigkeit wiederhergestellt. Die höhere Viskosität von Rapsölkraftstoff bewirkte in Verbindung mit den defekten Überströmventilen und der defekten Verkabelung der Kraftstoffpumpe im Niederdrucksystem vermutlich eine Unterversorgung an Kraftstoff an der Hochdruckpumpe. Im Dieselpetrieb trat dieser Fehler aufgrund der geringeren Kraftstoffviskosität nicht zutage.

John Deere 7830 (JD7-G)

Im Feldtest zeigte der Traktor im Rapsölbetrieb vermehrt die Fehlermeldungen ECU 1180.00 (Einlasstemperatur der Turbolader-Turbine extrem hoch) sowie ECU 1569.31 (Kraftstoffminderung) an. Diese führten zur Drosselung der Motorleistung durch das Motorsteuergerät. Ein Neustart des Traktors hob diese Leistungsminderung vorübergehend bis zum nächsten Auftreten der Fehlermeldung wieder auf. Der Tausch der Kraftstofffilter und auch der Einsatz des Additivs John Deere Clean-up durch die Servicewerkstatt brachten keine Verbesserung. Die Servicewerkstatt stellte den Traktor mittels Software-Updates auf Dieselmotorbetrieb um, da als Ursache der Störung Ablagerungen an den Injektoren vermutet wurden. Ein längerer Betrieb mit Dieselmotor sollte das Kraftstoffsystem und die Injektoren reinigen. Im Feldtest mit Dieselmotor zeigten sich während eines Beobachtungszeitraums von 150 Bh keine Störungen. Eine Leistungsmessung am Prüfstand des TFZ ließ auf eine tadellose Funktionstüchtigkeit des Traktors schließen. Die erneute Inbetriebnahme mit Rapsölkraftstoff erfolgte durch den Umrüster, der einen Tausch der Motorsteuerungssoftware am Traktorenprüfstand vornahm. Bei der Leistungsprüfung konnte die Fehlerkombination mit Leistungs-Drosselung reproduziert werden. Der Einsatz von Dieselmotor, der zur Beseitigung der vermuteten Injektorenablagierungen hätte führen sollen, brachte somit keine ausreichend positive Wirkung, um die Störung im Rapsölbetrieb zu beheben.

Anschließend erfolgte ein Tausch der Injektoren, woraufhin sich die Leistungs- und Verbrauchswerte geringfügig verbesserten. Schließlich lief der Traktor im Rapsölbetrieb auch nach dem Injektorentausch nicht störungsfrei. Während des Leistungstests aktivierte die Motorsteuerung die Leistungsminderung bei einer Drehzahl von kleiner als 1.400 min^{-1} unter Volllast. Zwischen den Motordrehzahlen 2.100 und 1.700 min^{-1} war hingegen unter Volllast ein störungsfreier Betrieb möglich. Im Betrieb mit Dieselmotor kam es unabhängig vom Betriebspunkt zu keiner Motordrosselung bzw. Leistungsminde- rung.

Eine verbesserte Motorsteuerungssoftware behob das Problem. Diese Software erstellten Mitarbeiter des John Deere European Technology Innovation Center (JD ETIC) nach weiteren Leistungstests am Traktorenprüfstand. Die Störung war auf einen Softwarefehler in der angepassten Motorsteuerungssoftware des Umrüsters zurückzuführen.

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

Beim Traktor Fendt 820 Vario^{greentec} des LVFZ in Achselschwang mit einem Zwei-Tank-System gab es Probleme mit dem Niederdruckkraftstoffsystem. Während des Betriebs mit Rapsölkraftstoff schaltete der Traktor häufig automatisch in den Dieselmotorbetrieb um. Dabei erschien gleichzeitig die Fehlermeldung „Kraftstofffilter“. Dies deutete darauf hin, dass die ausreichende Versorgung des Motors mit Rapsölkraftstoff nicht gewährleistet war. Auch durch einen Neustart ließ sich dieses Problem nicht beheben. Erst nach längerer Standzeit konnte der Traktor wieder für eine gewisse Zeit mit Rapsölkraftstoff betrieben werden. Die Folge war, dass ein hoher Anteil an Dieselmotor benötigt wurde, was aufgrund des kleinen Dieseltanks häufige Betankungen erforderte. Ein Wechsel der Rückschlag- und Umschaltventile der Diesel-Rapsöl-Umschaltseinheit durch die Service-

werkstatt konnte das Problem zunächst nicht beheben. Auch ein Wechsel des Kraftstofffilters führte zu keiner Verbesserung.

In Abstimmung mit der BayWa AG wurde das Kraftstoffsystem erneut in einer BayWa Servicewerkstatt überprüft. Nach ersten Tests wurde als Ursache ein Lufteintrag in das Kraftstoffsystem festgestellt. Die Undichtigkeit wurde an den Kraftstoffleitungen bzw. am Schauglas des Kraftstofffilters in Kombination mit einem zu geringen Kraftstoffförderdruck vermutet. Zudem waren auch Rückstände von Rapsölkraftstoff im Dieseltank zu finden, was auf defekte Rückschlagventile der Umschalteinheit hindeutete. Daraufhin wurde erneut die Kraftstoffumschalteinheit inkl. Rückschlagventilen ausgetauscht, der Vordruck zur Hochdruckpumpe neu justiert und die Kraftstoffleitungen inkl. Filter und Schauglas erneuert. Durch diese Maßnahmen wurde der Fehler behoben. Die Undichtigkeiten wurden am Bajonettverschluss aus Kunststoff an der Umschalteinheit vermutet. Eine fehlerhafte automatische Umschaltung in den Dieselmotorbetrieb ist bisher nicht mehr aufgetreten.

Diese Störung verdeutlicht, dass bei Eingriffen ins Kraftstoffsystem (z. B. Austausch von Bauteilen, Filterwechsel) in besonderem Maße auf die Funktionstüchtigkeit und Dichtigkeit aller Komponenten sowie auf einen ausreichenden Kraftstoffvordruck im Niederdruckkraftstoffsystem zu achten ist.

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

Wie beim Traktor FE-A kam es beim baugleichen Traktor Fendt 820 Vario^{greentec} am LVFZ in Almesbach (FE-AI) zur fehlerhaften Umschaltung von Rapsöl- auf den Dieselmotorbetrieb, allerdings konnte das Problem in der Regel durch einen Neustart behoben werden. Die Fehler traten in Kombination mit den Fehlercodes 1.2.41 (Rapsöltemperatur außerhalb Sollbereich), 1.2.42 (Diagnose Wärmetauscher) und 1.2.43 (Dieseltankfüllstandssensor) auf. Im Juni 2011 wurde daraufhin der Temperatursensor am Wärmetauscher zwischen dem Rapsölkraftstoffsystem und dem Kühlwasserkreislauf getauscht. Diese Störung war mit dieser Maßnahme nicht vollständig behoben, daher wurde der Traktor im April 2013 erneut in der Servicewerkstatt geprüft. Die Regelmembran am Magnetventil des Kühlwasser-Rapsöl-Wärmetauschers bewegte sich bei der Prüfung nur träge. Die Funktion des Wärmetauschers war damit beeinträchtigt und das Rapsöl wurde zu stark vorgewärmt. Die Rapsöltemperatur überschritt den in der Motorsteuerung festgelegten Grenzwert und die ECU aktivierte den Dieselmotorbetrieb. Das Magnetventil wurde erneuert, was seither einen störungsfreien Betrieb des Traktors mit Rapsölkraftstoff ermöglicht.

Fendt 718 Vario SCR (FE-Ka)

Am Fendt 718 Vario SCR (FE-Ka) gab es Störungen aufgrund von Undichtigkeiten im Kraftstoffsystem. Dadurch kam es zu einem Lufteintrag in das Kraftstoffsystem mit daraus resultierenden Abweichungen von Kraftstoffdruck und -förderleistung. Die erste Störung trat bei ca. 140 Bh beim Pflügen im Rapsölbetrieb auf. Speziell nach dem Wechsel von Hochlastphasen in Niedriglastphasen war die Fehlermeldung 1D.1.08 (Zumesseinheit Kraftstoff) aktiv. Dabei wurde teilweise auch die Leistungsdrosselung aktiviert, die oft auch mit den Fehlermeldungen 1D.1.1D (Druckbegrenzungsventil Rail) und 1D.1.09 (Sensor, Raildruck) einherging. Nach einem Neustart des Traktors war die Leistungsbe-

grenzung aufgehoben und der Traktor konnte wieder in vollem Umfang eingesetzt werden. Die Störung stellte für den Betreiber aufgrund der geringen Eintrittshäufigkeit keine Beeinträchtigung im Alltag dar. In Absprache mit der BayWa AG konnte der Traktor das Feldtestjahr 2013 ohne weitere Maßnahmen erfolgreich beenden.

Durch systematisches Eingrenzen konnte die Ursache des Fehlers am Prüfstand wiederholbar reproduziert werden.

Im Rücklauf des Kraftstoffs war ein deutlicher Lufteintrag ins Kraftstoffsystem festzustellen. Durch den Einbau transparenter Vor- und Rücklaufleitungen konnte das Problem lokalisiert werden. Die Luft gelangte an einer gelösten Einstellschraube an einer der zwei parallel geschalteten Kraftstoffpumpen ins System. Die betroffene Pumpe konnte keinen Kraftstoff mehr fördern und wirkte zudem als Bypass, sodass sich Förderleistung und Kraftstoffdruck verringerten. Die Über- oder Unterschreitung der traktorinternen Grenzwerte für den Kraftstoffdruck im Vorlauf der Hochdruckpumpe verursachte höchstwahrscheinlich die Fehlermeldungen. Nach der Beseitigung der Undichtigkeit konnten die Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand durchgeführt werden.

Die Kraftstoffdruckeinstellung wurde vor dem Feldtest 2014 wiederholt von der BayWa AG justiert. Die Fehlermeldungen konnten mit dieser Maßnahme behoben und defekte Bauteile mussten nicht ersetzt werden.

Das Kraftstoffsystem des Traktors konnte mithilfe der Prüfstandserfahrungen in Zusammenarbeit mit der BayWa AG verbessert werden. Der Einbau zusätzlicher Überdruckventile begrenzt nun den Kraftstoffdruck nach den Pumpen. Mittels nachgerüsteter Rückschlagventile in den Kraftstoffleitungen wird eine Bypass-Wirkung bei einer defekten Kraftstoffpumpe zukünftig verhindert. Mithilfe teilweise transparenter Kraftstoffleitungen lässt sich zudem ein Lufteintrag durch Undichtigkeiten in das Kraftstoffsystem frühzeitig erkennen.

6.1.5 Umweltwirkung des Pflanzenöleinsatzes

Die Betriebszeit aller untersuchten Rapsöltraktoren auf den Versuchsgütern beträgt zum Ende des Untersuchungszeitraums insgesamt über 34.000 Stunden. Dabei wurden durch den Rapsölbetrieb ca. 326.000 l Diesel ersetzt, was einer Treibhausgaseinsparung von etwa 640.000 kg Kohlenstoffdioxid-Äquivalente entspricht. In Abbildung 35 sind die indirekten Effekte der Rapsölkraftstoffnutzung dargestellt. Demnach wurde über die Jahre verteilt auf rund 235 ha Anbaufläche Raps erzeugt und daraus 336.000 l Rapsölkraftstoff sowie ca. 630 t Presskuchen als Eiweißfutter gewonnen. Darüber hinaus verblieben etwa 3.600 t organische Substanz (Stroh, Wurzeln und Stoppeln) auf der Fläche, was zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit und Humusversorgung beigetragen hat.

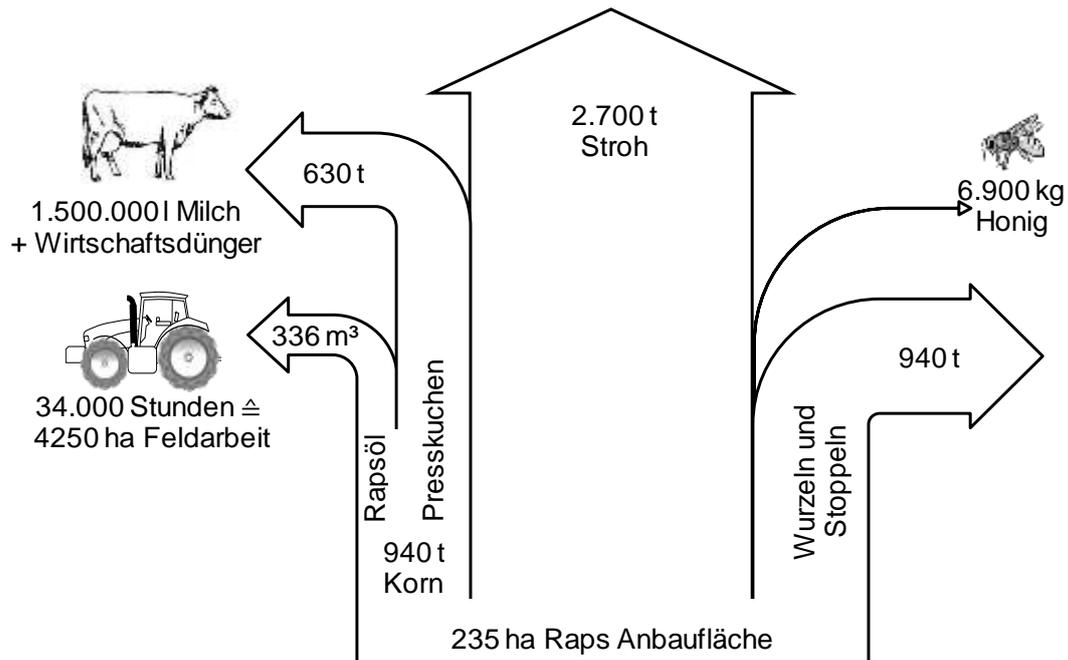


Abbildung 35: Beispielrechnung zu den Stoffströmen aus dem Rapsanbau zur Gewinnung von 336.000 l Rapsölkraftstoff für die Rapsöltraktoren auf den bayrischen staatlichen Versuchsgütern

6.2 Traktorenprüfstand

Leistungs- und Emissionsmessungen erfolgten am Traktorenprüfstand des TFZ für die Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt.

6.2.1 Abgasstufen I und II

6.2.1.1 Fendt Farmer Vario 412 (FE-K)

Die Emissions- und Leistungsmessungen am FE-K (Abgasstufe I) fanden mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei ca. 6.089 Bh bzw. 6.100 Bh statt. Abbildung 36 zeigt das Leistungsverhalten des Traktors über die letzten 3.400 Bh. Die Zapfwellenleistung, das äquivalente Motordrehmoment und der spezifische Kraftstoffverbrauch weisen keine signifikanten Veränderungen zu den vorangegangenen Messungen bei 4.890 Bh bzw. 4.910 Bh auf. Die Leistung an der Zapfwelle ist im Drehzahlbereich von 1.000 bis 1.900 min^{-1} mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zur Messung mit Dieselkraftstoff um ca. 9 % höher. Ferner ergibt sich für Rapsölkraftstoff ein 11 % höherer spezifischer gravimetrischer bzw. 2 % höherer spezifischer volumetrischer Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Ein Vergleich der Leistung bei 2.662 Bh und 6.089 Bh zeigt unter Berücksichtigung wechselnder Umgebungsparameter über die Betriebszeit ein nahezu konstantes Leistungsniveau. Somit bestätigen sich die Beobachtungen von EMBERGER et al. (2013) [23] und THUNEKE et al. (2009) [64] auch bei zunehmender Nutzungsdauer des Traktors.

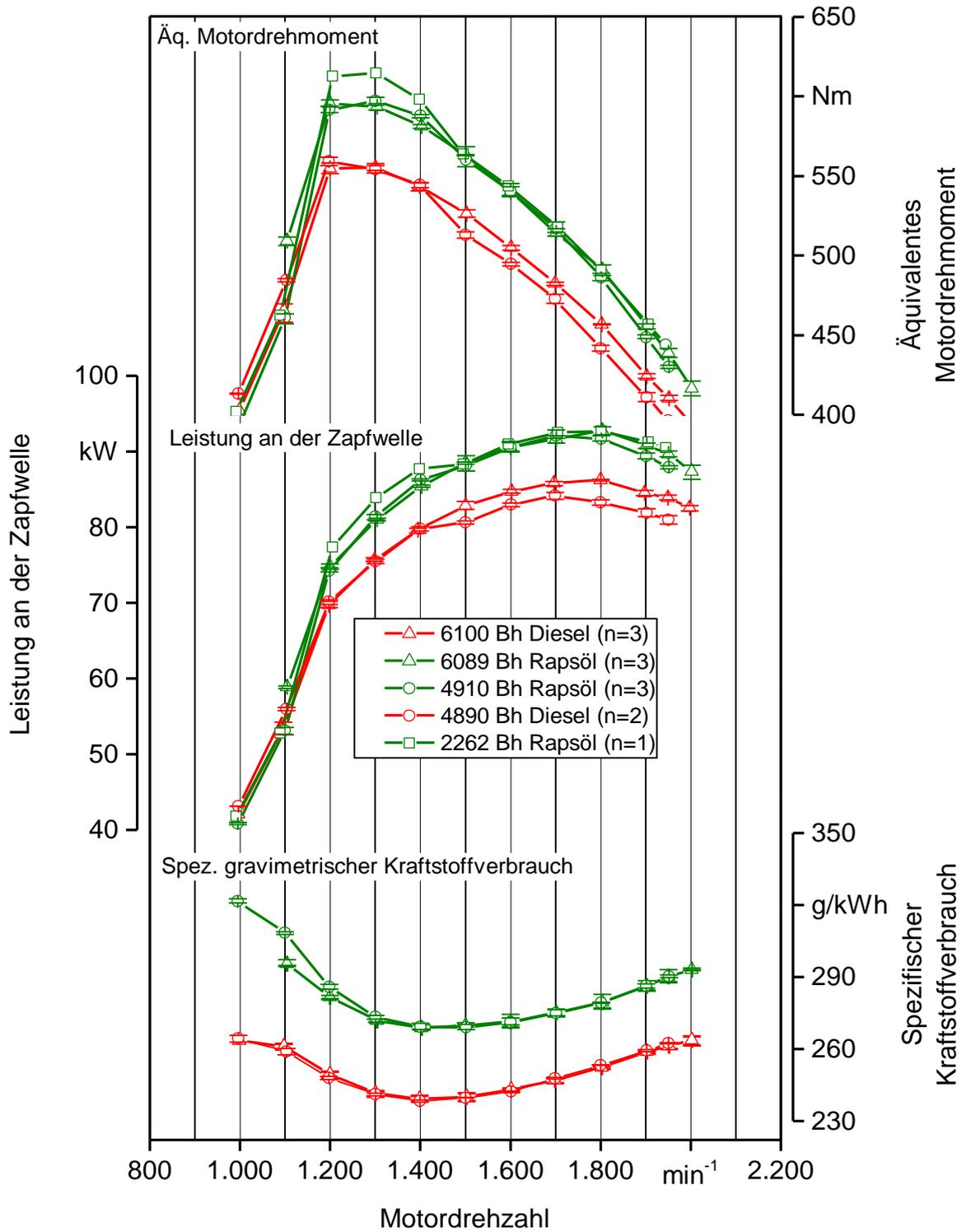


Abbildung 36: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung und des Kraftstoffverbrauchs des Traktors FE-K beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über 6.100 Bh [23][64]

Abbildung 37 zeigt den Verlauf der Abgasemissionen mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff über die Laufzeit des Traktors FE-K. Die gestrichelten Verbindungslinien geben nicht den tatsächlichen Verlauf der Emissionen zwischen den Einzelmessungen wieder, sondern dienen der besseren Lesbarkeit.

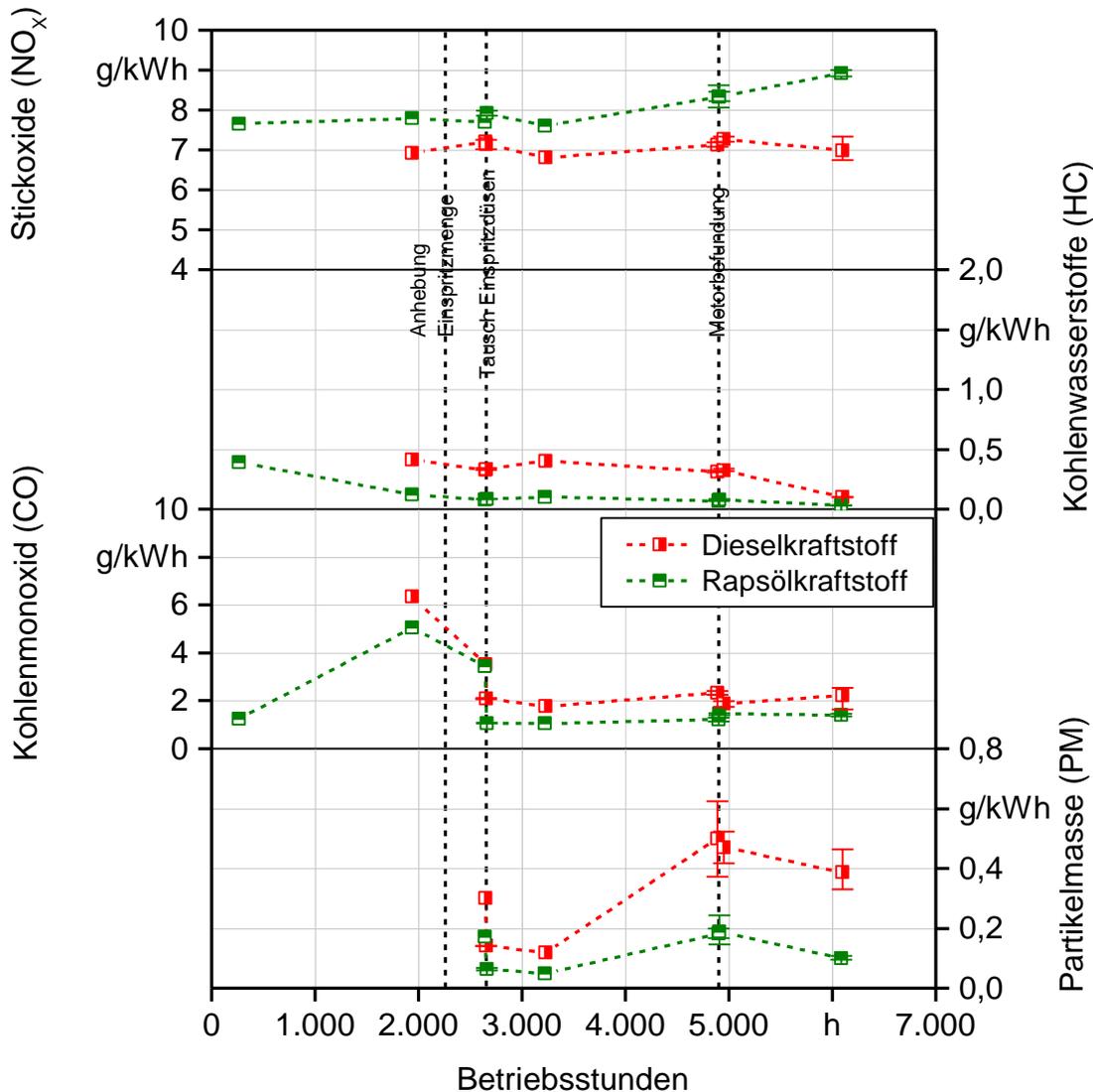


Abbildung 37: Mittelwerte und Spannweiten der limitierten Abgasemissionen bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle des Traktors FE-K Abgasstufe I im stationären C1-Zyklus nach ISO 8178-4 für Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff über die Laufzeit [23][64]

Die NO_x-Emissionen mit Rapsölkraftstoff veränderten sich bis 3.200 Bh kaum und stiegen anschließend bis 6.100 Bh um 15 % an. Dagegen waren die HC-Emissionen mit Rapsöl über die gesamte Betriebsdauer leicht rückläufig. Der CO-Ausstoß war ab ca. 2.650 Bh nahezu konstant. Bei 2.650 Bh zeigt sich gegenüber vorangegangenen Untersuchungen ein positiver Effekt durch die Erhöhung der Einspritzmenge und den Tausch

der Einspritzdüsen auf die CO-Emissionen [23][64]. Mit Ausnahme der Messungen bei ca. 4.900 Bh bewegten sich die PM-Emissionen mit Rapsölkraftstoff unterhalb des Ausgangsniveaus (vor dem Tausch der Einspritzdüsen bei ca. 2.650 Bh). Alle limitierten Emissionskomponenten liegen mit Rapsölkraftstoff stets unterhalb der Grenzwerte von Abgasstufe I.

Im Dieselbetrieb erfüllte der Traktor ebenso die Grenzwerte der Abgasstufe I. Im Vergleich zum Rapsölbetrieb emittierte der Traktor im Mittel über alle Messungen mit Dieselloskraftstoff rund 15 % weniger NO_x, 21 % mehr CO, 74 % mehr HC und 50 % mehr Partikelmasse.

Ein Vergleich der beiden in Abbildung 37 dargestellten Emissionsmessungen bei 4.900 und 6.100 Bh mit Rapsölkraftstoff zeigt einen Anstieg des NO_x-Ausstoßes um ca. 7 %, dagegen einen Rückgang der PM-Emissionen um 47 %. Mit Diesellokraftstoff sanken hingegen die NO_x-Emissionen um ca. 4 % und die PM-Emissionen um 22 % beim Vergleich beider Messungen. Einen Grund für die gegensätzliche Entwicklung der NO_x-Emissionen bei Rapsöl- und Diesellokraftstoff sowie für das Sinken der PM-Emissionen bei beiden Kraftstoffen in den letzten rund 1.200 Bh konnte bisher nicht ermittelt werden.

6.2.1.2 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K)

Bei 4.460 Bh wurde eine Motorbegutachtung am Traktor DE-K durchgeführt. Es waren geringfügige Unterschiede in der Zapfwellenleistung, im äquivalenten Motordrehmoment und im spezifischen Kraftstoffverbrauch vor und nach der Begutachtung zu verzeichnen. Ein Leistungsanstieg von ca. 2 bis 5 kW ist mit leicht günstigeren Umgebungsbedingungen und der Spülwirkung infolge der Durchflussmessung an den Düsen zu erklären. Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse nach OECD Code 2 über 3.590 Bh.

Der spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch lag im Betrieb mit Diesellokraftstoff um ca. 12 % niedriger als mit Rapsölkraftstoff, bei einem volumetrischen Vergleich beträgt der Unterschied noch ca. 3 %, wie bereits von EMBERGER et al. (2013) [23] und THUNEKE et al. (2009) [64] beobachtet wurde.

Über die Betriebsdauer ist es bislang zu keinen Leistungseinbußen gekommen. Vielmehr sind zwischen den Messungen bei 3.320 und 4.460 Bh sogar eine Leistungszunahme und Effizienzsteigerungen zu verzeichnen. Der Leistungszuwachs von 1,9 % und der um 1,3 % geringere spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch resultieren aus einer um ca. 0,6 Masse-% höheren Einspritzmenge. Die erhöhte Einspritzmenge ist möglicherweise auf leichte Veränderungen in der Einspritzmechanik infolge der Nutzungsdauer des Traktors bzw. auf natürlich schwankende Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Luftdruck) zurückzuführen. Geringfügige Leistungsunterschiede über die Betriebsdauer sind durchaus üblich.

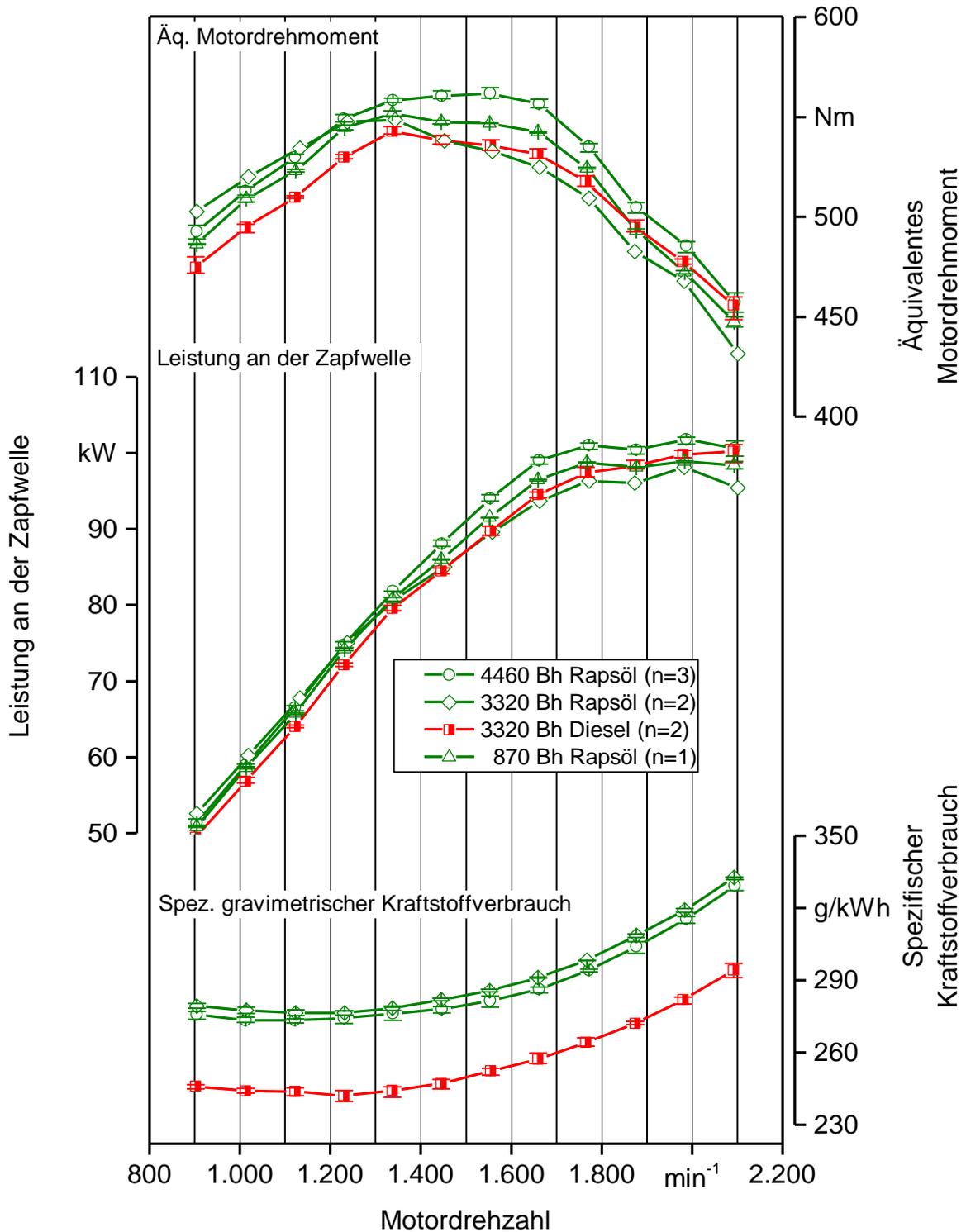


Abbildung 38: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung und des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle des Traktors DE-K beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff über 4.460 Bh (n = Anzahl der Messungen) [23][64]

Abbildung 39 zeigt den überwiegend konstanten Verlauf der limitierten Schadstoffkomponenten über die Betriebsdauer des Traktors DE-K mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff. Die Emissionen veränderten sich durch die Motorbegutachtung und Wartung bei 4.460 Bh kaum. Analog zum Pumpe-Leitung-Düse-Motor des FE-K ergaben sich auch beim DE-K ein deutlich reduzierter HC-, CO- und PM-Ausstoß und höhere NO_x-Emissionen mit Rapsölkraftstoff. Im Vergleich mit Dieseldieselkraftstoff werden rund 33 % weniger Partikelmasse, ca. 10 % weniger CO und ca. 50 % weniger HC sowie 8 % mehr NO_x emittiert.

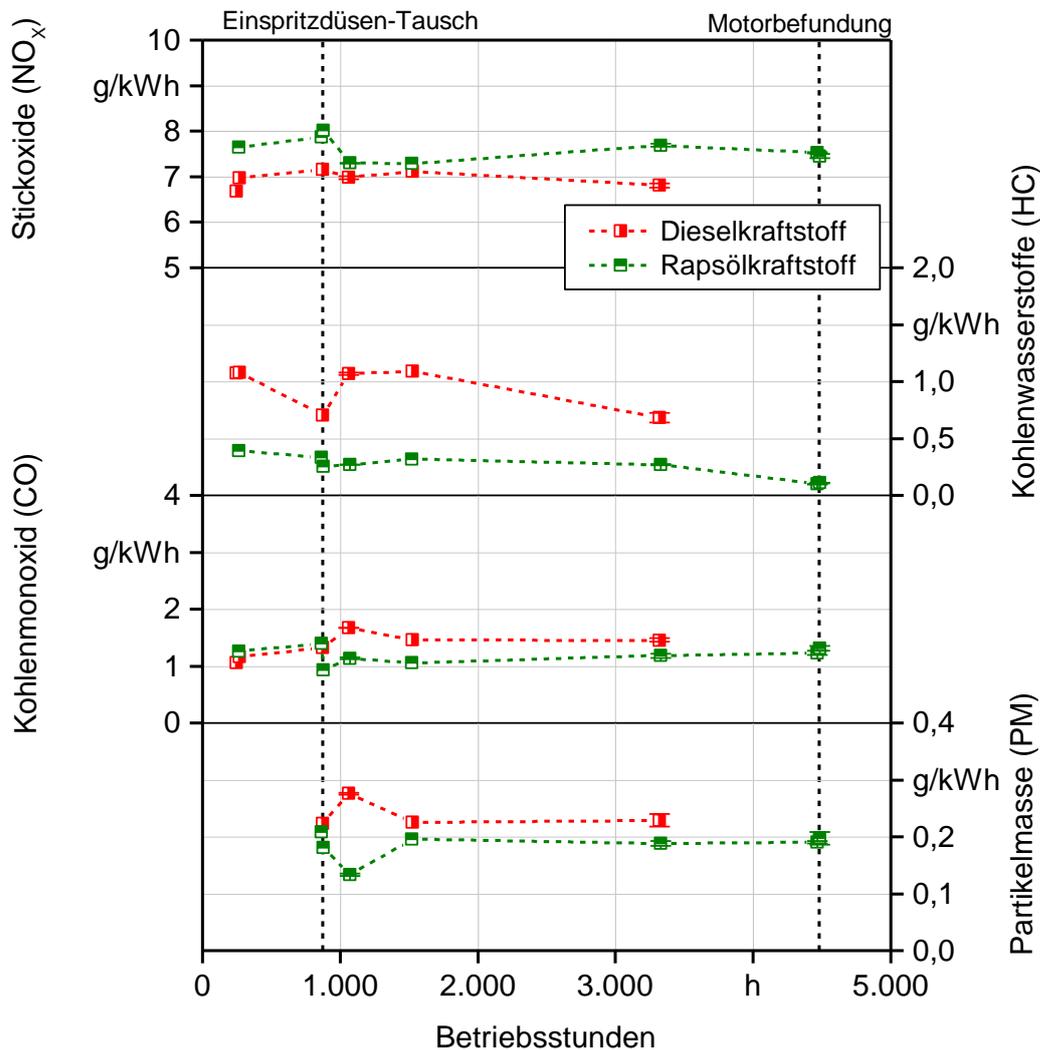


Abbildung 39: Mittelwerte und Spannweiten der limitierten Abgasemissionen bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle des Traktors DE-K im stationären C1-Zyklus nach ISO 8178-4 für Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff über die Laufzeit [23][64]

Am Traktor DE-K wurde neben dem stationären Testzyklus NRSC nach ISO 8178-4 auch der Non-Road-Transient-Cycle (kurz 10s NRTC) in Anlehnung an ISO 8178-11 durchgeführt. Im 10s NRTC werden die Drehzahl- und Drehmomentvorgaben des NRTC alle 10 Sekunden gemittelt (siehe hierzu Abschnitt 5.3.5.2 auf Seite 58).

Wie in Abbildung 40 zu sehen emittierte der Traktor im dynamischen Zyklus im Vergleich zum 8-Phasen-Zyklus weniger Stickoxide (NO_x). Ein Grund dafür kann die geringere mittlere Leistung im 10s NRTC im Vergleich zum NRSC sein. Dadurch bewegt sich der Traktor auf einem geringeren Temperaturniveau und es ist zu erwarten, dass geringere Spitzentemperaturen im Brennraum erreicht werden. Bei geringeren Spitzentemperaturen sinkt auch das Potenzial der NO_x -Bildung. Im Kaltstart wird dieser Effekt vermutlich durch die anfänglich geringeren Motortemperaturen verstärkt.

Im Vergleich zum stationären Zyklus steigen die Emissionen im Warmstart für Kohlenmonoxid (CO) und Partikelmasse (PM) an. Im Kaltstart erhöht sich der Anteil an Produkten unvollständiger Verbrennung (HC und CO). Die PM-Emissionen konnten im Kaltstart noch nicht ermittelt werden, da eine angepasste Volumenstromregelung der PM-Probenahme zu diesem Zeitpunkt erst noch integriert werden musste. Bei zukünftigen Messungen soll geprüft werden, ob sich der Einfluss auf die Emissionen in dieser Form bestätigt.

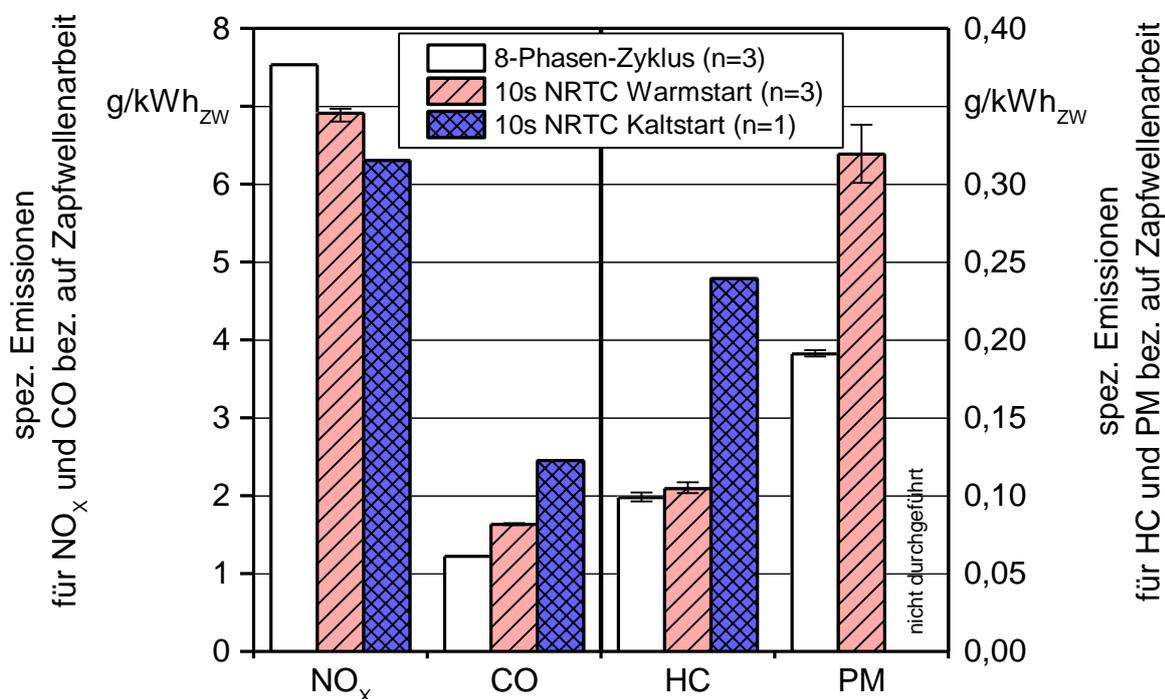


Abbildung 40: Mittelwerte und Spannweiten der limitierten Abgasemissionen bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle des Traktors DE-K im Zyklus 10s NRTC in Anlehnung an ISO 8178-11 mit Rapsölkraftstoff

Im Untersuchungszeitraum wurden die Versuche mit transienten Testzyklen ausschließlich mit Rapsölkraftstoff durchgeführt. Ein Vergleich mit Dieselloskraftstoff hinsichtlich des Emissionsverhaltens bei transienten Belastungen ist eine weitere interessante Fragestellung für zukünftige Forschungsvorhaben.

6.2.2 Abgasstufe IIIA

Die Leistungs- und Emissionsmessungen an Traktoren der Abgasstufe IIIA erfolgten im Untersuchungszeitraum an den Traktoren JD-K, JD-G und NH-W.

6.2.2.1 John Deere 6930 Premium (JD-K)

Die Emissions- und Leistungsmessungen am JD-K fanden mit Sojaöl und Rapsöl bei ca. 2.335 Bh statt. Nach den Feldtestjahren 2013 und 2014 sind weitere Messungen mit Sojaöl bei 2.920 Bh und bei 3.453 Bh mit Rapsöl erfolgt.

Das Ergebnis der Leistungsprüfungen nach OECD Code 2 ist in Abbildung 41 zu sehen. Die nach 2.326 bzw. 2.335 Bh durchgeführte Vergleichsmessung zwischen Rapsöl- und Sojaöl lieferte einen fast identischen Verlauf von Leistung, Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle. Der Leistungsunterschied betrug über die gesamte Volllastkennlinie lediglich ca. $\pm 0,5\%$. Die Differenz beim spezifischen Kraftstoffverbrauch fiel ebenso mit $\pm 0,2\%$ sehr gering aus. Der Wirkungsgrad im Betrieb mit Sojaöl war mit $0,3\%$ unwesentlich geringer als mit Rapsöl.

Die Messung nach 585 absolvierten Feldteststunden mit Sojaöl im Folgejahr bei 2.920 Bh ergab leicht niedrigere Leistungswerte. Die mittlere Leistung über die gesamte Volllastkennlinie war ca. $2,7\%$ niedriger als im Vorjahr. Dieser Effekt zeigte sich auch in einem um $0,7$ bis $2,8\%$ höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch und etwa $1,4\%$ niedrigeren Wirkungsgrad an der Zapfwelle. Die leicht verminderte Leistung des Motors kann weder auf einen Unterschied im Heizwert, noch auf veränderte Umgebungsbedingungen zurückgeführt werden.

Der leicht negative Trend konnte bei den Leistungsmessungen im Anschluss an das Feldtestjahr 2014 nicht bestätigt werden. Nach 3.453 Bh weist der Traktor im Betrieb mit Rapsölkraftstoff nahezu die gleiche Leistungs- und Verbrauchscharakteristik auf wie vor dem Beginn des Sojaöleinsatzes bei 2.326 Bh. Der Leistungsabfall zwischen diesen Messungen bei 2.920 Bh könnte z. B. durch vorübergehende Verunreinigungen am Injektor oder eine höhere Beladung des AGN-Systems verursacht worden sein. Über einen längeren Zeitraum betrachtet können die Einsatzbedingungen wie z. B. Motorlast oder Temperaturen die Ablagerungsbildung am Injektor und die Wirksamkeit des eingesetzten Additivs zur Injektorreinigung beeinflussen.

Insgesamt zeigte der Traktor JD-K keine dauerhaften Einbußen hinsichtlich Leistung und Kraftstoffverbrauch über zwei Einsatzjahre, trotz einer zusätzlich installierten Prototyp-Abgasnachbehandlung.

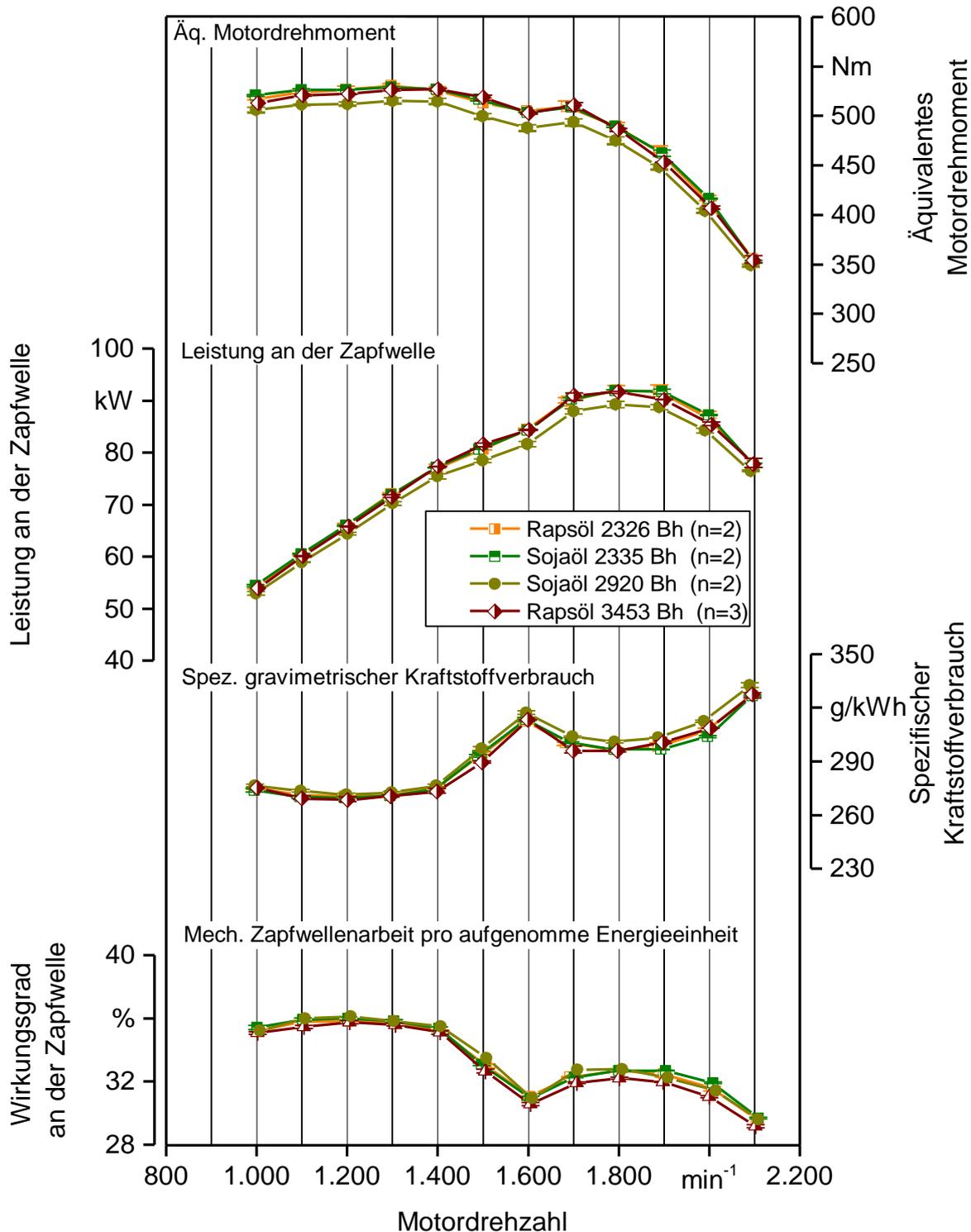


Abbildung 41: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des John Deere 6930 (JD-K) beim Betrieb mit Rapsöl- und Sojaölkraftstoff

Die Emissionsmessungen erfolgten in den gleichen Zeiträumen wie die Leistungsprüfungen. Dabei ist kaum ein Unterschied im Emissionsverhalten des Traktors mit Rapsölkraftstoff bei 2.326 Bh im Vergleich zu Sojaölkraftstoff bei 2.335 Bh ersichtlich.

Im Feldversuch mit Sojaölkraftstoff weist der Traktor im Untersuchungszeitraum gleichbleibende NO_x -, HC- und CO-Emissionen nach der Abgasnachbehandlung auf. Dies spricht auch für eine unveränderte Funktion des SCR- und Oxidationskatalysators.

In Prüfphase 8, dem Leerlauf, findet keine Reduktion von NO_x (Abbildung 43), CO (Abbildung 44) und HC (Abbildung 45) durch die Abgasnachbehandlung statt. Die Abgastemperaturen sind in dieser Prüfphase für die Funktion des SCR-Systems und des Oxidationskatalysators nicht ausreichend. In der Prüfphase 4 mit geringer Last (10 %) reichen hingegen die etwas höheren Abgastemperaturen für das Anspringen beider Katalysatoren aus. Die NO_x -Emissionen (Abbildung 42) unterscheiden sich über die drei Messreihen in den meisten Prüfphasen im Mittel kaum. Auch die Effizienz des SCR-Systems blieb über die drei Messreihen nahezu auf gleichem Niveau (Abbildung 43). Einzelne Prüfpunkte sind jedoch durch schwankende NO_x -Emissionen gekennzeichnet. Möglicherweise handelt es sich dabei um abgestufte Einstellungen der Motorsteuerung und des SCR-Systems, die in Abhängigkeit des Betriebszustands und der Umgebungsparameter in verschiedener Weise aktiv waren. Unterschiedliche Vorgaben der Motorsteuerung hinsichtlich der Einspritzparameter des Kraftstoffs oder der Abgasrückführung innerhalb der Wiederholungen eines Betriebspunkts haben einen ausgeprägten Einfluss auf die Emissionen. So resultiert die große Spannweite der NO_x -Emissionen in Phase 3 aus der deaktivierten Abgasrückführung in einer von drei Wiederholungen. Gleichmaßen verhält es sich mit der Konversionsrate des SCR-Systems, da deren Harnstoffdosierung unter anderem auch von der eingehenden motorseitigen Abgaszusammensetzung beeinflusst wird.

Die Partikelmasse-Emissionen befinden sich auf geringem Niveau und zeigen messverfahrensbedingte Schwankungen zwischen den Wiederholungsmessungen. Der PM-Ausstoß, wie in Abbildung 46 zu sehen, war in den Prüfphasen 5 und 8 mit Sojaölkraftstoff bei 2.920 Bh höher als bei den vorherigen Tests mit Sojaöl- und Rapsölkraftstoff. Ob höhere Rohemissionen des Motors oder eine geringere Abscheiderate des Partikelfilters diese Abweichung verursacht haben, ist unklar. Auch hier kann es möglich sein, dass das Motorsteuergerät je nach Betriebszustand den Motorbetrieb spezifisch regelt und manche Prüfphasen am Übergang zweier diskreter Regelungsstrategien liegen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Betrieb des Traktors mit Sojaöl über 585 Betriebsstunden nur geringfügige Auswirkungen auf das Emissionsverhalten hat. Resultierend aus einer etwas geringeren Leistung an der Zapfwelle und der damit geringeren geleisteten Arbeit erhöhen sich die spezifischen Emissionen geringfügig über den gesamten Prüfzyklus. Abbildung 47 zeigt, dass die Grenzwerte der Abgasstufe IIIA mithilfe der Prototypen-Abgasnachbehandlung dennoch unterschritten werden.

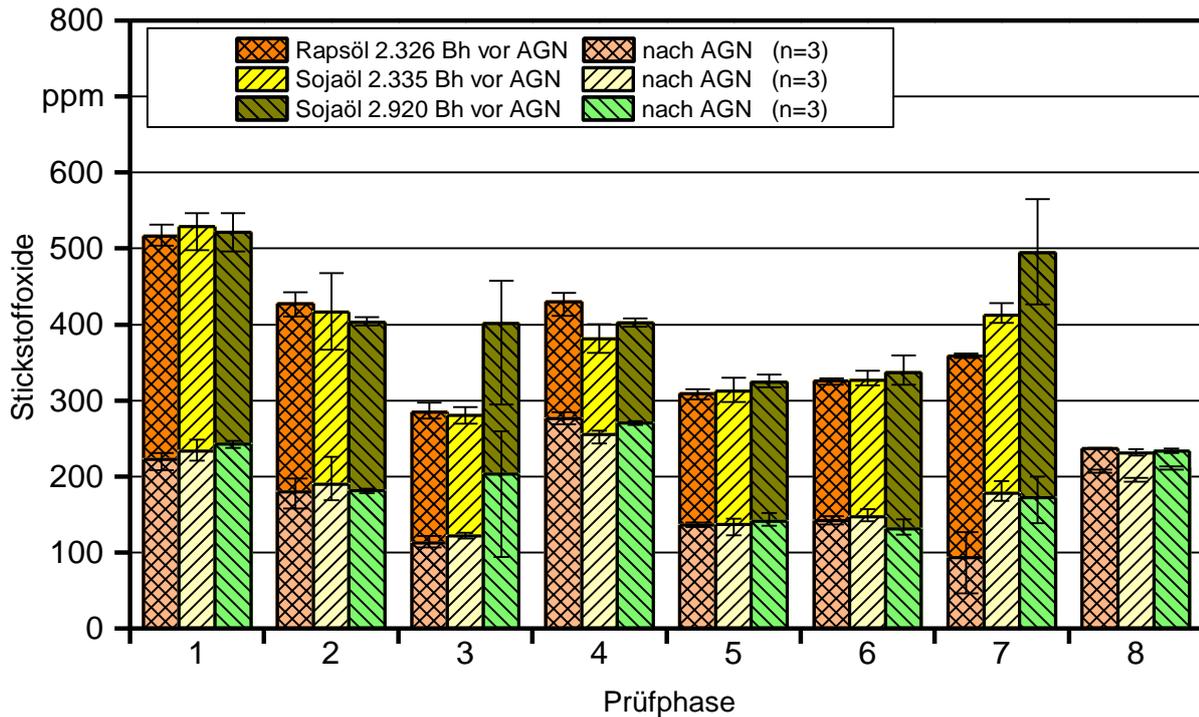


Abbildung 42: Mittelwerte und Spannweiten der Stickstoffoxid-Emissionen in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl vor und nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN) des John Deere 6930 (JD-K)

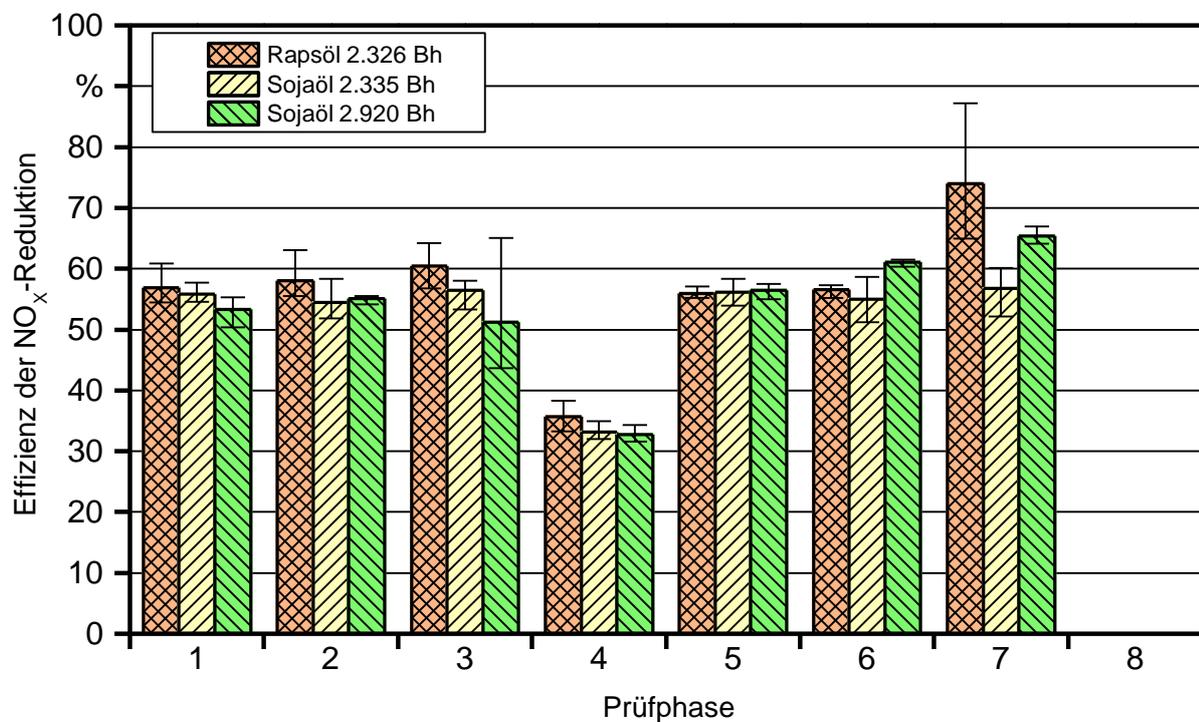


Abbildung 43: Mittelwerte und Spannweiten der Effizienz der Stickstoffoxid-Reduktion (SCR-Effizienz) in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl des John Deere 6930 (JD-K)

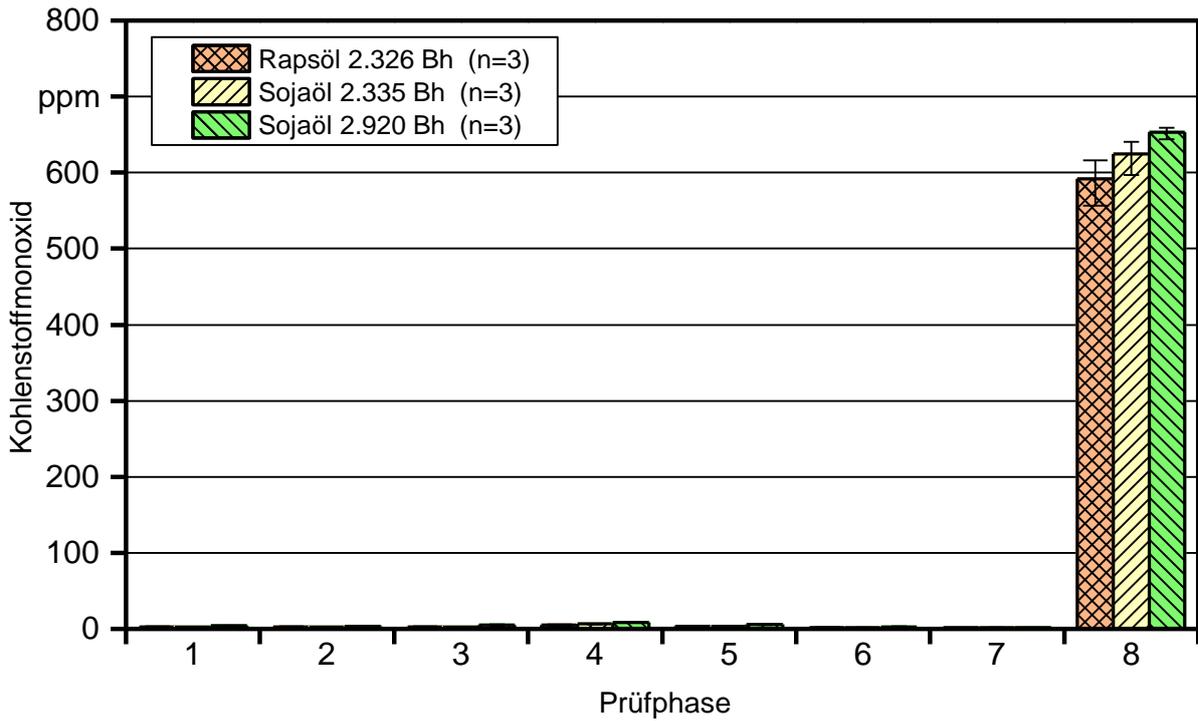


Abbildung 44: Mittelwerte und Spannweiten der Kohlenstoffmonoxid-Emissionen in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN) des John Deere 6930 (JD-K)

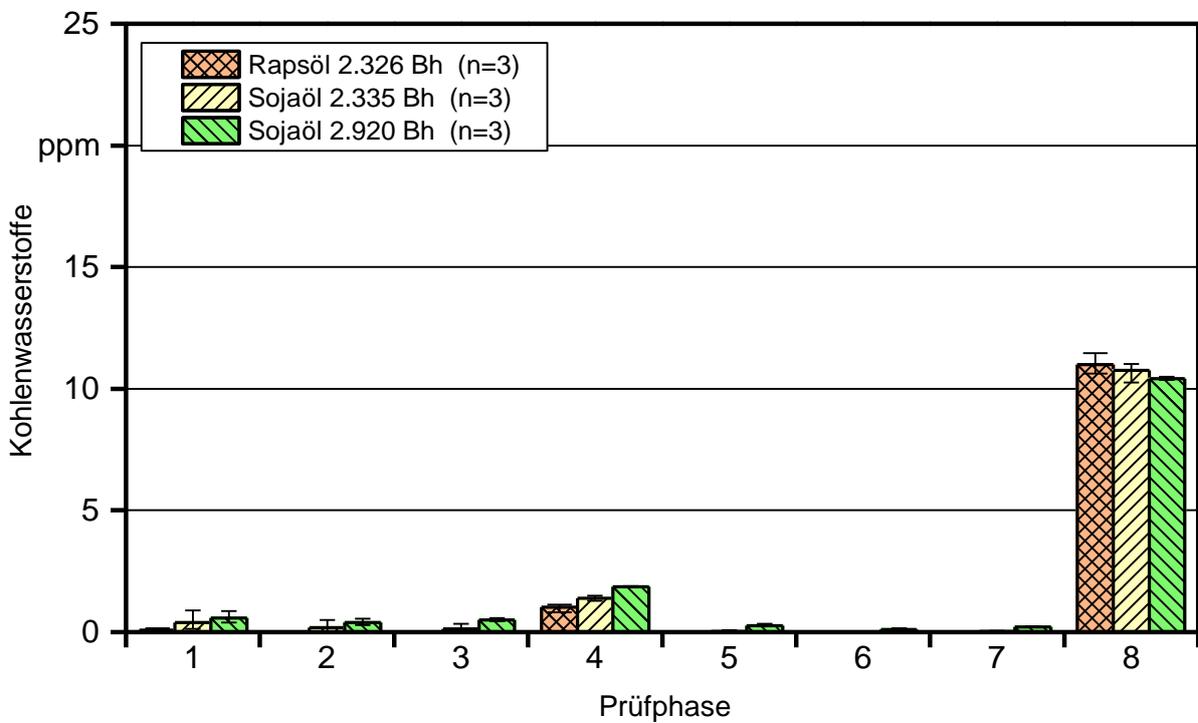


Abbildung 45: Mittelwerte und Spannweiten der Kohlenwasserstoff-Emissionen in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN) des John Deere 6930 (JD-K)

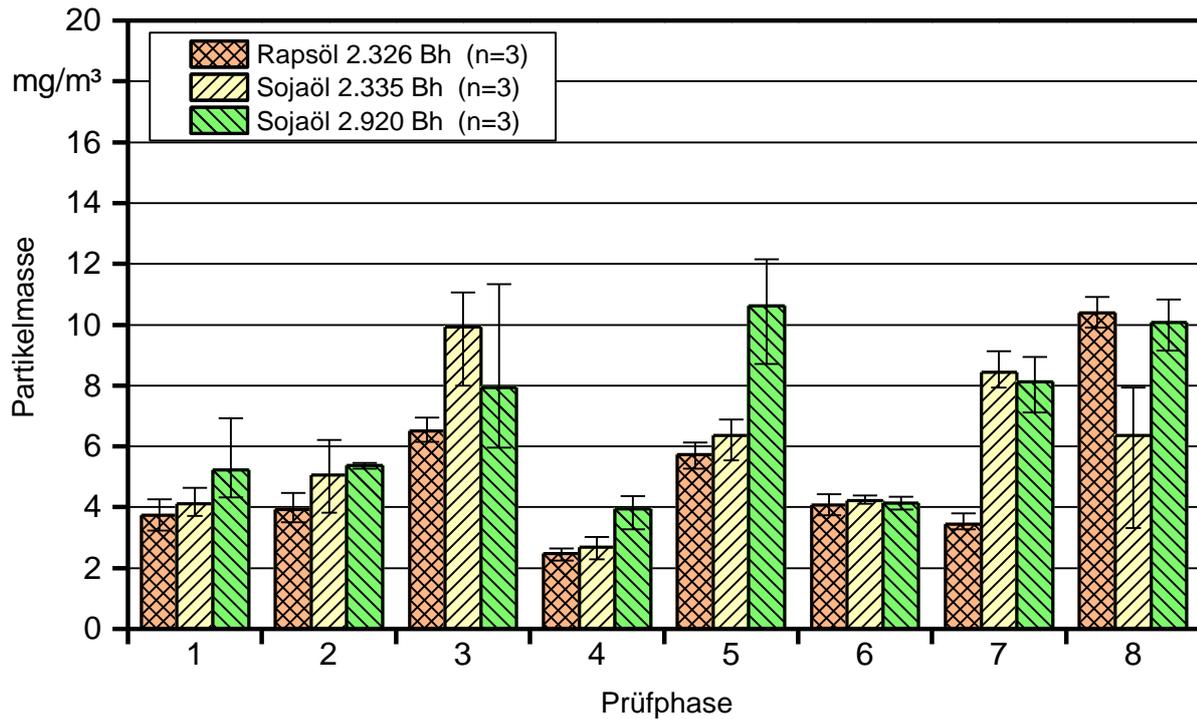


Abbildung 46: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse-Emissionen in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl und Sojaöl nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung (AGN) des John Deere 6930 (JD-K)

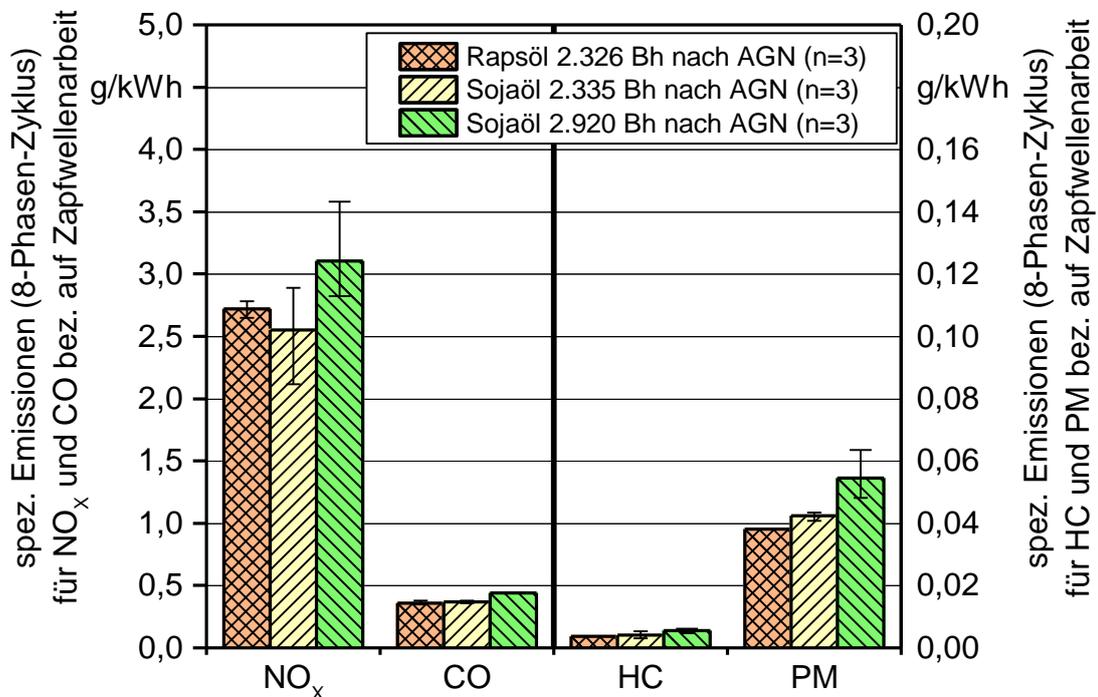


Abbildung 47: Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 (nach der Prototyp-Abgasnachbehandlung) für Rapsöl und Sojaöl des John Deere 6930 (JD-K)

6.2.2.2 John Deere 6930 Premium (JD-G)

Der Traktor JD-G mit Prototyp-AGN wurde bei ca. 2.000 Bh mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff am Traktorenprüfstand hinsichtlich Leistung und Emissionen getestet. Nach Befundung des Motors und Abbau der Prototyp-AGN erfolgte bei 2.821 Bh erneut eine Leistungsmessung mit dem ECU-Softwarestand der Ausgangsmessung bei 585 Bh, die auf den Pflanzenölbetrieb ohne AGN optimiert ist.

Leistungsmessung mit nachgerüsteter Prototyp-AGN

In Abbildung 48 ist der Verlauf von Leistung, Drehmoment, spezifischem Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle über knapp 900 Bh seit der Nachrüstung der Abgasnachbehandlung bei ca. 1.100 Bh dargestellt. Bei 1.157 Bh wurden Motorleistungsschwankungen in einigen Betriebspunkten mit einer verbesserten Motorsteuerungssoftware behoben.

Leistung, Drehmoment, spezifischer Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle waren mit Rapsölkraftstoff bei 1.111 und 1.416 Bh auf nahezu gleichem Niveau. Mit Dieselmotorkraftstoff hat der Traktor bei 1.120 Bh ca. 12 bis 16 % mehr Leistung an der Zapfwelle als mit Rapsölkraftstoff. Es zeigt sich, dass im Mittel über die gesamte Leistungsmessung 9 % weniger Kraftstoffvolumen pro Hub mit Rapsölkraftstoff in den Brennraum eingetragen wurde. In Kombination mit dem um ca. 5 % geringeren volumetrischen Heizwert von Rapsölkraftstoff lässt sich die höhere Leistung mit Dieselmotorkraftstoff erklären. Der Wirkungsgrad an der Zapfwelle ist mit Rapsöl um ca. 2 % niedriger.

Zwischen den Prüfstandsuntersuchungen bei 1.416 und 2.005 Bh ist die Leistung im Rapsölbetrieb um ca. 8 % im Mittel über die Volllastkurve gesunken. Im oberen Drehzahlbereich (über 1.600 min^{-1}) ist der Wirkungsgrad um ca. 3 bis 4 % geringer und im unteren Drehzahlbereich um ca. 1 bis 3 %. Es ist unklar, wodurch der Leistungsrückgang ausgelöst wurde. Ein möglicher Grund könnten Ablagerungen oder Verschleiß an den Injektoren sein. Ein Rückgang der volumetrischen Einspritzmenge um 5 % zwischen den Drehzahlen 2.100 und 1.000 min^{-1} könnte diese These unterstützen.

Eine weitere mögliche Ursache könnte der höhere Gegendruck im Abgasstrang sein (Abbildung 49), der zwischen den Messungen um 4 bis 6 % angestiegen ist. Üblicherweise ist bei einer höheren Leistung aufgrund des höheren Abgasmassenstroms ein höherer Abgasgegendruck zu erwarten. In diesem Fall stieg jedoch der Abgasgegendruck, obwohl die Leistung an der Zapfwelle fiel. Der Abgasgegendruck wurde direkt nach dem Oxidationskatalysator gemessen und kann auf eine höhere Partikelbeladung im nachfolgenden SCR-Katalysator oder halboffenen Partikelfilter hindeuten.

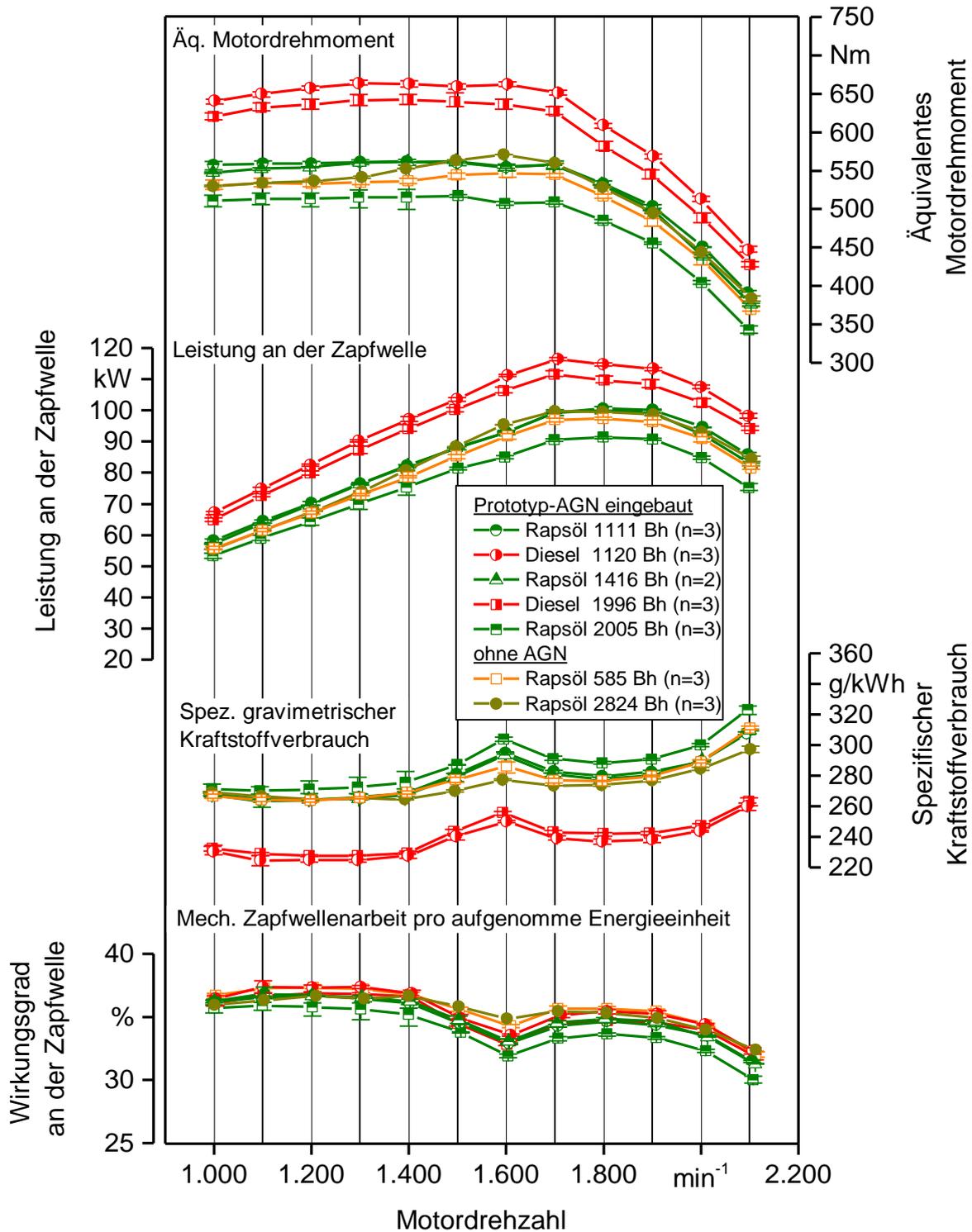


Abbildung 48: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des John Deere 6930 (JD-G) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff mit Abgasnachbehandlung (AGN) [24]

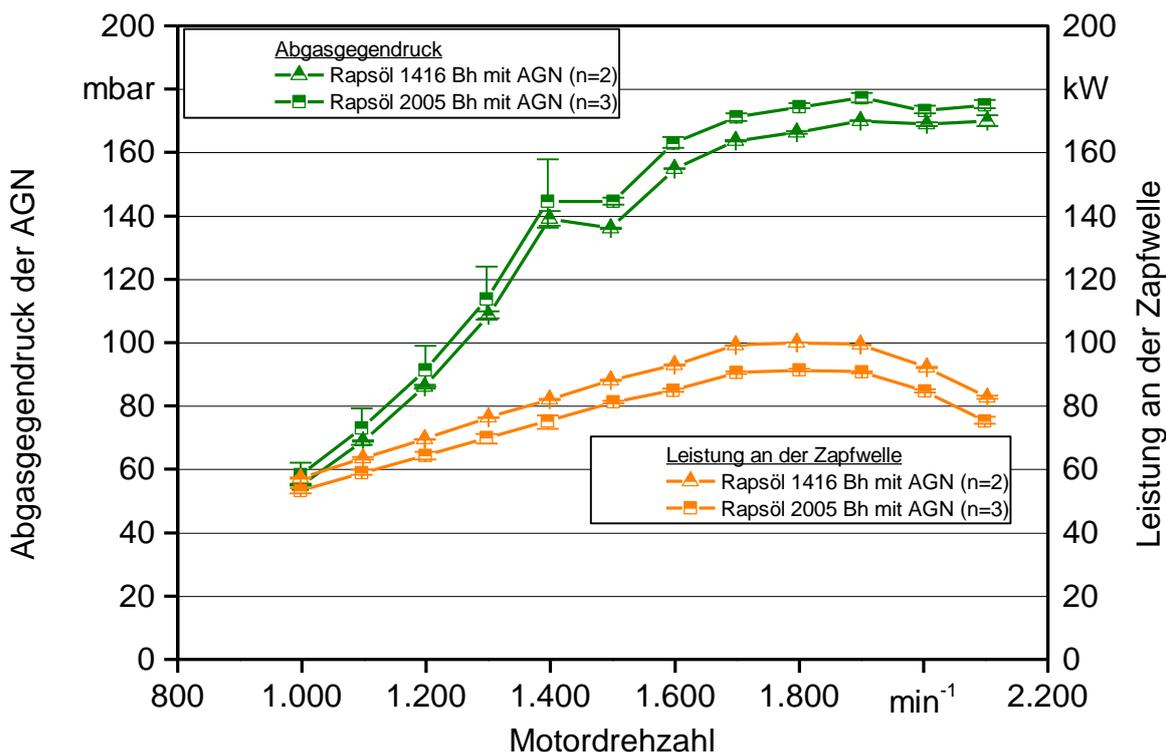


Abbildung 49: Mittelwerte und Spannweiten des Abgasgegendrucks zwischen Motor und AGN und Zapfwellenleistung nach 1416 und 2005 Bh mit Rapsölkraftstoff

Leistungsmessung ohne Prototyp-AGN

Bei 2.821 Bh wurde der Motor des JD-G begutachtet und die Prototyp-AGN abgebaut (siehe Abschnitt 6.2.2.2). Eine Leistungsmessung bei 2.824 Bh zeigte im Vergleich zu den Messungen vor dem Einbau der Prototyp-AGN bei 585 Bh keine Veränderung der Leistung oder des Kraftstoffverbrauchs (Abbildung 48). Der während des Betriebs mit der Prototyp-AGN bei 2.005 Bh aufgetretene Leistungsverlust war nach dem Ausbau der Prototyp-AGN und nach der Motorbefundung nicht mehr feststellbar.

Emissionsmessungen

In Abbildung 50 ist der Verlauf der Emissionen von JD-G mit Diesel- und Rapsölkraftstoff über knapp 2.000 Bh dargestellt. Bei ca. 50 Bh wurden im Rahmen der Umrüstung die Motoreinstellungen zur Reduzierung des NO_x -Ausstoßes im Pflanzenölbetrieb geändert. Der Traktor wurde bei ca. 1.100 Bh mit einem Prototyp-Abgasnachbehandlungssystem (AGN) nachgerüstet. Bis zu diesem Umbau am Traktor hatte JD-G mit Rapsölkraftstoff rund 9 bis 24 % höhere NO_x -, 21 bis 30 % höhere CO-, 24 bis 41 % geringere HC- und 19 bis 21 % niedrigere PM-Emissionen als mit Dieselmotorkraftstoff. Die AGN reduzierte die limitierten Schadstoffkomponenten im Abgas deutlich. Im Vergleich zur Messung bei 1.100 Bh ohne AGN war bei der Messung bei 2.000 Bh mit Rapsölkraftstoff der Ausstoß von NO_x um 47 %, von CO um 71 %, von HC um 95 % und von PM um 45 % reduziert.

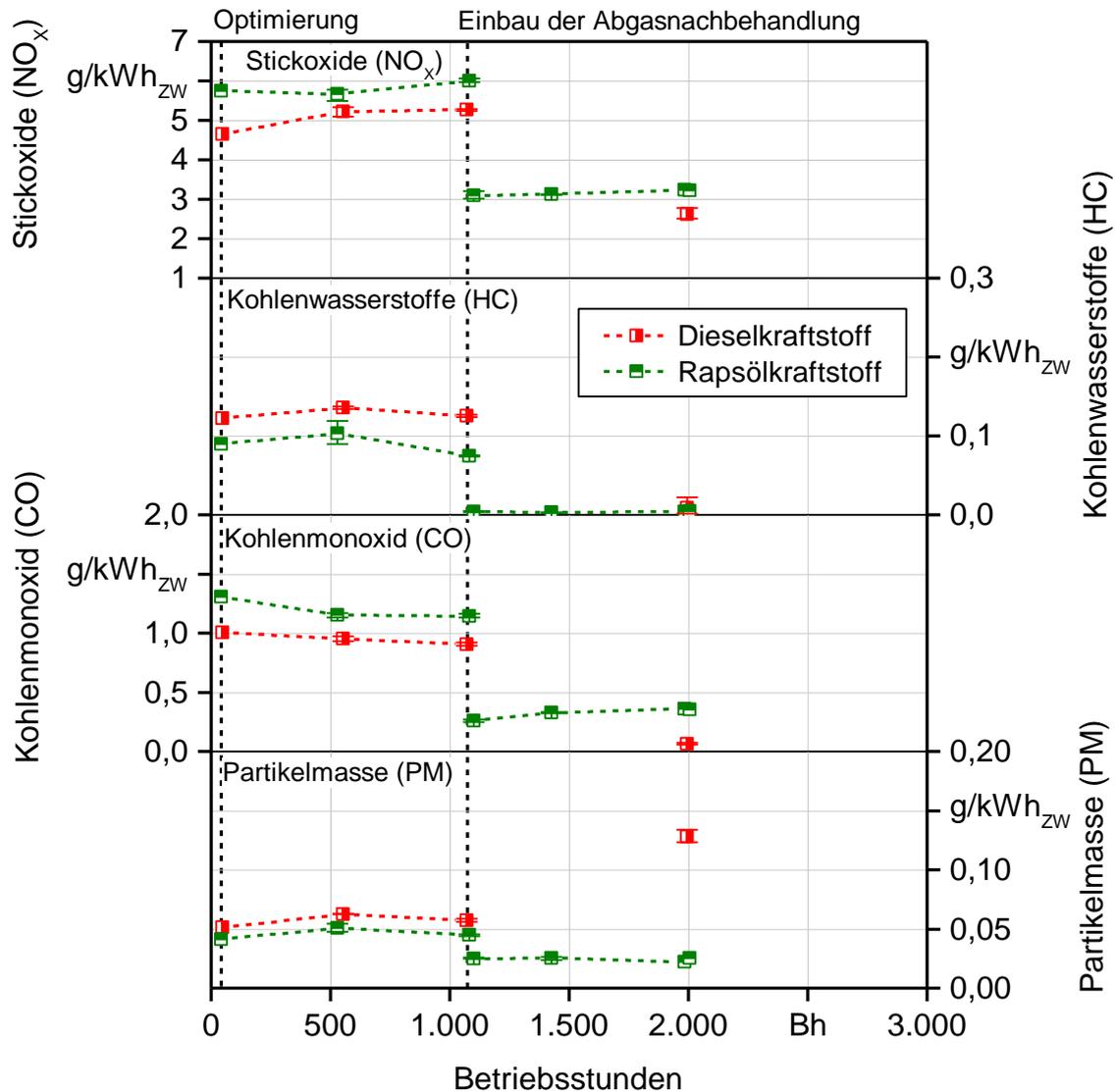


Abbildung 50: Mittelwerte und Spannweiten der limitierten Abgasemissionen des Traktors JD-G im stationären C1-Zyklus nach ISO 8178-4 für Rapsöl- (RK) und Dieseldkraftstoff (DK) über die Laufzeit [24]

Mit Dieseldkraftstoff zeigten sich bei 2.000 Bh mit nachgerüsteter AGN um 23 % geringere NO_x-Emissionen als mit Rapsölkraftstoff. Auch die CO-Emissionen sind mit Diesel geringer, da der Oxidationskatalysator aufgrund der höheren Leistung bei Dieselbetrieb eine höhere Betriebstemperatur im Leerlauf (Prüfphase 8) aufweist, die über der Anspringtemperatur des Oxidationskatalysators liegt. Der HC- bzw. PM-Ausstoß war mit Rapsölkraftstoffstoff hingegen um 50 bzw. 80 % niedriger. Die PM-Emissionen nach dem Einbau der AGN mit Rapsölkraftstoff bei 1.100 und 2.000 Bh sind nahezu konstant. Die jüngste Messung mit Dieseldkraftstoff bei ca. 2.000 Bh zeigt trotz des nachgerüsteten halboffenen Partikelfilters 2,2-fach höhere PM-Emissionen im Vergleich zur Messung vor

dem AGN-Einbau. Dieser Anstieg ist über alle Prüfphasen ersichtlich und konzentriert sich nicht nur auf Phasen nahe der Rußgrenze bei einem Lambda von 1,3.

Als Ursache werden generell höhere PM-Emissionen des Motors (vor der AGN) mit Dieselmotorkraftstoff oder ein verminderter Abscheidegrad aufgrund einer hohen Beladung des halboffenen Partikelfilters vermutet. Die höhere Beladung wiederum könnte eine Folge unzureichender passiver Regeneration des Partikelfilters durch das ungünstigere NO/NO₂-Verhältnis im Dieselmotorgas im Vergleich zum Rapsölbetrieb sein. Mit zunehmendem Beladungszustand steigen der Abgasgegendruck und damit auch die Menge des ungefilterten Abgases, das über den Bypass strömt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der nachträgliche Einbau eines AGN-Systems mit den Komponenten Oxidations- und SCR-Katalysator sowie halboffener Partikelfilter zu einer deutlichen Reduzierung der limitierten Emissionskomponenten geführt hat und die Wirksamkeit im Rapsölbetrieb auch nach knapp 1.000 h der AGN gleich geblieben ist. Ein späterer Ausfall der Dosierung des Prototyp-SCR-Systems im darauffolgenden Feldtest ist in Abschnitt 6.1.4 beschrieben.

6.2.2.3 New Holland T6080 (NH-W)

Der New Holland Traktor (NH-W) der Abgasstufe IIIA ohne Abgasnachbehandlung und mit Abgasrückführung wurde hauptsächlich durch Änderungen an der Motorsteuerungssoftware umgerüstet.

Die maximale Leistung an der Zapfwelle (bei aktiviertem Boost) liegt für beide Kraftstoffe im Drehzahlbereich von etwa 1.900 min⁻¹. Im Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff beträgt die Maximalleistung 131 kW und mit Rapsölmotorkraftstoff 125 kW. Mit Rapsölmotorkraftstoff war somit eine etwa 5 % geringere Maximalleistung an der Zapfwelle festzustellen. Im unteren Drehzahlbereich verringert sich die Differenz der Zapfwellenleistung zwischen den beiden Kraftstoffen. Ohne Anpassungen des Motorsteuergeräts wäre der Leistungsunterschied möglicherweise höher ausgefallen.

Die Unterschiede beim spezifischen Kraftstoffverbrauch für Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff lassen sich in den Bereich über und unter 1.650 min⁻¹ einteilen. Im oberen Drehzahlbereich lag der spezifische volumetrische Kraftstoffverbrauch mit Rapsölmotorkraftstoff um 9 bis 13 % höher, im unteren Drehzahlbereich dagegen nur um 1 bis 5 %. Weil Rapsölmotorkraftstoff einen etwa 5 % geringeren volumetrischen Heizwert aufweist, ergibt sich somit ein etwas höherer spezifischer Kraftstoffverbrauch.

Unter der Drehzahl von 1.600 min⁻¹ hat der Traktor unter Vollast mit Rapsölmotorkraftstoff einen etwas höheren Wirkungsgrad an der Zapfwelle. Über der Drehzahl von 1.600 min⁻¹ ist der Wirkungsgrad mit Dieselmotorkraftstoff höher.

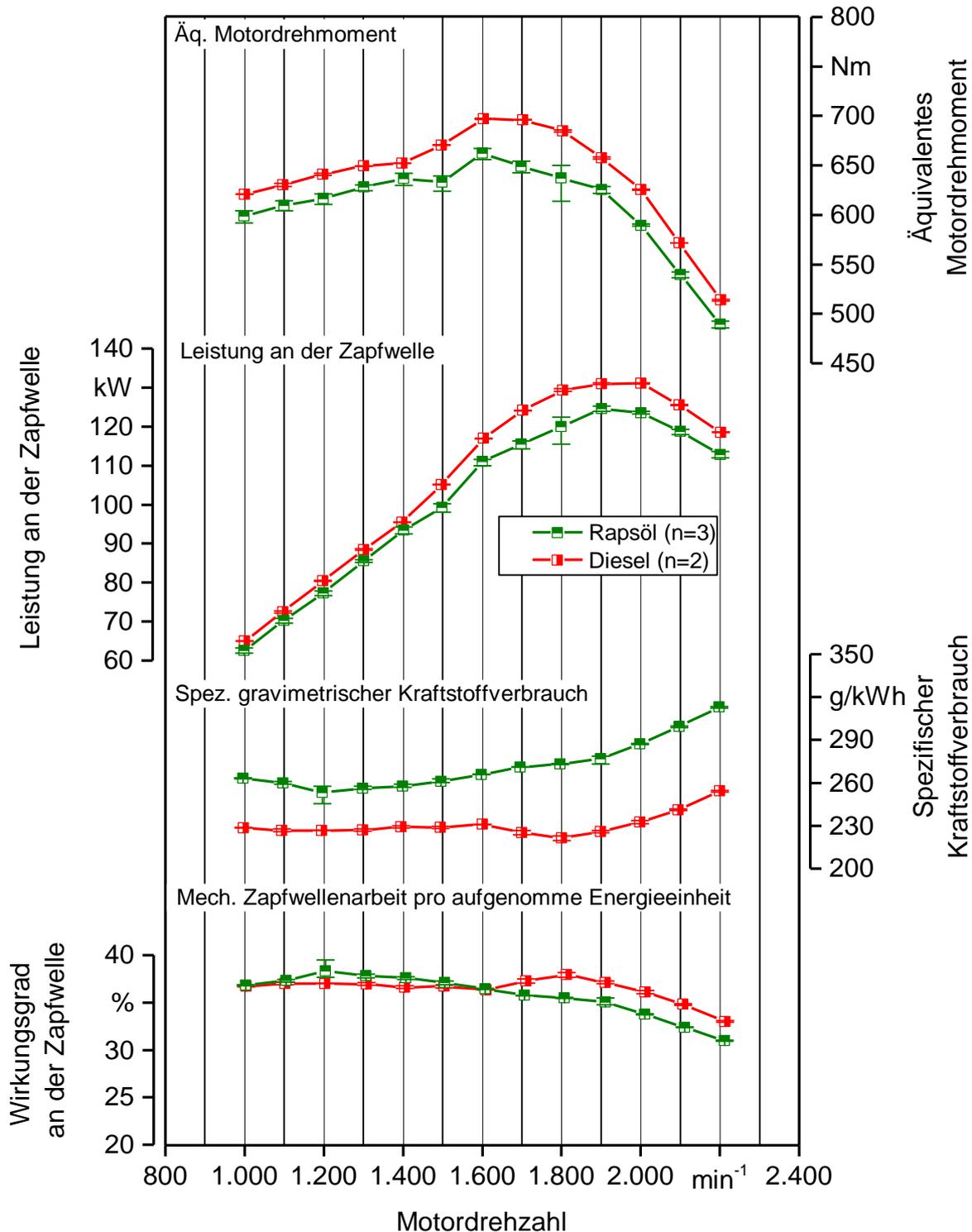


Abbildung 51: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des New Holland T6080 (NH-W) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff

Abbildung 52 zeigt die Ergebnisse der Emissionsmessungen des Traktors NH-W mit Dieselkraftstoff vor der Umrüstung und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung. Die Stickoxid- und Kohlenstoffmonoxid-Emissionen bewegen sich für beide Kraftstoffe auf etwa gleichem Niveau. Die Kohlenwasserstoff- und Partikelmasse-Emissionen halbieren sich jedoch im Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff.

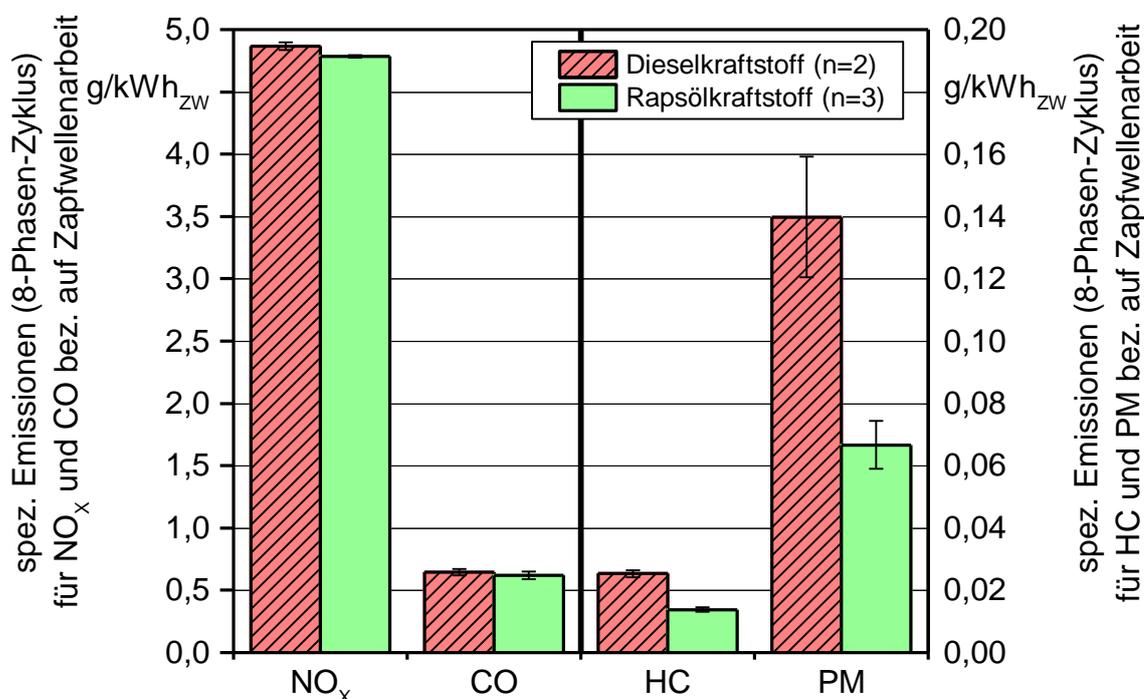


Abbildung 52: Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus nach ISO 8178 für Rapsöl- (RK) und Dieselkraftstoff (DK) des Versuchstraktors NH-W

6.2.3 Abgasstufe IIIB

Emissions- und Leistungsmessungen an den Traktoren der Abgasstufe IIIB liegen für den Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) und John Deere 6125R (JD-N) vor.

Der Fendt Vario 718 SCR wurde in einer ersten Messreihe im Werkzustand mit Dieselkraftstoff bei 10 Bh geprüft. Weitere Messreihen erfolgten nach der Umrüstung auf den Rapsölkraftstoffbetrieb bei 50, 250 und 520 Bh.

Beim Traktor JD-N wurden vor und nach der Umrüstung auf Rapsölkraftstoff sowie nach 200 Bh Feldtest Leistungs- und Emissionsmessungen durchgeführt.

6.2.3.1 Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka)

Leistung, Kraftstoff und Harnstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad

Die Leistung an der Zapfwelle ist im Dieselbetrieb mit 105 kW um ca. 21 % geringer als die vom Hersteller mit 133 kW angegebene Motornennleistung (nach 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.

Rapsöl- und Dieselkraftstoffmessungen im Neuzustand

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 Dieselmotorkraftstoff (siehe Abbildung 53). Daraus resultiert auch die geringere Leistung des Traktors mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. Der spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch ist im Betrieb mit Rapsölkraftstoff um 13 bis 18 % größer als mit Dieselmotorkraftstoff, der spezifische volumetrische Kraftstoffverbrauch ist aufgrund der höheren Dichte von Rapsölkraftstoff nur um 3 bis 7 % höher. Neben der Dichte unterscheidet sich auch der Heizwert zwischen Rapsölkraftstoff mit 37 MJ/kg und Dieselmotorkraftstoff mit 43 MJ/kg (siehe Abschnitt 6.1.2). Ein Vergleich des Verhältnisses von abgegebener Zapfwellenleistung zu zugeführter Brennstoffleistung ergibt, dass die Unterschiede zwischen Dieselmotorkraftstoff und Rapsölkraftstoff ± 2 % betragen. Der Wirkungsgrad des Traktormotors ist somit im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff in etwa gleich. Die Unterschiede im Leistungsverhalten sind auf die unterschiedlichen zugeführten Brennstoffenergiemengen zurückzuführen.

Unterschiede in der zugeführten Brennstoffenergiemenge können, neben der Dichte und dem Heizwert, auch auf das unterschiedliche Verhalten von Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff im Einspritzsystem des Motors zurückgeführt werden. Frühere Dieselmotoren-Generationen mit Hochdruckeinspritzsystemen des Typs Pumpe-Leitung-Düse (PLD) erreichen häufig mit Rapsölkraftstoff eine ähnliche oder höhere Leistung an der Zapfwelle als im Dieselmotorkraftstoffbetrieb. Bei diesen mechanischen Einspritzsystemen kommt es durch die Viskositäts- und Kompressibilitätsunterschiede von Rapsöl im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff zu einer früheren Düsenöffnung, was wiederum häufig eine höhere Einspritzmenge und damit auch Motorleistung zur Folge hat. [64]

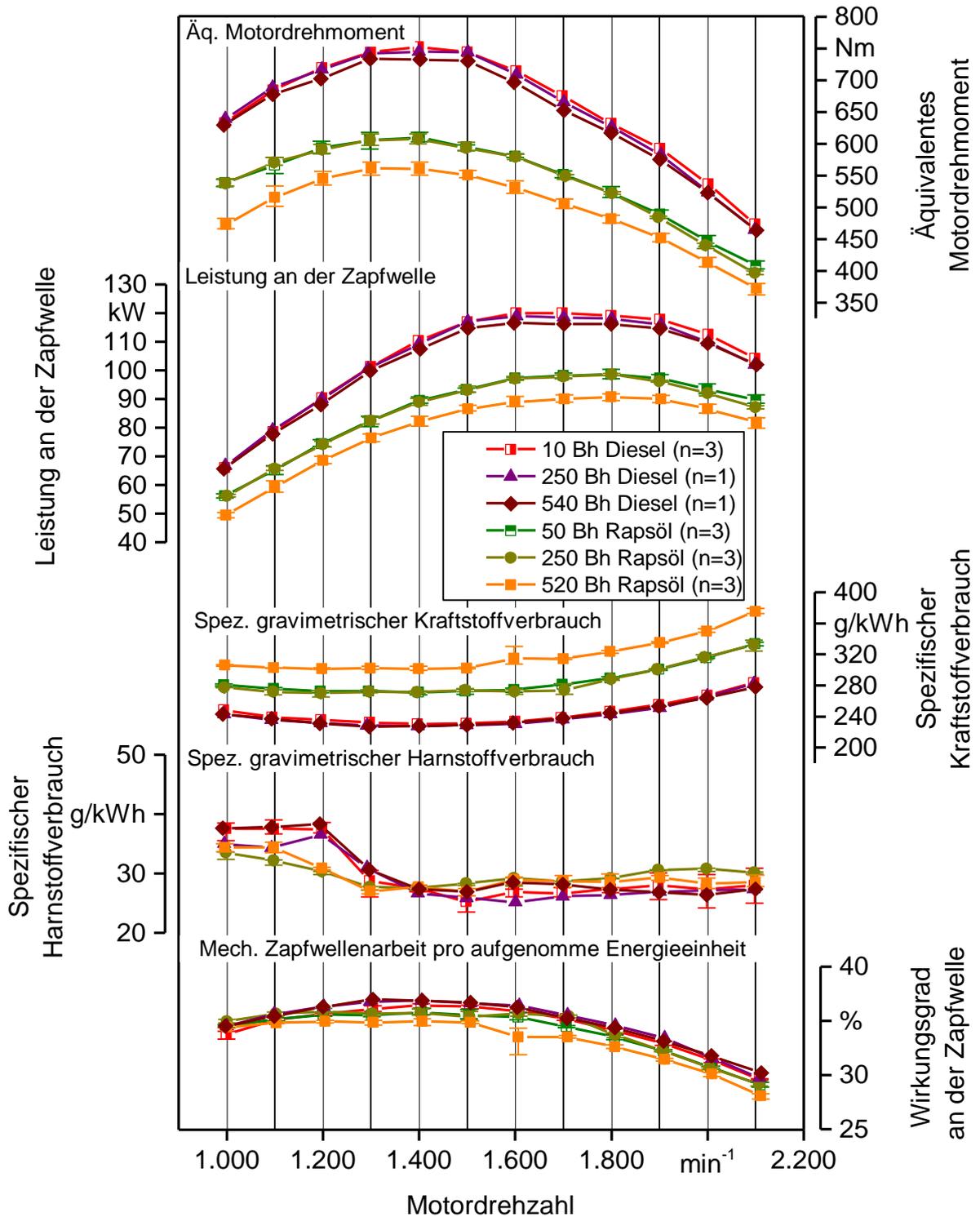


Abbildung 53: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Harnstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff

Bei Common-Rail-Motoren ist hingegen bei gleichen Motoreinstellungen häufig mit Rapsölkraftstoff eine geringere Motorleistung festzustellen als mit Diesellokraftstoff, da bei einem Common-Rail-System der Kraftstoff nach definierten Vorgaben, unabhängig von der Motordrehzahl und Kurbelwellenposition, injiziert wird. Die Einspritzmenge hängt dabei primär von der Bestromungsdauer des Injektoröffnungsventils ab [54]. Der geringere Energiegehalt von Rapsölkraftstoff führt demnach bei gleicher Einspritzmenge zu der beschriebenen Minderleistung. Dies konnte bereits bei mehreren Messungen an Traktoren mit Common-Rail-Motoren am Traktorenprüfstand des TFZ beobachtet werden. Beispielsweise war bei gleichen Einstellungen der Einspritzparameter im Motorsteuergerät die Leistung eines John Deere 6930 Premium und eines Fendt 820 Vario^{greentec} mit Rapsölkraftstoff in etwa 10 bis 17 % niedriger als mit Diesellokraftstoff [25]. Dies ist auch beim Fendt Vario 718 SCR festzustellen, wie aus Abbildung 54 hervorgeht. Um die zugeführte Brennstoffenergiemenge von Rapsöl- und Diesellokraftstoff anzugleichen, müsste die Einspritzmenge im Rapsölbetrieb erhöht werden. Dies würde voraussichtlich zu einer etwa gleichen Zapfwellenleistung führen. Dazu wäre jedoch eine Anpassung der Einspritzparameter im Motorsteuergerät erforderlich.

Der spezifische Harnstoffverbrauch beträgt im Betrieb mit Rapsöl über den ganzen Drehzahlbereich im Mittel ca. 30 ± 2 g/kWh (siehe Abbildung 53). Im Diesellobetrieb 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. Bei niedrigeren Drehzahlen steigt der spezifische Harnstoffverbrauch im Betrieb mit Diesellokraftstoff jedoch auf 37 g/kWh an. Mit Rapsölkraftstoff ist der Harnstoffverbrauch dabei mit 30 bis 34 g/kWh geringer. Ein Abgleich mit den gleichzeitig erfassten NO_x -Emissionen zeigt, dass bei diesen niedrigen Drehzahlen im Betrieb mit Diesellokraftstoff die NO_x -Emissionen mit ca. 330 bis 400 ppm deutlich höher sind als im Betrieb mit Rapsölkraftstoff (ca. 40 bis 100 ppm). Um diese höheren Emissionen zu kompensieren, wird durch das SCR-System eine größere Menge an Harnstofflösung in das Abgas dosiert. Anhand der plausiblen Harnstoff-Verbrauchswerte während der Leistungsmessung bei Vollast lässt sich schließen, dass das SCR-System des Traktors auch mit Rapsölkraftstoff gut funktioniert.

Rapsöl- und Diesellokraftstoffmessungen über knapp 500 Feldteststunden

Die Messung bei einem Betriebsstundenzählerstand von 250 bzw. nach 200 Feldteststunden zeigte keinen Einfluss auf die Leistung, den Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad im Rapsöl- und Diesellobetrieb. Nach knapp 500 Bh Einsatzzeit ist die Leistung jedoch im Rapsölbetrieb unter Vollast um durchschnittlich 7,8 % gesunken, verursacht durch eine um 5,1 % geringere volumetrische Einspritzmenge und einen um ca. 2,9 % niedrigeren Wirkungsgrad an der Zapfwelle. Im Diesellobetrieb sinken die volumetrische Einspritzmenge und die Leistung gleichermaßen im Mittel der Vollastkurve um 1,4 % bei unverändertem Wirkungsgrad. Tendenziell nimmt die Durchflussminderung mit Rapsöl und Diesel bei steigender Drehzahl ab.

Die Motorsteuerungssoftware sowie die Ansteuerzeiten des Injektors sind unverändert. Die Durchflussreduzierung kann möglicherweise durch Ablagerungen im Injektor verursacht worden sein.

Die Zerstäubung von Rapsölkraftstoff kann bei dieseloptimierten Einspritzbedingungen schlechter sein als mit Diesellokraftstoff, wodurch die Verbrennung weniger effizient verläuft und sich Ablagerungen bilden können [50]. Um die Ablagerungen zu verringern und einen diesellokraftstoffähnlichen Betrieb zu gewährleisten, ist eine Verbesserung der Verbrennung notwendig.

Ablagerungen scheinen im Rapsölbetrieb bei dieser Versuchsreihe stärkere Auswirkungen auf die Leistung als im Betrieb mit Diesellokraftstoff auszuüben. Jedoch können auch bei rein diesellobetriebenen Motoren mit Common-Rail-Einspritzsystem deutliche Leistungseinbußen bis 20 % über kurze Einsatzzeiten auftreten [16]. Additive zur kurzzeitigen oder dauerhaften Reinigung von Hochdruckeinspritzsystemen werden von den Motorenherstellern empfohlen, um die Ablagerungsbildung im Injektor zu mindern und einer Leistungsreduzierung über die Betriebsdauer entgegenzuwirken [16][17][11]. Das Rapsöl war im Feldtest nicht additiviert. Ausgehend von Ergebnissen der Traktorenflotte im Untersuchungszeitraum kann zwar keine eindeutige Wirksamkeit von Reinigungsadditiven im Rapsölbetrieb abgeleitet werden. Dennoch empfiehlt sich, wie auch im Diesellobetrieb, deren Einsatz z. B. im Zuge von Wartungsarbeiten. Für weitergehende Untersuchungen ist von Interesse, wie die Leistung mit und ohne Additivzugabe im Pflanzenölbetrieb verläuft.

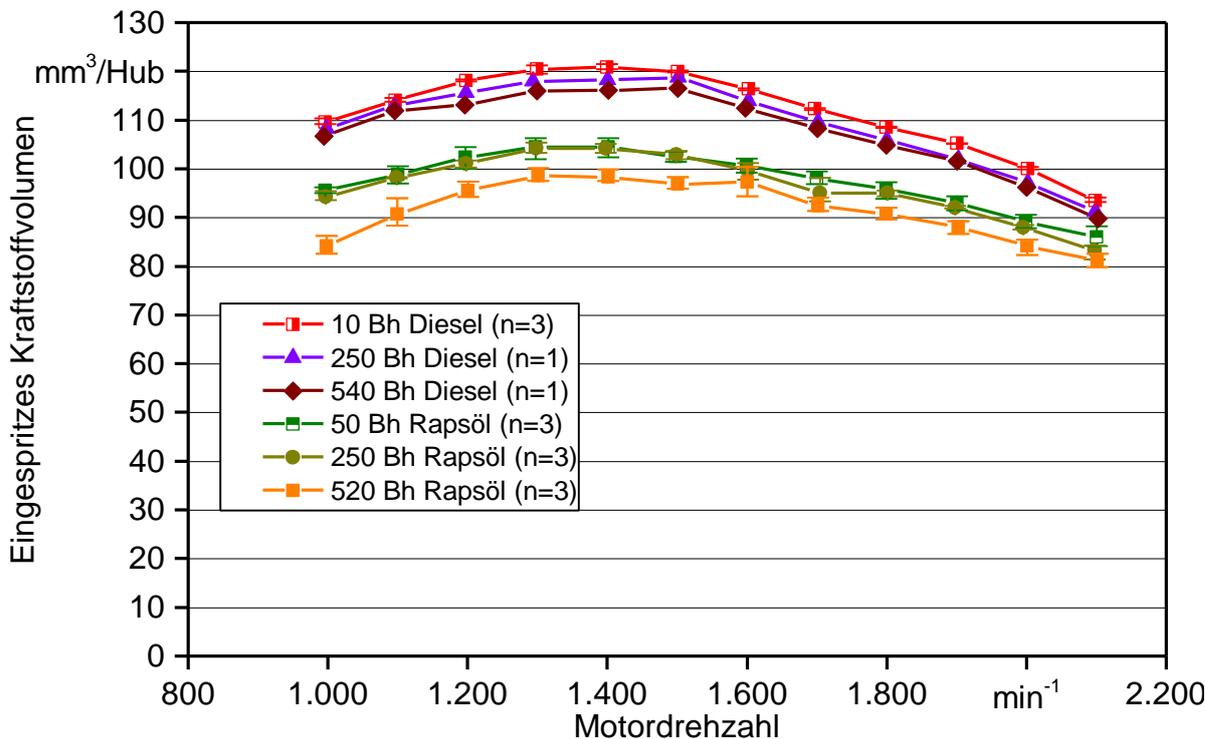


Abbildung 54: Mittelwerte und Spannweiten der pro Hub zugeführten Brennstoffmenge des Fendt Vario 718 beim Betrieb mit Rapsöl- und Diesellokraftstoff

Emissionen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Emissionsmessungen zu den einzelnen Prüfphasen, speziell zum Leerlauf und über den gesamten Prüfzyklus dargestellt.

Die Konzentration an Stickoxiden (NO_x) im Abgas des Traktors vor (Rohabgas) und nach (Reinabgas) dem Abgasnachbehandlungssystem (AGN) im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff ist in Abbildung 55 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in den Prüfphasen 1 bis 7 die NO_x -Emissionen durch das AGN-System deutlich reduziert werden, unabhängig vom verwendeten Kraftstoff. 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 Umsatzrate des SCR-Systems sinkt bei 520 Bh weiter ab auf 82 %. Bezüglich der Veränderung der Effizienz des SCR-Katalysators beim Dieselbetrieb wurden keine Untersuchungen durchgeführt.

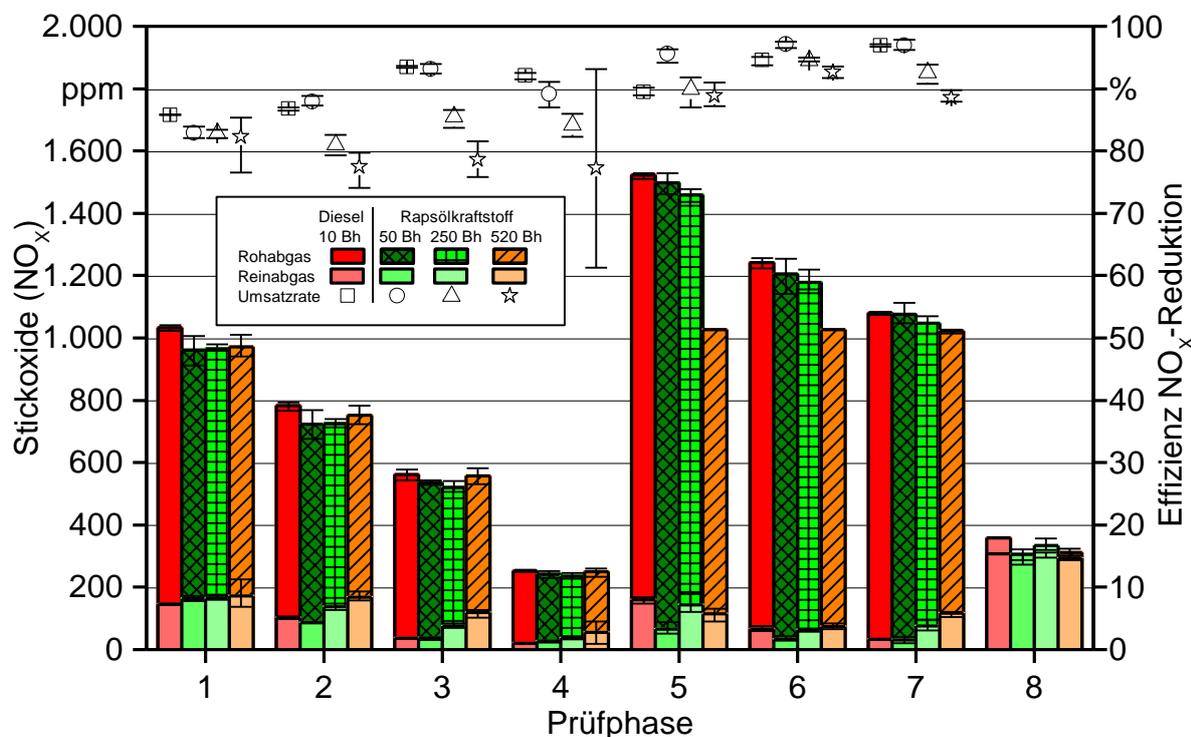


Abbildung 55: Mittelwerte und Spannweiten der Stickoxid-Emissionen des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung (Reingas)

Die NO_x -Konzentrationen von Rapsöl- und Dieselkraftstoff 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, da im Brennraum geringere Spitzentemperaturen erreicht werden und damit die

Bildung thermischen 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 56 für den Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff bei 10, 50, 250 und 520 Bh dargestellt. Bei der Nenn- und bei der Zwischendrehzahl ist ein Rückgang des Harnstoff-Verbrauchs mit abnehmender Leistung und damit abnehmenden NO_x -Konzentrationen vor dem AGN-System festzustellen. Das SCR-System gleicht in Abhängigkeit des Signals des NO_x -Sensors 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.

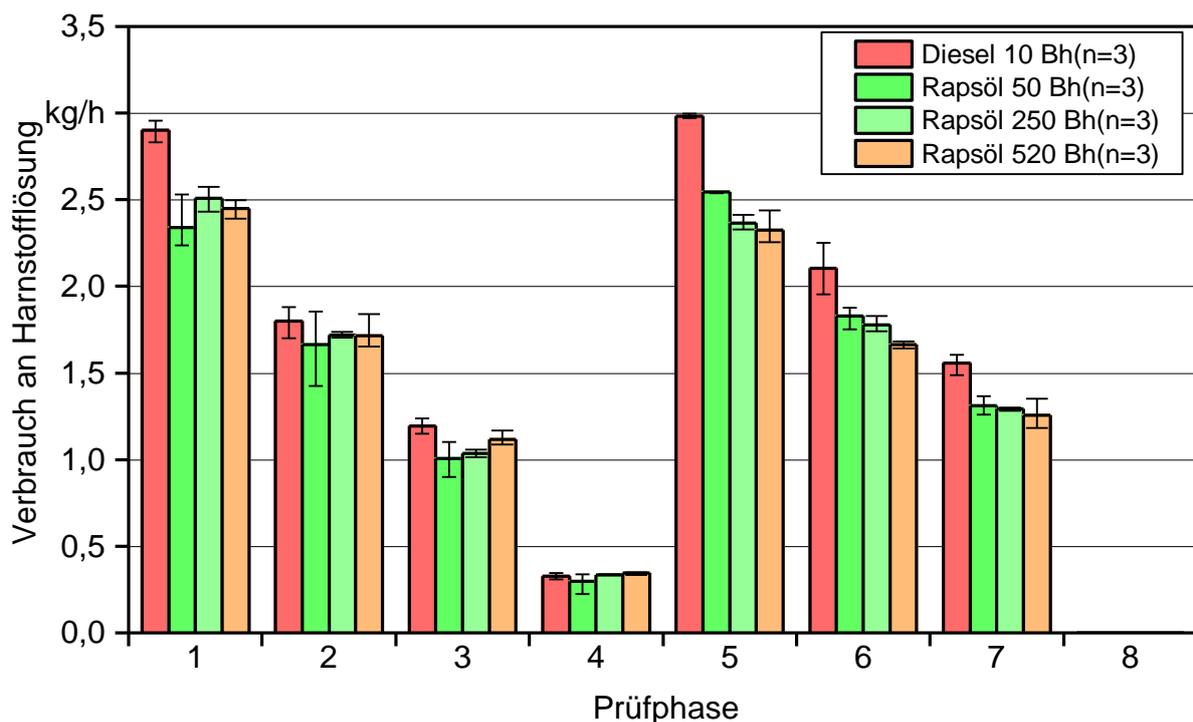


Abbildung 56: Mittelwerte und Spannweiten des gravimetrischen Verbrauchs wässriger Harnstofflösung des SCR-Systems über die einzelnen Prüfphasen des Versuchstraktors Fendt 718 SCR

Im Durchschnitt über alle Prüfphasen verbraucht der Traktor im Rapsölbetrieb (bei 50 Bh) mit 1,36 kg/h rund 15 % weniger Harnstoff als mit Dieselmotorkraftstoff (bei 10 Bh). Die dosierte Harnstoffmenge bleibt über die Betriebsdauer nahezu unverändert.

Abbildung 57 zeigt, dass der mittlere Ammoniaksschlupf im Reinabgas über die Betriebszeit ansteigt. Dies kann durch eine Überdosierung bzw. eine schlechtere Zerstäubung bei der Einspritzung der Harnstofflösung in das Abgas oder durch Alterung an der Beschichtung des SCR- und NH_3 -Katalysators (auch Slip-Kat. genannt) verursacht werden.

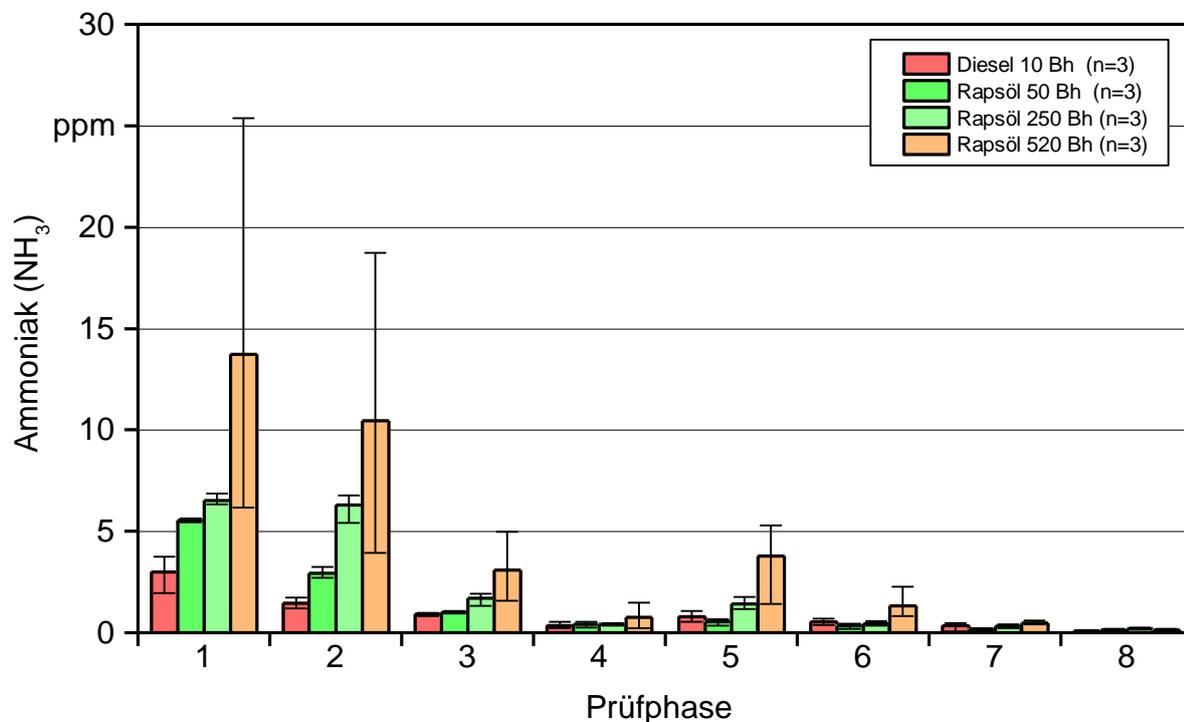


Abbildung 57: Mittelwerte und Spannweiten der Ammoniak-Emissionen (NH_3) des Fendt 718 nach dem SCR-System in den einzelnen Prüfphasen

In Abbildung 58 und Abbildung 59 sind die Konzentrationen an Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenstoffmonoxid (CO) im Abgas dargestellt. Mit Ausnahme des Leerlaufs ist bei allen anderen Prüfphasen eine deutliche Reduktion dieser Schadstoffkomponenten durch das AGN-System zu erkennen. Nach dem AGN-System betragen die Konzentrationen an CO weniger als 12 ppm und an HC weniger als 3 ppm für beide Kraftstoffe. Vor dem AGN-System sind bei beiden Kraftstoffen die höchsten Konzentrationen an CO und HC in der Schwachlastprüfphase 4 und im Leerlauf (Prüfphase 8) festzustellen. Mit Ausnahme der CO-Emissionen im Leerlauf im Betrieb mit Rapsölkraftstoff kommt es durch das AGN-System auch in diesen Betriebspunkten zu einer deutlichen Reduktion von CO und HC. Im Leerlauf im Betrieb mit Rapsölkraftstoff werden die CO-Emissionen durch das AGN-System nicht reduziert. Dies deutet darauf hin, dass der im AGN-System integrierte Oxidationskatalysator so stark abgekühlt ist, dass keine Reduktionswirkung für CO mehr gegeben ist. Im Durchschnitt über alle Prüfpunkte ergibt sich eine nahezu gleichbleibende Effizienz des Oxidationskatalysators von 94 % für HC und 61 % für CO zwischen den Messungen mit Rapsöl bei 50 Bh und 250 Bh. Bei beiden Abgaskomponenten sinkt die Effizienz nach 520 Bh um 3 %, was durch die teils geringen Rohgasemissionen sowie durch die reduzierte Leistung und damit das geringere Anwärmen des Katalysators bedingt sein kann.

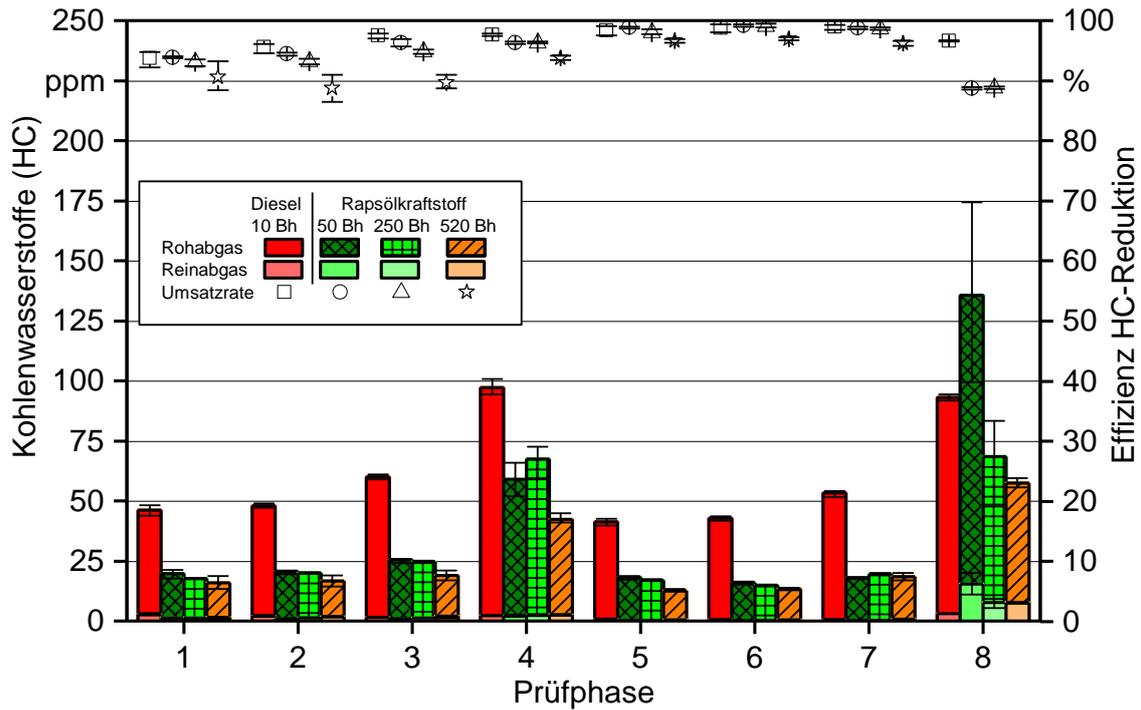


Abbildung 58: Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC) des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung

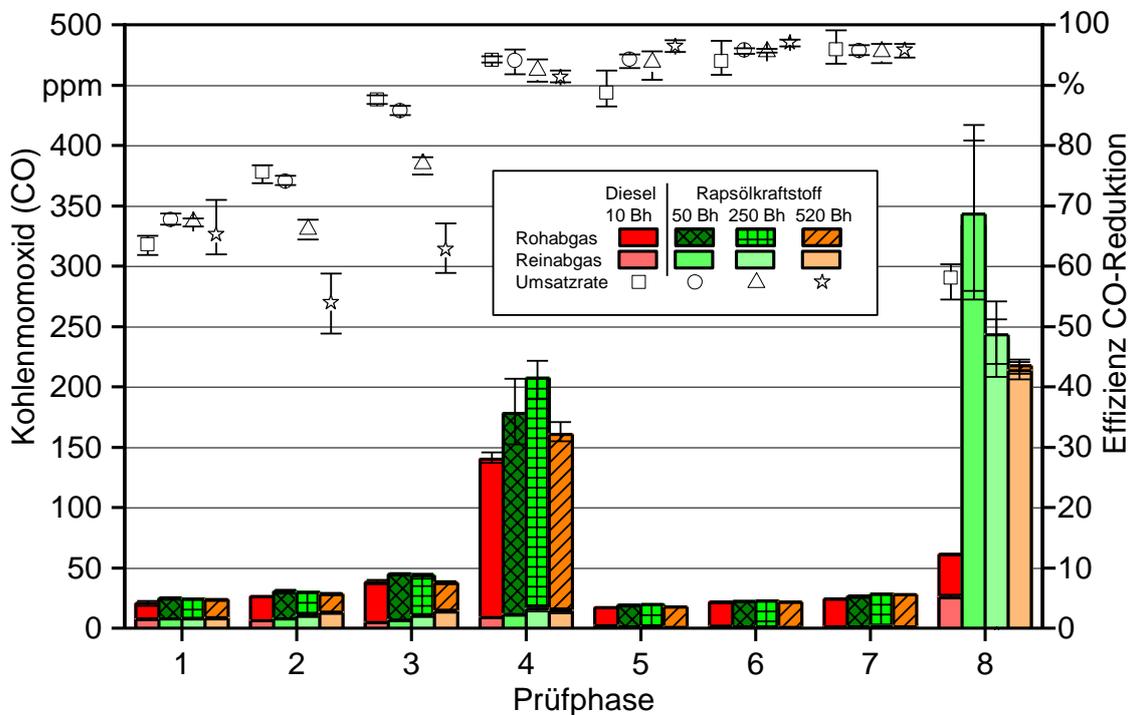


Abbildung 59: Kohlenstoffmonoxid-Emissionen (CO) des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff vor (Rohabgas) und nach der Abgasnachbehandlung

In Abbildung 60 ist die Partikelmasse (PM) im Abgas nach dem AGN-System dargestellt. Mit Ausnahme des Leerlaufs im Betrieb mit Rapsölkraftstoff, betragen die Konzentrationen im Abgas bei den Messungen bei 10, 50 und 250 Bh weniger als 10 mg/kg. Auffällig ist der Leerlauf mit Rapsölkraftstoff. Hier sind im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff und zu den anderen Prüfphasen deutlich höhere PM-Konzentrationen festzustellen. Zudem sind zwischen den Wiederholungsmessungen größere Schwankungen zu verzeichnen. Bei früheren Messungen waren auch bei Abgasstufe-III-A-Traktoren mit Common-Rail-Einspritzsystem die PM-Emissionen im Leerlauf im Betrieb mit Rapsölkraftstoff in der Regel am höchsten [63]. Durch die schlechteren Bedingungen zur Gemischaufbereitung im Leerlauf kommt es vermehrt zu unvollständiger Verbrennung, zu deren Produkten PM und CO zählen.

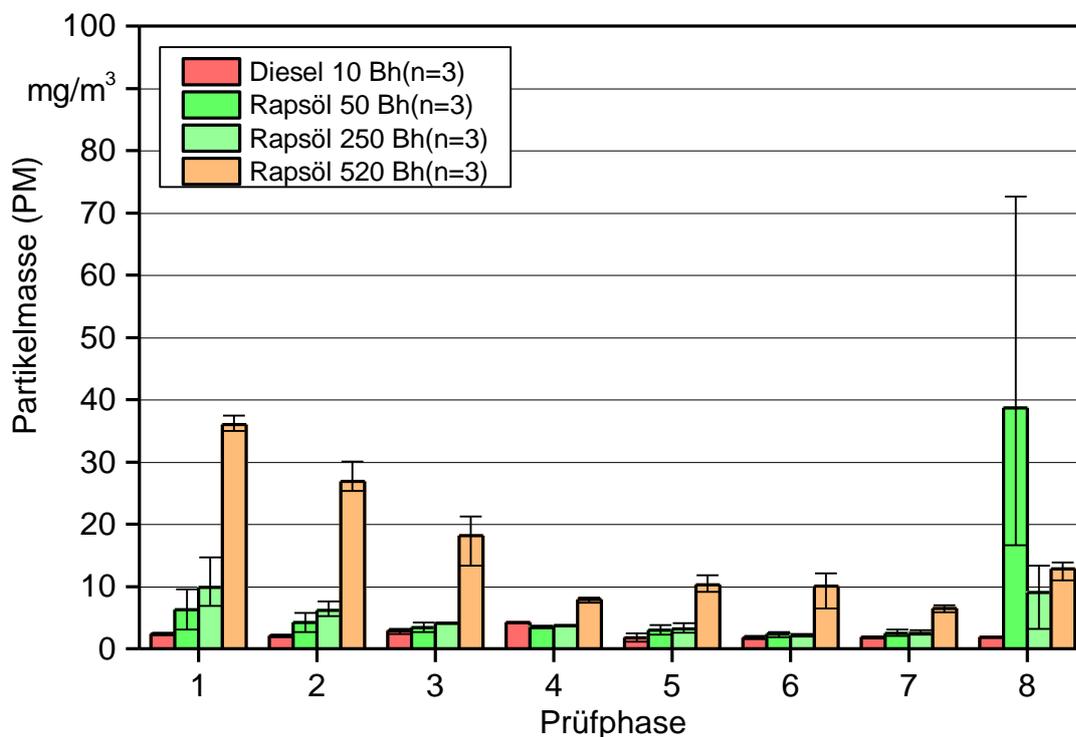


Abbildung 60: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse-Emissionen (PM) des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den einzelnen Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- (RK) und Dieselmotorkraftstoff (DK) nach der Abgasnachbehandlung (AGN) bei 10, 50, 250 und 520 Bh

Die PM-Konzentrationen im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff bei 10 und 250 Bh unterscheiden sich in den Prüfphasen 3, 4, 5, 6 und 7 kaum. Neben dem Leerlaufbetriebspunkt sind auch in den Prüfphasen 1 und 2 mit Rapsölkraftstoff höhere PM-Konzentrationen feststellbar als mit Dieselmotorkraftstoff. Auch hier sind im Vergleich zu allen anderen Prüfphasen größere Schwankungen zwischen den einzelnen Wiederholungsmessungen zu verzeichnen. Insgesamt jedoch sind die PM-Konzentrationen auch mit Rapsölkraftstoff gering.

Bei Messungen an Abgasstufe-IIIa-Traktoren, die nicht mit Abgasnachbehandlungssystemen ausgestattet sind, wurden im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei Prüfphasen mit hohen Lasten zumeist geringere PM-Konzentrationen als mit Dieselmotorkraftstoff festgestellt [63]. Inwiefern die Partikelemissionen durch das AGN-System beeinflusst werden, kann anhand der Ergebnisse nicht beurteilt werden. Bei der Emissionsmessung bei 250 Bh mit Rapsölkraftstoff zeigen sich niedrigere PM-Emissionen im Leerlauf als bei 50 Bh.

Bei den Messungen bei 520 Bh sind die Werte für die Partikelmasse in Prüfphase 1 bis 7 signifikant höher im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen bei 10, 50 und 250 Bh. In Prüfphase 8 ist kein Anstieg der PM gegenüber den vorangegangenen Messungen ersichtlich, hier ist auch das SCR-System nicht aktiv. Die PM- und CO-Emissionen steigen in der Regel bei unvollständiger Verbrennung bei sinkenden NO_x-Rohemissionen. Überwiegend gleichbleibende CO- und NO_x-Konzentrationen im Rohgas lassen keinen Anstieg der Rußemissionen aufgrund vermehrt unvollständiger Verbrennung erwarten. Um weitere Informationen über die Ursache zu erhalten, wurden die Partikelproben auf den Glasfaserfiltern einer Elementaranalyse (CHNS Analytik, n = 3) unterzogen. Die Elementaranalyse des Probenmaterials ergab einen vergleichsweise hohen Stickstoffgehalt (N) von 30,7 % ($\pm 0,1$ %) und niedrigen Kohlenstoffgehalt (C) von 33,2 % ($\pm 1,5$ %) der Probenmasse. Üblicherweise besteht die Partikelmasse deutlich über 85 % aus C und enthält kaum N [58]. Nachdem in den Prüfphasen 1 bis 7 auch der Ammoniak-Schlupf zunahm, wird angenommen, dass die Masseerhöhung durch Harnstoffrückstände in Form von Ammoniumsalzen ausgelöst wird, die bei der Partikelmessung auf den teflonbeschichteten Glasfaserfiltern mitabgeschieden werden. Somit ist die gemessene Partikelmasseerhöhung nicht auf eine zunehmende Rußkonzentration zurückzuführen, sondern durch Sekundäremissionen der Harnstoffeindüsung. Daher ist dieser Wert wenig aussagekräftig bezüglich des tatsächlichen Emissionsverhaltens. Möglichkeiten zur Vermeidung dieser Emissionen sind zukünftig zu untersuchen.

Leerlaufverhalten im Rapsölbetrieb

Der Leerlauf ist ein Betriebspunkt, der geprägt ist durch schlechtere Bedingungen zur Gemischaufbereitung. Es wird wenig Kraftstoff in den Brennraum eingespritzt (häufig bei niedrigeren Einspritzdrücken), der Abgasturbolader trägt weniger zur Erhöhung des Ladedrucks bei und der Motor kühlt ab. In der Folge herrschen zu Beginn der Einspritzung und während der Verbrennung im Zylinder geringere Temperaturen und Drücke.

Untersuchungen von SPICHER und LÜFT (2007) [59] zur Kraftstoffzerstäubung von Rapsöl und Dieselmotorkraftstoff in Druckkammern zeigen, dass bei der Einspritzung von Rapsöl längere und schmalere Einspritzstrahlen und größere Tropfendurchmesser entstehen und damit schlechtere Vorbedingungen für eine schadstoffarme Verbrennung vorherrschen. Insbesondere in Betriebspunkten, bei denen die Gemischbildung nicht durch einen heißen Brennraum und hohe Zylinderdrücke unterstützt wird, also im Leerlauf und Teillastbetrieb, ist von einem größeren Anteil unvollständiger Verbrennung auszugehen. CO-, HC- und PM-Emissionen stellen Produkte unvollständiger Verbrennung dar und steigen bei Schwachlastbetrieb und Leerlauf an.

Ungünstige Bedingungen für die Gemischaufbereitung sind auch beim Fendt Vario 718 SCR zu beobachten. In Abbildung 61 sind die Temperaturen von Motoröl, Kühlwasser und Abgas (gemessen kurz nach dem Abgasturbolader) des Traktors gemeinsam mit den Konzentrationen an CO und HC über die Messzeit der letzten drei Prüfphasen des Prüfzyklus im Betrieb mit Rapsölkraftstoff dargestellt. Insbesondere die Abgastemperatur fällt, kurz nachdem der Motor im Leerlauf betrieben wird, schnell ab und beträgt zum Ende der Prüfphase nur noch ca. 150 °C nach anfänglich ca. 350 °C. Die Motoröl- und die Kühlmitteltemperaturen fallen ebenfalls ab. Einhergehend mit dem Rückgang der Abgastemperatur steigt die CO-Konzentration nach dem Ende der Prüfphase 7 sehr schnell an. Auch die HC-Konzentration beginnt anzusteigen, wenngleich nicht in dem Ausmaß wie die CO-Konzentration.

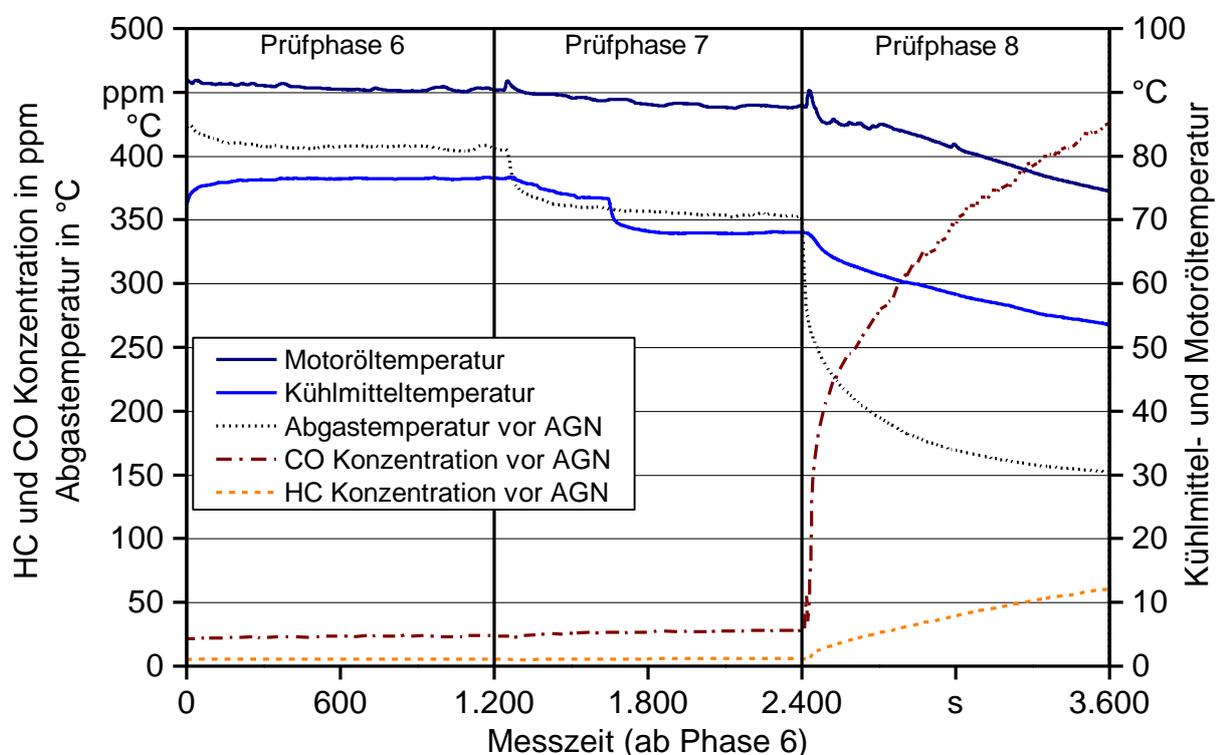


Abbildung 61: Kühlwasser-, Motoröl- und Abgastemperatur sowie die Konzentrationen von CO und HC vor der Abgasnachbehandlung im Abgas des Fendt Vario 718 SCR (FE-Ka) in den Prüfphasen 6 bis 8 der Messung mit Rapsölkraftstoff (Wiederholung II bei 50 Bh)

Bedingt durch das diskontinuierliche Messprinzip zur Bestimmung der PM-Emissionen kann ein Anstieg über die Messzeit nicht nachgewiesen werden. Da im Leerlauf zunehmend unvollständig verbrannte Kohlenwasserstoffe entstehen, kann auch von einem Anstieg der Partikelmasse über die Messdauer in Prüfphase 8 ausgegangen werden. Wie bei den HC- und CO-Emissionen ist auch bei den PM-Emissionen nach AGN im Leerlauf mit Rapsölkraftstoff eine vergleichsweise hohe Schwankungsbreite zwischen den einzelnen Messwiederholungen ersichtlich. Bei der Wiederholungsmessung mit dem

höchsten Ausstoß unvollständiger Verbrennungsprodukte sind auch die Kühlmittel- und Kraftstofftemperaturen um knapp 10 % niedriger als bei der Wiederholung mit den niedrigsten Emissionswerten. Unterschiede im Temperaturniveau des Traktors im Leerlauf können für die größere Schwankungsbreite von CO, HC und PM verantwortlich sein.

Die deutlich niedrigeren Abgastemperaturen der Prüfphase 8 führen auch zu einem Rückgang der Umsetzungsrate des Oxidationskatalysators, was ebenfalls einen Anstieg der Emissionen im Reingas (nach AGN) zur Folge hat. Insbesondere sehr lange Leerlaufzeiten im Rapsölbetrieb sind deshalb zu vermeiden.

Im Dieselpetrieb ist der Anstieg der Emissionen (bei höheren Motoröl- und Kühlwassertemperaturen) weniger stark ausgeprägt. Dies liegt daran, dass im Rapsölbetrieb die Kühlwassertemperatur niedriger ist, bedingt durch die Abkühlung am Wärmetauscher für die Erwärmung des Rapsöls und die geringere Motorleistung bei diesem Traktor in den vorangegangenen Prüfphasen.

Prüfzyklus-Emissionen

Die spezifischen Emissionen von Stickoxiden (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC) und Partikelmasse (PM) vor und nach der Abgasnachbehandlung sind in Abbildung 62 dargestellt.

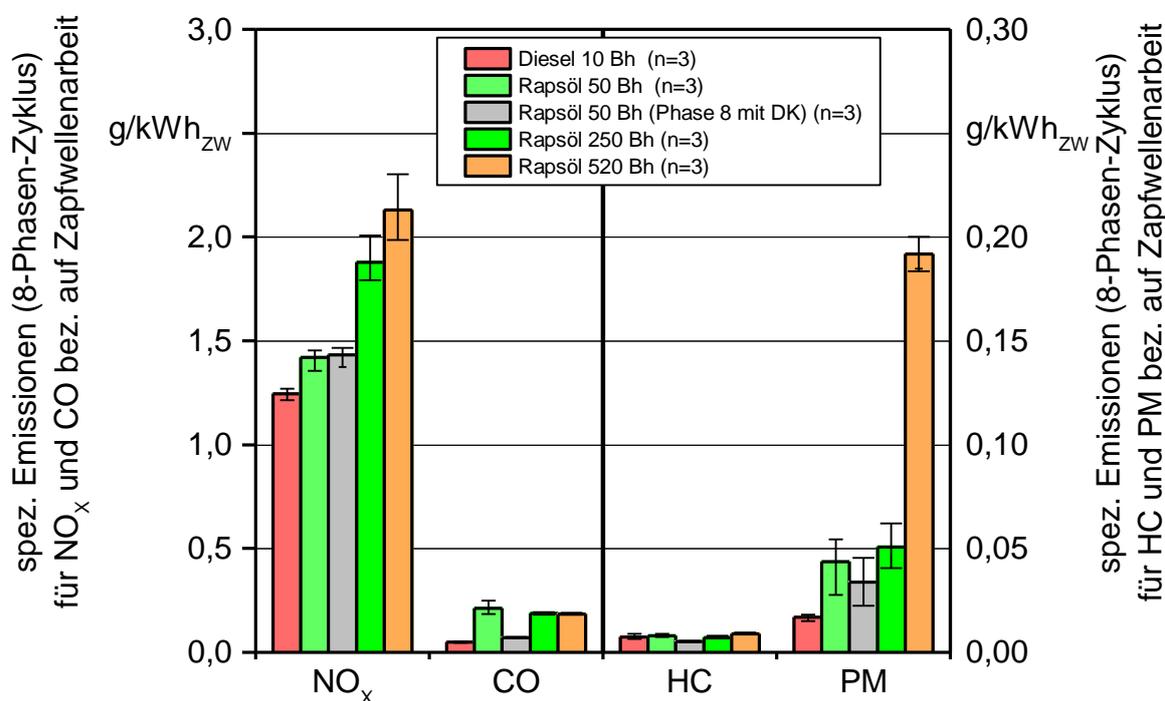


Abbildung 62: Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 nach der Abgasnachbehandlung (im Reinabgas) für Rapsöl- und Dieselpkraftstoff

Bei den Zykluswerten ist zu beachten, dass sich die Angaben auf die an der Zapfwelle und nicht auf die an der Kurbelwelle (KW) abgegebene Arbeit beziehen. Die gemessene Arbeit (z. B. in kWh) an der Zapfwelle des Gesamtfahrzeugs ist im Vergleich zur Arbeit an der Kurbelwelle durch zusätzliche Verbraucher und Verluste im Antriebstrang geringer. Die spezifischen Emissionen (in g/kWh) bezogen auf die Zapfwellenarbeit am Traktorenprüfstand sind somit um ca. 20 bis 30 % höher als am Motorenprüfstand, wo die Arbeit an der Kurbelwelle gemessen wird.

Im Rapsölbetrieb weist der Traktor über den gesamten Prüfzyklus betrachtet meist etwas höhere Abgasemissionen auf als im Dieselbetrieb. 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 sowie 250 Bh unterschritten. Nach 500 Bh Feldtest deutet sich anhand der höheren NO_x-Emissionen eine Effizienz-minderung des SCR-Systems an. Es ist derzeit noch unklar, ob es sich dabei um übliche Einlaufeffekte oder Fehlfunktion des SCR-Systems handelt, da Kenntnisse über die Alterung vergleichbarer SCR-Systeme im Rapsöl- und auch Dieselbetrieb nicht vorliegen.

Die Partikelmasse-Emissionen sind mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff deutlich höher und überschreiten den Grenzwert von 0,025 g/kWh auch unter Berücksichtigung der höheren Zapfwellenarbeit am Traktorenprüfstand im Vergleich zur Kurbelwellenarbeit. Dies ist zum einen auf das höhere Emissionsniveau der Phasen 1, 2 und 8 und zum anderen auf die geringere geleistete Arbeit im Rapsölbetrieb zurückzuführen (siehe Abbildung 60 und Abbildung 53). Insbesondere bei 520 Bh wurden vermutlich auch Rückstände des hinzudosierten Harnstoffs bei der Partikelmessung erfasst, was deutlich erhöhte PM-Emissionen zur Folge hat. Trotzdem werden unter Berücksichtigung der Leistungsunterschiede an der Zapf- und Kurbelwelle die Grenzwerte der NO_x-, HC-, und CO-Emissionen auch bei 520 Bh eingehalten.

Neben der reinen Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoffmessung wird auch eine Variante bei 50 Bh betrachtet, für die im Leerlauf, dem Zwei-Tank-Kraftstoffsystem des Traktors FE-Ka entsprechend, die Emissionen des Dieselbetriebs verrechnet werden. Diese Ergebnisse kommen einer Umschaltung auf Dieselbetrieb im Leerlauf gleich. Wird rechnerisch für den Leerlauf Dieselbetrieb unterstellt, wie es bei der automatischen Umschaltung im Leerlauf der Fall ist, liegen die Zykluswerte für CO (0,07 g/kWh), HC (0,005 g/kWh) und Partikelmasse (0,04 g/kWh) deutlich unter dem Niveau reinen Rapsölkraftstoffs, aber nicht unter dem Niveau des Dieselbetriebs (mit Ausnahme von HC).

6.2.3.2 John Deere 6125R (JD-N)

Leistung

Die Leistung ist im Dieselbetrieb mit 73 kW an der Zapfwelle um ca. 21 % geringer als die vom Hersteller mit 92 kW angegebene Motornennleistung (nach 97/68/EG). Diese Leistungsdifferenz ergibt sich bei der Leistungsmessung an der Zapfwelle durch zusätzliche Verbraucher wie Lüfter, Kühlwasserpumpe, Lichtmaschine und durch die Verluste im Getriebe. Um die gleiche Leistung mit Rapsölkraftstoff wie im Dieselbetrieb zu erreichen, wurde die Einspritzmenge vom Landmaschinenhersteller angepasst. Im Betrieb

mit Rapsölkraftstoff ist das äquivalente Motordrehmoment über 1.500 min^{-1} um 2 bis 5 % höher und unterhalb von 1.500 min^{-1} um durchschnittlich 3 % niedriger als mit Dieselmotorkraftstoff (siehe Abbildung 63).

Die daraus resultierenden geringfügigen Leistungsunterschiede der Kraftstoffvarianten sind unter anderem auf verschiedene Umgebungsbedingungen und Partikelfilterbelastung bei der Leistungsanpassung durch den Hersteller bzw. der Leistungsmessung zurückzuführen.

Der spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch ist im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei 855 Bh um 13 bis 22 % höher als mit Dieselmotorkraftstoff. Der spezifische volumetrische Mehrverbrauch liegt aufgrund der höheren Dichte von Rapsölkraftstoff bei 4 bis 8 %. Neben der Dichte unterscheidet sich auch der Heizwert zwischen Rapsölkraftstoff (37,1 MJ/kg) und Dieselmotorkraftstoff (42,9 MJ/kg). Ein Vergleich des Verhältnisses der abgegebenen Zapfwellenleistung zu zugeführter Brennstoffleistung ergibt Unterschiede zwischen Dieselmotorkraftstoff und Rapsölkraftstoff von $\pm 2 \%$. Die Effizienz des Traktors ist somit im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff in etwa gleich.

Nach 255 Bh Feldtest war ein Leistungsrückgang um ca. 9 % über alle Drehzahlen der Volllastkurve im Rapsölbetrieb zu verzeichnen. Der Abgasgegendruck hat sich im Mittel über die Volllastkurve von 42 mbar auf 72 mbar erhöht. Da der Partikelfilter nach den Dieselmessungen bei 845 Bh, vor dem Feldtest mit Rapsölkraftstoff aktiv regeneriert wurde, ist der angewachsene Druckverlust des Partikelfilters auf die hinzugekommene Ruß- bzw. Aschemenge zurückzuführen.

Als Grenzwert für den Abgasgegendruck beim Einsatz von Rußpartikelfiltern werden in der Literatur 200 mbar angegeben – ein Wert, der je nach Motor und Auslegung aber variieren kann [3]. Neue Partikelfilter erzeugen einen Druckverlust von ca. 20 bis 30 mbar. Bis 300 mbar besteht ein linearer Zusammenhang zwischen steigendem Abgasgegendruck und Kraftstoffmehrverbrauch und bei Drücken über 400 mbar werden auch Verbrennung und Aufladung negativ beeinflusst [3].

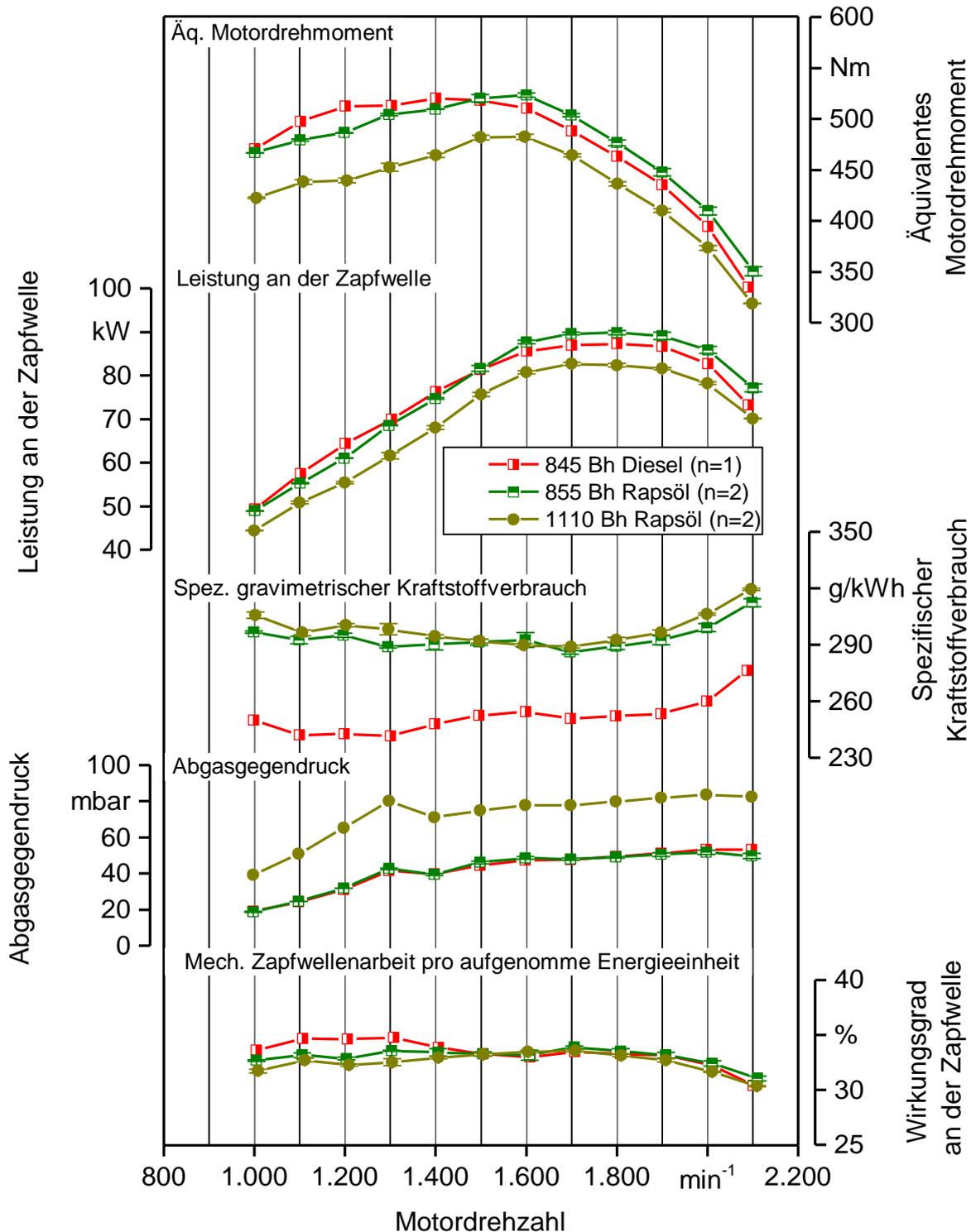


Abbildung 63: Mittelwerte und Spannweiten des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Abgasgegendrucks sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des John Deere 6125R (JD-N) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff

Der Leistungsrückgang zwischen 855 und 1.110 Bh ist nicht auf eine Minderung des Motorwirkungsgrads aufgrund des steigenden Abgasgedrucks, sondern auf das Einlaufverhalten der Injektoren mit reduzierter Einspritzmenge zurückzuführen. Abbildung 64 zeigt den Rückgang des eingespritzten Kraftstoffvolumens zwischen den Messungen mit Rapsöl bei 855 und 1.110 Bh. Verunreinigungen am Injektor verringern das eingespritzte Volumen und somit den Energieeintrag in den Brennraum sowie die Leistung.

Der Wirkungsgrad an der Zapfwelle und der gravimetrische Kraftstoffverbrauch sind jedoch mit bis zu 2 % Unterschied auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Messungen bei 855 Bh mit Rapsölkraftstoff.

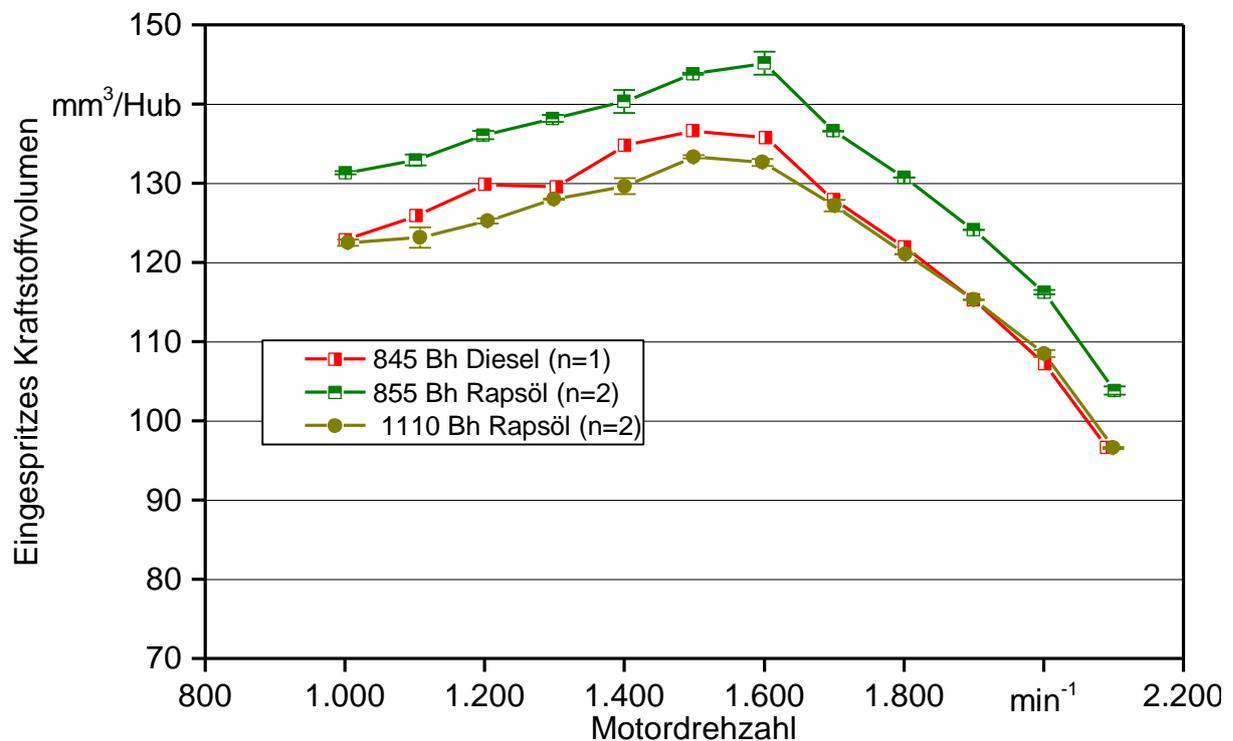


Abbildung 64: Mittelwerte und Spannweiten der pro Hub zugeführten Brennstoffmenge des John Deere 6125R (JD-N) im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff

Emissionen

Bei den Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass der Traktor JD-N hinsichtlich des Leistungsverhaltens, aber nicht bezüglich des Emissionsverhaltens auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff optimiert wurde. Emissionsmessungen fanden am Traktor mit Dieselmotorkraftstoff bei 845 Bh vor der Umrüstung und mit Rapsölkraftstoff bei 855 Bh und nach 255 Bh Feldtest, also bei 1.110 Bh statt.

Abbildung 65 zeigt die NO_x -Emissionen bei den acht Prüfphasen im Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoffbetrieb. Der Vergleich der NO_x -Emissionen zwischen Dieselmotorkraftstoff und Rapsölkraftstoff zeigt, dass mit Rapsölkraftstoff bei niedriger Last (Prüfphasen 4 und 8) weniger bzw. ähnlich hohe Stickoxidsmengen ausgestoßen werden. Die inhomogenere Gemischbildung von Rapsölkraftstoff und Verbrennungsluft bei geringen Einspritzmengen kann dafür ursächlich sein. Bei höherer Last entstehen im Rapsölbetrieb mehr NO_x -Emissionen, da die NO_x -Entstehung durch den im Rapsölkraftstoff vorhandenen Sauerstoffgehalt sowie lokal höhere Verbrennungstemperaturen begünstigt wird [21][20]. Die NO_x -Emissionen in den Prüfphasen 1, 3, 5, und 7 sind im Dieselmotorkraftstoffbetrieb zwischen 15 und 20 % geringer als im Rapsölbetrieb bei 855 Bh, was sich mit den Angaben aus der Literatur [20][49] und den Messungen an den Traktoren JD-K und JD-G (Abschnitte 6.2.2.1 und 6.2.2.2) deckt. Ein solches Verhalten stellten bereits EMBERGER (2013) [20], THUNEKE et al. (2009) [64], PICKEL und DIERINGER (2009) [49] sowie WACHTMEISTER et al. (2010) [66] bei Motoren der Abgasstufe IIIA fest. In Prüfphase 2 unterscheiden sich Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff am deutlichsten hinsichtlich der NO_x -Konzentration. In diesem Teillastpunkt entstehen mit Rapsölkraftstoff bei dieselmotorkraftstoffoptimierten Motoreinstellungen rund 48 % höhere NO_x -Emissionen.

Nach 255 Bh Betriebsdauer im Feldtest sind die NO_x -Emissionen im Rapsölbetrieb in allen Prüfphasen von 12 bis 20 % angestiegen. Wie zuvor beschrieben werden Ablagerungen am Injektor vermutet, die den Durchfluss und damit die Leistung reduzierten. Die AGR-Rate wurde bei den Messungen mit Rapsölkraftstoff erfasst. Diese beträgt bei Nenndrehzahl zwischen 20 und 28 % und bei der Zwischendrehzahl zwischen 15 und 21 %. Im Leerlauf wird kaum Abgas der Verbrennungsluft zugeführt. In den Prüfphasen 1, 2 und 6 ist eine um 1 bis 2 % über die Betriebsdauer zunehmende Abgasrückführrate zu beobachten. Dies hat jedoch keine sinkenden NO_x -Emissionen zur Folge.

Aufgrund des geschlossenen Partikelfilters sind die PM-Emissionen sehr gering (Abbildung 66). Es sind kaum Unterschiede in den einzelnen Prüfphasen und zwischen Dieselmotorkraftstoff und Rapsölkraftstoff hinsichtlich der emittierten Partikelmasse zu verzeichnen. Die geringe Zunahme der PM-Emissionen in Prüfphase 5 kann nicht eingeordnet werden.

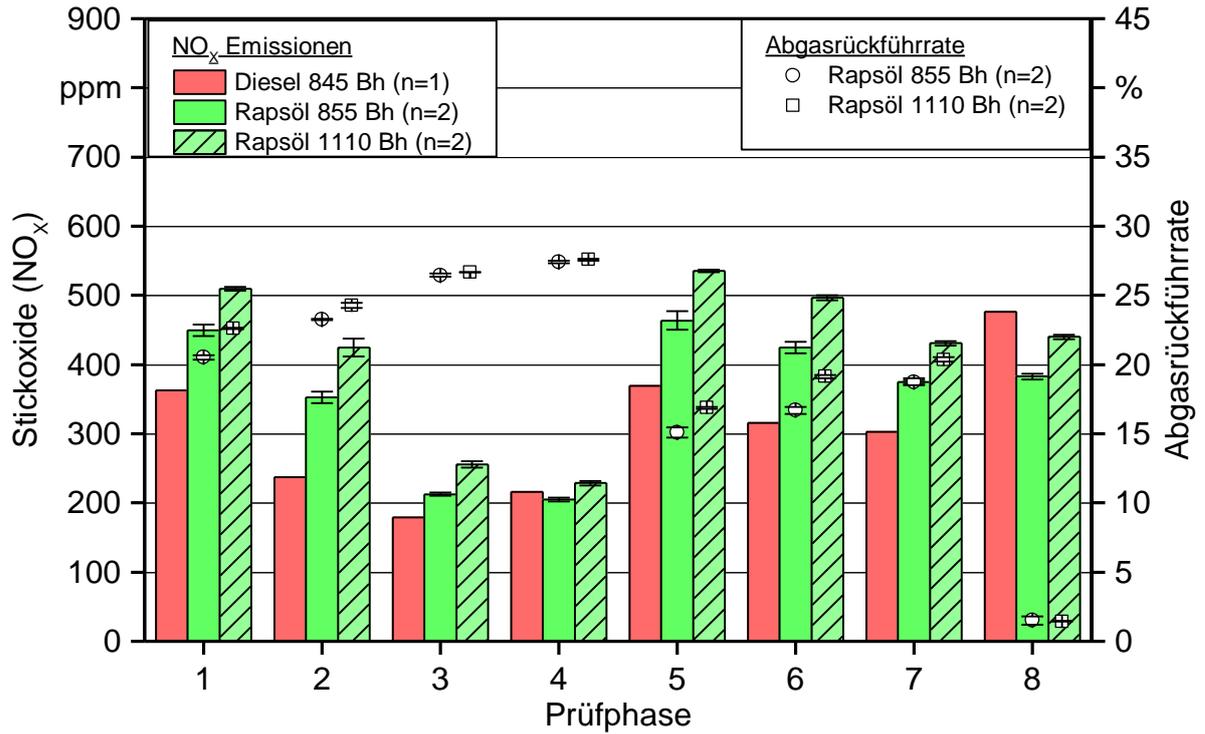


Abbildung 65: Stickstoffoxid-Emissionen des John Deere 6125R in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach der Abgasnachbehandlung

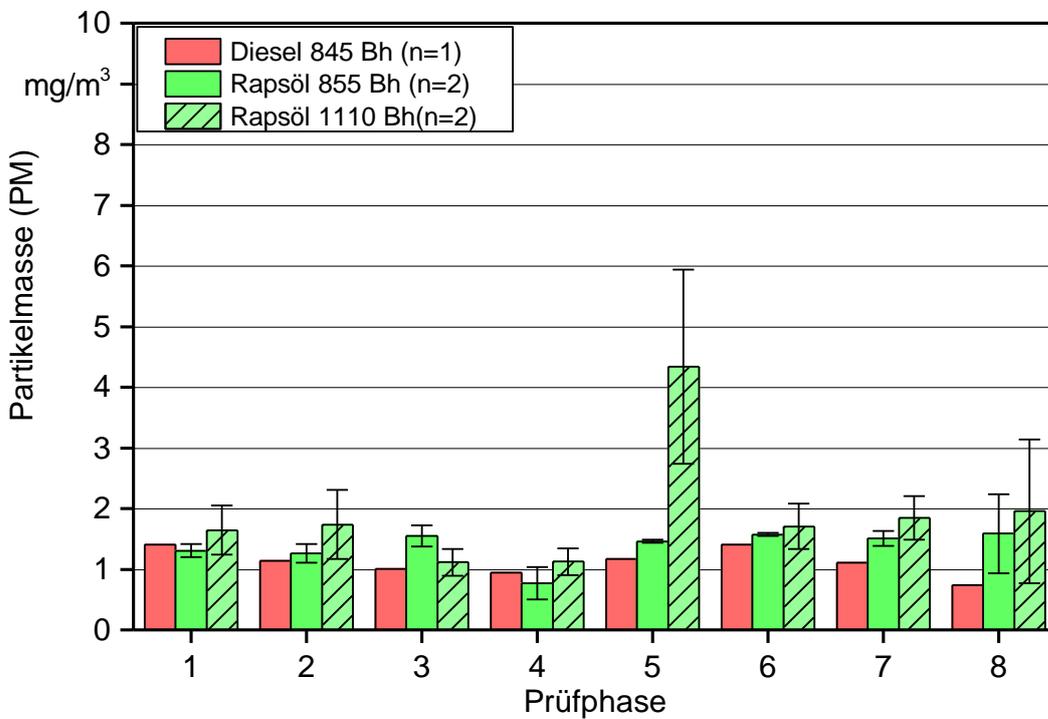


Abbildung 66: Partikelmasse-Emissionen (PM) des John Deere 6125R in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach der Abgasnachbehandlung

Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Abgastemperaturen in den Prüfphasen 4 und 8 sind dort leicht höhere HC-Konzentrationen messbar. (Abbildung 67). Auch sind die HC- und CO-Rohemissionen in diesen beiden Niedriglastphasen vor der Abgasmachbehandlung höher als in den anderen Prüfphasen. Allerdings bewegt sich das HC-Emissionsniveau nahe bzw. unter der Nachweisgrenze, was insbesondere im Leerlauf (Prüfphase 8) auffällig ist. Wegen des geringen Abgasmassenstroms des 4-Zylinder-Motors kühlt der Oxidationskatalysator langsamer aus und bleibt in Phase 8 wirksam, was bei den 6-Zylinder-Motoren bisher nicht der Fall war (z. B. JD-K, JD-G, FE-Ka). Alle CO-Emissionen sind nach der Abgasmachbehandlung unterhalb der Nachweisgrenze und deshalb nicht abgebildet.

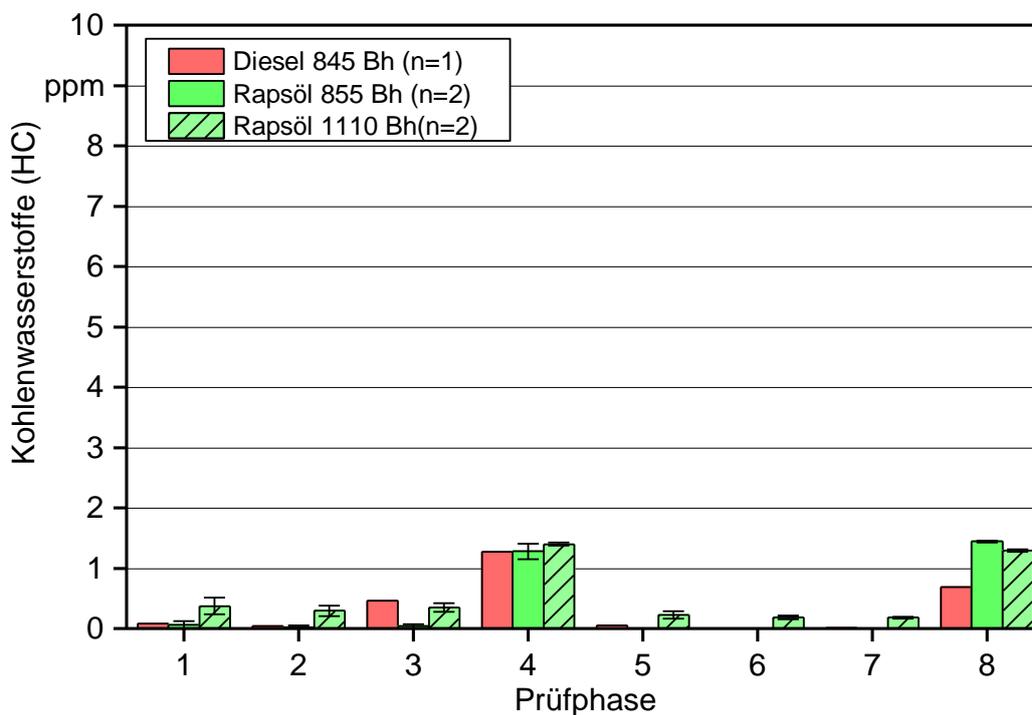


Abbildung 67: Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC) des John Deere 6125R in acht Prüfphasen in Anlehnung an ISO 8178 C1 für Rapsöl- und Dieselkraftstoff nach der Abgasmachbehandlung

In Abbildung 68 sind die spezifischen Emissionen über den gesamten Zyklus betrachtet dargestellt. Im Rapsölbetrieb weist der Traktor über den gesamten Prüfzyklus hinweg meist etwas höhere Abgasemissionen auf als im Dieseltreibstoff. Die CO-, HC- und PM-Emissionen werden durch den Oxidationskatalysator und Partikelfilter mit beiden Kraftstoffen effektiv reduziert. Die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe IIIB für PM (0,025 g/kWh), CO (5,0 g/kWh) und HC (0,19 g/kWh) werden bei allen Messungen unterschritten. Insbesondere die CO-Emissionen sind bei allen Messungen unterhalb der Nachweisgrenze.

Die NO_x-Emissionen sind mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieseltreibstoff höher und überschreiten den Grenzwert von 3,3 g/kWh, auch unter Berücksichtigung der niedrige-

ren Zapfwellenarbeit am Traktorenprüfstand im Vergleich zur Kurbelwellenarbeit, die bei der Typgenehmigungsprüfung am Motorenprüfstand als Grundlage für den Vergleich mit den gesetzlichen Grenzwerten dient. Über den Zyklus betrachtet steigen die NO_x -Emissionen im Rapsölbetrieb um 12 % nach rund 255 Bh Feldtest an. Ursächlich dafür könnten die geringen Einspritzmengen sein, da eine geringere Leistung meist höhere spezifische Abgasemissionen bezogen auf die Zyklusarbeit bewirkt.

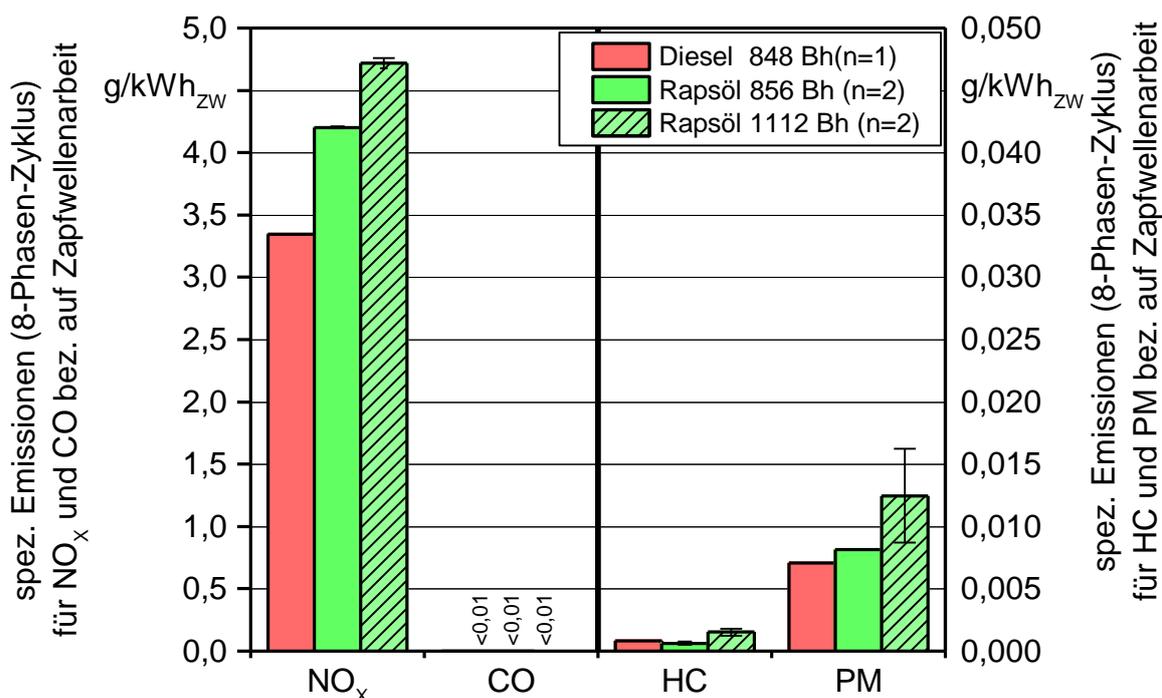


Abbildung 68: Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 (vor und nach der Abgasnachbehandlung) des John Deere 6125R (JD-N) für Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff

6.2.4 Vergleich Abgasstufen I bis IIIB

Abbildung 69 zeigt eine Auswahl der durchgeführten Emissionsmessungen und die Entwicklung des Emissionsverhaltens im Diesel- und Rapsölbetrieb von Abgasstufe I bis Abgasstufe IIIB. Die Messungen wurden am Traktorenprüfstand im stationären C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 (NRSC) durchgeführt.

Dabei nehmen die limitierten Abgasemissionen mit fortschreitender Abgasstufe überwiegend stark ab. Die Unterschiede zwischen den Kraftstoffvarianten werden zunehmend geringer, was unter anderem auf die eingesetzten Abgasnachbehandlungssysteme zurückzuführen ist. Die Traktoren der Abgasstufen I bis IIIA emittieren im Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff überwiegend weniger Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM), jedoch in etwa gleich viel oder etwas mehr Stickoxide (NO_x) als mit Dieselmotorkraftstoff.

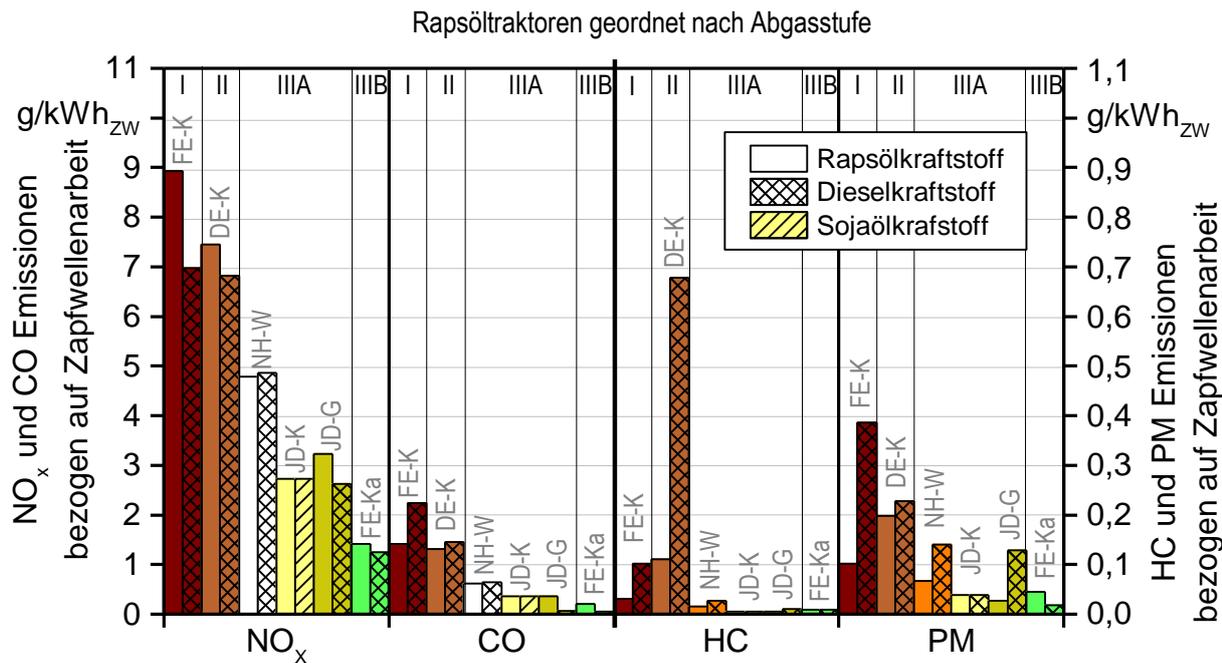


Abbildung 69: Limitierte Abgasemissionen im C1-Zyklus in Anlehnung an ISO 8178 mit Rapsöl-, Sojaöl- und Dieselmkraftstoff von Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB

6.3 Variation von Motorparametern

Am Traktor John Deere 6125R (JD-N) mit der Abgasstufe IIIB erfolgte eine systematische Untersuchung des Einflusses zweier Einspritzparameter und der Abgasrückführrate auf Emissionen und den Verbrauch von Rapsölkraftstoff, um eventuelles Optimierungspotenzial zu identifizieren. Der Motor wurde für die Untersuchung ohne Partikelfilter und Oxidationskatalysator betrieben und die Motorsteuerungssoftware war auf Dieselmtrieb optimiert, um einen definierten Ausgangspunkt für die Untersuchung zu haben.

Eine Optimierung von Motoreinstellungen stellt meistens einen Kompromiss dar, weil mehrere Zielkonflikte betrachtet werden müssen. Sind beispielsweise als primäre Zielgröße niedrige NO_x-Emissionen in den Rohemissionen definiert, ergeben sich in der Regel höhere PM-Emissionen (NO_x-PM-Zielkonflikt) und ein Anstieg des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen (NO_x-CO₂-Zielkonflikt). Eine auf partikelarme Verbrennung optimierte Motoreinstellung weist hingegen meist höhere NO_x auf. Da der Traktor im Originalzustand mit einem Partikelfilter ausgestattet ist, müssen vor allem die NO_x-Emissionen durch innermotorische Maßnahmen und die externe Abgasrückführung optimiert werden. Dadurch eventuell steigende PM-Emissionen werden durch den Partikelfilter im Nachgang vermindert. Dennoch sollen eine weitgehend partikelarme Verbrennung mit geringem Beladungsanstieg am Partikelfilter und eine effiziente Betriebsweise mit niedrigem Kraftstoffverbrauch gewährleistet sein.

Abbildung 70 zeigt die Ergebnisse des Betriebspunkts mit 75 % Last bei 1.575 min⁻¹ (P6S). Die Ergebnisse bei 2.100 min⁻¹ und 10 % Last sind in Abbildung 72 (P4S) und

Abbildung 71 (P4W) dargestellt. Die Standard-Kennfeldeinstellungen (S) für die Einspritzung und AGR-Rate im Pflanzenölbetrieb sind bei Varianten P6S und P4S aktiv. Bei Variante P4W liegen alternative Motoreinstellungen (W) desselben Betriebspunkts zugrunde, die in der Kaltstartphase zum Anwärmen des Abgasstrangs und insbesondere der Abgasnachbehandlung verwendet werden.

Bei allen betrachteten Betriebsphasen zeigt sich durch die Variation des Einspritzzeitpunkts, der Abgasrückführrate (AGR) oder des Einspritzdrucks ein deutlicher Einfluss auf meist mehrere Abgaskomponenten.

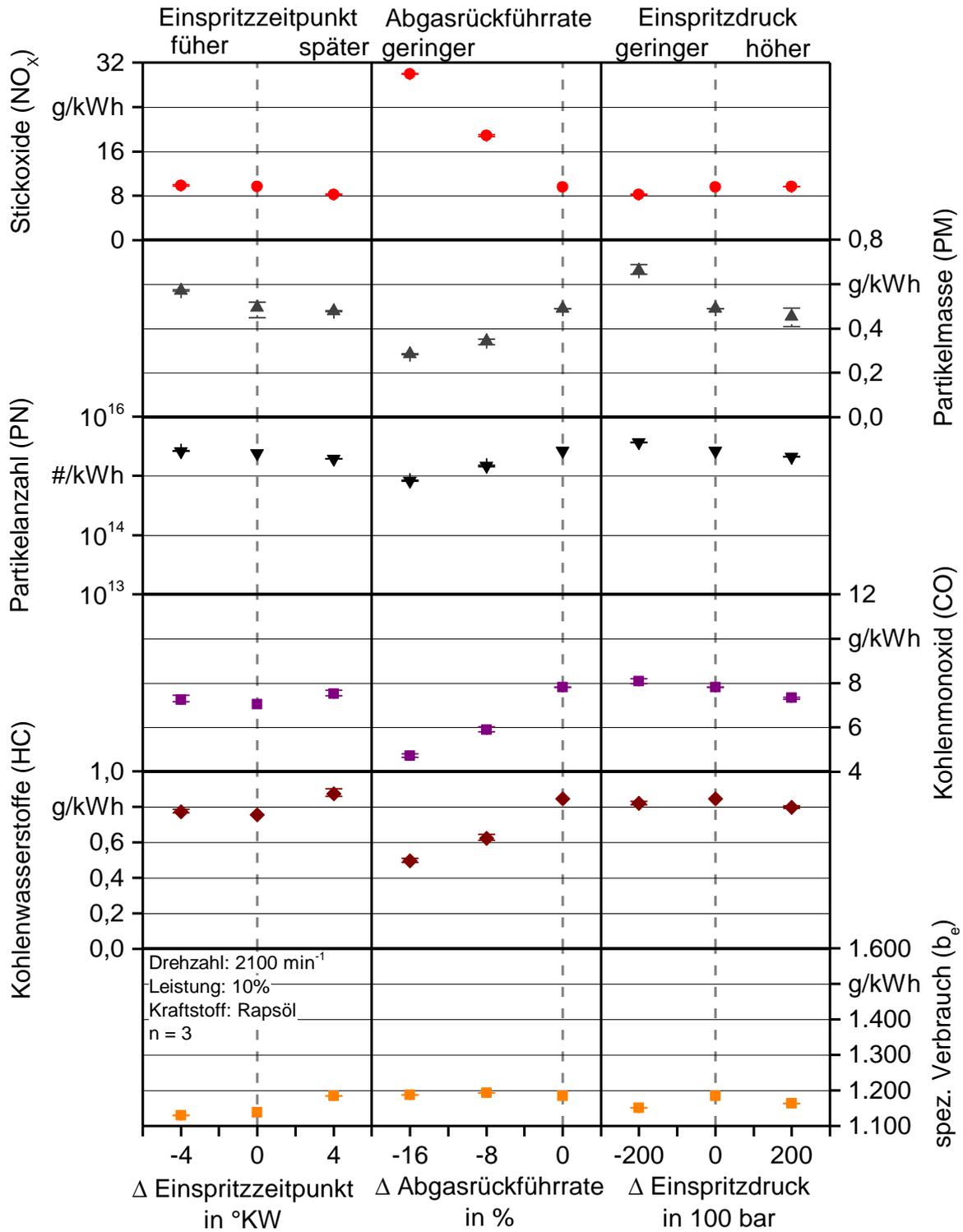


Abbildung 71: Variation des Einspritzzeitpunkts, der Abgasrückführ率 und des Einspritzdrucks im Betriebspunkt P4S (Motordrehzahl: 2.100 min⁻¹, Leistung an der Zapfwelle: 10 %, Kennfeld S)

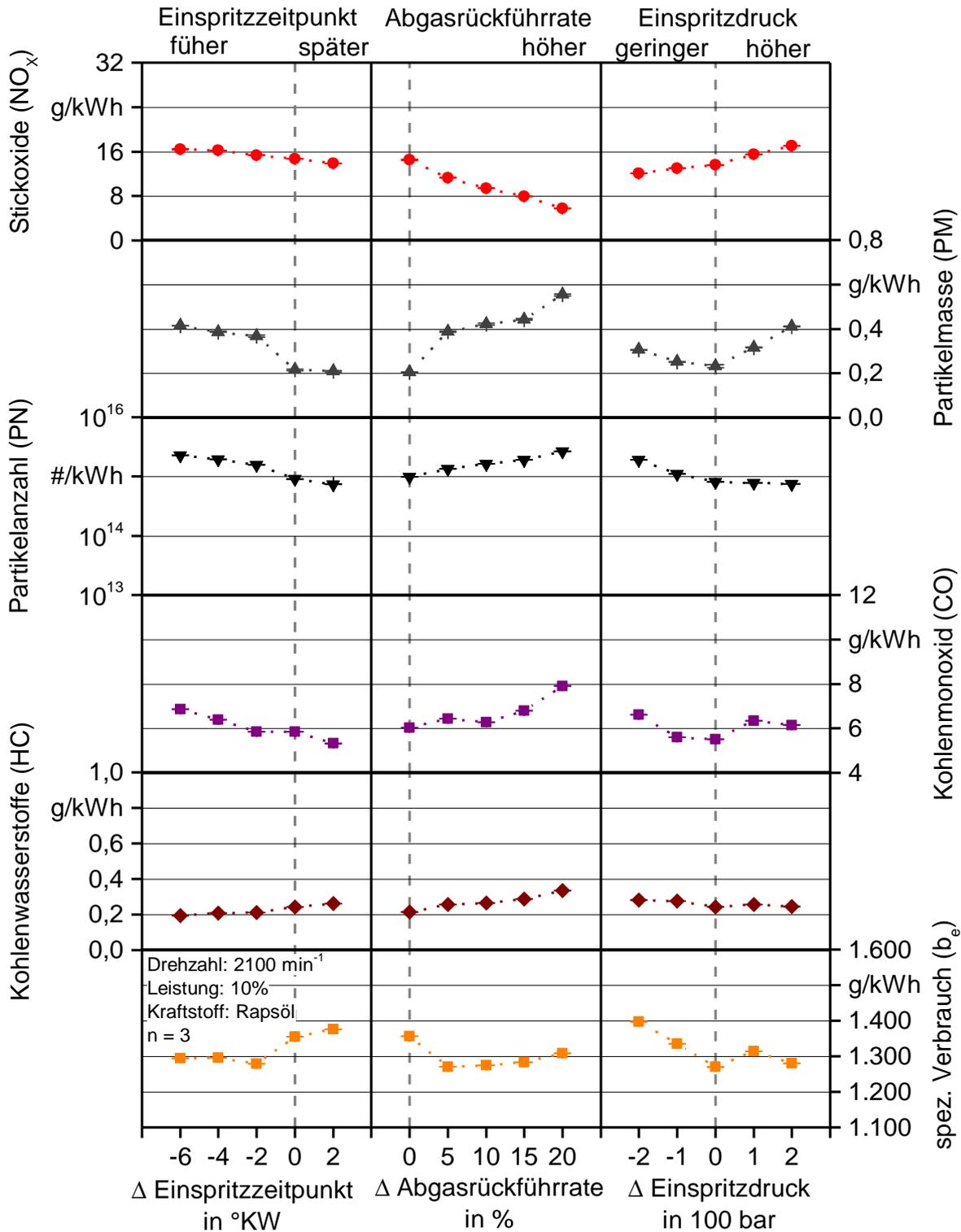


Abbildung 72: Variation des Einspritzzeitpunkts, der Abgasrückführrate und des Einspritzdrucks im Betriebspunkt P4W (Motordrehzahl: 2.100 min⁻¹, Leistung an der Zapfwelle: 10 %, Kennfeld W zum Aufheizen der Abgasnachbehandlung)

Die Ergebnisse der Parametervariation beim Einsatz von Rapsölkraftstoff werden nachfolgend diskutiert und mit bekannten Zusammenhängen beim Dieselmotorbetrieb verglichen. In Tabelle 30, Tabelle 31 und Tabelle 32 sind die Resultate zusammengefasst.

Abgasrückführrate

Die Veränderung der AGR-Rate hat den stärksten Einfluss auf die Abgasemissionen und den Kraftstoffverbrauch. In den Lastpunkten P6S, P4S und P4W zeigt sich ein überwiegend linearer Zusammenhang zwischen steigender AGR-Rate und sinkenden NO_x- sowie ansteigenden PM-, PN-, CO- und HC-Emissionen und umgekehrt. In der Variante P6S verursacht eine um 8 % höhere AGR-Rate einen überproportionalen Anstieg der PM- und CO-Emissionen, auf das 4- bis 8-Fache im Vergleich zu den Standardeinstellungen aufgrund der vermehrt unvollständigen Verbrennung. Letztere ist auf einen partiellen Sauerstoffmangel im Brennraum zurückzuführen, was das vergleichsweise niedrige Verbrennungsluftverhältnis von Lambda gleich 1,2 bei diesem Betriebspunkt verdeutlicht.

Tabelle 30: Qualitative Darstellung der Abgasrückführaten-Variation und die Auswirkungen auf die Emissionen (NO_x, PM, PN, CO, HC) und den Kraftstoffverbrauch (b_e) im Vergleich zu Literaturangaben mit Diesel [7][3]

Stellgröße Kraftstoff	geringere Abgasrückführrate				höhere Abgasrückführrate			
	Diesel	Rapsöl-Messungen			Diesel	Rapsöl-Messungen		
	[7][3]	P6S	P4S	P4W	[7][3]	P6S	P4S	P4W
Drehzahl (min ⁻¹)	–	1.575	2.100	2.100	–	1.575	2.100	2.100
Last (%)	–	75	10	10	–	75	10	10
Kennfeldeinst.	–	S	S	W	–	S	S	S
NO _x	↑	↑	↑	– ¹⁾	↓	↓	– ¹⁾	↓
PM	↓	↓	↓	– ¹⁾	↑	↑	– ¹⁾	↑
PN	– ¹⁾	↓	↓	– ¹⁾	– ¹⁾	↑	– ¹⁾	↑
CO	↓	↓	↓	– ¹⁾	↑	↑	– ¹⁾	↑
HC	↗	–	↓	– ¹⁾	↘	↑	– ¹⁾	↑
b _e	→	↘	→	– ¹⁾	→	↗	– ¹⁾	↓

¹⁾ nicht untersucht bzw. vorhanden

Eine Erhöhung der AGR-Rate um mehr als 4 % in diesem Lastpunkt ist also nicht praktikabel. Bei einer Reduzierung der AGR-Rate um 8 % erhöht sich das Lambda auf 1,6. In den Niedriglastpunkten P4S und P4W ist das Lambda stets größer als 1,9 und damit deutlich oberhalb der Rußgrenze. Der Verbrauch an Rapsölkraftstoff steigt bei einer Erhöhung der AGR-Rate um ca. 1 bis 2 %. Diese entspricht der beim Dieselpetrieb bekannten Größenordnung [3].

Einspritzzeitpunkt

Durch einen späteren Einspritzzeitpunkt sinken im Dieselpetrieb häufig die NO_x-Emissionen, gleichzeitig steigen die CO- und PM-Emissionen infolge einer inhomogeneren Gemischbildung im Brennraum an. Bei einem früheren Einspritzzeitpunkt verhält es sich umgekehrt und es sind höhere NO_x- und niedrigere PM-Emissionen zu erwarten [7][3]. Eine vorverlegte Einspritzung hat eine schnellere Zunahme des Brennkammerdrucks mit höheren Abgastemperaturen und NO_x-Emissionen zur Folge. Ferner kann der Wirkungsgrad sinken, da die Kolben in der Hubbewegung gebremst werden [54].

Tabelle 31: Qualitative Darstellung der Einspritzzeitpunkt-Variation und die Auswirkungen auf die Emissionen (NO_x, PM, PN, CO, HC) und den Kraftstoffverbrauch (b_e) im Vergleich zu Literaturangaben mit Diesel [7][3]

Stellgröße	früherer Einspritzzeitpunkt				späterer Einspritzzeitpunkt			
	Diesel [7][3]	Rapsöl-Messungen			Diesel [7][3]	Rapsöl-Messungen		
Kraftstoff	[7][3]	P6S	P4S	P4W	[7][3]	P6S	P4S	P4W
Drehzahl (min ⁻¹)	–	1.575	2.100	2.100	–	1.575	2.100	2.100
Last (%)	–	75	10	10	–	75	10	10
Kennfeldeinst.	–	S	S	W	–	S	S	S
NO _x	↑	↑	→	↗	↓	–	↓	↘
PM	↓	→	↑	↑	↑	–	↘	↘
PN	– ¹⁾	↑	↗	↑	– ¹⁾	↘	↓	↓
CO	↘	↑	↗	↑	↗	↘	↗	↘
HC	↗	↓	↗	↓	↗	–	↑	↗
b _e	→	↘	→	↓	↗	↗	↑	↘

¹⁾ nicht untersucht bzw. vorhanden

Im Rapsölbetrieb bestätigt sich dieses Verhalten nur zum Teil. So verursacht die frühere Einspritzung in den Punkten P6S und P4W bis zu 30 % höhere NO_x -, Partikel- und CO-Emissionen bei niedrigeren HC-Emissionen und geringerem Verbrauch.

Ein späterer Einspritzzeitpunkt führt bei niedriger Last (P4S und P4W) zur Reduzierung der NO_x -Emissionen um 5 bzw. 15 %, während bei hoher Last (P6S) kein eindeutiger Trend zu erkennen ist. Gleichzeitig nehmen auch die PM- und PN-Emissionen ab, wohingegen der Kraftstoffverbrauch um 4 bzw. 2 % zunimmt. Ein späterer Einspritzzeitpunkt zeigt somit einen günstigen Einfluss auf das Emissionsverhalten hinsichtlich des NO_x -PM-Zielkonflikts, geht jedoch zulasten eines höheren Kraftstoffverbrauchs. Ein früherer Einspritzzeitpunkt führt im Gegenzug zu einem niedrigeren Verbrauch und überwiegend schlechterem Emissionsverhalten.

Einspritzdruck

Eine Erhöhung des Einspritzdrucks führt im Dieselbetrieb zu einer besseren Gemischbildung und damit zu geringeren CO-, HC- und PM-Emissionen [7][3]. Die durchgeführten Messungen bei konstanter Leistung mit Rapsölkraftstoff zeigen ebenso in den Punkten P6S und P4S in unterschiedlicher Intensität eine abnehmende CO-, HC-, PM-Konzentration sowie Partikelanzahl im Abgas. Bei einer Erhöhung des Einspritzdrucks um 200 bar nimmt die emittierte Partikelmasse um 8 % (P4S) bzw. 41 % (P6S) ab, ebenso werden zwischen 7 und 21 % weniger Partikel gezählt.

Im Dieselbetrieb bewirkt die Druckerhöhung neben der besseren Gemischbildung und einer vollständigeren Verbrennung tendenziell einen leichten Rückgang des NO_x -Ausstoßes und Kraftstoffverbrauchs [7][3]. Entgegen den Literaturangaben zu Diesel steigen mit Rapsölkraftstoff die NO_x -Emissionen bei den hier durchgeführten Messungen um 13 % im Punkt P6S bzw. 26 % im Punkt P4W bei 200 bar höherem Raildruck während der Einspritzung. Der Kraftstoffverbrauch nimmt ferner um ca. 1 bis 3 % in den Punkten P6S und P4W zu. Im Niedriglastpunkt P4S sinkt hingegen der Verbrauch um 2 % bei nahezu gleichen NO_x -Emissionen bei gleicher Druckerhöhung (um 200 bar).

Die Untersuchung zeigt, dass sich im Rapsölbetrieb die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch bei modernen Motoren durch Veränderung der Motorparameter in der Motorsteuerungssoftware stark beeinflussen lassen. Rapsölkraftstoff unterscheidet sich unter anderem in Zündverzögerung, Viskosität und Heizwert von Dieselmotorkraftstoff. Trotzdem verändern sich Emissionen und Verbrauch durch Variation der Motorparameter meist in ähnlicher Form wie dies in der Literatur [7][3][54] für den Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff beschrieben ist. Insbesondere die Abgasrückführleistung stellt eine wirksame Stellgröße zur Anpassung und Verschiebung der NO_x - und PM-Rohemissionen dar. Auch Einspritzzeitpunkt und -druck sind geeignete Parameter zur Optimierung, wenngleich ihr Einfluss auf Emissionen und Verbrauch stärker vom jeweiligen Motorbetriebspunkt abhängt.

Für eine serienreife Applikation der Motorsteuerungssoftware auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff müssen mehrere Betriebspunkte und die Kombination verschiedener Parameteränderungen betrachtet werden. Ferner müssen auch weitere Zielgrößen wie Dauerhaltbarkeit von Bauteilen oder die Geräuschentwicklung miteinbezogen werden.

Tabelle 32: Qualitative Darstellung der Einspritzdruck-Variation und die Auswirkungen auf die Emissionen (NO_x, PM, PN, CO, HC) und den Rapsölverbrauch (b_e) im Vergleich zu Literaturangaben mit Diesel [7][3]

Stellgröße	geringerer Einspritzdruck				höherer Einspritzdruck			
	Diesel [7][3]	Rapsöl-Messungen			Diesel [7][3]	Rapsöl-Messungen		
		P6S	P4S	P4W		P6S	P4S	P4W
Drehzahl (min ⁻¹)	–	1.575	2.100	2.100	–	1.575	2.100	2.100
Last (%)	–	75	10	10	–	75	10	10
Kennfeldeinst.	–	S	S	W	–	S	S	S
NO _x								
PM								
PN	– ¹⁾				– ¹⁾			
CO								
HC								
b _e								

steigt stark
 steigt
 gleichbleibend
 sinkt
 sinkt stark
 nicht eindeutig
¹⁾ nicht untersucht bzw. vorhanden

6.4 Motorbegutachtung (Co-Autoren: Wunderlich T., Innerhofer S.)

Motorbegutachtungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Firma regineering GmbH Denkendorf (www.regineering.de) am Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K) bei 4.460 Bh und bei den Traktoren John Deere 6930 Premium (JD-G und JD-K) bei 2.821 Bh bzw. 3.454 Bh sowie John Deere 7830 Premium (JD7-G) bei 1.183 Bh. Die Ergebnisdarstellung beruht überwiegend auf den Berichten der Firma regineering GmbH.

6.4.1 Deutz-Fahr Agrottron TTV 1160 (DE-K)

Kolbenboden sowie Zylinderkopf und -wand

In Abbildung 73 sind Kolbenboden, Zylinderkopf, Ein- und Auslassventile sowie Zylinderwände des Motors zu sehen. Generell wurden keine für den Betrieb kritischen Ablagerungen im Bereich des Zylinderkopfs festgestellt. Kolbenboden Nr. 6 wurde bei der Demontage des Zylinderkopfs mit Kühlwasserresten benetzt, wodurch die Ablagerungen nur eingeschränkt zu beurteilen waren.

Die Kolben zeigen ein überwiegend symmetrisches Strahlbild an Kolbenmulde und Kolbenboden. Auffällig ist, dass lediglich bei Kolben 6 das Zentrum der Strahlauftrittsflächen unterhalb der Muldenoberkante liegt (siehe Abbildung 73).

Am Zylinderkopf zeigen sich Spuren weiß-grauer Ascheformationen an den Rändern der Einlassventile im Bereich Glühkerze/Einspritzdüse/Ventil sowie zwischen Ein- und Auslassventil oberhalb der Einspritzdüse.

Kolbenboden



Zylinderkopf



Ein- und Auslassventile



Zylinderwände



Abbildung 73: Kolbenboden, Zylinderkopf, Ein- und Auslassventile und Zylinderwände des Traktors DE-K bei 4.460 Bh von Zylinder Nr. 1 bis 6 (v. l. n. r.)

Diese Brennraumrückstände wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie EDX (REM) auf ihre Elementgehalte untersucht. Neben dem Hauptbestandteil Kohlenstoff (C) wies diese selektive Probe untergeordnete Anteile an Ca, S, P, Zn sowie Spuren von Mg, Al und Si auf. In Tabelle 33 werden die Elemente im Brennraum, Motoröl und Rapsölkraftstoff miteinander verglichen. Als Datengrundlage dienen Mittelwerte aus 15 Motorölanalysen und fünf Kraftstoffuntersuchungen. Die Verbrennungsrückstände haben ihren Ursprung im Motoröl und Kraftstoff. Der Anteil der Rückstände aus dem Motoröl hängt stark von der Zusammensetzung und der eingetragenen Menge Motoröl in den Brennraum ab. Im Rapsölkraftstoff sind die Elemente Al, Si und Zn nicht nachweisbar. Der hohe Anteil dieser Elemente in den Verbrennungsrückständen weist darauf hin, dass ein Großteil dieser Ablagerungen auf mitverbranntes Motorenöl zurückzuführen ist.

Tabelle 33: Zusammensetzung der Ablagerungen im Brennraum sowie entsprechende Elementgehalte im Motoröl und Rapsöl

Elemente	Brennraum (Massen-%)	Motoröl (Massen-%)	Rapsöl (Massen-%)
Kohlenstoff (C)	83,21	– ¹⁾	– ¹⁾
Magnesium (Mg)	0,9	0,032	0,002
Aluminium (Al)	0,11	0,0003	– ¹⁾
Silizium (Si)	0,15	0,001	– ¹⁾
Phosphor (P)	1,82	0,09	0,001
Schwefel (S)	2,76	0,38	0,0003
Calcium (Ca)	7,46	0,28	0,002
Zink (Zn)	3,58	0,10	– ¹⁾
Bor	0	0,001	– ¹⁾

¹⁾ nicht ermittelt

Der Zylinderkopfbereich wies um die Einspritzdüsen herum bei allen Zylindern Formationen verkokter Kraftstoffrückstände auf. Diese bildeten sich teils bis auf das Niveau der Einspritzdüsenkuppe aus. Erkennbar ist auch, dass die Kraftstoffeinspritzstrahlen in Richtung Glühkerze, bedingt durch den flachen Spritzwinkel im Strahlkegelbereich, keine Ablagerungen zulassen bzw. entstandene Ablagerungen wieder freisprühen. Die Oberfläche der Ablagerungen kann als tief zerfurcht mit Schollenbildung beschrieben werden. Der Zylinder 6 weicht mit glatter Oberfläche davon ab. Die Formationen erstrecken sich vom Auslass- bis hin zum Einlassventil, wobei die Ventilsitze selbst nicht betroffen sind. Die Honriefen der Zylinderwände waren deutlich ausgeprägt. Einige Laufbuchsen hatten vereinzelt leichtgradige Längsriefen im Bereich der Druckseite (DS) und Gegendruckseite (GDS). Diese Fressspuren sind vermutlich durch das Verschmieren der kompakten Verkokungen ausgehend vom Feuersteg verursacht. Eine leichtgradige Glättung der Honriefen ist abnutzungsbedingt an Zylinderwand 3 im unteren Drittel zu erkennen. Die Feuerstege waren scharf abgegrenzt und es gab keine Hinweise auf feststehende Kolbenringe. Dies wäre durch deutliche Fresserspuren an den Laufflächen an der Zylinderwand erkennbar.

An den Einlassventilen finden sich im Bereich der Ventilschäfte hin zu den Ventiltellern deutliche Ablagerungen. Diese sind für diese Motorengeneration typisch. Alle Ventilsitze waren nach der optischen Beurteilung beidseitig frei von Ablagerungen. Die Ventilschäfte der Auslassventile zeigten teilweise einen fließenden Verlauf der Grenzfläche der Ablagerungen, was auf eine leichtgradige Undichtigkeit der Ventilschaftdichtung hinweist. Die Ausprägung ist jedoch als unkritisch einzustufen. Vorsorglich wurde die Ventilschaftdichtung ersetzt. Sowohl die Turbinen- als auch die Verdichterseite des Abgasturboladers weisen äußerlich keine untypischen Ablagerungen im Vergleich zu Dieselmotoren auf. Das Turbinenrad besitzt an der Oberfläche eine trockene Rußschicht. Das Verdichterrad zeigt einen geringeren Rußbelag, der mit Motoröl benetzt ist, das über die Motorölrück-

führung in die Ansaugluft eingetragen wird. Es sind keine Ausbrüche oder relevante Formationen an Ablagerungen zu erkennen. Wie in Abbildung 74 zu sehen war der Zustand der Verdichterseite bei 4.600 Bh ebenso ohne technische Mängel wie schon bei 1.771 Bh [64] und 3.300 Bh [23].



Abbildung 74: Turbinenrad des Abgasturboladers am Traktor DE-K bei 1.771, 3.300 und 4.460 Betriebsstunden (v. l. n. r.)

Glühkerzen, Düsenhalterkombination (DHK) und Einspritzdüsenlöcher

Die Schäfte der Glühkerzen Nr. 1 und 6 waren im Gegensatz zu Nr. 2 bis 4 äußerlich korrosionsfrei, da ihre Aufnahmebohrungen im Zylinderkopf mit Motoröl bzw. Kraftstoff von außen vollgelaufen waren. Analog zu den stärkeren weißen Ascheformationen an den Zylinderköpfen Nr. 1 und 5 zeigten auch die Glühstifte Nr. 1 und 5 mehr Ablagerungen dieser Art als alle anderen.

Auffällig zeigten sich vor allem Düsenhalter Nr. 1 mit äußerlich flächendeckenden Polymerrückständen sowie in geringem Maße Düsenhalter Nr. 6 mit Polymerrückständen im Bereich der Verschraubung der Düsenspannmutter. Düsenhalterkombination (DHK) Nr. 1 zeigte bei der Vermessung am Düsenprüfstand einen Druckverlust durch eine unzureichende Kombinationsdichtheit, was zu Leckagen an der DHK führen kann. DHK Nr. 2 und 4 zeigten die gleiche Kombinationsdichtheit, wiesen aber äußerlich keine derartigen Rückstände auf. Die Kombinationsdichtheit der DHK Nr. 6 war bei der Messung nicht zu beanstanden. Denkbar wäre somit auch eine Leckage über die Rücklaufleitung oder über die bei der Umrüstung auf Pflanzenöl installierten Heizstifte, die anstelle von Fixierstiften in den Injektoren verbaut sind. Bei der späteren Demontage der DHK wurde ein radialer Versatz von Zwischenscheibe und Düsenkörper festgestellt, was ebenfalls zu Leckagen führen kann.

Die Düsenkörper und Düsennadeln wurden ungereinigt zur Fortführung des Feldtests wiederverwendet. Die bei der Umrüstung eingebauten Heizstäbe an zwei Düsenhaltern, die zur Vorwärmung der Injektoren und des darin befindlichen Pflanzenöls dienen, mussten erneuert gesetzt werden.

Noch vor der Vermessung wurden alle Einspritzdüsenlöcher (6-Lochdüse) sowie Düsennadeln lichtmikroskopisch untersucht. Wie in Abbildung 75 zu sehen ist, weisen alle Düsenkuppen ähnlich geprägte Ablagerungen auf. Analoge Ablagerungen zeigten sich bereits bei einer früheren Begutachtung bei 1771 Bh [64],



Abbildung 75: Detail Düsenkuppen der Zylinder Nr. 1 bis 6 (v. l. n. r.) bei 1.171 (Foto: TFZ) und 4.460 Betriebsstunden (Foto: regineering GmbH)

An Bereichen der Düsenkuppe, an denen die Verkokungen abgeplatzt waren, sind die blanken Einspritzdüsenlöcher erkennbar (Abbildung 76, Mitte). An Bereichen, an denen dies nicht der Fall war, konnten kompakte Strukturen teils mit Trompetenbildung beobachtet werden. Diese waren vielfältig geformt, von fein strukturiert bis stark zerklüftet. Ebenfalls fanden sich im Randbereich einiger Einspritzlöcher weißliche Oberflächen, der Hauptteil war jedoch tief schwarz. Grundsätzlich waren bei fast allen Einspritzlöchern die Austrittskanten zu erkennen. Aufgrund der sichtbaren Einspritzdüsenlöcher, des symmetrischen Strahlbilds und der konstanten Leistungswerte scheinen die Ablagerungen das Einspritzverhalten nicht zu beeinflussen.



Abbildung 76: Beispiele für unterschiedliche Ablagerungsformationen am Einspritzlochaustritt (Foto: regineering GmbH)

6.4.2 John Deere 6930 und 7830 (JD-G, JD-K und JD7-G)

Die Traktoren JD-K und JD-G waren vor der Befundung in einem betriebsbereiten Zustand. Bis auf leichte Verschmutzungen durch Kraftstoff- und Motorölreste zeigten sich äußerlich keine Mängel.

Beim Traktor JD-K wurde neben der Motorbefundung auch das Motorsteuergerät geprüft. Beim Auslesen des Fehlerspeichers wurden keine für den Motorbetrieb relevanten Fehlercodes festgestellt. Die Prüfung auf Fehlzündungen und Kompression durch das Wartungsprogramm John Deere Service Advisor zeigte keine kritischen Messwerte für die einzelnen Zylinder an, weder im kalten noch im warmen Zustand.

Nachfolgend werden Ablagerungen und der Zustand der Zylinderwand, des Kolbenbodens und des Zylinderkopfs der Traktoren JD-G und JD-K gegenübergestellt (Abbildung 78). Ferner werden Abgasrückführung (JD-G, JD-K), Ein- und Auslassventile (JD-G, JD-K), Abgasturbolader (JD-G, JD-K), Injektoren (JD-G, JD-K und JD7-G) und Abgasnachbehandlung (JD-G) beurteilt.

Zylinderwand und Honbild

Die Honriefen in den Zylinderwänden der Traktoren JD-G und JD-K waren deutlich sichtbar. Die Zylinderwände sind frei von Spiegelbildung, wie exemplarisch in Abbildung 77 und in der Gesamtheit in Abbildung 78 zu erkennen ist. Beim Traktor JD-G konnten an den Laufbüchsen des Zylinders zwei leichte Längsspuren im Bereich der Gegendruckseite festgestellt werden. Vereinzelt Partikel aus der Verbrennungsluft oder Ablagerungen am Feuersteg könnten für die Längsriefen ursächlich sein. Das Honbild der Zylinderwände beider Traktoren ist jedoch in einem technisch unbedenklichen Zustand. Aufgrund des schwachen Abriebs an der Honung kann auf geringe Kraftstoff- und Motorölablagerungen am Feuersteg geschlossen werden.

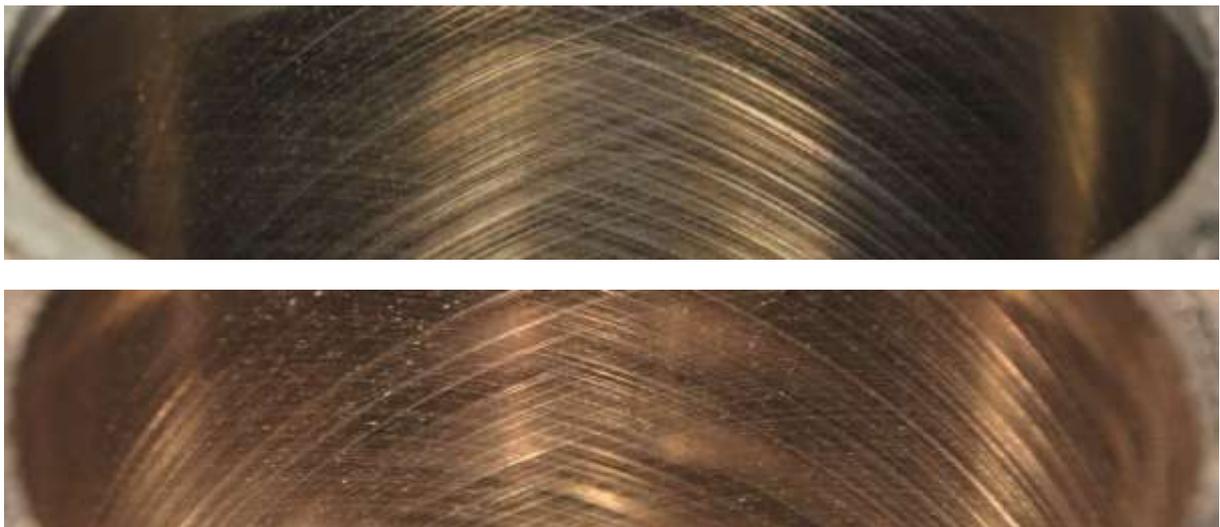


Abbildung 77: Nahaufnahme des Honbilds der Zylinderwände der Traktoren JD-K (oben) und JD-G (unten) des jeweils dritten Zylinders

Kolbenboden

Die Kolbenböden präsentierten sich nach Öffnen des Zylinderkopfs einheitlich und in einem technisch unbedenklichen Zustand. Es wurden weder für den einwandfreien Betrieb kritische Ablagerungen noch ein hoher Materialabtrag z. B. durch Erosion festgestellt.

Die Kolben 1, 2, 4, 5 und 6 des Traktors JD-G zeigten ein symmetrisches Strahlbild am Kolbenboden (Abbildung 78). Bei Kolben 3 ist die Symmetrie wegen schwach ausgeprägter Strahlmarken nur zu erahnen. Einige Strahlauftrittsflächen sind unterschiedlich groß, was auf ungleichmäßiges Einspritzen bzw. schlechte Zerstäubung an bestimmten Einspritzlöchern hindeuten kann. Die Strahlauftrittsflächen liegen innerhalb des Muldenrands. Dies lässt vermuten, dass die Einspritzung zum richtigen Zeitpunkt erfolgt und der Kraftstoff nicht zu weit, z. B. bis an die Zylinderwand verteilt, gelangt ist. Der geringe Kraftstoffeintrag ins Motoröl beider Traktoren (siehe Abschnitt 6.1.3) stützt diese Beobachtung. Der äußere Rand des Kolbenbodens ist bei Kolben 1 und 6 stärker, bei Kolben 4 weniger stark mit Verkrustungen versehen. Die Kolbenböden 1 bis 6 des Traktors JD-K weisen augenscheinlich etwas weniger Rußanteile und ein deutlich gleichmäßigeres sowie symmetrisches Strahlbild auf.

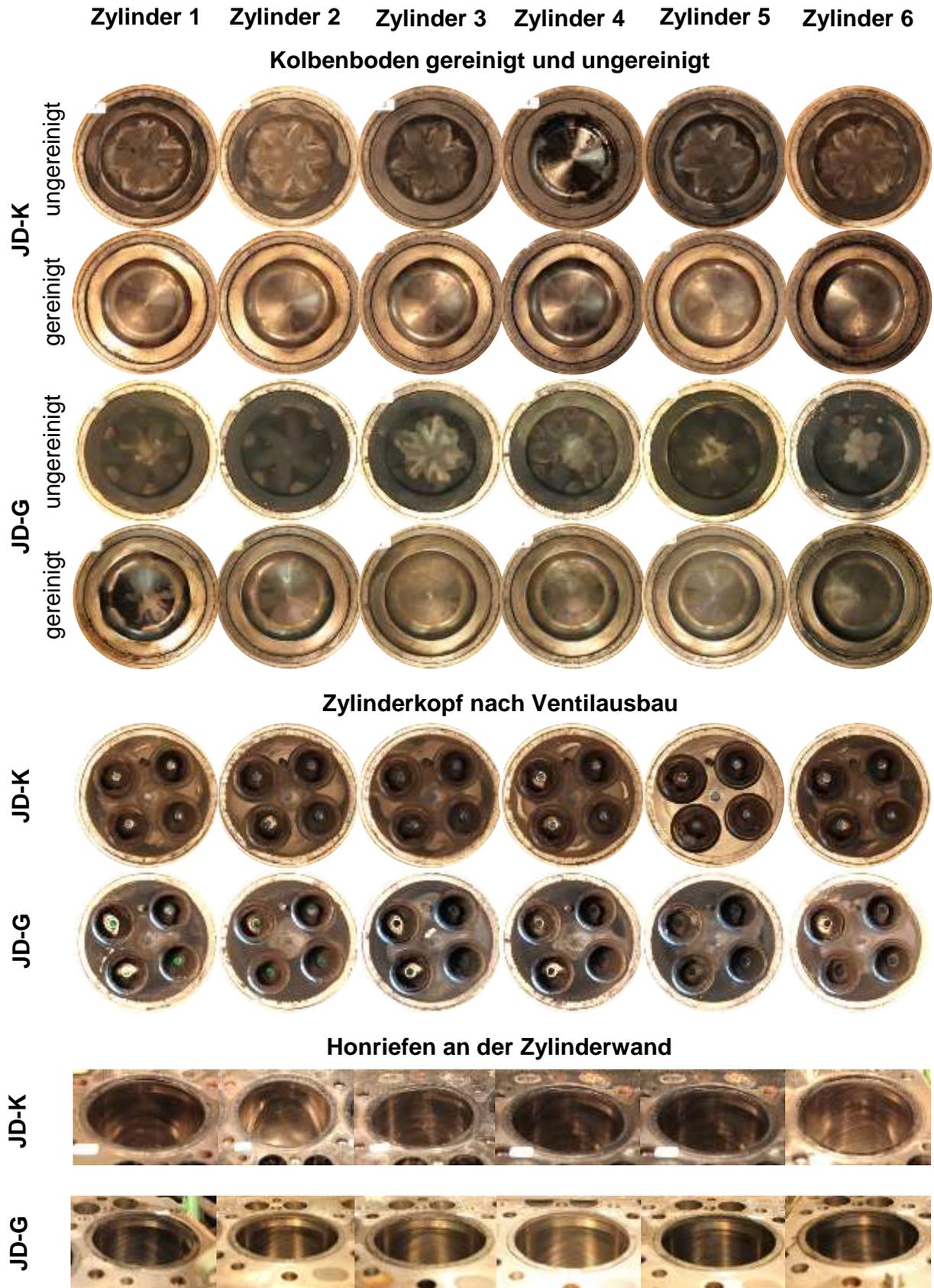


Abbildung 78: Kolbenböden, Zylinderköpfe und Zylinderwände der Traktoren JD-K und JD-G bei der Motorbefundung

Bei Kolben 5 und 6 des Traktors JD-G sind Abdrücke in der Oberfläche des Kolbenrands zu finden (Abbildung 79 für Kolben Nr. 5), die nicht eindeutig zugeordnet werden konnten. Denkbar wäre eine leichte Ventilberührung durch Verklemmen der Ventile. Ferner ist es möglich, dass sich fest verkrustete Ablagerungen am Muldenrand angesammelt haben. Alle Abdrücke bzw. Ablagerungen befinden sich auf dem Kolbenbodenrand und werden als unbedenklich eingeschätzt.

Im gereinigten Zustand war in allen Muldenzentren eine leicht raue Oberfläche zu sehen, wie beispielhaft Abbildung 79 zeigt. Es konnte nicht differenziert werden, ob es sich dabei um Ablagerungen oder einen geringfügigen Materialabtrag handelt. Eine Möglichkeit ist, dass Kraftstoffreste des Injektors nach dem Abstellen oder Starten des Motors auf die Kolbenmitte tropfen, sich dort erhitzen und verkoken. Daneben wäre auch eine Erosion an der Materialoberfläche aufgrund des Kraftstoffkontakts bzw. der thermischen Belastung denkbar.



Abbildung 79: Abdrücke bzw. Ablagerung auf der Oberfläche von Kolbenboden Nr. 5 (links oben) und raue Oberfläche in der Kolbenmulde (mittig) am Traktor JD-G

Beim Traktor JD-K sind vereinzelt kleinere Krater mit teilweise körnigen Füllungen am Kolbenboden zu finden. Hierbei handelt es sich vermutlich um Schweißreste (Schweißperlen, Metallstaub), die bei Arbeiten an der AGN über den offenen Einlasstrakt in den Brennraum gelangt sind. Aufgrund ähnlicher Rückstände von Schweißarbeiten an den Kolben 3 und 5 des Traktor JD-G wurden diese bei einer Befundung im Projekt

2nd VegOil [62] ausgetauscht. Aus diesem Grund sind bei der aktuellen Befundung des Traktors JD-K im Vergleich zu JD-G keine Schadensmarken mehr zu finden.

Abgasrückführkühler (AGR-Kühler)

Bei den Traktoren JD-K und JD-G wurde der AGR-Kühler an Einlass- und Auslassseite aufgetrennt und begutachtet. Wie Abbildung 80 verdeutlicht, ist die Einlassseite des AGR-Kühlers kaum mit Rußablagerungen versehen, während nach dem Kühler etwa 25 bis 30 % der Kanäle beim Traktor JD-G und ca. 10 % der Ausgangsseite beim Traktor JD-K mit Ablagerungen verschlossen sind.

Je nach eingestellter AGR-Rate, Betriebsweise und Nutzungsdauer sind Ablagerungen am AGR-Kühler auch im Dieselmotor üblich [65][36][8]. Dieses sogenannte „Fouling“ verursacht durch Akkumulation von Ruß- und Kohlenwasserstoffrückständen einen schlechteren Wärmeübergang zwischen dem heißen Abgas und dem Kühlwasser. Der übliche Effizienzrückgang wird mit 20 bis 30 % angegeben [65].

Die Ablagerungsbildung hängt weniger von der Gastemperatur ab. Insbesondere unverbrannte Kohlenwasserstoffe im Abgas (z. B. im Teillastbereich) bei geringen Kühlwassertemperaturen (z. B. kurz nach dem Start) erhöhen die Ablagerungsmenge im Kühler. Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit hingegen sinkt die Verweildauer im Kühler und die Wahrscheinlichkeit der HC- und Partikelanheftung [36][8].

Das Fouling über die Betriebsdauer wird in der Dimensionierung des AGR-Kühlers berücksichtigt. Der schlechtere thermische Wirkungsgrad und der Druckabfall führen in der Regel zu höheren NO_x-Emissionen. Ein deutlicher Anstieg der NO_x-Emissionen konnte jedoch bei den Traktoren JD-K und JD-G über die Lebensdauer nicht beobachtet werden (siehe Abschnitte 6.2.2.1 und 6.2.2.2), was auf eine ausreichende Kühlleistung und eine funktionstüchtige Regelung zwischen Lade- und Abgasgedruck sowie AGR-Ventilstellung schließen lässt.

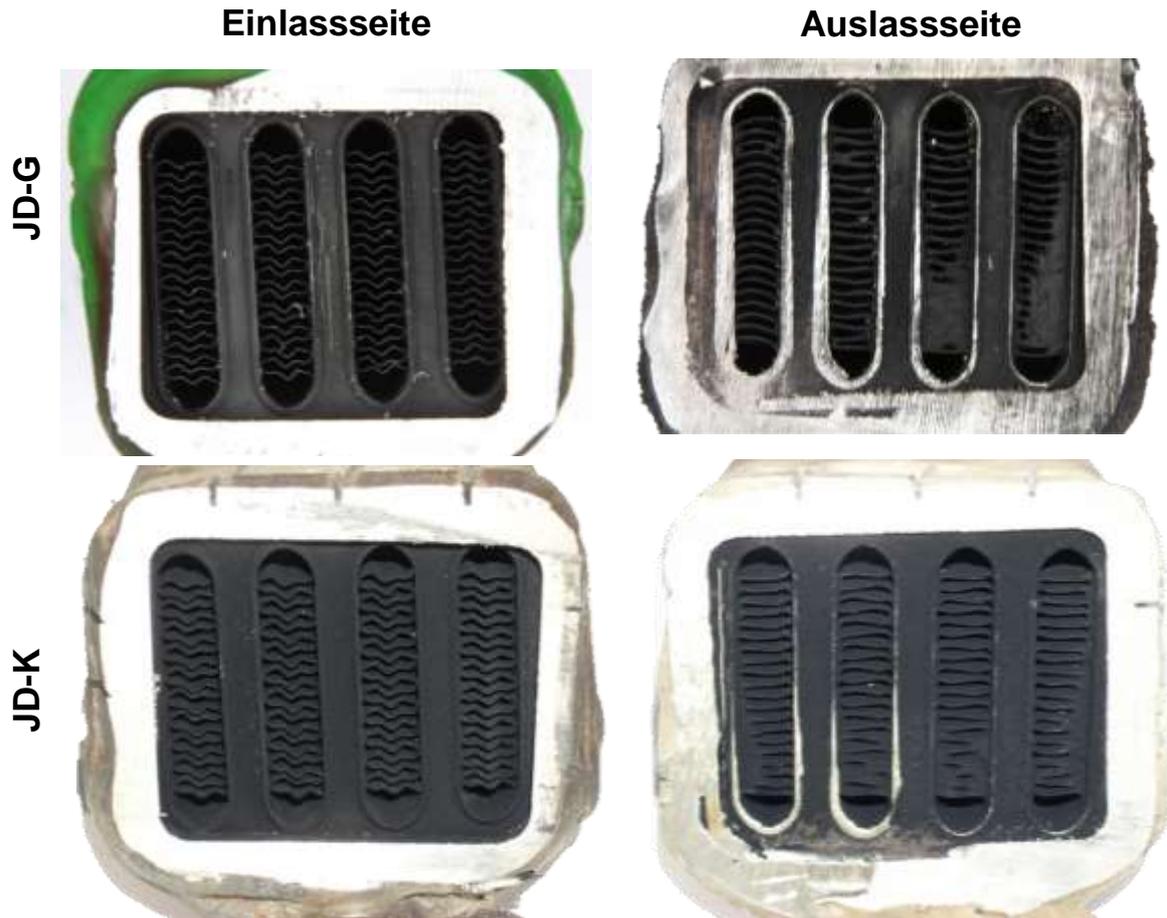


Abbildung 80: Ein- und Auslassseite des AGR-Kühlers der Traktoren JD-G und JD-K

Zylinderkopf, Ventilsitze, Ein- und Auslasskanäle

Die Auslasskanäle im Zylinderkopf zeigten deutlich weniger Ablagerungen als die Einlasskanäle. Bei den höheren Abgastemperaturen im Auslass haben sich nur dünne, aber feste Krusten ausgebildet. Insbesondere die Einlasskanäle 1, 3 und 5 des Traktors JD-K sowie 2, 5 und 6 des Traktors JD-G sind stärker betroffen als die übrigen Einlasskanäle. Das weitere Anwachsen der Ablagerungen über die Ventilsitze aus dem Luftkanal heraus könnte zur Schädigung des Ventilsitzes und zu Undichtigkeiten führen. Ferner ist unbekannt, wie sich die nachgerüstete Prototyp-AGN und der dadurch erhöhte Abgasgegendruck auf die AGR-Rate und den Ladungswechsel ausgewirkt haben. Die Luftzufuhr wird durch den verengten Querschnitt im Einlass reduziert, insbesondere wenn das zugehörige Ventil ebenso stärkere Ablagerungen aufweist.

Eine ungenügende Zufuhr von Verbrennungsluft führt zu Leistungseinbußen und zu höheren HC-, CO- und PM-Emissionen, die bei den Traktoren JD-G und JD-K nicht aufgetreten sind. Trotz der deutlichen Ablagerung reichte die Luftversorgung durch den verengten Einlass für einen unproblematischen Motorbetrieb aus.

Ein- und Auslassventile

Zur Beurteilung der Ablagerungen wurden alle Ventile aus dem Zylinderkopf demontiert. Wie in Abbildung 81 zu sehen ist, zeigten analog zu den Einlasskanälen die Einlassventile stärkere Beläge als die Auslassventile aufgrund der geringeren Temperaturen des Luft-/Abgasgemischs im Einlasskanal. Ferner könnte auch die nachgerüstete Prototyp-Abgasnachbehandlung mit höherem Abgasgegendruck den Ladungswechsel und die AGR-Rate beeinträchtigt haben.

Besonders die Einlassventile an den Zylindern 2, 5 und 6 beim JD-G sowie 3, 5 und auch 6 beim JD-K zeigten starke Beläge am Schaft, die so den effektiven Querschnitt des Lufteinlasskanals verringern. Die Beläge waren beim JD-K im Vergleich zum JD-G etwas dünner. Die Rückseiten der Ventilteller waren wiederum bis auf leichtgradige Verunreinigungen an einigen Einlassventilen ohne nennenswerte Rückstände. Die Ventil-sitzflächen waren nur leichtgradig verschmutzt und intakt. Die Konsistenz der Ablage-rungsschicht war rußartig, porös und in den unteren Lagen fest.

Durch Ablagerungen in der Ventilfehrung kann es zum Einlaufen der Ventile kommen, die sich dann nicht mehr frei bewegen lassen. Im Gleitbereich aller Ventile beider Trakto-ren zeigten sich jedoch nur vereinzelt und nicht umlaufend an den Ventilschäften schwarz verschmierte Rückstände. Dies lässt auf eine gute Beweglichkeit der Ventile schließen.

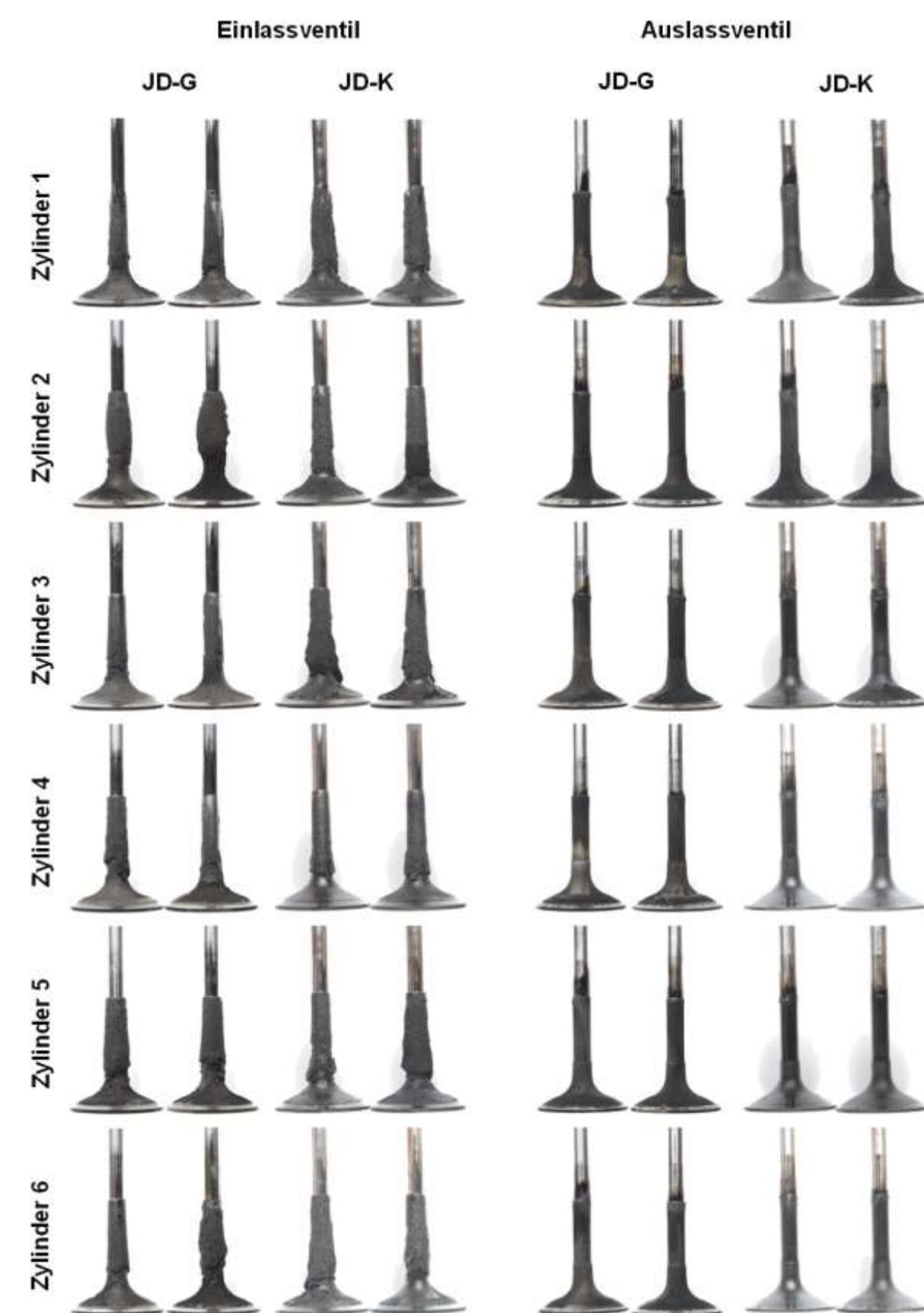


Abbildung 81: Ein- und Auslassventile der Traktoren JD-G und JD-K

Turbolader

Die Abgasturbolader der Traktoren JD-K und JD-G weisen auf der Abgasseite bis auf eine leichte Ruß- und Staubbedeckung keine Ablagerungen an den Flügeln auf, wie in Abbildung 82 zu sehen ist. Das Turbinenrad und das Spiralgehäuse sind trocken und es sind keine mechanischen Beschädigungen zu erkennen. Das Verdichterrad zeigt lediglich an den Vorderkanten feine Einschlüge von Partikeln aus der Ansaugluft sowie partiell eine leichte staubförmige Benetzung. Am äußersten Rand ist ein grüner Bereich unklarer Herkunft zu sehen. Die Turbolader beider Traktoren weisen aufgrund des guten optischen Eindrucks, des unauffälligen Betriebsgeräuschs und des Leistungsverhaltens keinerlei Anzeichen eingeschränkter Funktionstüchtigkeit auf.

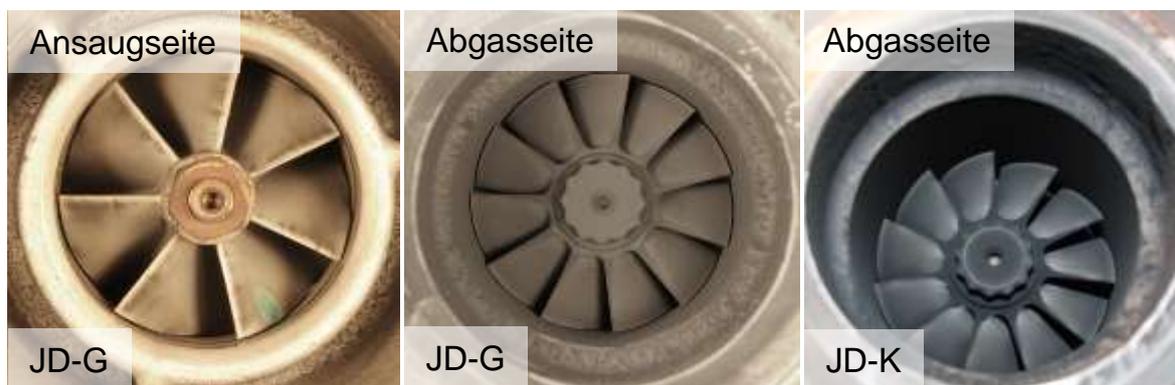


Abbildung 82: Abgas- und Ansaugseite des Turboladers am Traktor JD-G und Abgasseite des Traktors JD-K

Injektoren

Die Betriebszeiten der Injektoren mit Pflanzenöl betragen zum Zeitpunkt der Befundung beim Traktor JD-K 3.454 Bh, beim Traktor JD-G 2.821 Bh und beim Traktor JD7-G 1.183 Bh.

Die Injektoren der Traktoren JD-G, JD-K und JD7-G wurden vor der Vermessung am Düsenprüfstand fotografiert. In

Abbildung 83 und Abbildung 84 sind die Düsen Spitzen seitlich und als Draufsicht zu sehen. An allen Düsenkuppen sind Verkokungen ohne Trompetenbildung zu finden. Bei allen Einspritzlöchern sind die Austrittskanten des Kraftstoffs deutlich zu erkennen. Die optische Begutachtung des Strahlbilds am Düsenprüfstand zeigte bei allen Injektoren der Traktoren JD-G und JD-K keine Auffälligkeiten.

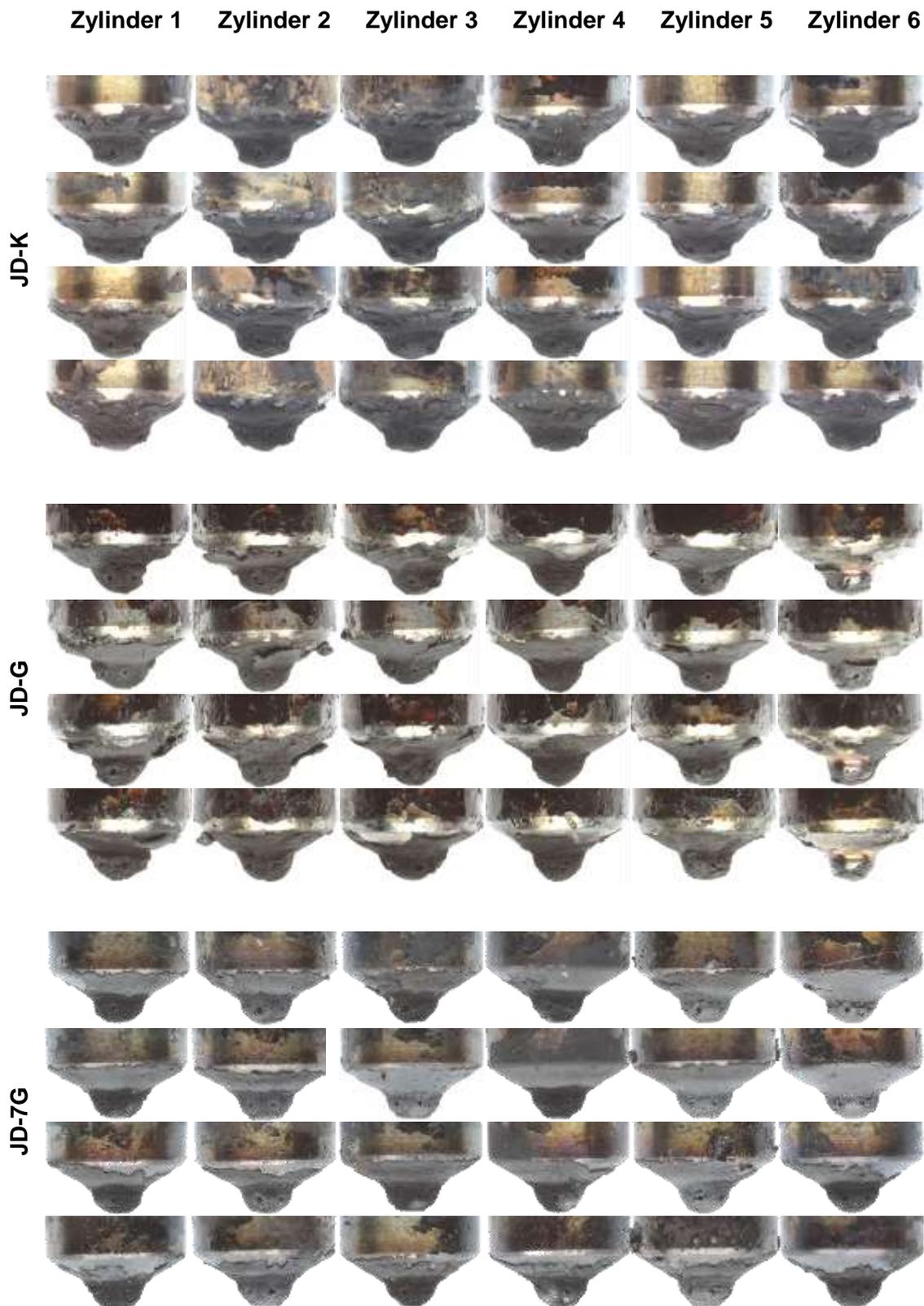
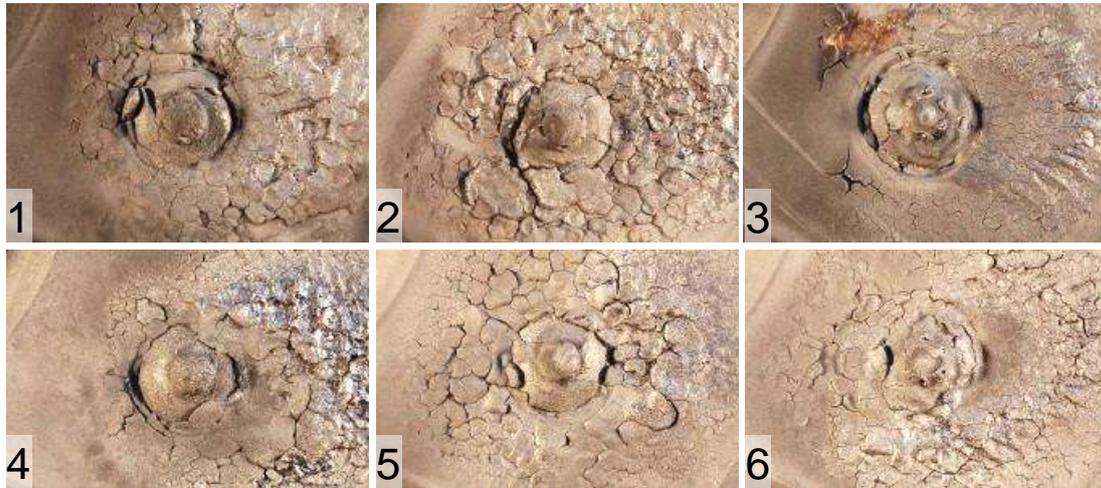


Abbildung 83: Injektorspitzen der Traktoren JD-K, JD-G und JD7-G bei einer Ansicht von vier Seiten (0°, 90°, 180° und 270°)

JD-G



JD-K

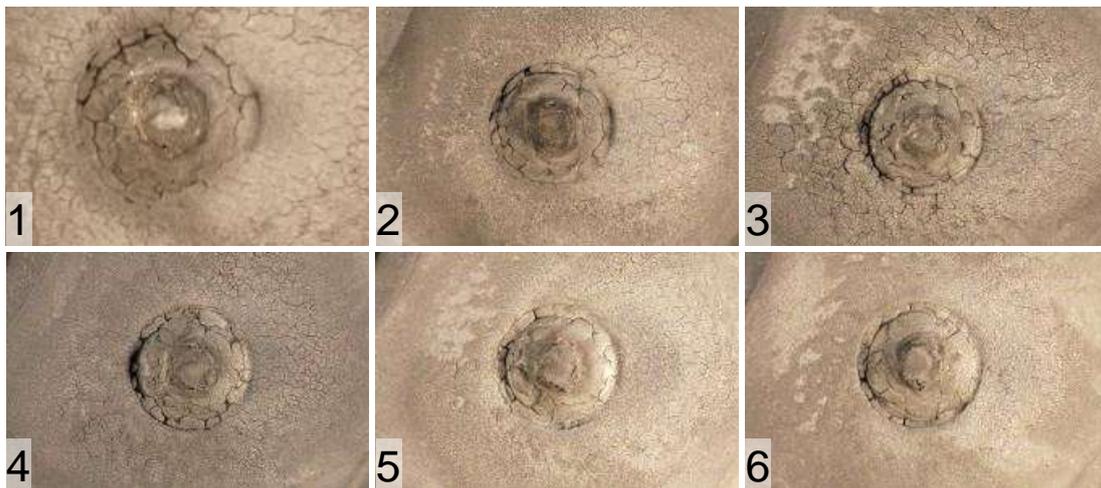


Abbildung 84: Im Zylinderkopf eingebaute Injektoren in der Draufsicht

Bei den Injektoren der Traktoren JD-K und JD-G wurde am Injektorprüfstand das Durchflussverhalten untersucht. Da keine Ausgangsmessungen im Neuzustand vorlagen, wurden diese mit einem neuen Injektor (Referenzinjektor) übereinstimmender Bauart verglichen. Wegen unbekannter Fertigungstoleranzen der Injektoren ist diese Messung aber nur eingeschränkt vergleichbar. Abbildung 85 zeigt die Ergebnisse der Durchflussmessungen der Injektoren aus JD-K und JD-G und des Referenzinjektors bei unterschiedlicher Ansteuerdauer und variierendem Einspritzdruck.

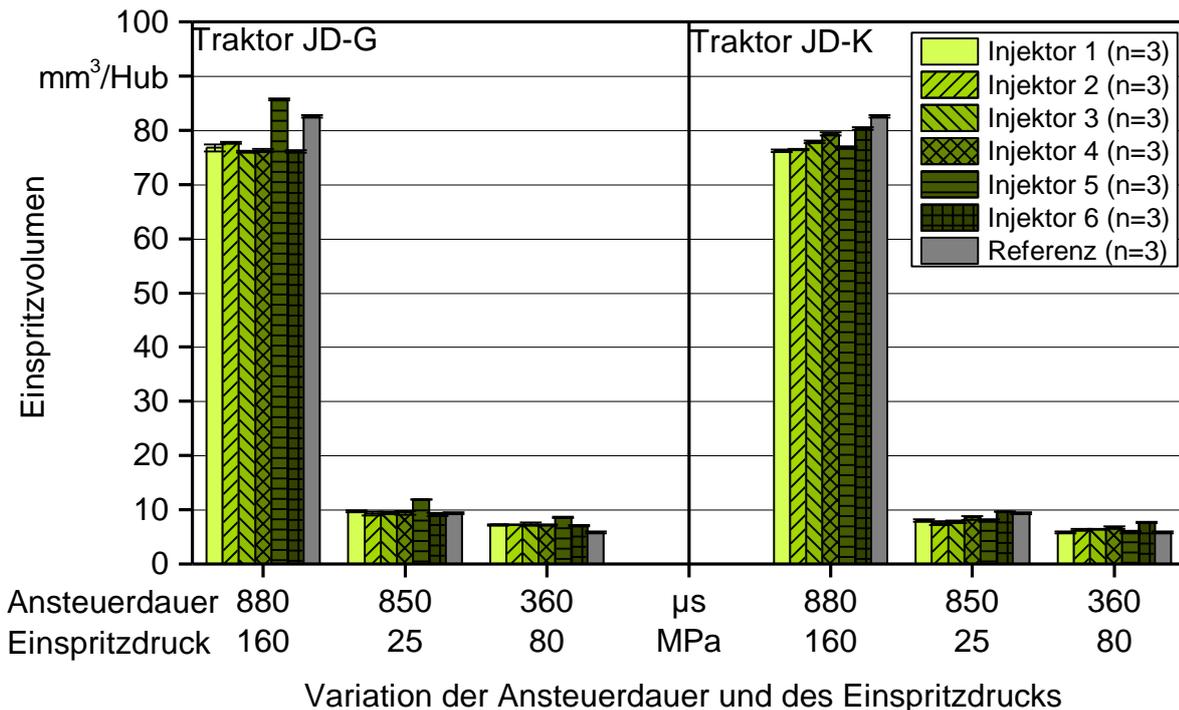


Abbildung 85: Einspritzvolumen bei verschiedenen Ansteuerzeiten und variierenden Einspritzdrücken der Injektoren der pflanzenöлтаuglichen Traktoren JD-K und JD-G im Vergleich zu einem neuen Injektor (Referenz)

Die Injektoren 1, 2, 3, 4 und 6 von Traktor JD-G weisen am Vollastpunkt einen ca. 6 bis 8 % geringeren Durchfluss auf als der baugleiche Referenzinjektor. Der Injektor 5 hingegen wies einen 4 % höheren Durchfluss als der Referenzinjektor auf. Beim Traktor JD-K war ebenso ein geringerer Durchfluss im Vergleich zum Referenzinjektor zwischen ca. 3 und 8 % zu verzeichnen. Zunehmende Durchflüsse können durch Verschleiß und niedrigere Durchflüsse durch Ablagerungen im Injektor verursacht werden. Die Messung des Durchflusses bietet somit eine qualitative und quantitative Aussage zum Kraftstoffdurchsatz, jedoch nicht zum Dynamikverhalten des Injektors.

Bei gleichem Fahrzeugzustand und konstanten Testbedingungen ist bei abnehmenden Durchflüssen mit einem Leistungsrückgang zu rechnen. Als Indikator für eine Veränderung des Durchflussvermögens kann also auch die Leistungsmessung dienen. Die Leistungsmessungen am Traktorenprüfstand deuten jedoch auf keinen Leistungsabfall aufgrund von Ablagerungen im Injektor hin.

Die Wiederholbarkeit der Durchflussmessung beim Vollastpunkt lag zwischen 0,4 und 0,7 % (JD-K) sowie zwischen 0,3 und 1,7 % (JD-G) in Bezug auf den jeweiligen Mittelwert eines Injektors. Absolut betrachtet liegen alle Injektoren beim Traktor JD-K mit einem Durchfluss von 76 bis 80 mm³/Hub eng beieinander. Beim Injektor 5 des Traktors JD-G ist die Durchflussmenge ca. 12 % im Vergleich zu den anderen fünf Injektoren erhöht, die nur um ± 1 % vom Gesamtdurchschnitt abweichen. Der Injektor 5 zeigte trotz Abweichung keine Funktionsbeeinträchtigung und eine gute Wiederholbarkeit.

Zusätzlich wurde beim Traktor JD-G für zwei Injektoren ein Mengenkennfeld für zwei Druckniveaus erstellt. Ein Mengenkennfeld gliedert sich bei Magnetventilinjektoren in zwei Bereiche, den ballistischen und den nicht ballistischen Bereich [53]: Im ballistischen Bereich überwiegt der Massenträgheitseinfluss durch die sich öffnende und schließende Nadel sowie das Schwingungsverhalten des gesamten Injektorsystems. Im nicht ballistischen Bereich hat die Düsenadel den maximalen Hub erreicht und es überwiegt der hydraulische Durchfluss durch lange Bestromungszeiten. Den Übergang beider Bereiche markiert ein Knick im Kurvenverlauf noch vor 1.000 μs Ansteuerzeit in Abbildung 86.

Für Injektor 3 und den Referenzinjektor zeigt sich ein ähnlicher Anstieg des Durchflusses im ballistischen Bereich. Im nicht ballistischen Bereich jedoch hat der neue Injektor ein deutlich höheres Durchflussvermögen als Injektor 3, was auf die Fertigungstoleranz der Einspritzdüse bzw. darin vorhandene Ablagerungen zurückzuführen sein könnte. Injektor 5 sticht mit erhöhter Durchflusskapazität im Vergleich zu den anderen Injektoren heraus. Die Funktion der zwei Injektoren sowohl bei kurzer (200 μs) als auch sehr langer Ansteuerdauer (3.000 μs) ist für beide Einspritzdruckniveaus ordnungsgemäß.

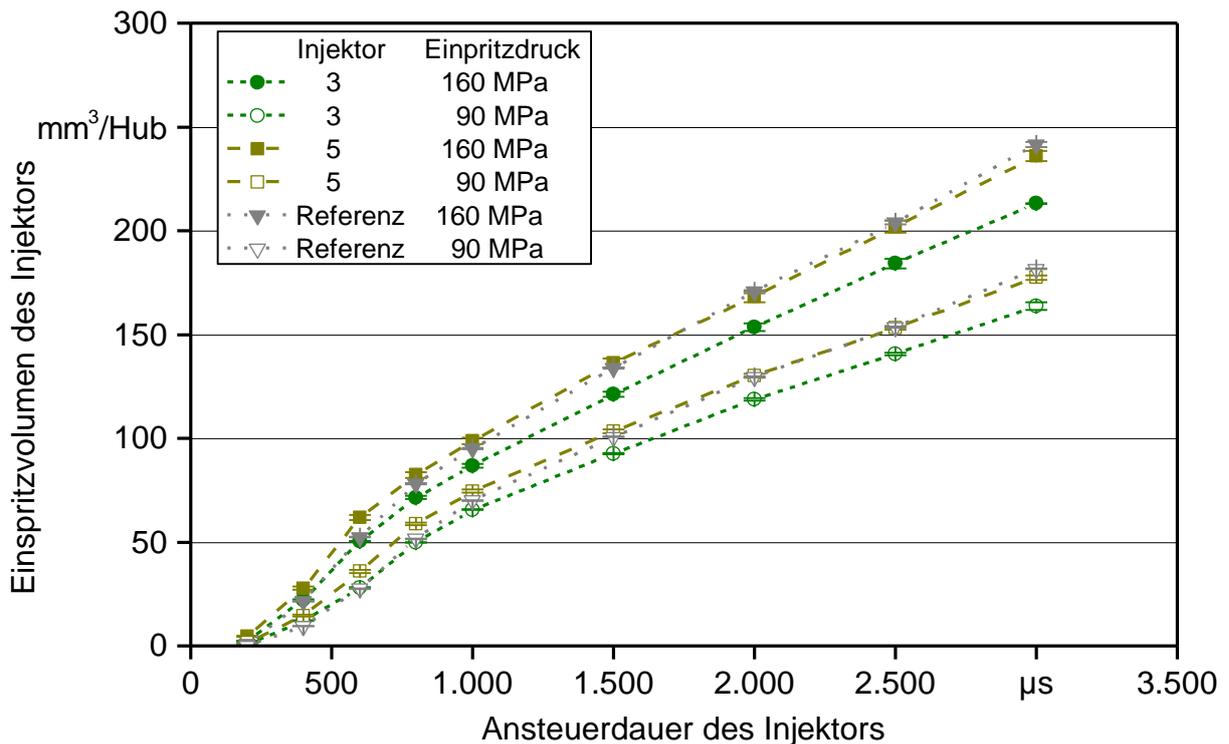


Abbildung 86: Mengenkennfeld der Injektoren 3 und 5 des Traktors JD-G sowie des Referenzinjektors bei je zwei Druckvarianten ($n = 2$)

Endoskopie der Abgasnachbehandlung

Am Traktor JD-G wurde die Prototyp-Abgasnachbehandlung mittels eines Endoskops auf Ablagerungen untersucht. Abbildung 87 zeigt, dass an den Oberflächen des Oxidationskatalysators, des halboffenen Partikelfilters sowie des SCR-Katalysators nahezu kein Belag vorhanden ist. Auch eventuelle Anhäufungen von Ablagerungen oder verstopfte Kanäle waren nicht ersichtlich. Dies deutet grundsätzlich auf eine gute Funktion der Abgasnachbehandlung im Pflanzenölbetrieb hin. Der Ausfall des nachgerüsteten Prototypsystems ist vermutlich auf elektronische Probleme zurückzuführen (siehe Abschnitt 6.1.4). Da diese AGN nicht für den Serieneinsatz bestimmt ist, wurde keine Reparatur vorgenommen und das System vom Fahrzeug abgebaut. Auch beim Traktor JD-K wurde das AGN-Prototypsystem vom Fahrzeug entfernt.



Abbildung 87: Komponenten der Prototyp-Abgasnachbehandlung am Traktor JD-G

6.5 Fazit der Ergebnisse

Die Begleitforschung pflanzenöлтаuglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern führte zu folgenden Resultaten:

- Insgesamt 14 pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB absolvierten bis zum Jahr 2015 rund 34.000 Betriebsstunden (Bh) auf acht bayerischen Versuchsgütern ohne schwerwiegende Schäden oder längere Ausfallzeiten. Am häufigsten traten Störungen im Niederdruckkraftstoffsystem z. B. durch Undichtigkeiten oder Druckschwankungen auf.
- Motorölanalysen bestätigen einen verschleißarmen Betrieb der Pflanzenöl-Traktoren mit Common-Rail-Einspritztechnik bei gleichen Motorölwechselintervallen wie dieseltreibene Traktoren.
- Die Rapsölkraftstoffqualität entspricht in der Regel den Anforderungen der DIN 51605, mit Ausnahme des Gehalts an Calcium. Dieser wurde bei mehreren Proben überschritten. Wichtig ist eine stärkere Sensibilisierung der Ölmühlen und Betreiber für die Einhaltung der Grenzwerte, insbesondere des Calcium-Gehalts.
- Im Rapsölbetrieb zeigt sich der gleiche Motorwirkungsgrad und je nach Motoreinstellung das gleiche Leistungsniveau wie im Dieseltreibetrieb. Das Emissionsverhalten beider Kraftstoffe unterscheidet sich bei zunehmendem Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen immer weniger. Das Leistungs- und Abgasemissionsverhalten sowie der Kraftstoffverbrauch blieben über die Beobachtungszeit überwiegend konstant. Ein Abgasstufe-IIIA-Traktor zeigte auch mit Sojaölkraftstoff über knapp 1.000 Bh Feldtest keine Unterschiede im Leistungs- und Emissionsverhalten zu Traktoren im Rapsölbetrieb.
- Transiente Emissionsmessungen an einem Pflanzenöltraktor der Abgasstufe II zeigten am Traktorenprüfstand, dass das Kalt- und Warmstartverhalten im Vergleich zum stationären Emissionszyklus einen deutlichen Einfluss auf die limitierten Emissionen nimmt. Ein Abgasstufe-II-Pflanzenöltraktor (DE-K) emittierte im dynamischen Zyklus (10s NRTC) bei geringer Zyklusleistung weniger Stickoxide (NO_x) und mehr Produkte unvollständiger Verbrennung (HC und CO) im Vergleich zum stationären Zyklus (NRSC).
- Abgasnachbehandlungssysteme wie Partikelfilter konnten im Pflanzenölbetrieb ohne aktive Regeneration bei einem unkritischen Abgasgegendruck betrieben werden. Das getestete SCR-System ist im Rapsöl- und Dieseltreibetrieb annähernd gleich wirksam. Erste Anzeichen einer geringeren Umsatzrate in bestimmten Betriebspunkten sind wahrscheinlich auf Einlaufeffekte zurückzuführen.
- Ein geringer Leistungsrückgang bei den Common-Rail-Motoren der Abgasstufe IIIB wird vermutlich durch Ablagerungen in den Injektoren verursacht, die den Kraftstoffeintrag in den Brennraum mindern. Diese können aber im Dieseltreibetrieb ebenso auftreten.

- Die systematische Untersuchung von Einspritzparametern und der Abgasrückführrate an einem Pflanzenöltraktor der Abgasstufe IIIB deutet auf weitere Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs hin. Ähnlich wie im Dieselbetrieb stellt die Abgasrückführung eine wirksame Stellgröße zur Anpassung und Verschiebung der NO_x- und PM-Rohemissionen im Rapsölbetrieb dar. Auch Einspritzzeitpunkt und -druck sind geeignete Parameter zur Optimierung, wenngleich ihr Einfluss auf Emissionen und Verbrauch stärker vom jeweiligen Motorbetriebspunkt abhängt.
- Der befundete Motor eines Abgasstufe-II-Traktors mit Pumpe-Leitung-Düse-Hochdruckeinspritzsystem war nach ca. 4.500 Bh in einem sehr guten Zustand. Auch zwei weitere Motoren der Abgasstufe IIIA zeigten kaum Anzeichen von Verschleiß. Es waren deutliche Ablagerungen im Bereich der Ansaugluft zu erkennen, die sich jedoch nicht auf die Leistung und Emissionen auswirkten. Die Injektoren des Common-Rail-Einspritzsystems waren nach 2.800 und 3.500 Bh Einsatzzeit mit Rapsölkraftstoff im ordnungsgemäßen Zustand.
- Die Betreiber und Fahrer sind mit der Betriebssicherheit, Leistungsfähigkeit und der Handhabung der Pflanzenöltraktoren zufrieden. Die stetige Erweiterung des Fuhrparks der staatlichen Versuchsgüter mit Pflanzenöltraktoren ist ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz.

Zusammenfassung

Die Energiewende erfordert die Umstellung von überwiegend fossilen und nuklearen auf erneuerbare Energieträger zum Schutz des Klimas und zur Schonung von Ressourcen. Die Landwirtschaft ist selbst vom Klimawandel stark betroffen und hat sich zum Ziel gesetzt, den Treibhausgasausstoß zu reduzieren. Der Abfluss von Geldmitteln aus den Regionen und die hohen CO₂-Emissionen dieselmotorbetriebener Arbeitsmaschinen sind Folgen der Abhängigkeit der heimischen landwirtschaftlichen Produktion von Importen fossilen Rohöls.

Aufgrund des hohen Energiebedarfs mobiler Arbeitsmaschinen werden rein elektrische oder auf gasförmigen Kraftstoffen basierende Antriebskonzepte auch mittel- oder langfristig nicht als Alternative zum Einsatz flüssiger Kraftstoffe zur Verfügung stehen. Effiziente Verbrennungsmotoren, die mit energiedichtem Rapsölkraftstoff betrieben werden, gelten als die aussichtsreichste Alternative zu dieselmotorbetriebenen Motoren in landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen [56][57]. Bei vergleichsweise geringem Entwicklungsaufwand ist es so möglich, den Treibhausgasausstoß um bis zu 80 % zu reduzieren [26]. Pflanzenölkraftstoff kann zudem regional erzeugt werden, ist nicht wassergefährdend und verringert Futtermittelimporte, da bei der Herstellung heimisches Eiweißfuttermittel als Koppelprodukt erzeugt wird [67].

Pflanzenöлтаugliche Traktoren haben bereits einen hohen Stand technischer Reife erreicht [24][23][64][62][32]. Die Entwicklung der Motorentechnik schreitet für diesel- und pflanzenölbetriebene Traktoren stetig voran. Bisherige Untersuchungen betrachten deshalb nur den jeweiligen Stand der Technik und einen Ausschnitt innerhalb der gesamten Lebensdauer. Das Betriebs- und Emissionsverhalten über eine längere Betriebsdauer, der anfallende Wartungsaufwand, die Verwendung weiterer Pflanzenöle sowie der Einsatz neuer Kraftstoffeinspritz- und Abgasnachbehandlungssysteme sind insbesondere bei Pflanzenöltraktoren noch nicht ausreichend untersucht.

Die Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöлтаuglicher Traktoren soll dazu beitragen, den aktuellen Stand der Technik und die Umweltwirkungen pflanzenöлтаuglicher Traktoren zu beschreiben sowie Möglichkeiten der technischen Optimierung und der Minderung umweltschädlicher und gesundheitlich relevanter Emissionen aufzuzeigen.

Auf den Versuchsgütern der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) werden die pflanzenöлтаuglichen Traktoren im landwirtschaftlichen Praxisbetrieb eingesetzt. Dabei werden unter anderem Einsatzzeiten und Verbräuche dokumentiert, die Kraftstoff- und Motorölqualität regelmäßig überprüft sowie eventuelle Störungen und Reparaturen begleitet.

Die Messung von Leistung und Verbrauch sowie limitierter und nicht limitierter Abgasemissionen der pflanzenöлтаuglichen Traktoren erfolgen am Traktorenprüfstand des TFZ mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff. Wiederkehrende Untersuchungen in Anlehnung an geltende Prüfzyklen zeigen das Langzeitverhalten von Leistung, Verbrauch und Emissionen.

onen sowie die Funktionalität von Abgasnachbehandlungssystemen wie Partikelfilter und SCR-Systemen.

Der Feldtest zeigt eine hohe Betriebssicherheit der 14 Rapsöltraktoren der Abgasstufen I bis IIIB im praktischen Einsatz auf acht landwirtschaftlichen Betrieben der LfL. Schwerwiegende Störungen oder Schäden an den Traktoren, die gemeinsam insgesamt rund 34.000 Betriebsstunden im Einsatz waren, traten nicht auf und die Betreiber zeigten sich sehr zufrieden.

Kleinere Störungen am Kraftstoffniederdrucksystem konnten in Kooperation mit den Herstellern und Servicewerkstätten auf den Versuchsbetrieben oder am TFZ behoben werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den meisten Maschinen um Prototypen handelt, die noch keinem Serienstand entsprechen. Durch die Untersuchungen am Traktorenprüfstand des TFZ konnten Fehler, die zumeist im Praxiseinsatz nur sporadisch auftraten, durch systematisches Abfahren der Drehzahl-/Lastkurve reproduziert werden. In Kooperation mit den Herstellern wurden die Ursachen erforscht und wenn möglich die installierte Technik optimiert.

Über 100 Motorölanalysen belegen einen verschleißarmen Betrieb mit Pflanzenöl. Der bei älteren Motorengenerationen bekannte hohe Pflanzenöleintrag in das Motorenöl war bei den moderneren Motoren mit Common-Rail-Einspritztechnik nicht mehr festzustellen. Bei einer Auswahl dieser Traktoren wurde daher keine Verkürzung des Motorölwechselintervalls, wie bei älteren Motorengenerationen üblich, mehr vorgenommen. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass für die untersuchten pflanzenöлтаuglichen Traktortypen das auch für Dieselkraftstoff übliche Wartungsintervall angewendet werden kann. Auch aufgrund dieser im Vorhaben gemachten Erfahrungen entsprechen die Wartungsintervalle bei pflanzenöлтаuglichen Serientraktoren, die im Rahmen des Förderprogramms angeschafft werden, denen des Dieselbetriebs.

Die Beschaffung von Rapsölkraftstoff, der in allen Parametern die Qualität gemäß DIN 51605 erfüllen sollte, stellte im Untersuchungszeitraum noch ein Problem dar. Insbesondere der Gehalt an Calcium mit dem 2012 abgesenkten Grenzwert von 1,0 mg/kg wird immer wieder, wenn auch nur knapp, überschritten. Im Rahmen des Vorhabens gelingt es aber durch intensive Beratung der Versuchsbetriebe und Ölmühlen sowie durch die Unterstützung bei der Bildung von Liefergemeinschaften, die Sensibilität für normgerechten Pflanzenölkraftstoff weiter zu erhöhen und Maßnahmen zur Qualitätssicherung zu etablieren.

Die Versuche am Traktorenprüfstand mit sieben Traktoren, mit Rapsöl-, Sojaöl- und Dieselkraftstoff sowie mit verschiedenen Prüfzyklen konnten ohne Störungen durchgeführt werden. Es zeigte sich bei den Messungen im Untersuchungszeitraum in der Regel kein negativer Einfluss des Dauerbetriebs mit Pflanzenölkraftstoff auf das Leistungs- und Emissionsverhalten über die Lebenszeit des Traktors.

Die Traktoren der Abgasstufen I und II weisen auch nach ca. 6.000 Bh (Fendt Farmer Vario 412, FE-K) bzw. 4.500 Bh (Deutz-Fahr TTV 1160, DE-K) Nutzungsdauer mit Rapsölkraftstoff ein kaum verändertes Emissionsbild bei konstantem Leistungsniveau

auf. Eine Motorbefundung am Deutz-Fahr TTV 1160 (DE-K) bei knapp 4.500 Bh bestätigt den insgesamt sehr guten Zustand des Motors mit Pumpe-Leitung-Düse-Hochdruckeinspritzsystem. Die Traktoren dieses Motorentyps haben mit Rapsölkraftstoff die gleiche oder eine höhere Leistung an der Zapfwelle.

Bei Rapsöltraktoren der Abgasstufen IIIA und IIIB mit Common-Rail-Einspritzsystem müssen hingegen für eine äquivalente Motorleistung zu Dieselmotoren die Einspritzparameter in der Motorsteuerungssoftware angepasst werden, da sonst die Einspritzmenge und der daraus resultierende Energieeintrag in den Brennraum verringert sind. Der gemessene Wirkungsgrad des Motors an der Zapfwelle unterscheidet sich jedoch kaum. Hauptsächlich aufgrund des etwa 5 % geringeren volumetrischen Heizwerts von Rapsölkraftstoff ergeben sich höhere spezifische Kraftstoffverbräuche der untersuchten Traktoren. Der Pflanzenöltraktor JD-K wurde über zwei Feldtestjahre mit Sojaöl anstatt Rapsöl bei nahezu gleichbleibenden Emissionen und gleichbleibender Leistung eingesetzt.

Beim John Deere 6930 (JD-G) wurden zwischenzeitlich ca. 4 bis 8 % weniger Leistung im Diesel- und Rapsölbetrieb festgestellt. Dies ist vermutlich auf den Betrieb mit der Prototyp-Abgasnachbehandlung zurückzuführen. Nach dem Ausbau der Abgasnachbehandlung war die Leistung des Motors im Rapsölbetrieb wieder auf demselben Niveau wie vor ihrem Einbau.

Bei den Common-Rail-Motoren der Abgasstufe IIIB wurde ein geringer Leistungsrückgang über die untersuchte Laufzeit festgestellt. Ursächlich sind vermutlich Ablagerungen in den Injektoren, die im Dieselmotorenbetrieb ebenso auftreten können.

Die durchgeführten Emissionsmessungen zeigen, dass die limitierten Abgasemissionen mit fortschreitender Abgasstufe überwiegend stark abnehmen. Die Unterschiede zwischen Diesel- und Rapsölbetrieb werden zunehmend geringer, was unter anderem auf die eingesetzten Abgasnachbehandlungssysteme zurückzuführen ist. Die Traktoren der Abgasstufen I bis IIIA emittieren im Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff überwiegend weniger Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM), jedoch in etwa gleich viel oder etwas mehr Stickoxide (NO_x) als mit Dieselmotorenkraftstoff.

Der Abgasstufe-IIIB-Traktor Fendt 718 SCR (FE-Ka) hat im Rapsölbetrieb etwas höhere Emissionen an NO_x, CO und PM sowie nahezu identische HC-Emissionen wie mit Dieselmotorenkraftstoff, dabei liegen jedoch die Messwerte für NO_x, CO und HC bei beiden Kraftstoffen deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten. Hingegen ist auch unter Berücksichtigung der höheren Emissionen durch die versuchsaufbaubedingte Leistungsabnahme an der Zapfwelle für die Einhaltung des Grenzwerts für PM-Emissionen im Rapsölbetrieb eine Optimierung z. B. der Einspritzparameter erforderlich. Erste Anzeichen einer Minderung der Wirksamkeit eines SCR-Katalysators bei einzelnen Betriebspunkten des Traktors Fendt 718 SCR (FE-Ka) sind hinsichtlich des weiteren Verlaufs sowie im Vergleich zum Dieselmotoren zu untersuchen.

Transiente Prüfzyklen am Traktor Deutz-Fahr TTV 1160 (DE-K) zeigten den Einfluss des Kalt- und Warmstartverhaltens auf die Emissionen am Traktorenprüfstand im Vergleich

zum stationären Emissionszyklus. Die dynamische Belastung des Motors, mit schnellen Drehzahl- und Drehmomentwechseln, hat einen deutlichen Einfluss auf die limitierten Emissionen. Die Dynamik des Motors während landwirtschaftlicher Arbeiten in der Praxis und die resultierenden tatsächlichen Emissionen von Traktoren im Rapsöl- und Dieselbetrieb sind daher näher zu untersuchen.

Die Betriebszeit aller untersuchten Rapsöltraktoren auf den Versuchsgütern beträgt zurzeit bis zum Jahr 2015 mehr als 34.000 Betriebsstunden. Durch den Rapsölbetrieb wurden somit ca. 326.000 l Diesel ersetzt, was einer Treibhausminderung von ca. 753.000 kg CO₂-Äquivalent (CO₂-Äq) entspricht. Die Rapsölnutzung durch die Versuchstraktoren erhöht die regionale Eiweißfuttermittelproduktion und die Nährstoffversorgung sowie den Humusaufbau auf den bewirtschafteten Flächen durch Stroh und Wurzeln. Demnach wurden über die Jahre verteilt auf insgesamt rund 235 ha Raps angebaut und daraus 336.000 l Rapsöl als Kraftstoff für die Traktoren, ca. 630.000 kg Rapspresskuchen als Eiweißfutter und über 3.500 t organische Substanz für die Bodenfruchtbarkeit gewonnen.

Aus dem Forschungsvorhaben ergeben sich folgende Fragestellung und Ziele für weitere Untersuchungen an pflanzenöлтаuglichen Traktoren:

- Wissenschaftliche Begleitung des Leistungs- und Emissionsverhaltens eines Pflanzenöltraktors über die gesamte Lebensdauer von 10.000 Bh.
- Prüfung der Funktionalität, Effizienz und Umweltwirkung von Abgasnachbehandlungssystemen im Feldeinsatz und am Prüfstand über einen längeren Einsatzzeitraum.
- Erprobung mehrerer Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IV und Erforschung der Partikelanzahl-Emissionen im Rapsöl- und Dieselbetrieb im Hinblick auf künftige Anforderungen, beispielsweise der Abgasstufe V.
- Untersuchung der Ablagerungsbildung in den Injektoren und der Wirkung von Reinigungsadditiven im Pflanzenölbetrieb.
- Anwendung transients Testzyklen im Kalt- und Warmstart an mehreren pflanzenöлтаuglichen Traktoren mit unterschiedlichen Kraftstoffen. Dabei ist von Interesse, wie sich schnelle Drehzahl- und Lastvariationen auf die Regelgüte von Motor- und Abgasnachbehandlungssteuerung und die Abgaszusammensetzung auswirken.
- Ermittlung realer Emissionen von Rapsöltraktoren für verschiedene Emissionskomponenten und Arbeiten mit einem portablen Emissionsmesssystem.

Abstract

Energiewende means the transition of an economy, based on fossil and nuclear energy sources to an economy based on renewable energy. The primary objectives are nuclear power phase-out and climate protection. Among the different areas electricity, heat and mobility, the latter is one of the biggest challenges. Especially drive systems for heavy-duty non-road applications will remain dependent on liquid fuels with high energy density for some further perspective. Plant oils, used as fuel in compatible agricultural machinery, significantly reduce greenhouse gas emissions in comparison to diesel. Harmlessness on climate and environment is guaranteed by Directive 2009/28/EC and national sustainability regulations. Regional processing of plant oils in small-scale oil mills from rapeseed or other oil seeds increase the added value in rural areas and contributes to the supply of healthy edible oils, genetically unchanged feed, valuable raw materials and high-value liquid fuel. Rapeseed oil fuel from decentral production is non-hazardous to soil and water and achieves a greenhouse gas reduction of up to 80 % compared to diesel.

Purpose of this work is to show the state of technology for plant oil compatible tractors. Based on 10 years of experience from accompanying research with so far 14 tractors of exhaust stage I to IIIB, results of operational reliability, power output, fuel efficiency and exhaust gas emissions are being evaluated. New rapeseed oil fuel compatible tractors are distributed by the manufacturers John Deere and Fendt, latter via its distribution partner BayWa in Bavaria. Compatibility is obtained by changes of fuel system components and software modification of the engine control unit (ECU).

Experiences of field tests show full technical reliability of rapeseed oil fuelled tractors and high operator's satisfaction. Two plant oil operated tractors (exhaust stages I and II) proved their full suitability in everyday use, performing more than 11,000 operating hours altogether. Investigation of further exhaust stage IIIA tractors with a cumulative runtime of about 20,000 hours and three tractors with exhaust stage IIIB and around 3,000 hours showed no considerable failures or damages. The installed exhaust gas after-treatment systems operated reliable with high emission reduction efficiency. Engine efficiency and emission behaviour of the tractors with rapeseed oil are similar to diesel operation.

The cumulative operation time of the tractors at the researched farms was 34,000 hours until the year 2015. It was possible to substitute approximately 326,000 litres of diesel fuel resulting in a greenhouse gas reduction of around 753,000 kg CO₂-equivalents. Furthermore, 630,000 kg of rapeseed press cake (regional high protein feed) was produced as by-product.

But still further research is necessary. The operation and emission behaviour over the complete lifetime of the tractors of 10,000 operating hours should be investigated. For the new exhaust stage IV tractors only little information is available concerning the long-term behaviour, particularly of the exhaust gas after-treatment systems. Furthermore, the real driving emissions of rapeseed oil tractors are unknown, same as for diesel fuelled tractors.

Quellenverzeichnis

- [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-Weihenstephan
- [2] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2013): Aktionsprogramm Heimische Eiweißfuttermittel. Eine Initiative im Rahmen von Aufbruch Bayern. 1. Aufl., 2 Seiten, URL: http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/schwerpunkte/dateien/aktionsprogramm_heimische_eiweissfuttermittel_infoblatt.pdf (Stand: 05.05.2015)
- [3] BASSHUYSEN, R. v. (2010): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 5., vollst. überarb. und erw. Aufl. ATZ-MTZ Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, XLV, 1176 Seiten, ISBN 3834806994
- [4] BISKOS, G.; REAVELL, K.; COLLINGS, N. (2005): Description and Theoretical Analysis of a Differential Mobility Spectrometer. *Aerosol Science and Technology*, Jg. 39, Nr. 6, S. 527–541
- [5] BONNEL, P.; PERUJO, A.; PROVENZA, A.; VILLAFUERTE, M. (2013): Non Road Engines Conformity Testing Based on PEMS. Lessons Learned from the European Pilot Program. European Commission (EC) (Hrsg.). Mitarbeiter: Stein, J.; Stark, A.; Marchetti, M.; Holmberg, J.; Ahlberg, J.; Williams, P.; Walker, E.; Knuth, H.-W.; Feisel, K.; Taylor, T.; Pease, N.; Woeldgen, J.-J.; Savvidis, D. Ispra: Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (IET). JRC Scientific and Policy Reports, Nr. EUR 26438 EN, 45 Seiten, ISBN 978-92-79-35091-7
- [6] BUNDESVERBAND DEZENTRALER ÖLMÜHLEN UND PFLANZENÖLTECHNIK E. V.; UNION ZUR FÖRDERUNG VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN E. V.; DEUTSCHER BAUERNVERBAND E. V. (2013): Marktanreizprogramm für mehr Biokraftstoffeinsatz in der Land- und Forstwirtschaft. Ausgabe vom 15. Mai 2013. Berlin, URL: <http://www.bdoel.de> (Stand: am 26.01.2015), 3 Seiten
- [7] BRÄHLER, H.; APPEL, W.; DAHLHAUS, U.; ESCH, T.; GRÄFENSTEIN, J. (2006): Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten; mit 48 Tabellen. Erich Hoepke, Stefan Breuer (Hrsg.). 4., aktual. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg (ATZ-MTZ-Fachbuch), 514 Seiten, ISBN 978-3-8348-0108-1
- [8] BRAVO, Y.; LARROSA, C.; ARNAL, C.; GARGUILO, V. (2015): Untersuchung der Ablagerungsbildung bei AGR-Kühlern. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, Jg. 76, Nr. 5, S. 36–41
- [9] CAMBUSTION LIMITED (2008): Cambustion Application Note DMS03 Version 4, Sampling Engine Exhaust with the DMS 500. Cambridge, UK: Cambustion Ltd.; 5 Seiten

- [10] CAMBUSTION LIMITED (2011): DMS 500 Fast Particulate Spectrometer with Heated Sample Line, High Ratio Diluter, User Manual Version 3.5. Cambridge, UK: Cambustion Ltd., 127 Seiten
- [11] DEERE & COMPANY (2012): Fuel-Protect - Keep Clean solution for diesel injectors (MCTY26827), URL: <https://jdparts.deere.com> (Stand: 02.02.2015)
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2006): DIN V 51605 - Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren. Berlin: Beuth-Verlag, 12 Seiten
- [13] 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
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2010): DIN 51605 - Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren - Rapsölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. September 2010. Berlin: Beuth Verlag, 16 Seiten
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2011): Entwurf DIN SPEC 51623 - Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren - Pflanzenölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. Mai 2011. Berlin: Beuth Verlag, 17 Seiten
- [16] DEUTZ AG (2010): Original DEUTZ Additives Clean-Diesel InSyPro, 2 Seiten, URL: <http://www.deutz.de/> (Stand: 24.03.2015)
- [17] DEUTZ AG (2010): Technisches Rundschreiben 0199-99-1210/0 DE - Motorprobleme durch verklebte/verharzte Einspritzventile, 6 Seiten, URL: <http://www.deutz.de/> (Stand: 02.02.2015)
- [18] DÖNGES, P.; TRAULSEN, H. (2006): Felderprobung Rapsöl pur. Rendsburg: DEULA Schleswig-Holstein GmbH, 51 Seiten
- [19] DÜSSELDORF, C.; PICKEL, P. (2014): Herausforderungen und Lösungsansätze zur Verwendung von Kraftstoffen biogenen Ursprungs in Dieselmotoren der Abgasstufe IV. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI); MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (MEG) (Hrsg.): Agrartechnik im Dialog mit Politik und Gesellschaft. Conference Agricultural Engineering. LAND.TECHNIK AgEng 2014, 72. International Conference on Agricultural Engineering. ESTREL Berlin, 19. u. 20. November. VDI-Berichte, Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 475–479, ISBN 978-3-18-09222-3
- [20] 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
- [21] EMBERGER, P.; HEBECKER, D.; PICKEL, P.; REMMELE, E.; THUNEKE, K. (2016): Emission behaviour of vegetable oil fuel compatible tractors fueled with different pure vegetable oils. Fuels, Jg. 167, Nr. 3, S. 257–270
- [22] EMBERGER, P.; LANDIS, M.; KRAMMER, K.; PRANKL, H.; SCHAUFLER, H.; SCHIESS, I.; THUNEKE, K. (2011): Emissionsmessungen an einem Traktor - Ringversuch von ART, FJ-BLT und TFZ. Landtechnik, Jg. 66, Nr. 1, S. 56-59
- [23] 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

- [24] 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
- [25] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; GASSNER, T.; PICKEL, 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. u. 28. Oktober 2010, Tagungsband. VDI-Berichte, Nr. 2111. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 79–84, ISBN 978-3-18-092111-2
- [26] 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; ETH ZÜRICH; EURAGENG (Hrsg.): Engineering for improving resource efficiency. Proceedings. International Conference of Agricultural Engineering, July 6-10. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, S. 1–8
- [27] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2014): Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. Text von Bedeutung für den EWR. 2014/0268 (COD). Europäische Kommission (Hrsg.). Brüssel, 62 Seiten
- [28] EUROPÄISCHE UNION (2009): 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 27.02.1997, S. 1). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Jg. 52, Nr. L 68, S. 1–249
- [29] EUROPÄISCHE UNION (2011): Richtlinie 2000/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 1990 über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Motoren, die für den Antrieb von land- und forstwirtschaftlichen Zugmaschinen bestimmt sind, und zur Änderung der Richtlinie 74/150/EWG (ABl. Nr. L 173 vom 12.07.2000), zuletzt geändert durch Richtlinie 2005/13/EG (ABl. Nr. L 55 vom 01.03.2005) der Kommission. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Jg. 54, Nr. L 25, S. 1–39
- [30] EUROPÄISCHE UNION (2012): Richtlinie 2012/46/EU der Kommission vom 6. Dezember 2012 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 55, Nr. L 353, S. 80–126
- [31] 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

- [32] HASSEL, E.; PRESCHER, K.; BERNDT, S.; FLÜGGE, E.; GOLISCH, J.; HARKNER, W.; SCHÜMANN, U.; SY, G.; WICHMANN, V. (2005): Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöлтаuglichen Traktoren. Abschlussbericht über die Begleitforschung zum Demonstrationsvorhaben, Aktenzeichen: 00 NR 200, Teil 1. Rostock: Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock, 107 Seiten
- [33] HINDS, W. C. (1999): Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. Second Edition. A Wiley-Interscience Publication. New York; Chichester; Weinheim: John Wiley & Sons, 483 Seiten, ISBN 978-0471-19410-1
- [34] 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
- [35] HÖCK, R.; WIDMANN, B. (1994): Betriebserfahrungen mit pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren (Natur- und Biodiesel). In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI), VDI-GESELLSCHAFT ENERGIETECHNIK (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; Tagung, 4. u. 5. Juli 1994, Würzburg. VDI-Berichte, Nr. 1126. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 231–238, ISBN 9783180911267
- [36] HÖRNIG, G. T. M. (2012): Untersuchungen zur Aerosolabscheidung in AGR-Wärmetauschern. Dissertation. München: Technische Universität München, Fakultät für Chemie, Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, Lehrstuhl für Analytische Chemie, 153 Seiten
- [37] HUBER, G.; SCHOLZ, A.; STÖHR, M.; DÜSSELDORF, C.; FLIERL, R.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; PICKEL, P. (2015): Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl. In Zusammenarbeit mit: John Deere GmbH & Co. KG, Technische Universität Kaiserslautern, B.A.U.M. Consult GmbH. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Berichte aus dem TFZ, 44).
- [38] 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. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 71 Seiten
- [39] JOHN DEERE GMBH & CO. KG; B.A.U.M. CONSULT GMBH (2014): PraxTrak - Green Power feeds your engine. Vorträge der Abschlussveranstaltung. Workshop, Berlin, Vertretung des Landes Rheinland-Pfalz, 2. Dezember. Kaiserslautern, München: John Deere GmbH & Co. KG; B.A.U.M. Consult GmbH
- [40] 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, June 16-18. Aachen: RWTH Aachen University, S. 26–27
- [41] KULKARNI, P.; BARON, P. A.; WILLEKE, K. (2011): Aerosol Measurement. Principles, Techniques, and Applications. 3. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley & Sons, 883 Seiten, ISBN 978-0-470-38741-2

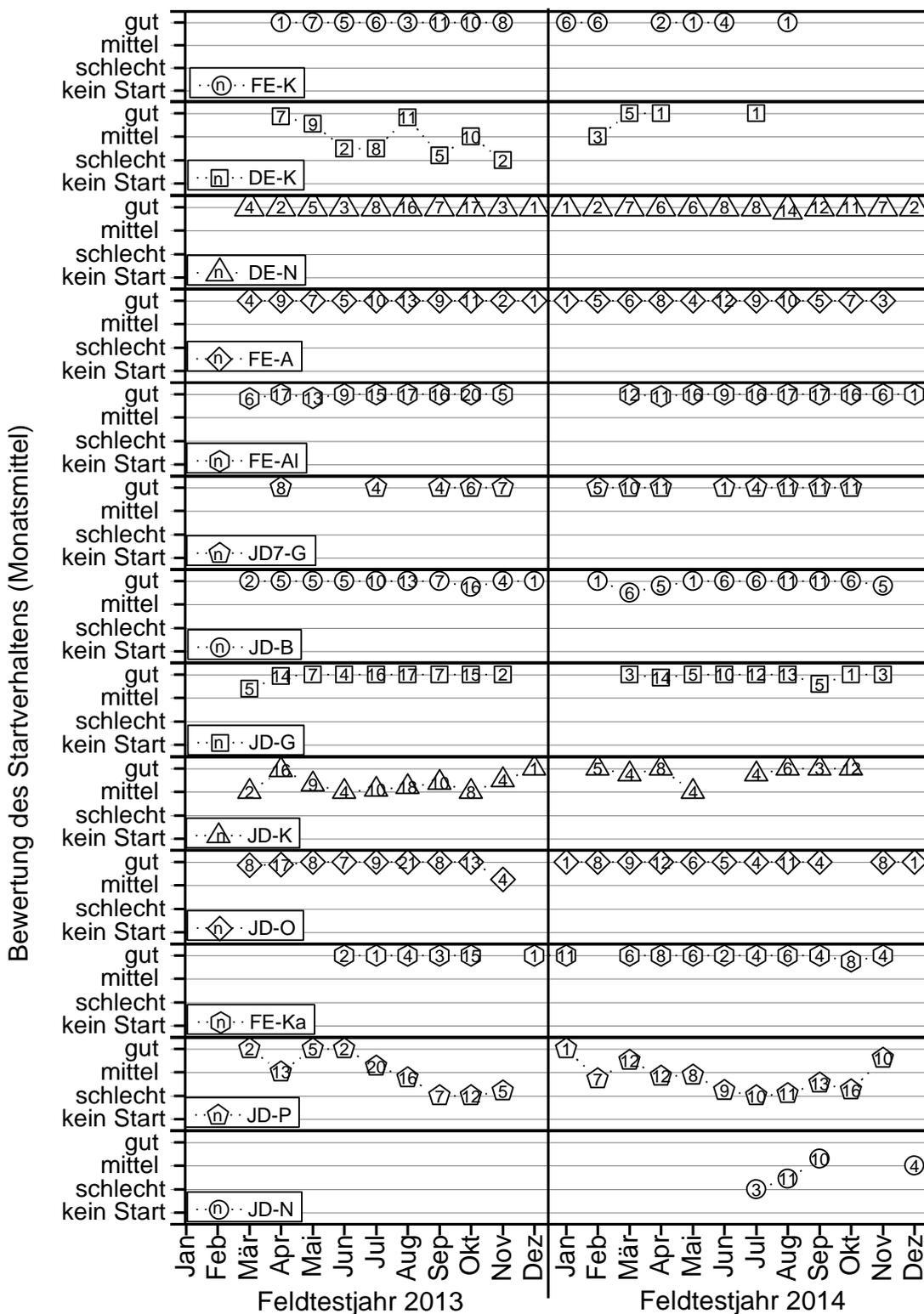
- [42] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Aufl. Darmstadt: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, 1180 Seiten, ISBN 978-3-939371-91-5
- [43] LANDIS, M. (2012): Dynamischer Messzyklus für Emissionsmessungen an Traktoren. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI); MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRAR-TECHNIK (MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK 2012. Mit Erfahrung und Innovationskraft zu mehr Effizienz. Conference: Agricultural Engineering - 70. Internationale Tagung. Karlsruhe, 6. u. 7. November. VDI-Berichte, Nr. 2173. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 81–86, ISBN 978-3-18-092173-0, ISSN 0083-5560
- [44] MEYER, M. (2009): Rapsölkraftstoff. Die krisensichere Ökoenergie vom eigenen Acker. Agrarforschung, Jg. 16, Nr. 7, S. 262–267
- [45] MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E. V. (2014): WV-Jahresbericht 2013. Mineralöl-Zahlen. Berlin: MWV e. V., 82 Seiten
- [46] MOLLENHAUER, K.; TSCHÖKE, H. (2007): Handbuch Dieselmotoren. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 702 Seiten, ISBN 978-3-540-72164-2
- [47] OELCHECK GMBH (2010): Typische Limitwerte für Motoröle aus (nicht stationären) Dieselmotoren. In: Öl Checker, Ausgabe Frühjahr 2010, S. 6-7, URL: <https://www.oelcheck.de/fileadmin/oelcheck/pdf/oelchecker/frue2010.pdf> (Stand: 24.06.2014)
- [48] PEAL, S.; JONES, C. (2012): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Work package WP4 Engine Oil Development. Deliverable No. 4.8. Publishable. Version 2.0. S. 9, URL: <http://www.2ndvegoil.eu> (Stand: 18.06.2014)
- [49] PICKEL, P.; DIERINGER, S. (2009): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Work package WP2 Engine development. Publishable summary. Version 1. 24 Seiten, URL: <http://www.2ndvegoil.eu> (Stand: 20.03.2014)
- [50] PRAGER, M.; LI, Q.; DÜSSELDORF, C. (2015): Verbundvorhaben: Erfassung der grundlegenden Ablagerungsbildungsmechanismen im rapsölbetriebenen Forschungsmotor mit angeschlossener Übertragung der Ergebnisse auf Vollmotor. Teilvorhaben 3: Dauerversuche und Feldtests. Datum der Veröffentlichung: 19.08.2015. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.). Mitarbeiter: Wachtmeister, G.; Pickel, P. Gülzow, München, Kaiserslautern: Technische Universität München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen; John Deere European Technology Innovation Center, 89 Seiten
- [51] RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; KRIECHBAUM, T.; PRANKL, H.; BREINESBERGER, J. (2008): Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft. Wieselburg; St. Pölten: HBL-FA Francisco Josephinum; BLT Biomass, Logistic, Technology; AGRAR PLUS GmbH, 1078 Seiten
- [52] REAVELL, K.; HANDS, T.; COLLINGS, N. (2002): SAE Technical Paper 2002-01-2714 A Fast Response Particulate Spectrometer for Combustion Aerosols. Powertrain & Fluid Systems, Conference & Exhibition, San Diego, California, USA, October 21-24. Warrendale, PA, SAE International, 7 Seiten

- [53] REIF, K. (2010): Moderne Diesel-Einspritzsysteme. Common Rail und Einzelzylindersysteme. 1. Aufl. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 172 Seiten, ISBN 9783834897152
- [54] REIF, K. (2012): Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung. 5. Aufl. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 501 Seiten, ISBN 978-3-8348-1715-0
- [55] 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
- [56] REMMELE, E.; ECKEL, H.; WIDMANN, B. (2013): Alternative Energieträger und Antriebskonzepte für mobile Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft. Zusammenfassung der Ergebnisse. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (Hrsg.): KTBL/TFZ-Fachgespräch. Straubing, 20. u. 21. März. Darmstadt, Straubing: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL); Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 18 Seiten
- [57] REMMELE, E.; ECKEL, H.; WIDMANN, B. (2014): Regenerative Energieträger und alternative Antriebskonzepte für mobile Arbeitsmaschinen. Landtechnik, Jg. 69, Nr. 5, S. 256-259
- [58] SEONG, H. J.; BOEHMAN, A. L. (2011): Impact of Intake Oxygen Enrichment on Oxidative Reactivity and Properties of Diesel Soot. Energy & Fuels, Jg. 25, Nr. 2, S. 602-616
- [59] SPICHER, U.; LÜFT, M. (2007): Optimierung der Kraftstoffstrahlausbreitung für Pflanzenöl, insbesondere natürliches Rapsöl, bei der Verwendung moderner Diesel-Einspritzsysteme. Karlsruhe: Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe, 58 Seiten
- [60] SY, G.; FLÜGGE, E.; WICHMANN, V.; KLAASEN, G. (2009): Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz. Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben. Aktenzeichen: 22021107 (07NR211). Rostock: Universität Rostock, 106 Seiten
- [61] SYMONDS, J. P.; REAVELL, K. S.; OLFERT, J. S.; CAMPBELL, B. W.; SWIFT, S. J. (2007): Diesel soot mass calculation in real-time with a differential mobility spectrometer. Journal of Aerosol Science, Jg. 38, Nr. 1, S. 52–68
- [62] 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.2ndveoil.eu> (Stand: 20.04.2012)
- [63] 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, June 29 - July 1. Proceedings (Papers on CD-ROM), Abstract Book. Vienna, Austria: BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, S. 1-10, ISBN 978-3-200-02204-1

- [64] 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
- [65] VÖLK, P.; WACHTMEISTER, G.; HÖRNIG, G.; NIESSNER, R. (2012): Ablagerungsmechanismen in Abgaswärmeaustauschern. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Jg. 73, Nr. 9, S. 710–717
- [66] WACHTMEISTER, G.; HUBERT, A. (2010): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Work package WP2 Engine development. Results of basis measurements with 2nd generation vegetable oil. Version 2. S. 26, URL: <http://www.2ndvegoil.eu> (Stand: 20.03.2015)
- [67] 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 1: Bewertung des Startverhaltens der Pflanzenöltraktoren über die Einsatzmonate betrachtet in den Feldtestjahren 2013 und 2014



Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenölauglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors

15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauvarianten
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	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenölsauglichen 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 Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets – Europaweites Holzpelletscreening mit Fokus auf den deutschen Pelletmarkt
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpResBio – Methoden Methoden zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern – Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt
47	Pflanzenölsaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB



ISSN 1614-1008