Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

32

Berichte aus dem TFZ

Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA

Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

Kooperationspartner:

LfL
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

TFZ

Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA

Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA

Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

Peter Emberger
Dr. Klaus Thuneke
Dr. Edgar Remmele

Kooperationspartner:

LfL
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Berichte aus dem TFZ 32

Straubing, September 2012

Titel:	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA - Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
Autoren:	Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke, Dr. Edgar Remmele
Projektleiter:	Dr. Edgar Remmele
Bearbeiter:	Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke, Thomas Gassner, Sebastian Kirner, Thomas Kießlinger, Sonja Plankl, Anja Rocktäschel, Matthias Plank, Dr. Edgar Remmele
in Kooperation mit:	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) LVFZ für Milchvieh- und Rinderhaltung Achselschwang LVFZ für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell Versuchsstation Grub

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

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

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

ISSN:	1614-1008
Hrsg.:	Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail:	poststelle@tfz.bayern.de
Internet:	www.tfz.bayern.de
Redaktion:	Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke
Verlag:	Eigenverlag
Erscheinungsort:	Straubing
Erscheinungsjahr:	2013
Gestaltung:	Peter Emberger, Ulrich Eidenschink
Fotos:	TFZ

Vorwort

Wir bedanken uns beim Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, für die Finanzierung des Vorhabens. Vor allem Herrn Ltd. MR Dr. Rupert Schäfer gilt ein herzliches Dankeschön für die stets sehr gute Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen.

Bedanken möchten wir uns weiterhin beim John Deere European Technology Innovation Center, Kaiserslautern, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel und Frau Dr. Stefanie Dieringer, sowie Herrn Dr.-Ing. Axel Kunz von den John Deere Werken Mannheim, für die großartige Zusammenarbeit und die Bereitstellung von zwei Traktoren für die Feld- und Prüfstandsversuche. Ebenso gilt unser Dank der AGCO GmbH, Marktoberdorf und der BayWa AG, München, die uns einen Traktor für die Leistungs- und Emissionsmessungen am Prüfstand zur Verfügung stellten, sowie der Agrolohn Kobler GmbH, Neukirchen vorm Wald, für den Betrieb des Traktors im Feld.

Großer Dank gebührt dem Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum (LVFZ) für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell, dem LVFZ für Milchvieh- und Rinderhaltung Achselschwang und der Versuchsstation Grub der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) für die aktive Unterstützung des Vorhabens. Ein herzliches Dankeschön geht hierbei an Herrn Johann Blöchinger, Herrn Sven Böttcher, Herrn Rasso Höck, Herrn Klaus Lettenmeyer, Herrn Wolfgang Löw und Herrn Michael Scheidler für die hervorragende Zusammenarbeit.

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

Weiterhin gilt unser Dank allen Mitarbeitern des Sachgebiets Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe am Technologie- und Förderzentrum für die Unterstützung im Projekt, sowie Herrn Matthias Plank, der im Rahmen seines Praxissemesters tatkräftig bei den Emissionsmessungen mitwirkte.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 7

Abbildungsverzeichnis 9

Tabellenverzeichnis 15

1 Einführung 17

2 Problemstellung 19

3 Zielsetzung 21

4 Stand des Wissens 23

4.1 Pflanzenöltaugliche Traktoren 23
4.1.1 Motoren pflanzenöltauglicher Traktoren 23
4.1.2 Bisherige Untersuchungen zum Betriebsverhalten 24

4.2 Emissionen 25
4.2.1 Gesetzliche Vorgaben zum Schadstoffausstoß 25
4.2.2 Prüfzyklen zur Erfassung der Emissionen von Traktoren 27
4.2.3 Emissionen im Betrieb mit Rapsöl- bzw. Pflanzenölkraftstoff 28

4.3 Abgasnachbehandlung 31
4.3.1 Oxidationskatalysator 32
4.3.2 Entstickungskatalysator 32
4.3.3 Partikelfiltersysteme 33

5 Material und Methode 37

5.1 Traktoren 37
5.1.1 John Deere 6930 Premium 37
5.1.2 Fendt 820 Vario^{greentec} 38

5.2 Betriebsdatenerfassung 38
5.2.1 Betriebstagebuch 39
5.2.2 Elektronisches Datenerfassungssystem 39

5.3 Betriebsstoffe 41
5.3.1 Rapsölkraftstoff 41
5.3.2 Dieselkraftstoff 42
5.3.3 Motoröl 43

5.4 Prüfstand 43
5.4.1 Bestimmung von Motorleistung, Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch 44
5.4.2 Gasanalyse 45
5.4.3 Partikelmassebestimmung 46

5.5 Prüfzyklen 47

5.6 Abgasnachbehandlung (AGN) 51

6 Ergebnisse und Diskussion 53

6.1 Betriebsverhalten im Praxiseinsatz 53

6.1.1 Einsatzprofile im Feldbetrieb 54
6.1.2 Erfasste Betriebsdaten 56
6.1.3 Kraftstoffqualität 65
6.1.4 Motorölqualität 68
6.1.5 Notwendige Reparaturen 75

6.2 Leistung, Drehmoment und Kraftstoffverbrauch 77

6.3 Emissionsverhalten (wiederkehrende Messungen) 84

6.4 Emissionsverhalten bei verschiedenen Prüfzyklen 99

6.5 Emissionsverhalten mit Abgasnachbehandlung (AGN) 101

6.5.1 Prüfzyklus Emissionen 102
6.5.2 Limitierte Emissionen in den Prüfphasen 103
6.5.3 Nicht-limitierte Emissionen in den Prüfphasen 108
6.5.4 Zusammenfassung 112

Zusammenfassung 113

Quellenverzeichnis 117

Anhang... 123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung von Eingangs-, Einfluss- und Zielgrößen für die Untersuchungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren....20

Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines geschlossenen keramischen Partikelfilters....34

Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Betriebstagebuch zur Dokumentation von durchgeführten Arbeiten und Wartungen....39

Abbildung 4: Aufbau des Emissionsprüfstands am Technologie- und Förderzentrum (TFZ)....44

Abbildung 5: Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4....48

Abbildung 6: Prüfpunkte im Motorenkennfeld zur detaillierten Erfassung des Emissionsverhaltens bei 31 Betriebszuständen....51

Abbildung 7: Schematische Übersicht zum Aufbau des Abgasnachbehandlungssystems....52

Abbildung 8: Anteil der Arbeiten des Traktors JD-K in den Betriebsjahren 2009 bis 2011....55

Abbildung 9: Anteil der Arbeiten des Traktors JD-G in den Betriebsjahren 2009 bis 2011....55

Abbildung 10: Anteil der Arbeiten des Traktors FE-A in den Betriebsjahren 2010 bis 2011....56

Abbildung 11: Mittels elektronischer Datenaufzeichnung erfasste Betriebsstunden der John Deere Traktoren im Feldbetrieb 2010....57

Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Betriebsdauer der beiden John Deere Traktoren im Feldbetrieb 2010....58

Abbildung 13: Anzahl an Startvorgängen der John Deere Traktoren im Feldbetrieb 2010 (Kaltstart bei einer Motoröltemperatur von < 50 °C)....59

Abbildung 14: Umgebungstemperatur bei den Kaltstartvorgängen der John Deere Traktoren im Feldbetrieb 2010....60

Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Kraftstofftemperatur an der Hochdruckpumpe bei den Kaltstartvorgängen der beiden John Deere Traktoren....61

Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung der Kraftstofftemperatur an der Hochdruckpumpe der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010....62

Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Kraftstofftemperatur am Kraftstofffilter der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010....62

Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Kühlmitteltemperatur der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010....63

Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Motoröltemperatur der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010 64

Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung der Temperatur im Ansaugkrümmer der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010 64

Abbildung 21: Verlauf des Kraftstoff- und Rußgehalts des Motorenöls des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum 69

Abbildung 22: Verlauf der kinematischen Viskosität des Motorenöls bei 40 °C und bei 100 °C des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum 70

Abbildung 23: Verlauf der Elementgehalte der Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motorenöls des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum 71

Abbildung 24: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TAN) des Motorenöls des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum 71

Abbildung 25: Verlauf des Kraftstoff- und Rußgehalts des Motorenöls des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum 73

Abbildung 26: Verlauf der kinematischen Viskosität des Motorenöls bei 40 °C und bei 100 °C des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum 73

Abbildung 27: Verlauf der Elementgehalte der Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motorenöls des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum 74

Abbildung 28: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TAN) des Motorenöls des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum 75

Abbildung 29: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff (n = Anzahl der Messungen) 78

Abbildung 30: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch des Traktors JD-G im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff (n = Anzahl der Messungen) 80

Abbildung 31: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch des Traktors FE-A im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff (n = Anzahl der Messungen) 82

Abbildung 32: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch des Traktors FE-N im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff (n = Anzahl der Messungen) 83

Abbildung 33: Spezifische NO_X-Emissionen des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff während des Berichtszeitraumes 85

Abbildung 34: Spezifische CO-Emissionen des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff während des Berichtszeitraumes 86

Abbildung 35: Spezifische HC-Emissionen des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff während des Berichtszeitraumes 87

Abbildung 36: Spezifische Partikelmasse-Emissionen (PM) des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff während des Berichtszeitraumes 88

Abbildung 37: Spezifische NO_X-Emissionen des Traktors JD-G im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Originalzustand, sowie Diesel- und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung während des Berichtszeitraumes 89

Abbildung 38: Spezifische CO-Emissionen des Traktors JD-G im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Originalzustand, sowie Diesel- und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung während des Berichtszeitraumes 90

Abbildung 39: Spezifische HC-Emissionen des Traktors JD-G im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Originalzustand, sowie Diesel- und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung während des Berichtszeitraumes 91

Abbildung 40: Spezifische Partikelmasse-Emissionen des Traktors JD-G im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Originalzustand, sowie Diesel- und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung während des Berichtszeitraumes 92

Abbildung 41: Spezifische NO_X-Emissionen des Traktors FE-A im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 93

Abbildung 42: Spezifische CO-Emissionen des Traktors FE-A im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 94

Abbildung 43: Spezifische HC-Emissionen des Traktors FE-A im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 94

Abbildung 44: Spezifische Partikelmasse-Emissionen des Traktors FE-A im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 95

Abbildung 45: Spezifische NO_X-Emissionen des Traktors FE-N im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 96

Abbildung 46: Spezifische CO-Emissionen des Traktors FE-N im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 97

Abbildung 47: Spezifische HC-Emissionen des Traktors FE-N im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 98

Abbildung 48: Spezifische Partikelmasse-Emissionen des Traktors FE-N im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 99

Abbildung 49: Spezifische Emissionen von NO_X, CO, HC und Partikelmasse des Traktors JD-K unter Anwendung verschiedener Prüfzyklen 101

Abbildung 50: Spezifische Emissionen von NO_X, CO, HC und Partikelmasse des Traktors JD-K vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage 102

Abbildung 51: Spezifische Emissionen von NO_X, CO, HC und Partikelmasse des Traktors JD-G vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen) 103

Abbildung 52: Stickstoffoxid-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-K 104

Abbildung 53: Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-K 105

Abbildung 54: Partikelmasse-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-K 105

Abbildung 55: Stickstoffoxid-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-G 106

Abbildung 56: Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Trak- tor JD-G 107

Abbildung 57: Partikelmasse-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-G 107

Abbildung 58: Kohlenwasserstoff-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-G 108

Abbildung 59: Ammoniak-Emissionen des Traktors JD-K vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen) 109

Abbildung 60: Ammoniak-Emissionen des Traktors JD-G vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen) 110

Abbildung 61: Formaldehyd-Emissionen des Traktors JD-K vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen) 111

Abbildung 62: Formaldehyd-Emissionen des Traktors JD-G vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen) 111

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte und deren Einführungsdatum nach EU–Richtlinie 97/68/EG [14] (zuletzt geändert durch 2010/26/EU) für Dieselmotoren in mobilen landwirtschaftlichen Maschinen 26

Tabelle 2: Übersicht zu den Traktortypen und Einsatzorten im Feldversuch 37

Tabelle 3: Technische Daten der John Deere 6930 Premium Traktoren 38

Tabelle 4: Technische Daten der Fendt 820 Vario^{greentec} Traktoren 38

Tabelle 5: Aufgenommene Messgrößen der Traktoren 40

Tabelle 6: Qualität der für die Emissions- und Leistungsmessungen verwendeten Rapsölkraftstoffe 41

Tabelle 7: Qualität des verwendeten Referenzdieselkraftstoffes 42

Tabelle 8: Verwendete Motorenöle im Rahmen des Feldbetriebs 43

Tabelle 9: Ausgewählte Untersuchungsparameter zur Beurteilung der Motorqualität und verwendete Analyseverfahren 43

Tabelle 10: Technische Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile bei den Emissionsmessungen 46

Tabelle 11: C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 47

Tabelle 12: Eingestellte Drehzahlen, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren 49

Tabelle 13: Messpunkte und deren Gewichtung nach dem FAT 6-Stufen-Test [22] 49

Tabelle 14: Eingestellte Drehzahlen, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer bei Anwendung des FAT 6-Stufen-Tests für Traktor JD-K 50

Tabelle 15: Im Feldbetrieb absolvierte Betriebsstunden der Traktoren (ohne Betriebsstunden am Traktorenprüfstand) 53

Tabelle 16: Kraftstoffverbrauch der Traktoren während des Feldeinsatzes 54

Tabelle 17: Innerhalb von Zeitintervallen absolvierte Betriebsstunden der Traktoren 59

Tabelle 18: Verwendete Kraftstoffqualität zum Betrieb des Traktors JD-K (Grenzwertüberschreitungen der DIN 51605 hervorgehoben) 65

Tabelle 19: Fettsäurezusammensetzung der verwendeten Pflanzenöle ermittelt nach ISO 5508 (Hauptbestandteile hervorgehoben) 66

Tabelle 20: Verwendete Rapsölqualität zum Betrieb des Traktors JD-G (Grenzwertüberschreitungen der DIN 51605 hervorgehoben) 67

Tabelle 21: Verwendete Rapsölqualität zum Betrieb des Traktors FE-A (Grenzwertüberschreitungen der DIN 51605 hervorgehoben) 67

Tabelle 22: Überblick zur Einsatzdauer und verwendeten Motorölsorte im Traktor JD-K 68

Tabelle 23: Überblick zu Einsatzdauer und verwendeter Motorölsorte im Traktor JD-G 72

Tabelle 24: Kategorien der vom CAN-Bus des Traktors abgerufenen Drehzahlen und Kraftstoffverbräuche zur Zuordnung der im Feldbetrieb anhand der Betriebsdatenerfassung ermittelten Messwerte 100

Tabelle 25: Anteil der Messwerte pro Kategorie bzw. Gewichtung der Kategorien 100

1 Einführung

Die Verwendung von Rapsölkraftstoff in Traktoren fördert die regionale Landwirtschaft und kann bereits heute einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Um weitreichende Folgen der Klimaerwärmung abzuwenden, sind Maßnahmen, die zur Minderung des CO_2-Ausstoßes führen, möglichst umgehend zu ergreifen. Rapsölkraftstoff-Technologien zeichnen sich bereits durch einen hohen Entwicklungsstand bei sehr geringen CO_2-Vermeidungskosten aus. Die stets gekoppelte Erzeugung von Rapsöl und Futtermittel dient in gleichem Maße zur Verbesserung der Versorgungssicherheit sowohl mit hochwertigen Nahrungsmitteln als auch mit Energieträgern. Im Positionspapier „Biokraftstoffe - Fragen und Antworten“ werden die vielfältigen Aspekte der Biokraftstoffnutzung umfassend diskutiert [56].

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben dient als Maßnahme im Programm „BioEnergie für Bayern“ im Rahmen des „Klimaprogramm Bayern 2020“ des Freistaats dazu, offene Fragen zum Einsatz von Pflanzenölkraftstoffen in der Landwirtschaft zu beantworten, Wege zur erfolgreichen und umweltschonenden Anwendung in Traktoren aufzuzeigen und die Vorbildfunktion staatlicher landwirtschaftlicher Betriebe weiter zu stärken.

„Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell“ des Technologie- und Förderzentrums, finanziert durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Forschungsvorhaben N/05/05) zeigten bereits, dass umgerüstete Traktoren der Abgasstufen I und II mit normgerechtem Rapsölkraftstoff zuverlässig, effizient und emissionsarm betrieben werden können [51].

Weitere Erkenntnisse zum Einsatz umgerüsteter Traktoren wurden in Deutschland auch im sogenannten „100-Traktoren-Programm“ [17] oder in Österreich im „35-Traktoren-Programm“ [2] gewonnen. Eine Vielzahl der untersuchten Traktoren erzielte mit Rapsölkraftstoff hinsichtlich Leistung und der limitierten Abgasemissionen CO, HC und Partikelmasse bessere Ergebnisse als mit Dieselkraftstoff. Einzig bei den Stickstoffoxiden waren mit Rapsölkraftstoff zumeist höhere Werte zu verzeichnen.

Ein Hemmnis für eine stärkere Marktdurchdringung von rapsölkraftstofftauglichen Traktoren war bislang, dass keine neuen werkseitig freigegebenen Modelle am Markt verfügbar waren. Eine nachträgliche Umrüstung ist mit zusätzlichen Investitionen verbunden und führt in der Regel zum Verlust der Gewährleistungsansprüche und Garantieleistungen gegenüber dem Hersteller. Mit dem seit Sommer 2008 erhältlichen ersten Modell eines serienmäßig rapsöltauglichen Traktors, der eine Herstellerfreigabe mit vollem Gewährleistungsanspruch besitzt, vermindert sich das Ausfallrisiko für den Anwender.

Obwohl landwirtschaftliche Betriebe des Freistaats Bayern keine Energiesteuerrückerstattung erhalten, können derzeit (September 2012) dennoch Kraftstoffkosten eingespart werden, da für diese Betriebe auch kein Anspruch auf begünstigten Agrardiesel besteht. Die zukünftige Rentabilität hängt in hohem Maße von der Preisentwicklung für Diesel- und Rapsölkraftstoff ab.

Unabhängig von der möglichen Kosteneinsparung kommt den landwirtschaftlichen Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft jedoch auch eine besondere Vorbildfunktion beim Einsatz moderner Technologien mit weitreichenden Vorteilen für die heimische Landwirtschaft sowie dem Boden-, Gewässer- und Klimaschutz zu.

2 Problemstellung

Gegenstand bisheriger Untersuchungen waren zumeist Traktoren der Abgasstufen I und II. Die neuen Traktormotoren der Abgasstufe IIIA gehören einem neuen Entwicklungsstand mit Common-Rail-Einspritzsystemen und innermotorischen Maßnahmen zur NO_X-Minderung an. Die miteinander einhergehende Fortentwicklung von Motor- und Abgasnachbehandlungstechnologien, von Rapsölkraftstoff sowie die Fortschreibung der Abgasgesetzgebung führen zu veränderten Bedingungen beim Einsatz von Rapsölkraftstoff in landwirtschaftlichen Traktoren. Diese ergeben sich durch die:

- Markteinführung und Demonstration pflanzenöltauglicher Traktoren ab Werk
  - Fendt 820 Vario^{greentec} mit Deutz Natural Fuel Engine® (Zwei-Tank-System)
  - Deutz-Fahr NaturalPower mit Deutz Natural Fuel Engine® (Zwei-Tank-System)
  - John Deere-Konzeptstudie mit Ein-Tank-System
- technische Weiterentwicklung von Traktormotoren
  - Common-Rail Einspritzsysteme
  - Motorenoptimierung zur Emissionsminderung (z.B. Abgasrückführung)
  - Entwicklung und Erprobung nachmotorischer Abgasminderungsmaßnahmen
  - Partikelfiltersysteme
  - Entstickungskatalysatoren
- Fortschreibung der Abgasgesetzgebung von Stufe IIIA über IIIB zu IV
  - Verschärfung der Grenzwerte (NO_X und Partikelmasse)
  - geplante Aufnahme von Grenzwerten für weitere Emissionskomponenten (Partikelanzahl)
  - Einführung neuer Prüfzyklen für Typenzulassungen (inkl. Lastwechsel)
- Weiterentwicklung von Rapsölkraftstoff
  - Reduzierung aschebildender Elemente

Neben den bisher offen gebliebenen Fragen zu umgerüsteten Traktoren der Abgasstufen I und II führen diese Entwicklungen zu neuen Fragestellungen hinsichtlich des Betriebs- und Emissionsverhaltens der Abgasstufe IIIA Traktoren. Diese betreffen beispielsweise die Störanfälligkeit im praktischen Einsatz, Leistung und Kraftstoffverbrauch sowie die Einhaltung aktueller und zukünftiger Emissionsanforderungen. Neben den limitierten Abgaskomponenten Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_X), Kohlenwasserstoffe (HC) und der Partikelmasse sind auch derzeit nicht limitierte Emissionen (z. B. Aldehyde) für eine umfassende Beurteilung des Beitrags von Rapsölkraftstofftraktoren zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung zunehmend von Bedeutung. Dazu liegen bislang nur sehr wenige Ergebnisse vor. Für die Klärung offener Fragen sind systematische Untersuchungen unter Berücksichtigung moderner Motor- und Abgasnachbehandlungstechnologien sowie weiterentwickelter Qualitäten des Rapsölkraftstoffs erforderlich.

Offene Fragen sind insbesondere:

- Welche limitierten und nicht limitierten Abgasemissionen, welche Leistungs- und Kraftstoffverbräuche sind von modernen Traktoren der Abgasstufe IIIA zu erwarten?
- Wie unterscheidet sich dabei der Betrieb von Rapsölkraftstoff gegenüber Dieselkraftstoff, wenn die Traktoren für beide Kraftstoffe freigegeben sind?
- Wie verändern sich die limitierten und nicht limitierten Abgasemissionen, die Leistung und das Drehmoment sowie der Kraftstoffverbrauch im realen Praxisbetrieb?
- Wie verhalten sich die Emissionskonzentrationen bei verschiedenen Prüfzyklen?
- Können durch Abgasnachbehandlungssysteme die Partikel- und NO_X-Emissionen das Niveau von zukünftigen Emissionsgrenzwerten erreichen?
- Wie verhalten sich die Traktoren im praktischen Einsatz, z.B. hinsichtlich Störungen oder Veränderungen des Motorenöls?

Wie in Abbildung 1 dargestellt wird, haben eine Vielzahl von Einflussgrößen wie z. B. Kraftstoffart und -eigenschaften, Betriebsbedingungen des Motors und Art bzw. Betriebszustand des Abgasnachbehandlungssystems Auswirkungen auf den Motorzustand, das Betriebsverhalten und die Emissionen der Traktoren. Diese gilt es näher zu untersuchen.

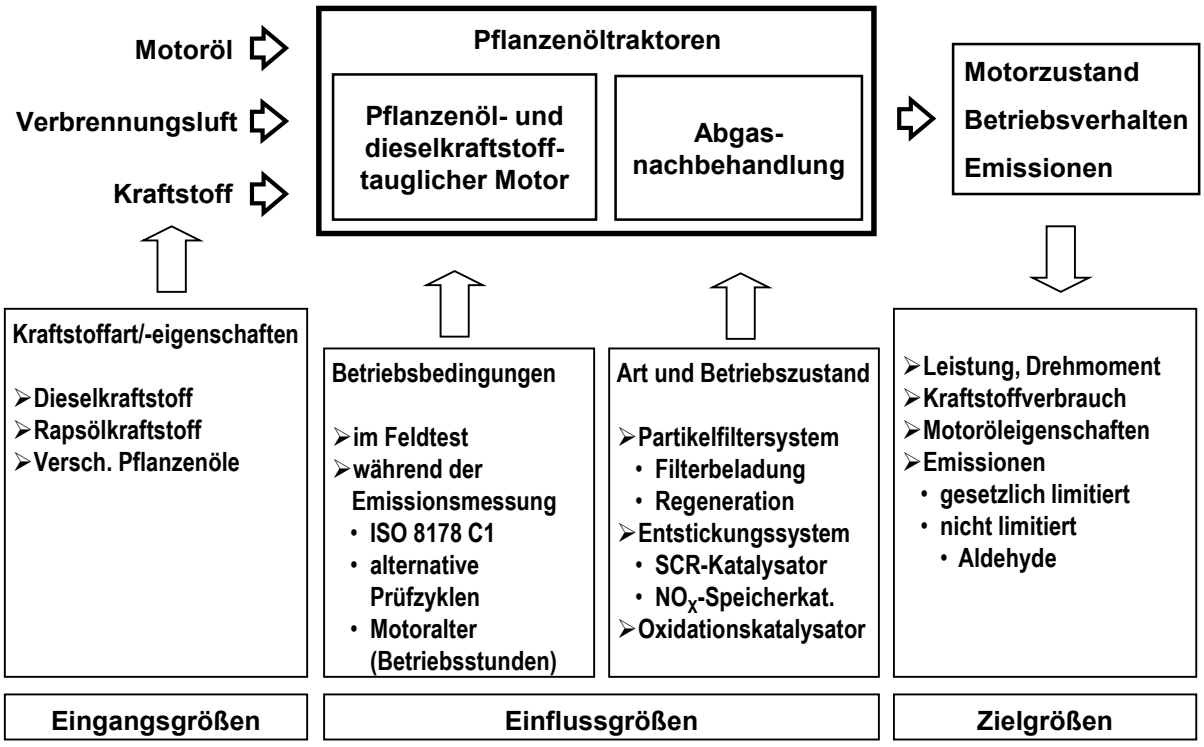


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Eingangs-, Einfluss- und Zielgrößen für die Untersuchungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren

3 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist es deshalb, systematisch das Emissions- und Betriebsverhalten pflanzenöltauglicher Traktoren über einen längeren Zeitraum im Feld und am Prüfstand zu erfassen. Am Prüfstand sollen dabei die Einflüsse von verschiedenen Motorbetriebsbedingungen, von Prüfzyklus-Varianten und von Abgasnachbehandlungssystemen (Einflussgrößen) auf die Zielgrößen, insbesondere limitierte Abgaskomponenten, untersucht werden.

Das Betriebsverhalten in der Praxis soll am Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Milchvieh- und Rinderhaltung Achselschwang (LVFZ Achselschwang), am Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell (LVFZ Kringell) und an der Versuchsstation Grub an je einem pflanzenöltauglichen Traktor der Abgasstufe IIIA untersucht werden. Das Betriebsverhalten im Feld soll anhand von folgenden Maßnahmen ermittelt werden:

- Kontinuierliche Erfassung der Einsatzbedingungen sowie wichtiger Betriebsparameter der Traktoren,
- Dokumentation von Störungen sowie Wartungs- und Reparaturarbeiten,
- Überprüfung der Kraftstoffqualität,
- Überprüfung der Qualität des Motoröls.

Das Emissionsverhalten sowie Leistung und Kraftstoffverbrauch der Traktoren sollen unter reproduzierbaren Bedingungen am Prüfstand des TFZ ermittelt werden. Hierzu soll ein vierter Traktor mit in die Untersuchung einbezogen werden. Dabei sollen vor allem die Zielgrößen

- gesetzlich limitierte Emissionskomponenten,
- zum Teil gesetzlich nicht limitierte Emissionskomponenten,
- Leistung und Drehmoment sowie
- Kraftstoffverbrauch

in Abhängigkeit folgender Einflussgrößen erfasst werden:

- Unterschiedliche Kraftstoffe (Rapsölkraftstoff, Dieselkraftstoff),
- zunehmende Betriebsdauer,
- verschiedene Prüfbedingungen bzw. Prüfzyklen,
- unterschiedlichen Betriebszustände mit einem Abgasnachbehandlungssystem.

Die Ergebnisse des Vorhabens sollen dazu beitragen, die Betriebssicherheit pflanzenöltauglicher Traktoren zu erhöhen, den Wartungsaufwand zu minimieren, einen emissionsarmen Betrieb der Traktoren im Praxiseinsatz zu gewährleisten und das Potenzial sowie ggf. Strategien zur Erfüllung zukünftiger Emissionsanforderungen aufzuzeigen.

4 Stand des Wissens

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zum derzeitigen Stand des Wissens bezüglich der Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff in Traktoren gegeben.

4.1 Pflanzenöltaugliche Traktoren

4.1.1 Motoren pflanzenöltauglicher Traktoren

Im Vergleich zu herkömmlichen Dieselmotoren sind pflanzenöltaugliche Dieselmotoren speziell an die Kraftstoffeigenschaften von Pflanzenöl angepasst. Die Anpassungen können bereits bei der Konstruktion der Motoren erfolgen, wie zum Beispiel beim Motor der Firma Elsbett, oder sie werden nachträglich an Seriendieselmotoren durchgeführt [40][49].

Prinzipiell können pflanzenöltaugliche Motoren hinsichtlich ihres Kraftstoffsystems in folgende zwei Kategorien unterteilt werden [51]:

- Ein-Kraftstoff-Systeme
- Zwei-Kraftstoff-Systeme

Bei Ein-Kraftstoff-Systemen wird der Motor in allen Betriebszuständen mit Pflanzenöl betrieben. Insbesondere den kritischen Betriebsphasen wie zum Beispiel Kaltstart oder Schwachlastbetrieb ist größte Aufmerksamkeit zu schenken um einen zuverlässigen Betrieb des Motors zu gewährleisten. Bei Zwei-Kraftstoff-Systemen kann der Motor wahlweise mit Dieselkraftstoff oder Pflanzenöl betrieben werden. Für den Startvorgang, die Warmlaufphase und gegebenenfalls weitere ungünstige Betriebszustände wird der Motor mit Dieselkraftstoff betrieben. Werden Betriebsbedingungen erreicht, die eine störungsfreie Verwendung von Pflanzenöl zulassen, so wird manuell oder automatisch auf den Betrieb mit Pflanzenöl umgeschaltet. Vor dem Abstellen wird der Motor wieder mit Dieselkraftstoff betrieben, um das Kraftstoffsystem zu spülen und den nächsten Startvorgang wieder mit Dieselkraftstoff ausführen zu können.

Je nach Motortyp und Umrüstvariante werden folgende Anpassungen in unterschiedlichen Kombinationen durchgeführt [40][49]:

- Ersetzen von nicht pflanzenölverträglichen Materialien (zum Beispiel Schläuche und Dichtungen)
- Vergrößerung des Kraftstoffleitungsquerschnitts
- Ersetzen des Kraftstofffilters und gegebenenfalls Einbau eines zusätzlichen Kraftstofffilters
- Einbau von Kraftstoffvorwärmeinrichtungen an Kraftstofftanks, Leitungen, Filtern, Pumpen und Einspritzdüsen
- Ersetzen der Kraftstoffförderpumpe
- Ersetzten der Einspritzpumpe
- Ersetzen oder Modifikation der Einspritzdüsen
- Ersetzen oder Modifikation der Glühkerzen und der Vorglüheinrichtung (zum Beispiel verlängerte Glühzeit)
- Vorwärmung des Motors mittels Kühlwasserheizung vor beziehungsweise während des Kaltstarts und der Warmlaufphase
- Modifikation der Brennraumgeometrie
- Änderungen an den Ein- und Auslassventilen
- Modifikationen in der Kraftstoffführung
- Steigerung des Einspritzdrucks
- Anpassungen der mechanischen oder elektronischen Motorsteuerung (zum Beispiel Einspritzzeitpunkt und Einspritzmenge)
- Einbau von Steuerungselementen für die Umschaltung von Dieselkraftstoff auf Pflanzenöl (bei Zwei-Kraftstoff-Systemen)
- Einbau von Systemen zur Kraftstofferkennung bei Wechselbetankung

Im Jahr 2008 waren in etwa 20 Systemanbieter für die Umrüstung von landwirtschaftlichen Maschinen in Deutschland tätig [18]. Seit 2007 bietet die Deutz AG serienmäßig einen pflanzenöltauglichen Motor an, der mit einem Zwei-Kraftstoff-System ausgestattet ist. Die Motorentwicklung erfolgte gemeinsam mit den Traktorenherstellern AGCO GmbH (Fendt) und Same Deutz-Fahr Deutschland GmbH. Traktoren der beiden Hersteller sind seit 2008 in Deutschland erhältlich [50]. Die John Deere Werke Mannheim haben ebenfalls einen pflanzenöltauglichen Motor entwickelt der jedoch mit einem Ein-Kraftstoff-System ausgestattet ist. Um die Praxistauglichkeit zu demonstrieren, befinden sich seit 2008 mit diesem Motor ausgestattete Traktoren in einem Feldtest [36]. Informationen hierzu können unter www.2ndVegOil.eu abgerufen werden.

4.1.2 Bisherige Untersuchungen zum Betriebsverhalten

Zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren wurden in den letzten Jahren einige Erfahren gesammelt. Untersuchungen wie das „100-Traktoren-Programm“ [17] in Deutsch-

land, das „35-Rapsöl-Traktoren-Programm“ [38] in Österreich, die "Felderprobung Rapsöl pur" [12] in Deutschland oder die Untersuchung zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren [51] in Bayern konnten bereits erfolgreich unter Beweis stellen, dass Rapsölkraftstoff unter bestimmten Voraussetzungen erfolgreich in Traktoren eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse beruhen zumeist auf Traktoren der Abgasstufen I und II die im Rahmen der Projekte jedoch selten mehr als 3.000 Bh mit Rapsölkraftstoff absolvierten. Um weitere Informationen über das Langzeitverhalten von Rapsöltraktoren zu erhalten, führte die Universität Rostock nachfolgend zum „100-Traktoren-Programm“ eine Untersuchung zur Dauerhaltbarkeit der Motoren durch [47]. Hierzu wurde der Großteil der am „100-Traktoren-Programm“ beteiligten Traktoren aufgesucht, die Erfahrungen der Betreiber dokumentiert und zum Teil wurden Motorinspektionen mittels Endoskopie vorgenommen. Etwa ein Drittel der Traktoren wiesen zu dem Zeitpunkt bereits mehr als 5.000 Bh auf, einzelne mehr als 7.000 Bh. Es kann festgehalten werden, dass Motoren für Landmaschinen der Abgasstufe I prinzipiell mit Rapsölkraftstoff betrieben werden können. Für modernere Traktoren ab Abgasstufe IIIA liegen wenige Erfahrungen vor. Bisherige Ergebnisse, die im Rahmen des Projektes "2nd VegOil" mit John Deere Traktoren der Abgasstufe IIIA gesammelt wurden, weisen auf ein gutes Betriebsverhalten beim Einsatz von Rapsöl hin [48].

4.2 Emissionen

4.2.1 Gesetzliche Vorgaben zum Schadstoffausstoß

Die Einführung und Fortschreibung gesetzlicher Vorgaben zum Schadstoffausstoß stellen einen wesentlichen Antrieb für die weitere Entwicklung der Motortechnologie dar. Für landwirtschaftliche Traktoren gilt die Richtlinie 2000/25/EG [15], zuletzt geändert durch Richtlinie 2010/22/EU. Die Grenzwerte sind dieselben, wie in Richtlinie 97/68/EG [14], zuletzt geändert durch Richtlinie 2010/26/EU. Gesetzlich limitiert sind die Schadstoffkomponenten NO_X, CO, HC und Partikelmasse. Die Grenzwerte für die limitierten Emissionskomponenten für Traktormotoren sind mit dem Jahr des Inkrafttretens in Tabelle 1, gestaffelt nach Leistungsklassen (P_N: Motornennleistung), dargestellt.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte und deren Einführungsdatum nach EU–Richtlinie 97/68/EG [14] (zuletzt geändert durch 2010/26/EU) für Dieselmotoren in mobilen landwirtschaftlichen Maschinen

Leistung P_N in kW	NO_X in g/kWh	HC in g/kWh	CO in g/kWh	Partikel in g/kWh	Datum*
		Stufe I			
$37 \leq P_N < 75$	9,2	1,3	6,5	0,85	Apr 1999
$75 \leq P_N < 130$	9,2	1,3	5,0	0,70	1999
$130 \leq P_N \leq 560$	9,2	1,3	5,0	0,54	1999
		Stufe II			
$18 \leq P_N < 37$	8,0	1,5	5,5	0,8	2001
$37 \leq P_N < 75$	7,0	1,3	5,0	0,4	2004
$75 \leq P_N < 130$	6,0	1,0	5,0	0,3	2003
$130 \leq P_N \leq 560$	6,0	1,0	3,5	0,2	2002
		Stufe IIIA			
$19 \leq P_N < 37$	7,5 (NO_X + HC)		5,5	0,6	2007
$37 \leq P_N < 75$	4,7 (NO_X + HC)		5,0	0,4	2008
$75 \leq P_N < 130$	4,0 (NO_X + HC)		5,0	0,3	2007
$130 \leq P_N \leq 560$	4,0 (NO_X + HC)		3,5	0,2	2006
		Stufe IIIB			
$37 \leq P_N < 56$	4,7 (NO_X + HC)		5,0	0,025	2013
$56 \leq P_N < 75$	3,3	0,19	5,0	0,025	2012
$75 \leq P_N < 130$	3,3	0,19	5,0	0,025	2012
$130 \leq P_N \leq 560$	2,0	0,19	3,5	0,025	2011
		Stufe IV			
$56 \leq P_N < 130$	0,4	0,19	5,0	0,025	Okt 2014
$130 \leq P_N \leq 560$	0,4	0,19	3,5	0,025	2014

**Datum für das Inverkehrbringen, Typgenehmigung ein Jahr vorher (außer für $130 \leq P_N \leq 560$)*

Insbesondere für die NO_X- und Partikelmasse-Emissionen wurden die gesetzlichen Vorgaben in den letzten Jahren erheblich verschärft. Um die Anforderungen hinsichtlich der Partikelmasse-Emissionen ab Stufe IIIB und der NO_X-Emissionen ab Stufe IV zu erfüllen, sind die Fortentwicklung des Motorsystems sowie nach heutigem Wissen der Einsatz von Abgasnachbehandlungstechnologien, wie Partikelfilter und/oder Entstickungskatalysatoren erforderlich [5][1]. In der Richtlinie 97/68/EG sind auch die anzuwendenden Prüfzyklen zur Bestimmung der Abgasemissionen aufgeführt.

4.2.2 Prüfzyklen zur Erfassung der Emissionen von Traktoren

Für die Messung der gasförmigen Emissionen wird bis zur vorerst letzten Abgasstufe IV ein stationärer Prüfzyklus (NRSC; entspricht 8-Phasen-Zyklus nach ISO 8178) eingesetzt. Ab Abgasstufe IIIB ist für alle limitierten Komponenten zusätzlich der transiente Prüfzyklus (NRTC) vorgeschrieben. Im Rahmen der Typgenehmigung werden die Emissionen der Motoren im ausgebauten Zustand am Motorenprüfstand geprüft. Ob die hierbei verwendeten Prüfzyklen das Einsatzprofil von Motoren in Traktoren repräsentativ wiedergeben, wurde zum Teil in Frage gestellt und war Bestandteil von verschiedenen Untersuchungen, die im Folgenden aufgeführt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Arbeiten zum Teil an Motoren durchgeführt wurden, welche im Traktor eingebaut waren. Vorgaben zur Durchführung von Emissionsmessungen an Traktoren existieren derzeit nicht. In mehreren Forschungsarbeiten [21][38][17][50] wurde jedoch bisher ein Vorgehen in Anlehnung an den stationären Prüfzyklus nach Richtlinie 97/68/EG [14] (entspricht dem C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 [7]) angewandt.

RINALDI und NÄF (1992) [42] untersuchten anhand der Aufzeichnung von Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch die Motorauslastung von zwei Traktoren bei unterschiedlichen Arbeiten und berechneten daraus Lastkollektive für drei schweizerische Modellbetriebe (Futterbaubetrieb, Ackerbaubetrieb und gemischter Betrieb). Der Einfluss der Betriebsstruktur und der Motorleistung des Traktors auf die Motorauslastung war bei auf die Betriebsgröße angepassten Geräten und Geschwindigkeiten gering. Anhand der Ergebnisse wurde ein Vorschlag für Testpunkte zur Messung der Abgasemissionen von Traktoren erarbeitet. RINALDI und STADLER (2002) [43] entwickelten ein Abgasmodell anhand der Auswertung von Messdaten von 112 Traktoren, die in den Jahren 1994 bis 2001 gemessen wurden. Als Prüfzyklus wurde der C1-Zyklus der ISO 8178 und ein interner 6-Stufen-Test der ehemaligen eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) in der Schweiz verwendet. Nach Angaben der Autoren repräsentiert der 6-Stufen-Test die realen Arbeitspunkte des Motors beim praktischen Einsatz in der Landwirtschaft besser. Dieser Test wird in weiteren Forschungsarbeiten von RINALDI et al. (2005) [41], LANDIS (2005) [21] und LANDIS et al. (2007) [22] verwendet.

Ähnliche Untersuchungen wurden in Schweden von HANSSON et al. (1999) [16] und LINDGREN (2004) [25] zum Teil in gemeinsamen Arbeiten durchgeführt. HANSSON et al. (1999) [16] entwickelte für die Prüfpunkte des C1-Zyklus der ISO 8178 für einzelne landwirtschaftliche Arbeiten spezifische Wichtungsfaktoren. Basis für die Untersuchung war ein Valmet 805 (70 kW) Traktor bei dem Drehzahl, Kraftstoffverbrauch und weitere Parameter bei sechs verschiedenen Arbeiten über max. 2,8 h mit einem Aufzeichnungsintervall von 7,5 s erfasst und anschließend auf den Motorenprüfstand übertragen wurden. Insbesondere hohe Motorlasten bei Zwischendrehzahl traten in der Praxis kaum auf, diese werden somit für den verwendeten Versuchsträger durch die vorgegebene Wichtung im C1-Zyklus überbewertet. Eine weitere Feststellung war, dass aus diesem Grund vor allem die NO_X-Emissionen bei Verwendung der vorgegebenen Wichtungen zu hoch bewertet werden.

LINDGREN (2004) [25] zeichnete zwischen 1999 und 2002 mit einer Frequenz von 1 Hz die Lastzustände von drei Traktoren bei verschiedenen landwirtschaftlichen Arbeiten auf. Am Prüfstand wurden die Emissionen der Motoren bei 20 verschiedenen Lastzuständen erfasst. Anhand der Aufzeichnungen aus dem realen Betrieb wurden spezifische Emissionen berechnet und mit den spezifischen Emissionen des C1-Zyklus der ISO 8178 verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass der C1-Zyklus nicht die mittlere jährliche Auslastung von Traktoren widerspiegelt.

4.2.3 Emissionen im Betrieb mit Rapsöl- bzw. Pflanzenölkraftstoff

Im Folgenden werden eine Auswahl bisheriger Untersuchungen zum Emissionsverhalten vorgestellt. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere bei der Messung der gesetzlich nicht limitierten Emissionen zum Teil keine normierten Prüfverfahren vorliegen und bei den verschiedenen Untersuchungen Differenzen beispielsweise im Bereich des Prüfzyklus oder der Art der Probenahme bestehen. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander gestaltet sich somit oftmals schwierig.

Gesetzlich limitierte Schadstoffkomponenten

Eine Literaturstudie zu Ergebnissen von Forschungsarbeiten im Zeitraum von 1985 bis 1996 zum Emissionsverhalten von Dieselmotoren, die mit Rapsöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff betrieben wurden, führte TSCHÖKE (1997) [53] durch. Insgesamt wurden sehr hohe Streuungen zwischen den Ergebnissen der Untersuchungen festgestellt. Untersuchungen an Dieselmotoren, die für den Betrieb mit Rapsöl speziell angepasst waren, zeigten, dass bezüglich der gesetzlich limitierten Abgaskomponenten mit Rapsöl gleiche beziehungsweise bessere Werte als für Dieselkraftstoff erreicht werden können.

Es existieren zahlreiche aktuelle Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff, zum Beispiel HASSEL et al. (2006) [17], KRAHL et al. (2007) [20], THUNEKE et al. (2007) [50], THUNEKE et al. (2009) [51], WICHMANN (2008) [55], KRAHL et al. (2008) [19], BLASSNEGGER et al (2009) [4], PICKEL und DIERINGER (2009) [35], MUNACK et al. (2010) [30]. Hinsichtlich der NO_X-Emissionen wurde zumeist ein Anstieg im Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff festgestellt. Bei den Emissionen von CO, HC und PM sind jedoch häufig auch differierende Ergebnisse zu finden. Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle Motoren auf den Betrieb mit Rapsöl optimiert waren und oftmals nur einzelne Motoren Gegenstand der Untersuchung waren.

RATHBAUER et al. (2008) [38] führten im Rahmen eines Flottenversuchs mit 35 Traktoren Emissionsmessungen unter Anwendung des 8-Punkte-Prüfzyklus nach ISO 8178 durch. Die Motoren der Traktoren, überwiegend Abgasstufe I und II, wurden mit unterschiedlichen Systemen auf den Betrieb mit Rapsöl angepasst. Die Leistungsabnahme erfolgte an der Zapfwelle. Im Vergleich zu Dieselkraftstoff ergaben sich im Betrieb mit Rapsöl im Mittel (Messungen aller Traktoren zu Beginn des Projektes) 11 % geringere CO, 55 %

geringere HC und 14 % höhere NO_X-Emissionen. Bei der Abschlussvermessung nach dem Feldversuch waren im Vergleich zu Dieselkraftstoff noch 4 % geringere CO, 11 % höhere NO_X und 33 % geringere PM-Emissionen festzustellen. Die Veränderungen hinsichtlich der CO- und NO_X-Emissionen wurden zum Teil auf Verschleiß an der Einspritzanlage zurückgeführt.

Aldehyde

PRESCHER und STANEV (1998) [37] führten Untersuchungen zu Aldehyd-Emissionen beim Einsatz von Rapsöl- und Dieselkraftstoff in einem schweröltauglichen Einzylinder Dieselmotor 1 VDS 18/15 durch. Die Messungen wurden bei konstanter Nenndrehzahl unter Variation der Motorlast durchgeführt. Die Aldehyde wurden mittels eines Fourier-Transformierten-Infrarotspektroskops (FTIR) SESAM 2 erfasst. Es wurde festgestellt, dass die Aldehyd-Emissionen bei beiden Kraftstoffen in großem Maße lastabhängig sind. Vor allem im Leerlauf und bei niedriger Teillast kommt es aufgrund von niedrigen Verbrennungs- und Abgastemperaturen zu einer Erhöhung der Emissionen. Bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff lagen die Aldehyd-Emissionen (Summe Formaldehyd, Acetaldehyd und Acrolein) im Leerlauf und unter Volllast um 50 % bzw. 100 % höher als bei Dieselkraftstoff. Im mittleren Lastbereich wurden niedrigere oder gleich hohe Aldehyd-Konzentrationen festgestellt.

LEA-LANGTON et al. (2009) [24] untersuchten mittels eines Gasmet CR-2000 FTIR die Emissionen von Aldehyden und VOC (Volatile Organic Compounds) an einem Perkins Phaser 180Ti (Abgasstufe EURO II mit Oxidationskatalysator) mit 134 kW Maximalleistung, der mit Dieselkraftstoff, Altfettmethylester und „Rapsspeiseöl“ betrieben wurde. Mit dem Messgerät nachgewiesen werden konnten die Aldehyde Formaldehyd, Acetaldehyd und Acrolein sowie die VOC Cyanwasserstoff (Blausäure), Acetylen, Methansäure (Ameisensäure) und Iso-Buten. Die gemessenen Konzentrationen waren vor allem bei den VOC zumeist im Bereich der Nachweisgrenze des Gerätes von 3 ppm. Während des Kaltstartes wurde festgestellt, dass die Emissionen der drei untersuchten Aldehyd-Komponenten im Betrieb mit Rapsöl um bis zum Vierfachen höher waren als mit Dieselkraftstoff. Bei den zwei untersuchten stationären Prüfpunkten mit 25 bzw. 50 % Motorlast bei 60 % der Nenndrehzahl wurden mit Rapsöl im Vergleich zu Dieselkraftstoff um bis zu zweifach höhere Aldehyd-Emissionen nachgewiesen. Bei den VOC war Iso-Butan die Komponente, welche in den höchsten Konzentrationen gemessen wurde, generell war die gemessene Konzentration sehr gering und oft nahe der Nachweisgrenze. Durch Messungen vor und nach dem Oxidationskatalysator konnte eine starke Verminderung der Aldehyde durch den Katalysator nachgewiesen werden.

BLASSNEGGER et al. (2009) [4] untersuchten an einem LKW der Abgasstufe EURO V mit Oxidationskatalysator und SCR-Katalysatorsystem und einem Traktormotor der Abgasstufe IIIA die Auswirkungen des Einsatzes von Rapsöl- im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Bei den Untersuchungen kamen, in Abhängigkeit vom Maschinentyp, verschiedene Prüfzyklen zum Einsatz. Während beim Traktormotor in der Summe kaum Unterschiede

zwischen den Kraftstoffen hinsichtlich der Aldehyd-Emissionen feststellbar waren, zeigten sich bei den Messungen mit dem LKW, je nach verwendetem Prüfzyklus, ca. 20 bis 30 % höhere Aldehyd-Emissionen im Betrieb mit Rapsölkraftstoff. Bei Verwendung des transienten Prüfzyklus wurden mit beiden Kraftstoffen in etwa doppelt so hohe Aldehyd-Konzentrationen als im Vergleich zum stationären Prüfzyklus festgestellt.

An einem Mercedes-Benz Motor OM 906 LA der Abgasnorm Euro III untersuchten MUNACK et al. (2010) [30] die Aldehyd-Emissionen im Betrieb mit Rapsöl und Dieselkraftstoff unter Anwendung des 13-Stufen-Prüfzyklus. Die Probenahme auf DNPH (2,4-Dinitrophenylhydrazin) erfolgte hierbei auch während der Lastwechselphasen, die Analyse wurde mittels HPLC (High-Performance-Liquid-Chromatography) durchgeführt. Die quantitativ zum größten Anteil vorhandenen Aldehyde waren bei beiden Kraftstoffen vor allem Formaldehyd, Acetaldehyd und Acrolein. In Summe waren die Aldehyd-Emissionen dieses Motors im Betrieb mit Rapsöl höher als mit Dieselkraftstoff.

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Untersuchungen zu PAK-Emissionen an einem auf Pflanzenöl optimierten, aufgeladenen Deutz-MWM D-916-6 Motor, der in Traktoren eingebaut wurde, führten MAY et al. (1994) [26] durch. Für den untersuchten Prüfpunkt bei 1.500 min^{-1} und 320 Nm wurde eine Reduktion der PAK-Emissionen beim Betrieb mit Rapsöl um 70 % im Vergleich zum Dieselbetrieb festgestellt. TSCHÖKE (1997) [53] kam in seiner Literaturstudie zum Schluss, dass mit Rapsöl gleiche beziehungsweise niedrigere PAK Werte wie für Dieselkraftstoff erreicht werden können.

In Arbeiten von THUNEKE et al. (2007) [50] war der PAK- und nitro-PAK-Gehalt von Partikeln eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff betriebenen Traktors der Abgasstufe II Gegenstand der Untersuchung. Hierbei wurde der Traktor in Anlehnung an den stationären 8-Phasen-Zyklus nach ISO 8178-4 betrieben. Die über den gesamten Prüfzyklus im Rapsölbetrieb gesammelten Partikel zeigten in etwa 30 bis 35 % geringere Konzentrationen an PAK und nitro-PAK als die Partikel aus dem Dieselbetrieb. Zusätzlich wurden Partikel aus dem Leerlauf, einem Betriebspunkt mit schlechterer Gemischaufbereitung, gezogen und untersucht. Auch in diesem Betriebspunkt enthielten die Partikel aus dem Rapsölbetrieb ca. 35 % weniger nitro-PAK. Der Summengehalt an PAK der Rapsölpartikel lag jedoch doppelt so hoch wie bei den Dieselpartikeln.

Bei Untersuchungen zu PAK an Abgaspartikeln eines Perkins Phaser 180Ti Motors (Abgasstufe EURO II mit Oxidationskatalysator, Baujahr 1999), der mit „Rapsspeiseöl“ betrieben wurde, stellten LEA-LANGTON et al. (2008) [23] für zwei stationäre Prüfpunkte ebenfalls eine Reduktion der PAK im Vergleich zum Dieselbetrieb fest.

Forschungsarbeiten von BLASSNEGGER et al. (2009) [4] zeigten bei einem LKW und einem Traktormotor im Betrieb mit Rapsölkraftstoff höhere PAK-Emissionen als mit Dieselkraftstoff. Die Unterschiede betrugen beim Traktormotor in etwa 25 bis 30 %, je nach Prüfzyklus, beim LKW wurden unter Anwendung eines des stationären Prüfzyklus eben-

falls etwa 25 % höhere PAK-Konzentrationen festgestellt. Durch die Verwendung des transienten Prüfzyklus erhöhten sich die Unterschiede beim LKW auf ca. 60 %. Der PAK-Ausstoß wurde beim LKW durch die Wahl des Prüfzyklus, vor allem im Betrieb mit Rapsöl, stark beeinflusst. Beim Traktormotor waren die PAK-Emissionen weitgehend unabhängig vom Prüfzyklus. Bei den ebenfalls untersuchten nitro-PAK-Emissionen konnte für den LKW kein eindeutiger Trend zwischen den Kraftstoffen festgestellt werden. Beim Traktormotor wurden im Betrieb mit Rapsölkraftstoff zwischen 30 bis 75 % geringere nitro-PAK im Vergleich zu Dieselkraftstoff beobachtet. Dies stimmt mit den Ergebnissen von THUNEKE et al. (2007) [50] überein.

MUNACK et al. (2010) [30] untersuchten an zwei Motoren, unter anderem, die PAK-Emissionen im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff. Beim Motor Mercedes-Benz OM 906 LA der Abgasnorm Euro III, wurden unter Anwendung des 13-Stufen-Prüfzyklus mit und ohne Berücksichtigung der transienten Lastwechselphasen mit Rapsölkraftstoff höhere PAK-Emissionen im Vergleich zu Dieselkraftstoff festgestellt. Eine Umrüstung des Motors auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff mit einem System des Herstellers eoil zeigte keinen Einfluss auf die PAK-Emissionen. Mit dem zweiten Motor, ein MAN D0836 LFL 51 der Abgasstufe EURO IV, wurden ebenfalls PAK-Messungen mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff unter Verwendung des 13-Stufen-Prüfzyklus im Vergleich zum European-Transient-Zyklus (ETC) nach Richtlinie 2005/55/EG durchgeführt. Insgesamt waren die PAK-Emissionen mit beiden Kraftstoffen auf deutlich geringerem Niveau im Vergleich zum EURO III Motor. Während bei Verwendung des 13-Stufen-Prüfzyklus zum Teil mit Rapsölkraftstoff höhere PAK-Emissionen feststellbar waren, konnte unter Anwendung des transienten Prüfzyklus kein Unterschied zwischen den beiden Kraftstoffen festgestellt werden.

4.3 Abgasnachbehandlung

Zur Abgasnachbehandlung können verschiedene Techniken und Verfahren eingesetzt werden. Hierzu zählen Oxidationskatalysatoren, Entstickungskatalysatoren und Abgaspartikelfiltersysteme. Der niedrige Schwefelgehalt von < 10 ppm von Rapsöl ist beim Einsatz von Abgaskatalysatoren bei Rapsölmotoren vorteilhaft. Nachteilig wirken sich hohe Gehalte an Phosphor, Calcium und Magnesium im Rapsölkraftstoff aus, aufgrund dessen sind seit 01.01.2012 die Grenzwerte dieser Elemente in der DIN 51605 für Rapsölkraftstoff stark reduziert worden [8].

Abgasnachbehandlungssysteme können aus verschiedenen einzelnen Komponenten bestehen. Die Auswahl der einzelnen Komponenten erfolgt durch eine Vielzahl von Randbedingungen, wie zum Beispiel Anforderungen des Gesetzgebers, Betriebsbedingungen, Wartungsintensität oder Lebensdauer, und ist auch aufgrund von Wechselwirkungen zwischen den Komponenten komplex und für jeden Einsatzfall individuell zu optimieren [29]. Im Folgenden werden die einzelnen, für Traktormotoren relevanten Komponenten von Abgasnachbehandlungssystemen vorgestellt.

4.3.1 Oxidationskatalysator

Die primäre Aufgabe des Oxidationskatalysators ist die Senkung der CO- und HC-Emissionen. Bei modernen Abgasnachbehandlungssystemen erfüllt der Oxidationskatalysator jedoch auch weitere Funktionen. Hierzu zählen die Oxidation von flüchtigen Partikel-Bestandteilen zur Reduktion der Partikelemissionen, Verbesserung des Verhältnisses von Stickstoffdioxid zu Stickstoffmonoxid zur Förderung der Selektiven-Katalytischen-Reduktion (SCR) der Stickoxide, Freisetzung von Wärme durch bewusste Zufuhr von CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen zur Unterstützung der Partikelfilterregeneration und zudem ist es durch den Einsatz von geeigneten Beschichtungen möglich auch die NO_X-Emissionen in geringem Umfang zu reduzieren [29].

Oxidationskatalysatoren setzen die Energieschwelle für die Einleitung von chemischen Reaktionen (Oxidation und Reduktion) herab und erhöhen gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit [10]. Dem Beginn solcher Reaktionen geht die Anlagerung der oxidierbaren Stoffe (CO, HC) und des Sauerstoffs an der katalytisch aktiven Schicht voraus. Dadurch wird die Aktivierungsenergie der chemischen Reaktion vermindert. Im Anschluss an die katalytische Umsetzung verlassen die Endprodukte, bei CO und HC sind dies H_2O und CO_2, wieder den Katalysator, der selbst dabei nicht verändert wird.

Die Light-Off-Temperatur (erreichen von etwa 50 % Konversionsrate) liegt je nach Katalysatorzusammensetzung, Abgaszusammensetzung und Strömungsgeschwindigkeit bei ca. 150 bis 200 °C. Bei ca. 230 °C erreicht der Umsatz mehr als 90 %. Durch Oxidation von an Partikeln angelagerten Kohlenwasserstoffen kann auch die Partikelmasse um 15 bis 30 % reduziert werden [44].

Oxidationskatalysatoren sind aus einem Trägermaterial, einer Zwischenschicht („Washcoat“) und einer katalytisch aktiven Beschichtung aufgebaut. Das Trägermaterial besteht meist aus einem keramischen oder metallischen Wabenkörper durch den das Abgas geleitet wird. Das Trägermaterial ist mit einem oxidischen Washcoat, bestehend aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), Ceroxid (CeO_2) oder Zirkonoxid (ZrO_2), überzogen und weist eine größere spezifische Oberfläche auf. Auf den Washcoat ist die katalytisch aktive Schicht, zumeist bestehend aus Platin und Palladium, aufgebracht, welche die Oxidation der Schadstoffe einleitet [44][29].

4.3.2 Entstickungskatalysator

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

- NO_X-Speicherkatalysatoren
- SCR-Katalysatoren (Selective-Catalytic-Reduction)

Im Bereich der Nutzfahrzeuge erfolgt die Entstickung bevorzugt mit SCR-Systemen, aufgrund dessen wird im Folgenden nur dieses System kurz erläutert [44].

Beim SCR-Katalysator wird NO_X mit dem Reduktionsmittel Ammoniak (NH_3) in einem geeigneten Katalysator zu Stickstoff reduziert [29]. Hierbei laufen im Wesentlichen folgende Reaktionen ab:

- $4\ NO + 4\ NH_3 + O_2 \rightarrow 4\ N_2 + 6\ H_2O$
- $NO + NO_2 + 2\ NH_3 \rightarrow 2\ N_2 + 3\ H_2O$
- $6\ NO_2 + 8\ NH_3 \rightarrow 7\ N_2 + 12\ H_2O$

Die für die meisten Betriebszustände dominierenden Reaktionen sind die ersten beiden. Bei Temperaturen von unter ca. 300 °C verläuft die Reaktion überwiegend nach der zweiten Reaktionsgleichung. Zur Optimierung des Umsatzes ist daher ein NO_2/NO Verhältnis von 1 anzustreben. Dies kann durch einen vorgeschalteten Oxidationskatalysator erreicht werden.

Die Produktion von Ammoniak (NH_3) erfolgt mittels folgender Reaktionen aus einer wässrigen Lösung mit 32,5 % Harnstoff (zum Beispiel AdBlue®):

- $(NH_2)_2CO \rightarrow NH_3 + HNCO$
- $HNCO + H_2O \rightarrow NH_3 + CO_2$

Bei niedrigen Temperaturen können in einer Nebenreaktion Ablagerungen entstehen. Aufgrund dessen sind Temperaturen von über 250 °C und geeignete Katalysatoren notwendig. Während sich für die SCR-Reaktionen bereits bei 180 °C gute Umsätze mit Ammoniak erzielen lassen, sind aufgrund der vorgelagerten Ammoniak Produktion aus der Harnstofflösung höhere Temperaturen für dauerhaft gute Umsätze erforderlich [44][29].

Bei einer Überdosierung des Reduktionsmittels (kann lokal auch durch eine inhomogene Verteilung auftreten) wird dieses nicht mit NO_X umgesetzt sondern entweicht unerwünscht ohne reagiert zu haben (Ammoniak-Schlupf). Durch die Anordnung eines Oxidationskatalysators (Sperrkat) nach dem SCR-Katalysator kann Ammoniak zu Stickstoff und Wasser weiter oxidiert werden [44][29].

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

4.3.3 Partikelfiltersysteme

Partikelfiltersysteme bestehen aus dem Filtermedium, der Regenerationseinrichtung sowie einer Steuerungs- und Kontrolleinheit zur Funktionsüberwachung [3]. Zur Abscheidung der Dieselpartikel, die überwiegend einen Durchmesser von < 100 nm aufweisen, eignet sich für ausreichend große Abscheidewirkungsgrade nur die Filtration [29]. Da sich mit zunehmender Menge gefilterten Abgases auch der Strömungswiderstand über den Filter erhöht, ist es erforderlich den Filter in bestimmten Intervallen zu regenerieren. Bei der Regeneration werden die brennbaren Bestandteile des Filtrats oxidiert und es

bleiben nur Aschen zurück. Der Betrieb von Partikelfiltern lässt sich somit in Phasen der Partikelabscheidung und Regenerationsphasen einteilen.

Partikelfilter können unterschieden werden in geschlossene und offene Bauarten [39]. Bei geschlossenen Partikelfiltern muss das gesamte Abgas durch die Filterwände hindurch. Bei zunehmender Beladung lagern sich Partikel an den Wänden an und kommt es zu einer Erhöhung des Abgasgegendrucks. Wird der Filter nicht rechtzeitig regeneriert, so kann der Motorenbetrieb negativ beeinflusst werden [29]. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau eines geschlossenen keramischen Partikelfilters. Geschlossene keramische Filter können mehr als 95 % der Partikel zurückhalten.

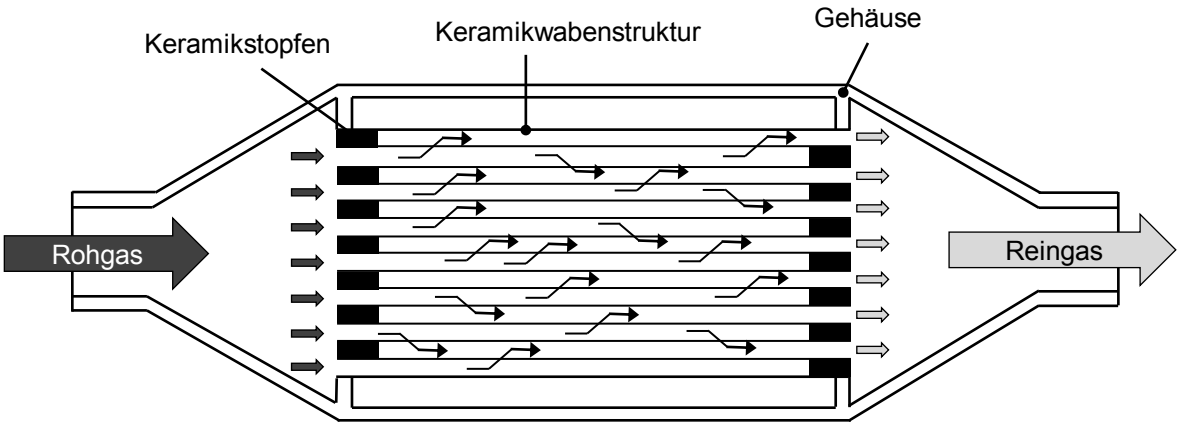


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines geschlossenen keramischen Partikelfilters

Beim offenen Partikelfilter strömt nur ein Teil des Abgases durch die Filterwand. Durch in die Filterkanäle hineinragende Taschen wird das Abgas umgelenkt und in Richtung der Filterwand beschleunigt. Bei geringer Filterbeladung tritt das Abgas durch die Wand hindurch und die Partikel werden zurückgehalten. Mit zunehmender Beladung und dadurch steigendem Durchtrittswiderstand nimmt der Anteil an unfiltriert passierendem Abgas zu. Offene Partikelfilter erreichen je nach Einsatzbedingungen Abscheidegrade zwischen etwa 30 und 70 % [39].

Für die Regeneration sind Abgastemperaturen von mehr als 600 °C am Filtereintritt erforderlich [29][39]. Derart hohe Temperaturen liegen beim üblichen Motorenbetrieb selten vor. Aufgrund dessen sind Maßnahmen vorzusehen, um die Rußabbrand-Temperatur herabzusetzen und/oder die Abgastemperatur zu erhöhen.

Um dies zu erreichen gibt es folgende Regenerationsstrategien [29]:

- Nicht-katalytische Regeneration durch Temperaturanhebung auf 550 bis 650 °C (z.B. mittels Einspritzverlaufsänderung)
- Regeneration mittels Zudosierung von Additiven in das Abgas (z. B. Cer- oder Eisenverbindungen)
- Regeneration mit NO_2 als Oxidationsmittel (Erzeugung von NO_2 durch einen vorgelagerten Oxidationskatalysator)
- Regeneration mit katalytisch beschichtetem Filter zur Herabsetzung der notwendigen Rußabbrandtemperatur

5 Material und Methode

5.1 Traktoren

Die Untersuchungen zum Emissions- und Betriebsverhalten von Abgasstufe IIIA Traktoren sollten an insgesamt vier pflanzenöltauglichen Traktoren durchgeführt werden. Die John Deere Werke Mannheim stellten hierzu zwei John Deere 6930 Premium Traktoren für die Untersuchungen zur Verfügung. Einsatzorte der Traktoren waren das LVFZ Kringell und die Versuchsstation Grub. Das LVFZ Achselschwang beschaffte im zweiten Halbjahr 2009 einen Fendt 820 Vario^{greentec}, der ebenfalls mit in das Projekt eingebunden wurde. Die BayWa AG stellte in Zusammenarbeit mit der AGCO Deutschland GmbH vom 01. Dezember 2009 bis zum 15. März 2011 einen Fendt 820 Vario^{greentec} zur Verfügung. Die Maschine stand primär für die Emissionsmessungen zur Verfügung und wurde im Feldbetrieb bei einem Lohnunternehmer eingesetzt.

Tabelle 2 zeigt die Traktoren und die Standorte für die Feldversuche.

Tabelle 2: Übersicht zu den Traktortypen und Einsatzorten im Feldversuch

Traktor	Einsatzort	Kurzbez.
John Deere 6930 Premium	LVFZ Kringell	JD-K
John Deere 6930 Premium	Versuchsstation Grub	JD-G
Fendt 820 Vario^{greentec}	LVFZ Achselschwang	FE-A
Fendt 820 Vario^{greentec}	Agrolohn Kobler GmbH, Neukirchen v. Wald	FE-N

5.1.1 John Deere 6930 Premium

Bei den zwei John Deere 6930 Premium Traktoren (JD-K, JD-G) handelte es sich um Prototypen, welche direkt vom Hersteller auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst wurden. Die Traktoren erfüllen nach Angaben des Herstellers die Abgasstufe IIIA und sind mit einem Common-Rail-Einspritzsystem und einer gekühlten, externen Abgasrückführung ausgestattet. Die Traktoren dienten gleichzeitig als Versuchsträger im EU-Projekt 2nd VegOil und mussten laut Herstellervorgabe mit einem speziellen, additivierten Pflanzenölkraftstoff betrieben werden. Die technischen Daten der Traktoren sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Technische Daten der John Deere 6930 Premium Traktoren

Traktortyp	John Deere 6930 Premium
Motortyp	PowerTech PLUS
Anzahl der Zylinder / Hubraum in ccm	6 / 6788
Nennleistung in kW / PS	134 / 182
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2008 bzw. 2009
Abgasstufe	IIIA
Getriebe	Lastschaltgetriebe AutoQuad Plus

5.1.2 Fendt 820 Vario^{greentec}

Die beiden Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-A, FE-N) sind Serienfahrzeuge, die für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff nach DIN V 51605 freigegeben sind. Die AGCO GmbH vertreibt diese Traktoren seit Mitte 2008. Die Traktoren erfüllen die Abgasstufe IIIA und sind mit einem Common-Rail-Einspritzsystem und einer gekühlten, externen Abgasrückführung ausgestattet. An den Fahrzeugen ist ein Tank für Dieselkraftstoff mit einem Fassungsvermögen von 100 l und ein Tank für Rapsölkraftstoff mit 340 l installiert. In Abhängigkeit von Rapsölkraftstofftemperatur und Motordrehmoment/-drehzahl schaltet das integrierte Kraftstoffmanagementsystem zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoffbetrieb um. Für besondere Betriebssituationen, z. B. bei leerem Dieseltank, besteht die Möglichkeit das Kraftstoffmanagementsystem zu deaktivieren und unabhängig vom Motorbetriebszustand mit Rapsölkraftstoff zu fahren. Tabelle 4 enthält die technischen Daten der Traktoren.

Tabelle 4: Technische Daten der Fendt 820 Vario^{greentec} Traktoren

Traktortyp	Fendt 820 Vario^{greentec}
Motortyp	Natural Fuel Engine
Anzahl der Zylinder / Hubraum in ccm	6 / 6057
Nennleistung in kW / PS	152 / 207
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2008 bzw. 2009
Abgasstufe	IIIA
Getriebe	stufenlos

5.2 Betriebsdatenerfassung

Die Dokumentation der Betriebsdaten erfolgte durch ein Tagebuch und zusätzlich durch eine elektronische Betriebsdatenerfassung, welche in die Traktoren eingebaut wurde.

5.2.1 Betriebstagebuch

Von den Betreibern der Traktoren JD-K, JD-G und FE-A wurde ein Betriebstagebuch geführt, um die mit den Traktoren durchgeführten Arbeiten zu dokumentieren und Daten zu Wartung und gegebenenfalls auftretenden Schäden zu erheben. Das Betriebstagebuch basiert auf den im Rahmen des EU-Projektes 2nd VegOil verwendeten Tagebuches [36] und wurde in bestimmten Bereichen erweitert.

In den Betriebstagebüchern werden folgende Daten täglich dokumentiert:

- Betriebsstunden
- Tankmengen an Rapsöl und Diesel
- Motorölstand, Motorölnachfüllmenge und Motorölwechsel
- Durchgeführte Arbeiten und Einstellungen der Arbeitsgeräte
- Wartungsarbeiten und Reparaturen
- Fehlercodes, insofern vorhanden

Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus dem Betriebstagebuch.

Betriebstagebuch

Einsatzort: LVFZ Achselschwang **Traktortyp:** Fendt 820 greentec **Seriennummer:** 731275441

Datum	Betriebs stunden	Getankte Menge (Liter) Rapsöl	Diesel	Ölstand mm über min	Motoröl (Liter) gewechselt	aufgefüllt	durchgef. Arbeiten *)	Wartungsarbeiten / Reparaturen / Sonstiges /
1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.01.10								
Einstellung Arbeitsgerät:				Schlag:			Fehlercodes:	
02.01.10								
Einstellung Arbeitsgerät:				Schlag:			Fehlercodes:	
03.01.10								
Einstellung Arbeitsgerät:				Schlag:			Fehlercodes:	
04.01.10								
Einstellung Arbeitsgerät:				Schlag:			Fehlercodes:	
05.01.10								
Einstellung Arbeitsgerät:				Schlag:			Fehlercodes:	
06.01.10								
Einstellung Arbeitsgerät:				Schlag:			Fehlercodes:	
07.01.10								
Einstellung Arbeitsgerät:				Schlag:			Fehlercodes:	

durchgef. Arbeiten *)

Nr.	Arbeit
1	Pflug
2	Grubber
3	Scheibenegge
4	Straßentransport
5	Düngerstreuer
6	Feldspritze
7	Kreiselegge
8	Sämaschine
9	Ballenpresse
10	Mähwerk
11	Schwader, Wender
12	Futterladewagen
13	Güllewagen
14	Miststreuer
15	Frontlader
16	.....

Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Betriebstagebuch zur Dokumentation von durchgeführten Arbeiten und Wartungen

5.2.2 Elektronisches Datenerfassungssystem

Die zwei John Deere 6930 Premium Traktoren wurden mit einem Datenerfassungssystem der Firma Sensor-Technik Wiedemann GmbH ausgestattet, welches über GPRS (General Packet Radio Service) die Daten selbstständig in bestimmten Zeitintervallen an

einen Server sendet. Das TFZ rief in regelmäßigen Abständen die aufgezeichneten Daten vom Server ab. Die aufzuzeichnenden Kenngrößen werden teilweise aus dem CAN-Bus ausgelesen und teilweise direkt über eigens angebrachte Sensoren ermittelt. Die Aufzeichnungsrate der Datenerfassung ist frei wählbar und beträgt 1 Hz für bestimmte Kenngrößen wie zum Beispiel Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch.

Für den Fendt 820 Vario^{greentec} Traktor FE-A konnte die Datenerfassung erst im Spätsommer 2010 installiert werden, da es bei der Abklärung technischer Details zu längeren Verzögerungen kam.

Tabelle 5 zeigt eine Übersicht zu den aufgenommenen Messgrößen der drei Abgasstufe IIIA Traktoren.

Tabelle 5: Aufgenommene Messgrößen der Traktoren

Messgröße	JD-K	JD-G	FE-A
Abgastemperatur Zylinder 1 bis 6	✓	-	-
Umgebungstemperatur	✓	✓	-
Kraftstofftemperatur am Kraftstofffilter	✓	✓	✓
Motoröltemperatur	✓	✓	✓
Ladelufttemperatur	✓	✓	✓
Betriebsstunden	✓	✓	✓
Fahrzeuggeschwindigkeit	-	-	✓
Motordrehzahl	✓	✓	✓
Kraftstoffverbrauch	✓	✓	✓
Kraftstofftemperatur an der Hochdruckpumpe	✓	✓	-
Motoröldruck	✓	✓	✓
Kühlmitteltemperatur	✓	✓	✓
Heckzapfwellengeschwindigkeit	✓	✓	✓
Druck der Ladeluft	✓	✓	✓
Sollwert-Abgasrückführrate	-	-	✓
Modus Diesel-Rapsöl-Betrieb	-	-	✓
Common-Rail-Druck	-	-	✓

5.3 Betriebsstoffe

5.3.1 Rapsölkraftstoff

Die beiden John Deere Traktoren wurden im Feldbetrieb gemäß Vorgabe im Rahmen des europäischen „2nd VegOil“ Projektes mit einem kaltgepressten, additivierten Rapsölkraftstoff aus einer dezentralen Ölmühle aus Österreich betrieben. Durch ein spezielles Nachbehandlungsverfahren wurden im Rapsölkraftstoff die Gehalte an Phosphor, Magnesium und Calcium reduziert. Die Zugabe der unterschiedlichen Additivpakete für die beiden Traktoren erfolgte durch das TFZ. Bei Anlieferung jeder Charge wurde vor der Zugabe der Additivmischung eine Probe gezogen und analysiert, um die Qualität zu prüfen. Neben Rapsölkraftstoff wurde bei einem Traktor auch Maiskeimöl und Jatrophaöl während des Feldbetriebs eingesetzt.

Der Traktor FE-A wurde mit Rapsölkraftstoff aus dezentralen Ölmühlen aus der näheren Umgebung betrieben, auch hier wurden bei Anlieferung frischer Chargen Rapsölkraftstoffproben gezogen und hinsichtlich qualitätsbeschreibender Parameter untersucht.

Die Qualitätseigenschaften der Rapsölkraftstoffe, die bei den Emissions- und Leistungsmessungen am Traktorenprüfstand des TFZ verwendet wurden, sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Qualität der für die Emissions- und Leistungsmessungen verwendeten Rapsölkraftstoffe

Kenngröße	Einheit	Chargennummer			
		1	2	3	4
Dichte	kg/m³	920	920	920	920
Flammpunkt (Pensky-Martens)	°C	274	237	274	268
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm²/s	35,4	34,5	34,5	35,5
Heizwert	MJ/kg	37,2	37,2	37,1	37,1
Zündwilligkeit (Abgeleitete Cetanzahl)	-	57,9	48,5	47,1	44,1
Iodzahl	g Iod/100g	107	111	111	109
Gesamtverschmutzung	mg/kg	6	3	2	21
Säurezahl	mg KOH/g	3,1	0,9	1,3	0,0
Oxidationsstabilität	h	8,1	6,4	7,0	10,1
Wassergehalt	mg/kg	640	580	440	160
Schwefelgehalt	mg/kg	8	3	<1	3
Phosphorgehalt	mg/kg	2	<0,5	8	<0,5
Summengehalt Calcium und Magnesium	mg/kg	3	<0,5	16	<0,5

Charge 1 wurde im Zeitraum Januar bis April 2009, Charge 2 von Januar 2010 bis Februar 2010 (Traktoren JD-K und JD-G), Charge 3 von Januar 2010 bis März 2010 (Traktoren FE-A und FE-N) und Charge 4 von November 2010 bis Juni 2011 verwendet. Mit Ausnahme der ersten Charge, bei der der Grenzwert der Säurezahl nicht eingehalten wurde, erfüllten alle Rapsölkraftstoffe die Anforderungen der zum Zeitpunkt gültigen DIN 51605. Die bei der Analyse verwendeten Prüfverfahren und entsprechenden Grenzwerte der DIN 51065 sind in Anhang 1 aufgeführt.

5.3.2 Dieselkraftstoff

Für vergleichende Emissions- und Leistungsmessungen wurde am Traktorenprüfstand des TFZ auch Dieselkraftstoff verwendet. Hierbei kam ein Referenzdiesel der Qualität CEC RF 06-03 zur Anwendung, der die Anforderungen nach 97/68/EG als Prüfkraftstoff für Typgenehmigungen von Motoren der Abgasstufe IIIB und IV erfüllt. Tabelle 7 zeigt die Qualität des verwendeten Referenzdieselkraftstoffes. Die zur Analyse verwendeten Prüfverfahren, sowie ausgewählte Anforderungen nach 97/68/EG sind in Anhang 2 aufgeführt. Alle verwendeten Chargen erfüllten die Vorgaben.

Tabelle 7: Qualität des verwendeten Referenzdieselkraftstoffes

Kenngröße	Einheit	Chargennummer 1	2	3	4
Dichte	kg/m³	834	837	835	837
Flammpunkt	°C	94	64	72	65
Cetanzahl	-	53	53	54	52,1
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm²/s	3,13	2,45	2,31	2,50
Koksrückstand	Masse-%	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cold Filter Plugging Point	°C	-21	-27	-27	-30
Schwefelgehalt	mg/kg	2,2	6,8	5,8	8,5
Oxidationsstabilität	mg/ml	<0,001	0,014	0,010	0,012
Schmierfähigkeit (HFFR)	µm	266	362	389	379
PAK[1)]	Masse-%	4,6	5,5	5,3	3,2
Aschegehalt	Masse-%	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Wassergehalt	Masse-%	0,0028	0,0024	0,0023	0,0030
Fettsäuremethylestergehalt	-	OK	OK	OK	OK

1) PAK: Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

5.3.3 Motoröl

Die im Rahmen des Feldbetriebs eingesetzten Motorenöle der Traktoren JD-G, JD-K und FE-A sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Verwendete Motorenöle im Rahmen des Feldbetriebs

Traktor	Motorölhersteller	Motorölbezeichnung
JD-G	Lubrizol	ACEA E9
JD-K	Lubrizol	ACEA E7 und ACEA E9[1)]
FE-A	Tectrol	Super Truck 1040

[1)] *Wechsel der Motorölsorte während des Feldbetriebs*

Die Motorölqualität wurde während des Feldbetriebs mehrmals untersucht, um Aussagen zum Motorölzustand treffen zu können. Darüber hinaus können anhand der Analysen Rückschlüsse auf übermäßigen Verschleiß gezogen werden. Eine Auswahl der untersuchten Parameter und die dabei verwendeten Analysemethoden sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Ausgewählte Untersuchungsparameter zur Beurteilung der Motorqualität 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

5.4 Prüfstand

Die Abgasemissionsmessungen wurden 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 erfolgten in Anlehnung an die Richtlinie 2000/25/EG bzw. 97/68/EG. Der Aufbau des Prüfstandes und die technischen Merkmale von Prüfstandsbestandteilen entsprachen bei den durchgeführten Emissionsmessungen im Wesentlichen denen des Vorgängerprojekts und sind in

THUNEKE et al. (2009) [51] ausführlich beschrieben. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht des Prüfstandes.

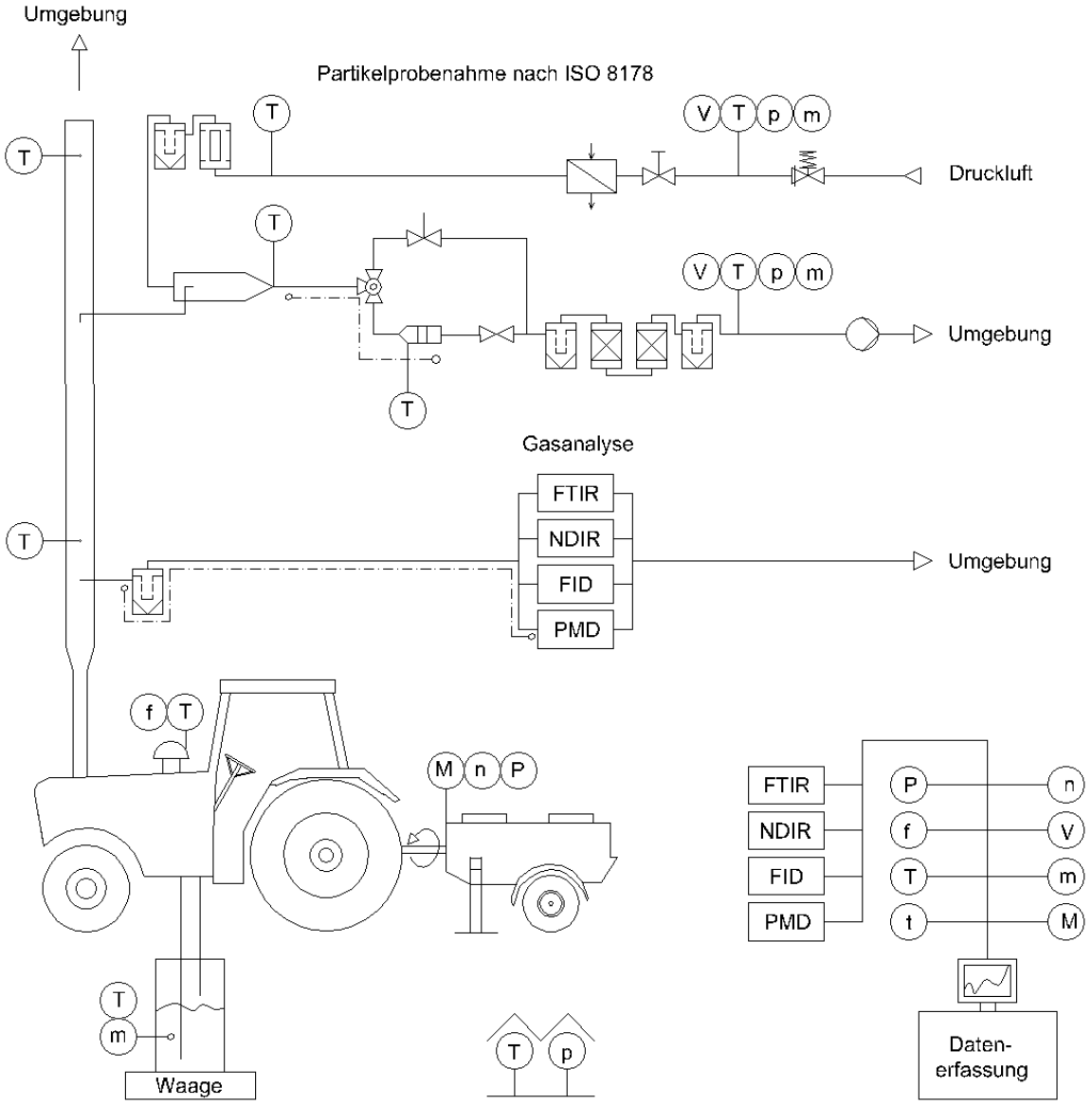


Abbildung 4: Aufbau des Emissionsprüfstands am Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

5.4.1 Bestimmung von Motorleistung, Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch

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

Da bei diesem Vorhaben vor allem die Abgasemissionen von Traktormotoren, die in der Praxis in Betrieb sind, getestet werden sollten, war eine Bestimmung der Motorleistung im ausgebauten Zustand nicht beabsichtigt. Daher waren Abweichungen zum Typprü-

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

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

p_s atmosphärischer Druck in kPa

T_a Umgebungstemperatur in K

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

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

Der Kraftstoffverbrauch wurde gravimetrisch mittels einer Waage (Mettler-Toledo Tischwaage KB60.2, max. 60 kg, bzw. PESA WT 1 B2.2, max. 60 kg) erfasst. Dazu wurde am Traktor das Kraftstoffsystem am Tank aufgetrennt und Kraftstoffvorlauf und -rücklauf in einen Versuchskraftstoffbehälter geleitet, dessen Gewicht über die Waage kontinuierlich ermittelt wird.

5.4.2 Gasanalyse

Zur Gasanalyse wurde ein System bestehend aus konventionellen Analysatoren verwendet. Seit April 2010 wurde zusätzlich ein Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop (FTIR) für die Analyse der gasförmigen Emissionen eingesetzt. Das FTIR bietet den Vorteil, dass nicht nur die gesetzlich limitierten Abgaskomponenten Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_X) und Kohlenwasserstoffe (HC) erfasst werden, sondern auch gesetzlich nicht limitierte Emissionen wie z. B. Formaldehyd, Acetaldehyd, Lachgas und Ammoniak gemessen werden können.

Eine Übersicht über die technischen Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile gibt Tabelle 10. Alle Messwerte werden kontinuierlich in einem Ab-

stand von 1 Sekunde erfasst und mit Hilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW™) aufgezeichnet.

Tabelle 10: Technische Daten der Messgeräte zur Analyse der gasförmigen Abgasbestandteile bei den Emissionsmessungen

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/ Messverfahren
CO_2	BINOS 1004 Fa. Fisher-Rosemount	Nicht-Dispersives-Infrarot-Spektroskop (NDIR)
CO	BINOS 1001 Fa. Fisher-Rosemount	Nicht-Dispersives-Infrarot-Spektroskop (NDIR)
NO_X [1)]	Modell 951 A Fa. Beckmann Industrial	Chemolumineszenz-Detektor (CLD)
O_2	Oxynos 100 Fa. Fisher-Rosemount	Paramagnetischer Detektor (PMD)
HC [2)]	FID 3-100 Fa. J.U.M. Engineering	Flammenionisations-Detektor (FID)
CO_2 CO NO NO_2 N_2O NH_3 Formaldehyd	SESAM 4 Fa. AVL Emission Test Systems	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop (FTIR)

[1)] *$NO_X = NO + NO_2$*
[2)] *Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas*

5.4.3 Partikelmassebestimmung

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

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

Die Partikelabscheidung erfolgt in einem Filtergehäuse durch ein im Abstand von 17 mm hintereinander angeordnetes Filterpaar (Hauptfilter und Nachfilter). Zur Abscheidung dienen teflonbeschichtete Glasfaserfilter (Pall Life Sciences, EmfabTM 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 mit Hilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW^{TM}) aufgezeichnet.

5.5 Prüfzyklen

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Messungen in Anlehnung an ISO 8178-1 unter Verwendung des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4 durchgeführt. Dieser Prüfzyklus wird unter anderem auch vom Gesetzgeber für die Prüfung von Motoren landwirtschaftlicher Zugmaschinen herangezogen. Der Prüfzyklus besteht aus acht Prüfphasen, die in einer festgelegten Reihenfolge einzustellen sind. Bei den ersten vier Prüfphasen wird die vom Hersteller angegebene Nenndrehzahl angefahren und verschiedene Leistungen eingestellt. Für drei weitere Betriebspunkte wird eine Zwischendrehzahl angefahren. Die Zwischendrehzahl wird dort festgelegt, wo der Motor sein höchstes Drehmoment besitzt. Liegt das höchste Drehmoment jedoch bei unter 60 % der Nenndrehzahl so wird die Zwischendrehzahl bei 60 % der Nenndrehzahl festgelegt, liegt sie bei mehr als 75 % der Nenndrehzahl werden 75 % der Nenndrehzahl als Zwischendrehzahl definiert. Auch bei der Zwischendrehzahl werden drei verschiedene Leistungen eingestellt. Die letzte Prüfphase des Prüfzyklus ist der Leerlaufbetriebspunkt. Bei der Berechnung der spezifischen Emissionen des Prüfzyklus fließen die Messwerte aus den einzelnen Prüfphasen mit unterschiedlicher Gewichtung in das Endergebnis ein. Tabelle 11 gibt einen Überblick zu den Vorgaben des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178, in Abbildung 5 sind die Prüfphasen schematisch im Motorenkennfeld eingezeichnet.

Tabelle 11: C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4

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

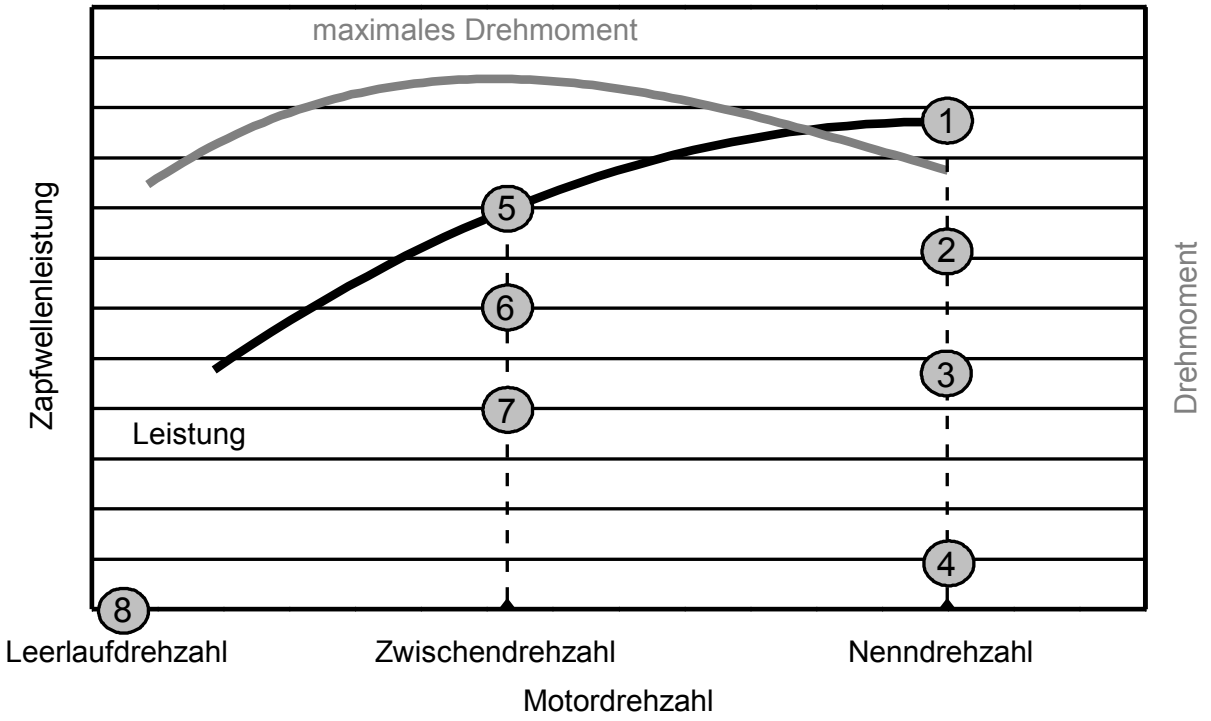


Abbildung 5: Schematische Darstellung der acht Prüfphasen des C1-Prüfzyklus nach ISO 8178-4

Für die Verweildauer auf der jeweiligen Prüfphase wird nach ISO 8178-4 ein Mindestzeitraum von zehn Minuten angegeben. Bei Emissionsmessungen am Gesamtsystem Traktor reicht dieser Mindestzeitraum allerdings nicht aus, um in allen Prüfphasen ein stabiles Emissionsbild zu erreichen [13]. Aus diesem Grund wurden bei der Durchführung der Messung für beide Traktortypen feste Verweildauern auf den einzelnen Prüfphasen definiert, bevor mit der Partikelprobenahme (Einzelfiltermethode für jede Prüfphase nach ISO 8178-1) begonnen wurde. Für die Traktoren wurden die Partikel über einen Zeitraum von zehn Minuten pro Prüfphase gesammelt, um für jede Prüfphase in den Bereich der nach ISO 8178-1 empfohlenen Filterbeladung zukommen. In Tabelle 12 sind für beide Traktoren und jede Prüfphase die angefahrenen Drehzahlen sowie die Verweildauer auf den einzelnen Prüfphasen vor den Partikelprobenahmen und die Partikelprobenahmedauer aufgeführt. Zur Auswertung der gasförmigen Abgasbestandteile wurden gemäß den Vorgaben der ISO 8178 die Messwerte der letzten drei Minuten der jeweiligen Prüfphase herangezogen.

Tabelle 12: Eingestellte Drehzahlen, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für die Traktoren

Prüfphase	Eingestellte Drehzahl in min^{-1}		Verweildauer vor Partikelprobenahme in min	Partikelprobe-nahmedauer in min
	John Deere	Fendt		
1	2100	2100	30	10
2	2100	2100	6	10
3	2100	2100	6	10
4	2100	2100	10	10
5	1575	1350	15	10
6	1575	1350	10	10
7	1575	1350	10	10
8	850	800	10	10

Um den Einfluss von verschiedenen Prüfzyklen auf das Ergebnis der spezifischen Emission zu prüfen, wurde neben dem vorgestellten 8-Phasen-Prüfzyklus auch der 6-Stufen-Test der ehemaligen eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), jetzt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), in der Schweiz verwendet. In Tabelle 13 sind die Messpunkte des FAT 6-Stufen-Tests dargestellt.

Tabelle 13: Messpunkte und deren Gewichtung nach dem FAT 6-Stufen-Test [22]

Prüfpunkt	1	2	3	4	5	6
Drehzahl[1)]	95 %	95 %	75 %	75 %	50 %	Leerlauf
Motorlast	80 %	40 %	90%	45 %	35 %	0 %
Gewichtung	20 %	15 %	12 %	18 %	15 %	20 %

[1)] bezogen auf die vom Traktorhersteller angegebene Nenndrehzahl

Die Messungen nach diesem Zyklus werden mit Traktor JD-K durchgeführt. Unter Anwendung der Vorgaben ergaben sich die in Tabelle 14 aufgeführten Drehzahlen, welche mit diesem Traktor angefahren wurden. Darüber hinaus wurden auch bei Anwendung dieses Prüfzyklus vor Beginn der Partikelprobenahme gleiche Verweildauern zur Stabilisierung des Traktors auf der jeweiligen Prüfphase eingehalten.

Tabelle 14: Eingestellte Drehzahlen, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer bei Anwendung des FAT 6-Stufen-Tests für Traktor JD-K

Prüfphase	Eingestellte Drehzahl in min^{-1}	Verweildauer vor Partikelprobenahme in min	Partikelprobe-nahmedauer in min
1	1995	30	10
2	1995	10	10
3	1575	10	10
4	1575	10	10
5	1050	10	10
6	850	10	10

Weiterhin sollte anhand der Daten zu Drehzahl und Kraftstoffverbrauch, die mit der Betriebsdatenerfassung aufgezeichnet werden, ein neuer Prüfzyklus definiert werden, der dem Einsatzprofil der Traktoren näher kommt. Hierzu wurden in einem ersten Schritt die Emissionen an insgesamt 31-Punkten im Motorkennfeld des Traktors JD-K erfasst. Abbildung 6 gibt einen Überblick zu den eingestellten Prüfpunkten, weitere Informationen zu eingestellten Drehzahlen, Motorlast und Verweildauern vor der Partikelprobenahme sind in Anhang 3 aufgeführt.

Die mit der Betriebsdatenerfassung ermittelten Werte wurden kategorisiert und den 31 Punkten zugeordnet. Mit Hilfe der in der Praxis auftretenden Häufigkeit der Betriebszustände wurden die Prüfpunkte zur Berechnung von spezifischen Emissionen gewichtet. Die Vorgehensweise zur Berechnung entspricht dem Vorgehen nach ISO 8178.

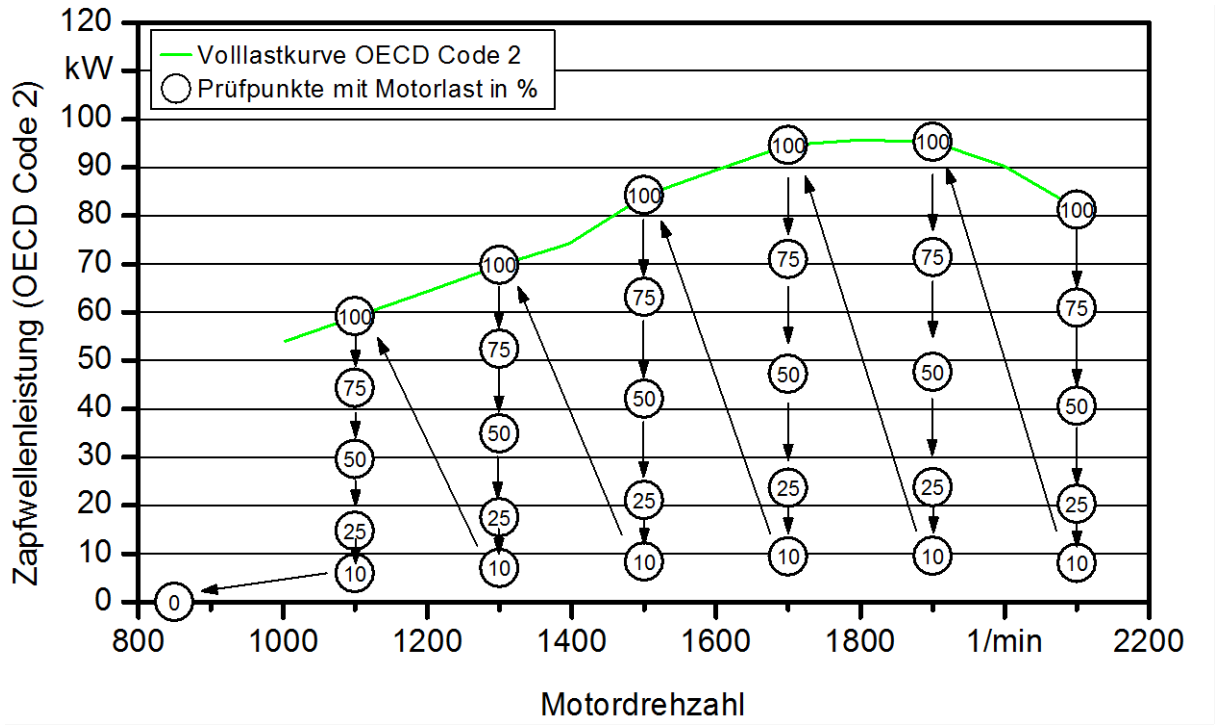


Abbildung 6: Prüfpunkte im Motorenkennfeld zur detaillierten Erfassung des Emissionsverhaltens bei 31 Betriebszuständen

5.6 Abgasnachbehandlung (AGN)

Die Traktoren JD-K und JD-G wurden von den John Deere Werken Mannheim mit einem experimentellen Abgasnachbehandlungssystem ausgestattet. Das Abgasnachbehandlungssystem beider Traktoren bestand im Wesentlichen aus einem Oxidationskatalysator, einer Harnstoffdosiereinrichtung, einem offenen Partikelfilter, einem SCR-Katalysator und den notwendigen Steuer- und Regelungseinrichtungen. In der Ausführung der einzelnen Komponenten unterschieden sich die AGN-Systeme zum Teil. Mit Hilfe dieses AGN-Systems, welches mit diesem Stand nicht in Serie gehen wird, sollten erste Erfahrungen zum Einsatz von komplexen AGN-Systemen in Verbindung mit Pflanzenöl gesammelt werden. Zudem sollte der Abgasstufe IIIA Motor durch das nachgeschaltete AGN-System auch die Grenzwerte der Abgasstufe IIIB einhalten können.

Abbildung 7 zeigt eine schematische Übersicht zum Aufbau der verwendeten AGN-Systeme.

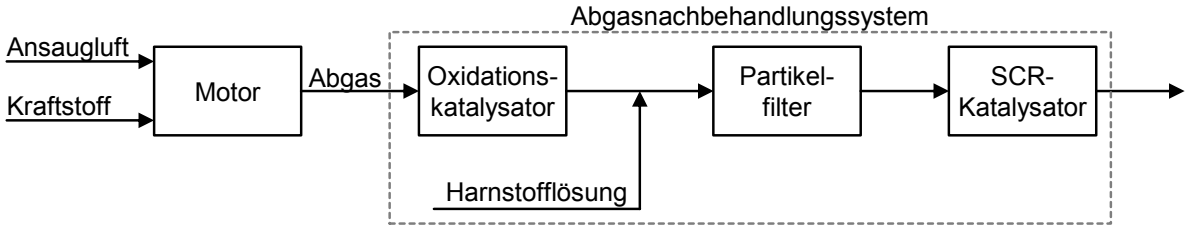


Abbildung 7: Schematische Übersicht zum Aufbau des Abgasnachbehandlungssystems

Für die Erfassung der gasförmigen Schadstoffkomponenten nach der Abgasnachbehandlung wurde das FTIR-Gasanalysesystem (siehe Tabelle 10) und zur Bestimmung der Partikelmasse-Emissionen wurde der in Kapitel 5.4.3 beschriebene Teilstromverdünnungstunnel verwendet.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Betriebsverhalten im Praxiseinsatz

Mit Ausnahme des Traktors FE-N wurden für alle weiteren Traktoren Betriebstagebücher geführt um den Feldbetrieb der Traktoren zu dokumentieren. Für die Traktoren JD-K und JD-G konnte das Betriebsverhalten für einen Zeitraum von drei Jahren von 2009 bis 2011 dokumentiert werden. Der zu einem späteren Zeitpunkt zusätzlich in das Projekt aufgenommene Traktor FE-A wurde zwei Jahre im Feldbetrieb von 2010 bis 2011 begleitet. Der zweite zusätzliche Traktor FE-N diente primär der Ermittlung des Emissionsverhaltens. Im Rahmen des Feldbetriebs im Jahr 2010 konnten für diesen Traktor keine auswertbaren Daten ermittelt werden. Der Traktor FE-N wird aufgrund dessen bei der weiteren Ergebnisdarstellung zum Betriebsverhalten vernachlässigt.

Die Traktoren JD-K und JD-G absolvierten in den drei Jahren 1194 beziehungsweise 1277 Bh. Der Traktor FE-A in zwei Jahren 1454 Bh. Bei den Unterschieden zwischen dem John Deere Traktor und dem Fendt Traktor bleibt zu berücksichtigen, dass die John Deere Traktoren längere Betriebszeiten auf dem Traktorenprüfstand absolvierten und aufgrund dessen zum Teil erst im späten Frühjahr an die Betreiber weitergegeben wurden. Tabelle 15 gibt einen Überblick zu den im Feldbetrieb auf den staatlichen Betrieben absolvierten Betriebsstunden.

Tabelle 15: Im Feldbetrieb absolvierte Betriebsstunden der Traktoren (ohne Betriebsstunden am Traktorenprüfstand)

Traktor	2009	2010	2011	Gesamt
JD-K	450 Bh	387 Bh	352 Bh	1189 Bh
JD-G	462 Bh	495 Bh	319 Bh	1276 Bh
FE-A	-	748 Bh	706 Bh	1454 Bh

Die drei Traktoren verbrauchten während des Beobachtungszeitraumes am Feld insgesamt 47.869 l Pflanzenöl und 7048 l Dieselkraftstoff. Mit Ausnahme des Traktors JD-K war das verwendete Pflanzenöl Rapsöl. Bei Traktor JD-K wurden im Jahr 2010 neben Rapsöl auch ca. 1700 l Maiskeimöl verwendet und im Jahr 2011 wurde der Traktor ausschließlich mit Jatrophaöl (4791 l) betrieben. Tabelle 16 gibt einen Überblick zu den jährlich im Feldeinsatz verbrauchten Kraftstoffmengen für die Traktoren JD-K, JD-G und FE-A.

Tabelle 16: Kraftstoffverbrauch der Traktoren während des Feldeinsatzes

	Pflanzenölverbrauch in l			Dieselkraftstoffverbrauch in l		
Traktor	2009	2010	2011	2009	2010	2011
JD-K	6238	4371	4767	0	0	0
JD-G	6230	5852	4451	0	460	0
FE-A	-	9863	6097	-	1233	5355

Der überwiegende Anteil des Dieselkraftstoffes wurde von Traktor FE-A im Frühjahr 2011 aufgrund von Lieferschwierigkeiten von Rapsölkraftstoff, welches die Anforderungen der DIN 51605 und der Nachhaltigkeitszertifizierung erfüllen musste, verbraucht. Der Anteil an Dieselkraftstoff am Gesamtkraftstoffverbrauch lag für die mit einem Ein-Kraftstoff-System ausgestatteten Traktoren zumeist bei 0 %. Bei Traktor JD-G wurden aufgrund des Verdachtes von Ablagerungen im Kraftstoff oder Einspritzsystem im Jahr 2010 zwei Tankfüllungen Dieselkraftstoff verwendet. Der Dieselkraftstoffanteil des durch ein Zwei-Kraftstoff-System charakterisierten Traktors FE-A betrug im Jahr 2010 11,1 %.

6.1.1 Einsatzprofile im Feldbetrieb

Die Traktoren wurden von den Betreibern je nach anfallenden Arbeiten verwendet. Mit Hilfe der im Betriebstagebuch aufgeführten Tabelle (siehe Abbildung 3) erfolgte die Einteilung der Arbeiten, auf Basis dessen die Einsatzbedingungen dokumentiert wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einigen Arbeiten Gerätekombinationen verwendet wurden, welche sich nicht eindeutig in das definierte Schema einordnen lassen. So kam beispielsweise beim Traktor JD-G im Betrieb auf der Versuchsstation Grub häufig eine Kombination aus Frontpacker, Kreiselegge und Sämaschine zum Einsatz. Die Zuordnung erfolgte in solchen Fällen zu einer der Arbeiten, in letztem Beispiel der Kreiselegge.

Der Traktor JD-K leistete mit einem Anteil von etwa 37 % die meisten Betriebsstunden im Rahmen von Transportarbeiten. Daneben wurde er zu insgesamt etwa 25 % zur Bodenbearbeitung, zu ca. 20 % zur Ausbringung von Wirtschaftsdüngern und zu ca. 15 % im Bereich der Futterwerbung und Fütterung verwendet.

Der Traktor JD-G wurde knapp die Hälfte seiner Betriebsstunden im Bereich der Bodenbearbeitung eingesetzt. Weitere größere Einsatzbereiche stellten mit 27 % Transportaufgaben und mit etwa 16 % Ausbringung von Wirtschaftsdünger dar.

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die mit dem Betriebstagebuch erfassten Arbeiten anteilig auf die im Feldeinsatz absolvierten Betriebsstunden für die Traktoren JD-K und JD-G dargestellt.

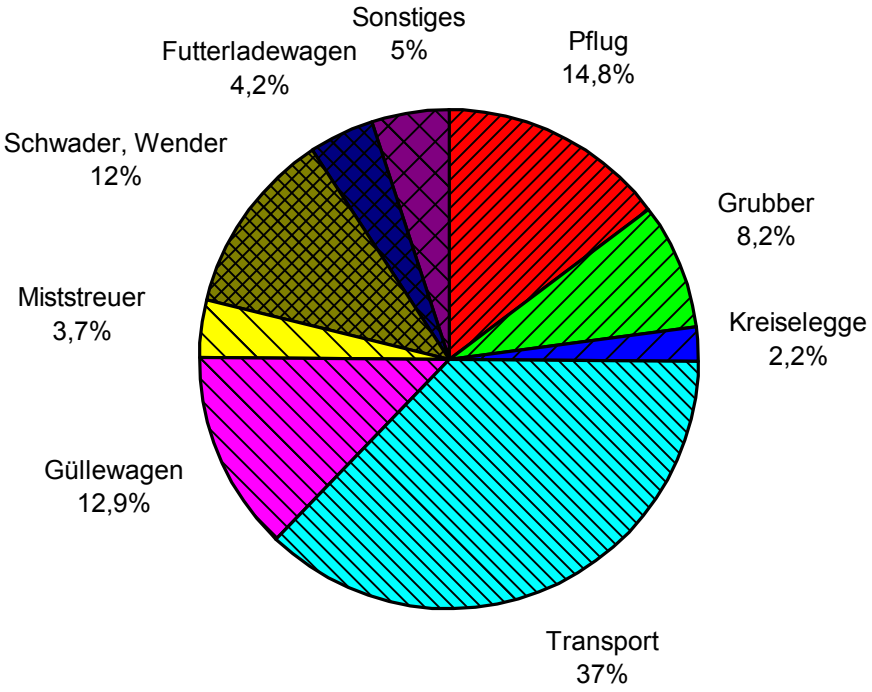


Abbildung 8: Anteil der Arbeiten des Traktors JD-K in den Betriebsjahren 2009 bis 2011

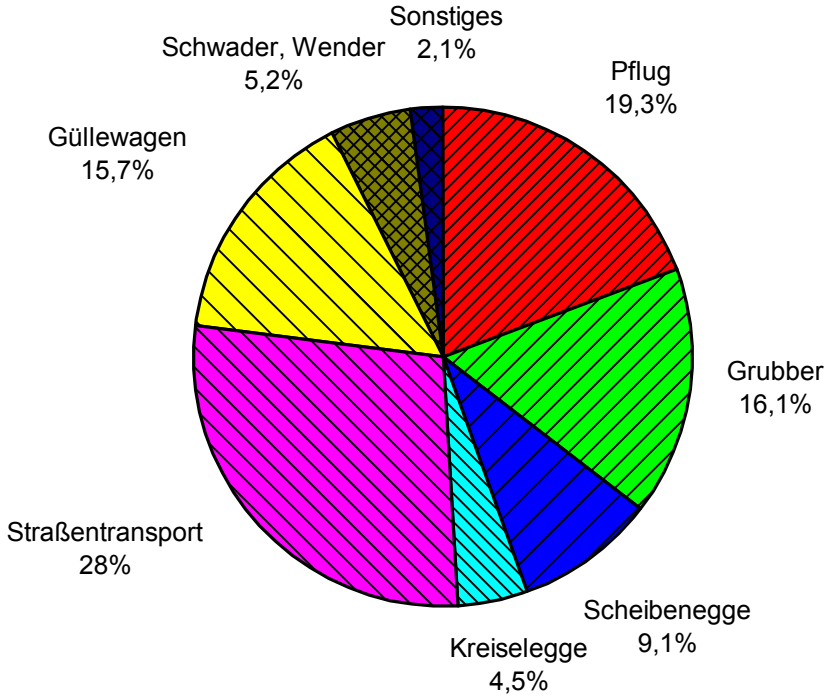


Abbildung 9: Anteil der Arbeiten des Traktors JD-G in den Betriebsjahren 2009 bis 2011

Der Traktor FE-A leistete mit etwa 46 % die meisten Betriebsstunden im Bereich der Bodenbearbeitung, größtenteils in Form von Arbeiten mit dem Pflug. Wie auch bei den anderen beiden Traktoren, nehmen Transportaufgaben mit etwa 26 % ebenfalls einen grö-

ßeren Anteil am Einsatzspektrum ein. Die Ausbringung von Wirtschaftsdünger erfolgte zu 11 % der Einsatzzeit. Im Unterschied zu den Traktoren JD-K und JD-G wurde dieser Traktor häufig auch für Mäharbeiten verwendet. Abbildung 10 zeigt die Anteile der mit dem Traktor durchgeführten Arbeiten über die Betriebsdauer im Feldeinsatz.

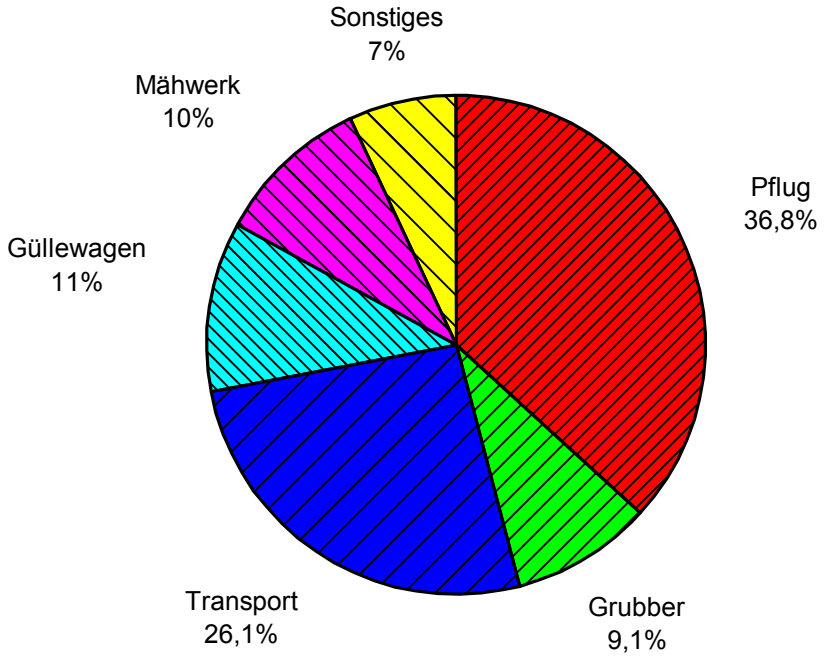


Abbildung 10: Anteil der Arbeiten des Traktors FE-A in den Betriebsjahren 2010 bis 2011

Alle Traktoren weisen ein unterschiedliches Einsatzspektrum auf, welches auf die Anforderungen der Betreiber und die Ausstattung der Traktoren zurückzuführen ist.

6.1.2 Erfasste Betriebsdaten

Im Folgenden Abschnitt werden die mit der elektronischen Betriebsdatenerfassung ermittelten Ergebnisse zu den Betriebsbedingungen der Traktoren JD-K und JD-G dargestellt. Für den zusätzlich in das Projekt eingebundenen Traktor FE-A konnten aufgrund von technischen Problemen mit der elektronischen Datenerfassung keine repräsentativ auswertbaren Daten gewonnen werden.

Abbildung 11 zeigt die monatlich mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichneten Betriebsstunden der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs im Jahr 2010. Die statistische Auswertung erfolgte auf Basis dieser Daten. Beim Traktor JD-K konnten insgesamt knapp 90 % und bei Traktor JD-G knapp 80 % der im Feldeinsatz absolvierten Betriebsstunden mit der Datenerfassung aufgezeichnet werden. Aufzeichnungslücken ergaben sich, wenn der Traktor über längere Zeit in Gebieten ohne Mobilfunk-Netz be-

trieben wurde oder, im Falle des Traktors JD-G, aufgrund eines technischen Defektes im letzten Betriebsmonat.

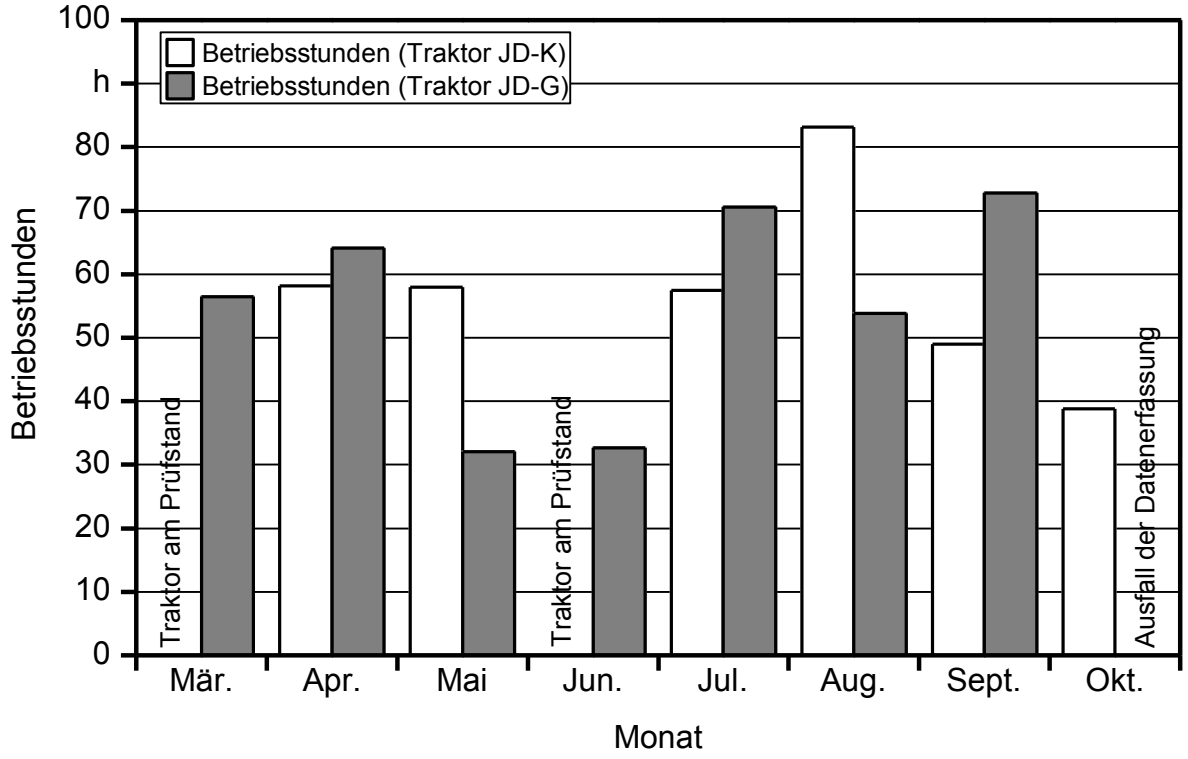


Abbildung 11: Mittels elektronischer Datenaufzeichnung erfasste Betriebsstunden der John Deere Traktoren im Feldbetrieb 2010

Beide Traktoren liefen bei etwa 30 % der Startvorgänge nur für kurze Zeitintervalle von < 2,5 Minuten. Für Traktor JD-K lagen 51 % und für Traktor JD-G 53 % der Betriebsdauern unter zehn Minuten. RATHBAUER et al. (2008) [38] ermittelten für zehn Traktoren im Durchschnitt bei 47 % der Fahrten Betriebsdauern von unter zehn Minuten. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse zeigen hierzu eine sehr gute Übereinstimmung. Der häufige Kurzzeitbetrieb lässt sich durch kurze Fahrten auf dem Betriebsgelände erklären, die nötig sind, um beispielsweise Anbaugeräte auf- oder abzunehmen, bevor dann längere Betriebsdauern bei der eigentlichen Feld- oder Hofarbeit entstehen.

Abbildung 12 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Betriebsdauer der Traktoren, eingeteilt in sich jeweils verdoppelnde Zeitintervalle. Bei der Häufigkeit der Betriebsdauer bis 40 Minuten sind kaum Unterschiede zwischen den Traktoren zu verzeichnen. Für Zeitintervalle im Bereich zwischen 40 und 160 Minuten wurde der Traktor JD-K häufiger als der Traktor JD-G betrieben. Der Traktor JD-G wies dafür jedoch öfter Betriebsdauern von mehr als 160 Minuten auf.

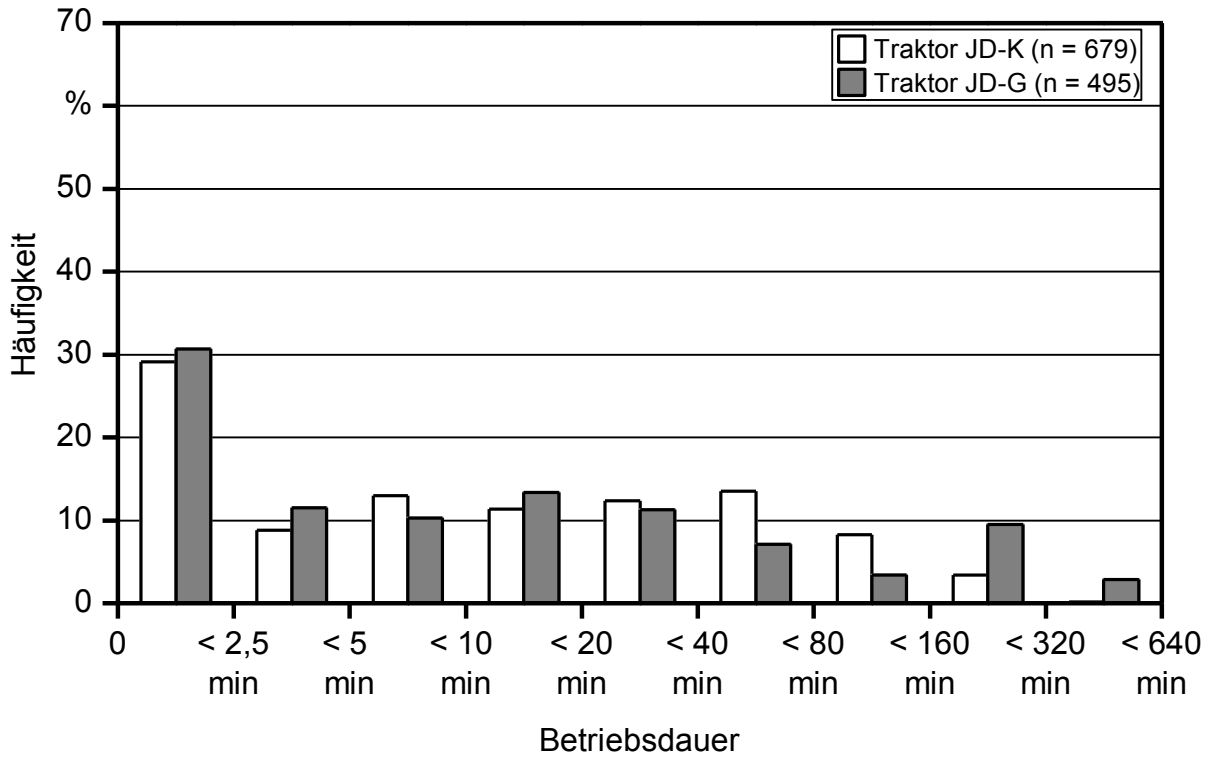


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Betriebsdauer der beiden John Deere Traktoren im Feldbetrieb 2010

Die Bedeutung des Kurzzeitbetriebs (< 10 Minuten) an den insgesamt absolvierten Betriebsstunden der Traktoren ist für den Traktor JD-K mit einem Anteil von 5 % und 3 % für den Traktor JD-G vergleichsweise gering. Zu einem ähnlichen Ergebnis mit etwa 7 % kommen auch RATHBAUER et al. (2008) [38].

In Tabelle 17 sind die innerhalb von bestimmten Zeitintervallen absolvierten Betriebsstunden der Traktoren dargestellt. Der Traktor JD-K wurde mit einem Anteil von 30 % an den Gesamtbetriebsstunden mit einer Betriebsdauer von 80 bis 160 Minuten verwendet. Im Vergleich dazu arbeitete der Traktor JD-G mit einem Anteil von 46 % an den Gesamtbetriebsstunden zumeist länger zusammenhängend im Bereich von 160 bis 320 Minuten. Unter Einbezug des nächsten, längeren Zeitintervalls ergibt sich ein Anteil von 69 % der Gesamtbetriebsstunden, in denen der Traktor ohne Abstellen im Bereich von 160 bis 640 Minuten betrieben wurde. Diese Unterschiede zwischen den Traktoren können unter anderem auf die unterschiedlichen Betriebsstrukturen mit unterschiedlichen Schlaggrößen zurückgeführt werden.

Tabelle 17: Innerhalb von Zeitintervallen absolvierte Betriebsstunden der Traktoren

	Innerhalb von Zeitintervallen absolvierte Betriebsstunden der Traktoren								
Traktor	< 2,5 min	< 5 min	< 10 min	< 20 min	< 40 min	< 80 min	< 160 min	< 320 min	< 640 min
JD-K	0,9	6,2	11,0	18,8	42,6	90,5	107,8	80,2	6,7
JD-G	0,7	5,5	6,3	15,1	25,3	32,3	33,6	176,3	86,7

Für den Traktor JD-K wurden während der aufgezeichneten 365 Bh insgesamt 679 Startvorgänge registriert. In Anlehnung an die Definition von RATHBAUER et al. (2008) [38] können die Startvorgänge anhand der Motoröltemperatur in Kalt- und Warmstart eingeteilt werden. Ein Kaltstart liegt vor, wenn die Motoröltemperatur < 50 °C beträgt. Etwa 37 % der Startvorgänge des Traktor JD-K erfolgten bei kaltem Motor.

Beim Traktor JD-G wurden 495 Startvorgänge während der erfassten 382 Bh ermittelt, davon 315 im kalten Motorzustand. Somit erfolgten 64 % der Startvorgänge im kalten Zustand. Abbildung 13 gibt einen Überblick zur Anzahl der Startvorgänge in den einzelnen Monaten des Feldbetriebs.

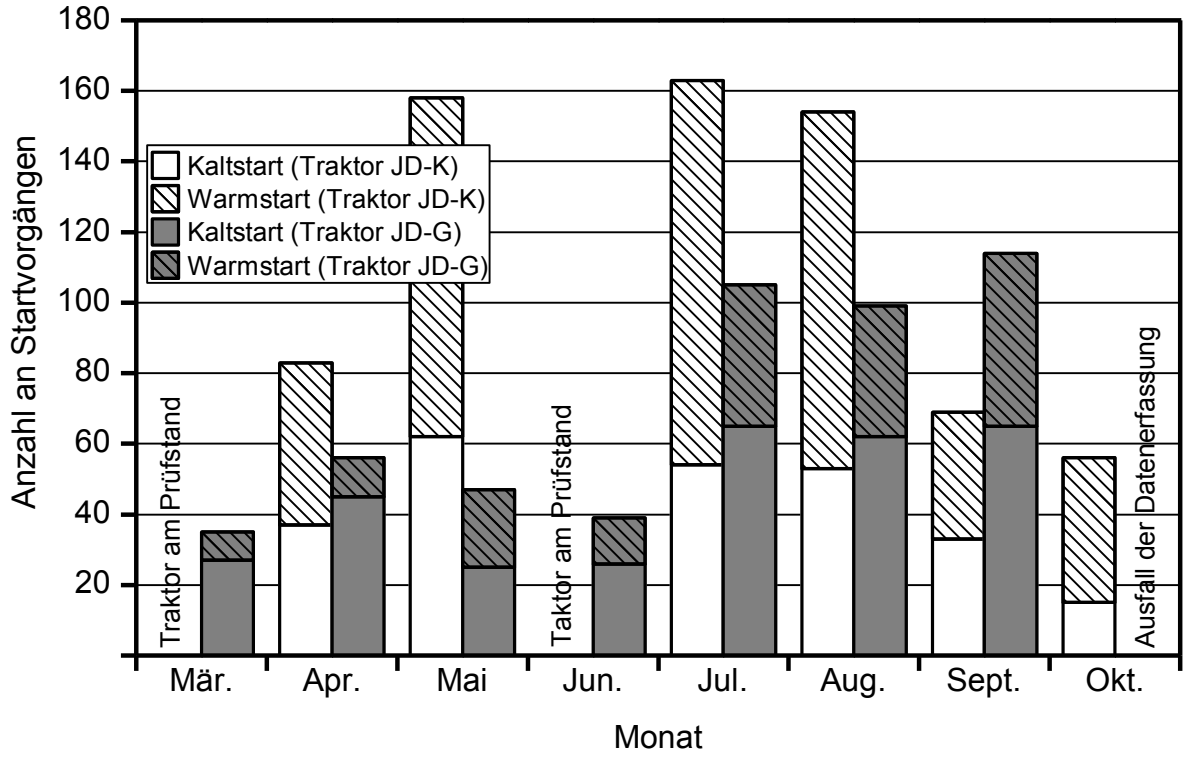


Abbildung 13: Anzahl an Startvorgängen der John Deere Traktoren im Feldbetrieb 2010 (Kaltstart bei einer Motoröltemperatur von < 50 °C)

Der Kaltstart erfolgte bei beiden Traktoren mit einem Anteil von etwa 60 % zumeist bei Umgebungstemperaturen zwischen 10 und 20 °C. Mit dem Traktor JD-K erfolgten 25 Startvorgänge bei Temperaturen zwischen 0 und 10 °C und bei Traktor JD-G 69.

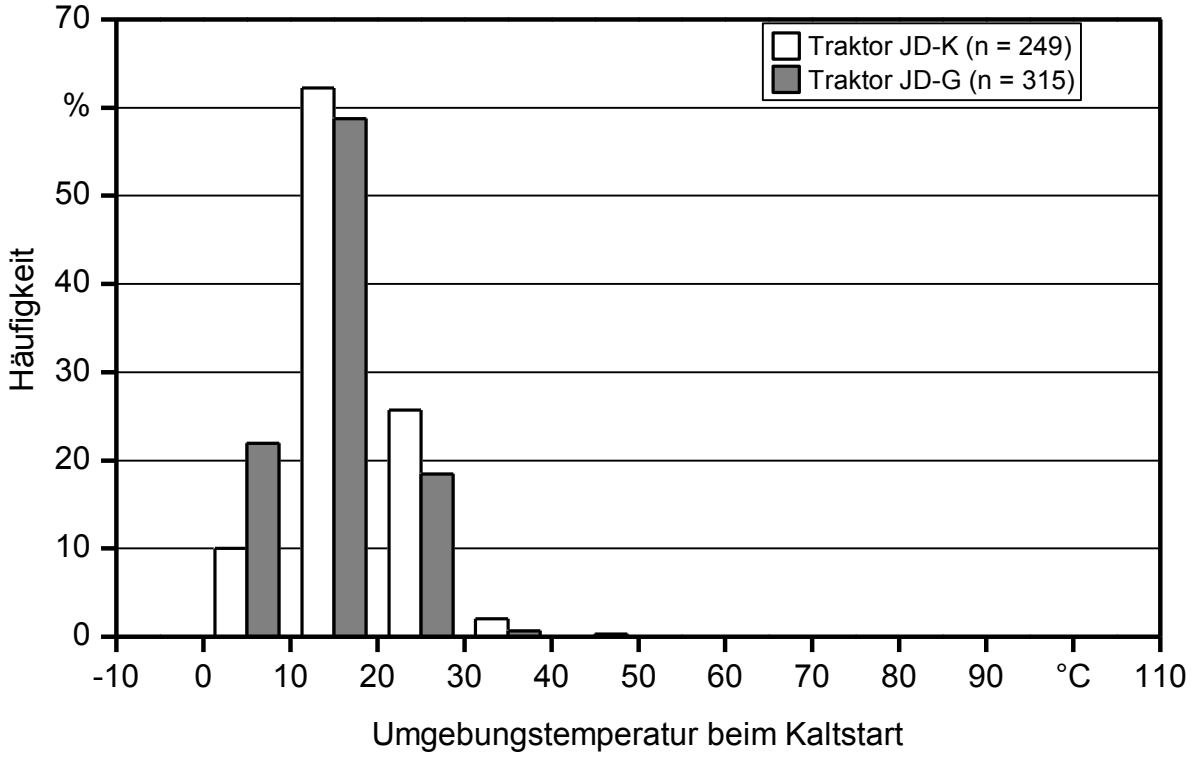


Abbildung 14: Umgebungstemperatur bei den Kaltstartvorgängen der John Deere Traktoren im Feldbetrieb 2010

Die Kraftstofftemperatur, gemessen an der Hochdruckpumpe des Einspritzsystems, lag bei den Kaltstartvorgängen zumeist auf einem höheren Niveau als die Umgebungstemperatur. Dies ist zum einen auf die geschütztere Lage unter der Motorhaube zurückzuführen. Zum anderen kann es auch vorkommen, dass die Traktoren bei einem Start nach eine Motoröltemperatur von unter 50 °C aufweisen und somit als Kaltstart gewertet werden, jedoch infolge von unterschiedlicher Abkühlung bei nicht allzu langen Standzeiten die Kraftstofftemperatur an der Hochdruckpumpe trotzdem noch vergleichsweise hoch ist. Dieser Effekt ist auch aus Abbildung 15 ersichtlich, wo beim Kaltstart zum Teil Kraftstofftemperaturen von über 50 °C vorhanden sind.

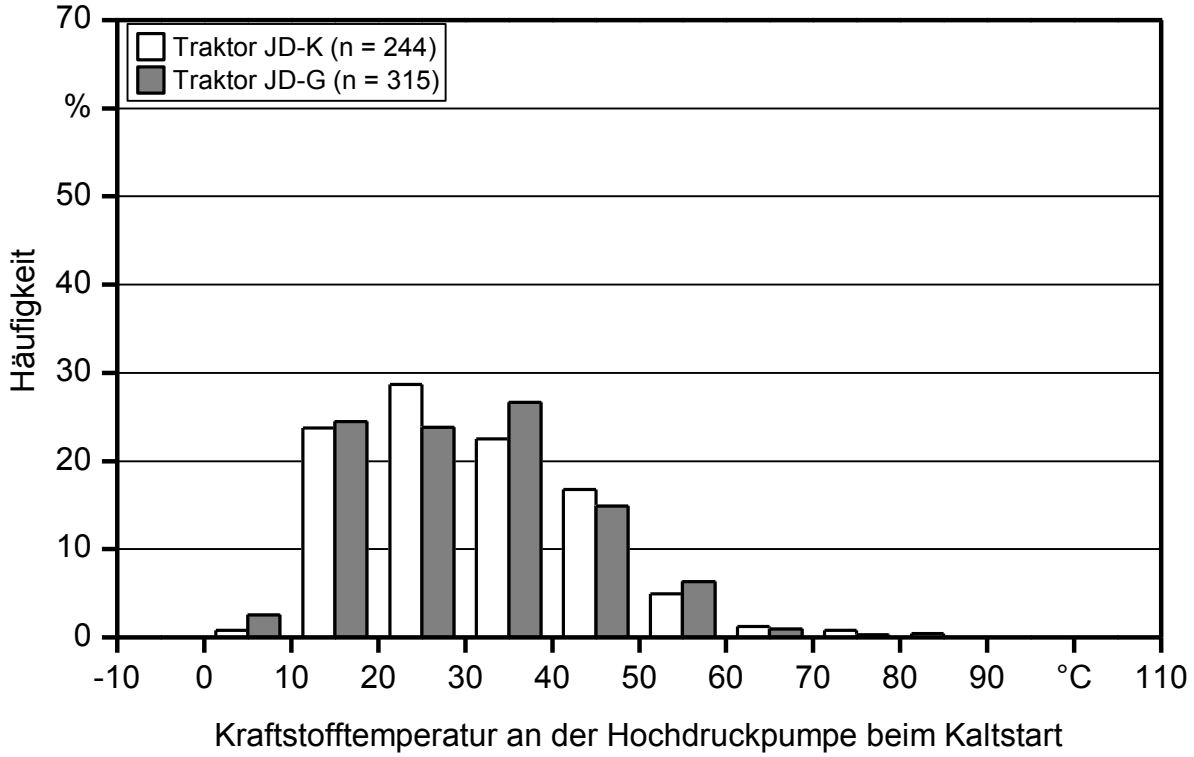


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Kraftstofftemperatur an der Hochdruckpumpe bei den Kaltstartvorgängen der beiden John Deere Traktoren

Abbildung 16 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Kraftstofftemperatur an der Hochdruckpumpe über den gesamten aufgezeichneten Feldbetrieb und Abbildung 17 die Häufigkeitsverteilung der Kraftstofftemperatur am Kraftstofffilter. Die Temperaturen an der Hochdruckpumpe liegen bei beiden Traktoren mit etwa 73 % der aufgenommenen Messwerte zwischen 60 und 80 °C. Die Temperaturen am Kraftstofffilter liegen zumeist um etwa 10 bis 20 K niedriger.

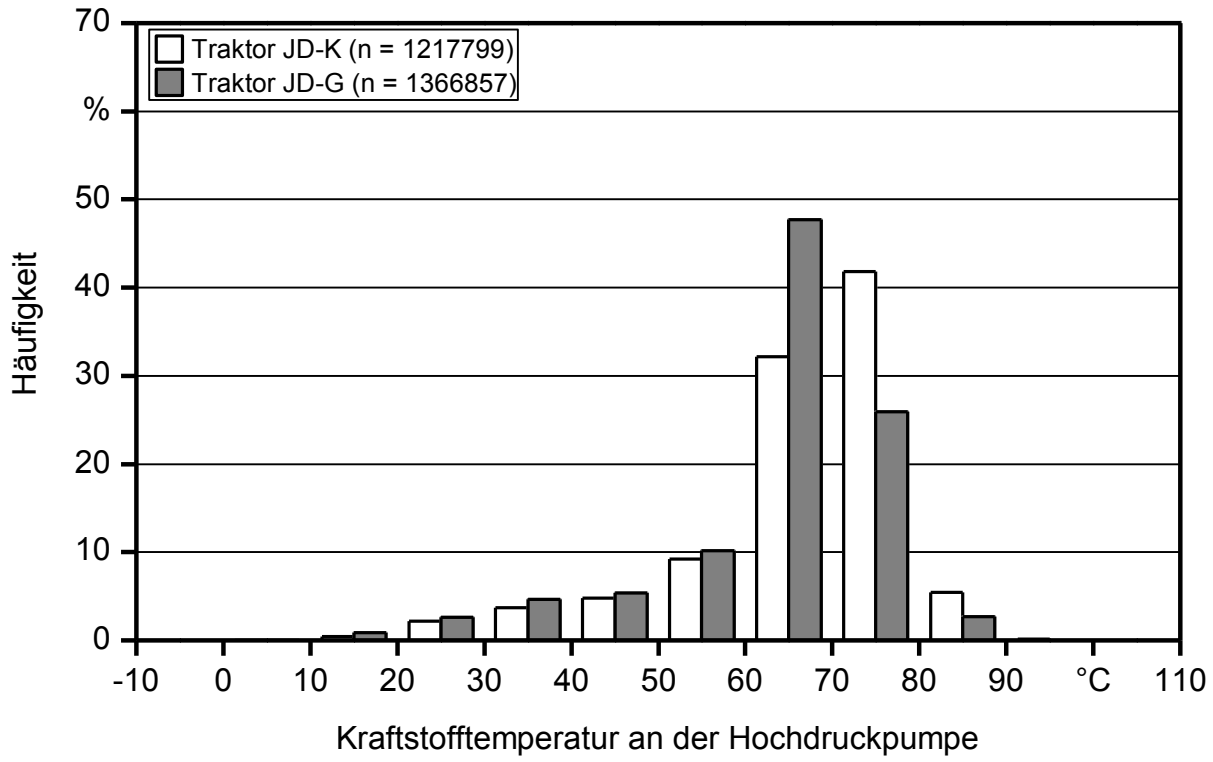


Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung der Kraftstofftemperatur an der Hochdruckpumpe der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010

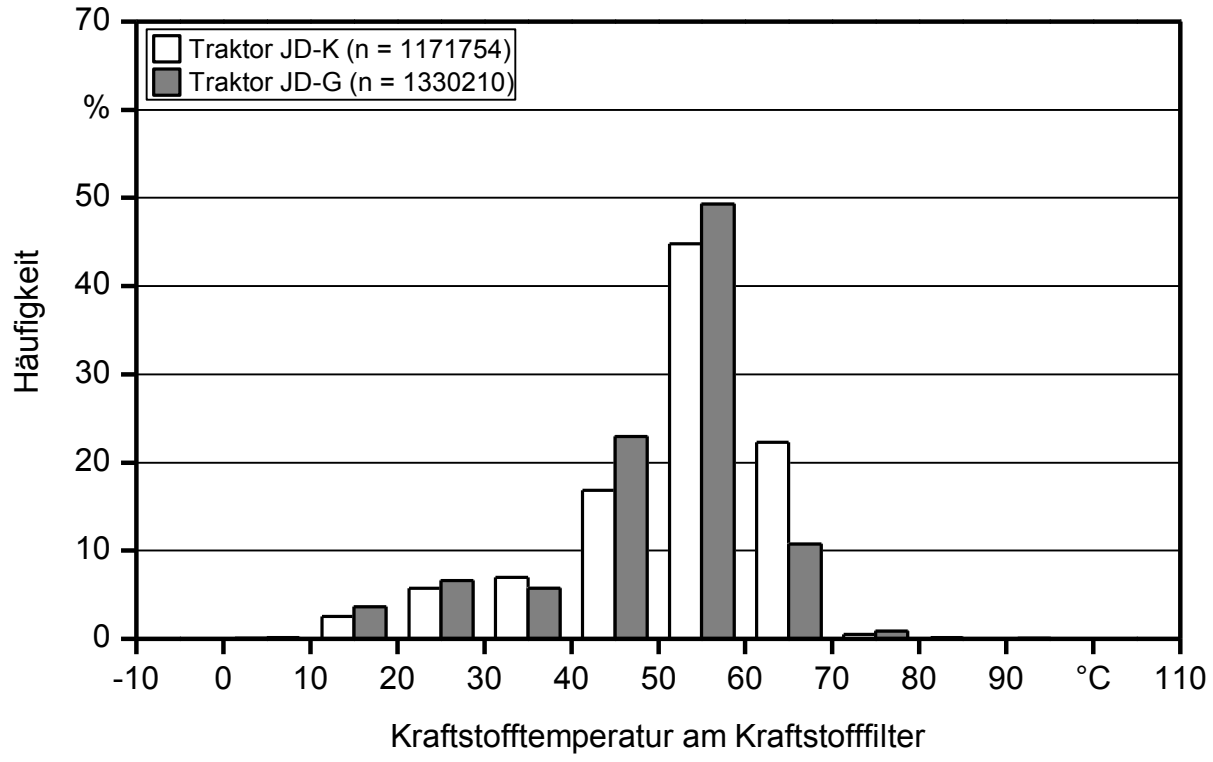


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Kraftstofftemperatur am Kraftstofffilter der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010

Die Kühlmitteltemperatur lag bei beiden Traktoren im aufgezeichneten Zeitraum über eine Dauer von etwa 90 % bei 70 bis 90 °C (siehe Abbildung 18). Auch die Motoröltemperatur bewegte sich, wie aus Abbildung 19 hervorgeht, zumeist im Bereich von 80 bis 100 °C. Dies spiegelt den geringen Einfluss des häufig vorkommenden Kurzzeitbetriebes bezogen auf die gesamte Laufzeit der Traktoren wieder (siehe hierzu auch Tabelle 17).

In Abbildung 20 ist die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Ansauglufttemperaturen im Ansaugkrümmer der Traktoren dargestellt. Die Ansaugluft lag in den meisten Fällen zwischen 40 und 70 °C.

Insgesamt weisen die Traktoren über den größten Anteil der Betriebsdauer günstige Voraussetzungen, nämlich einen Betrieb mit hoher Motorauslastung, für den Betrieb mit Pflanzenöl auf.

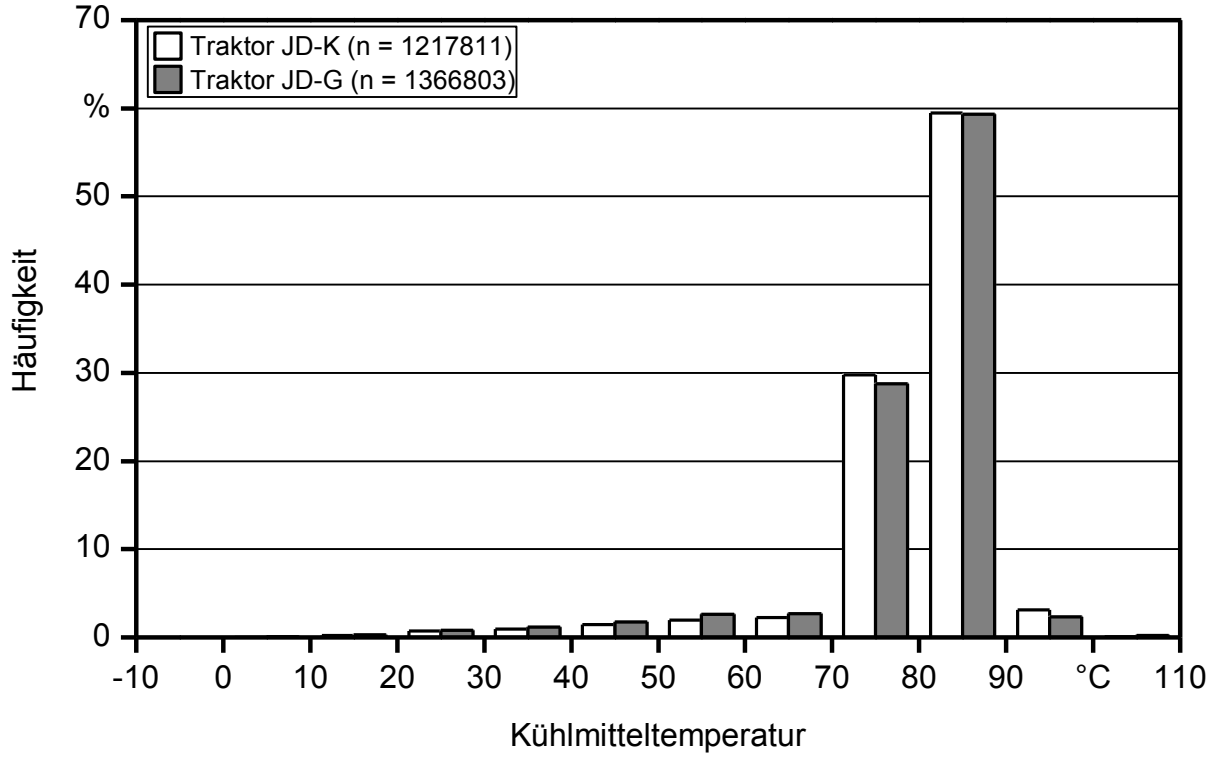


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Kühlmitteltemperatur der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010

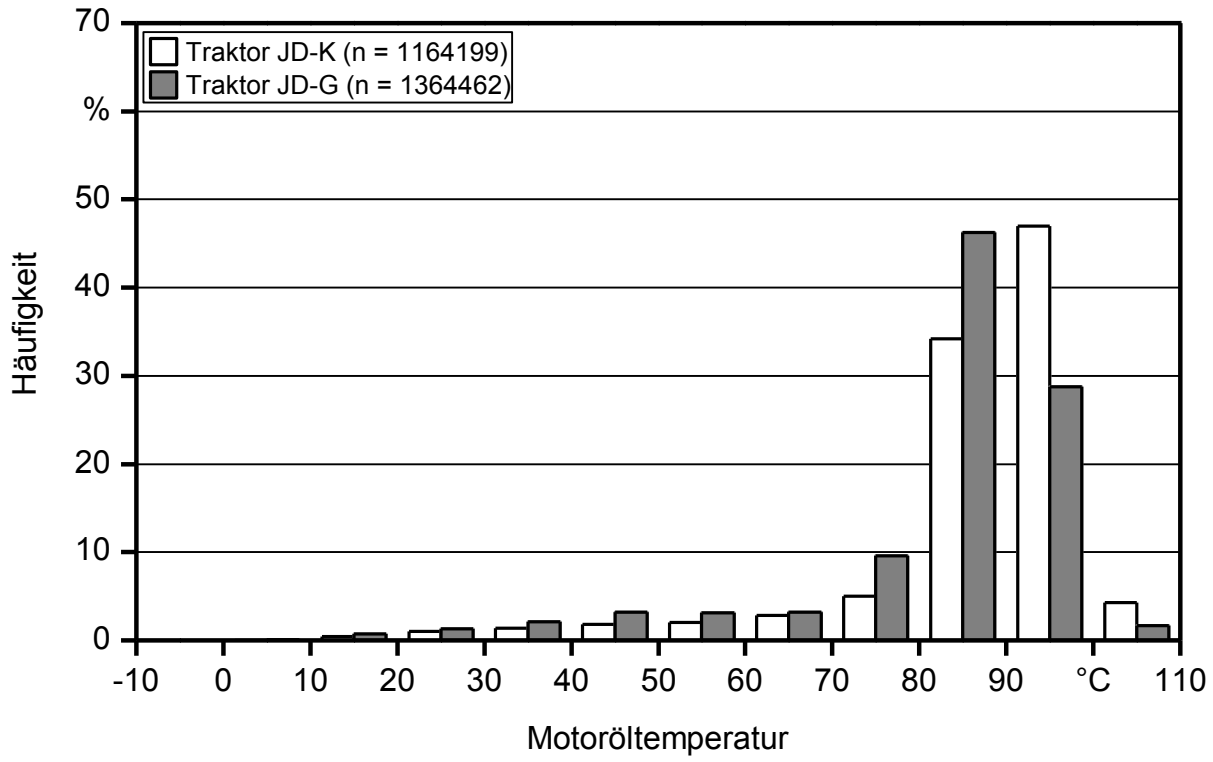


Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Motoröltemperatur der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010

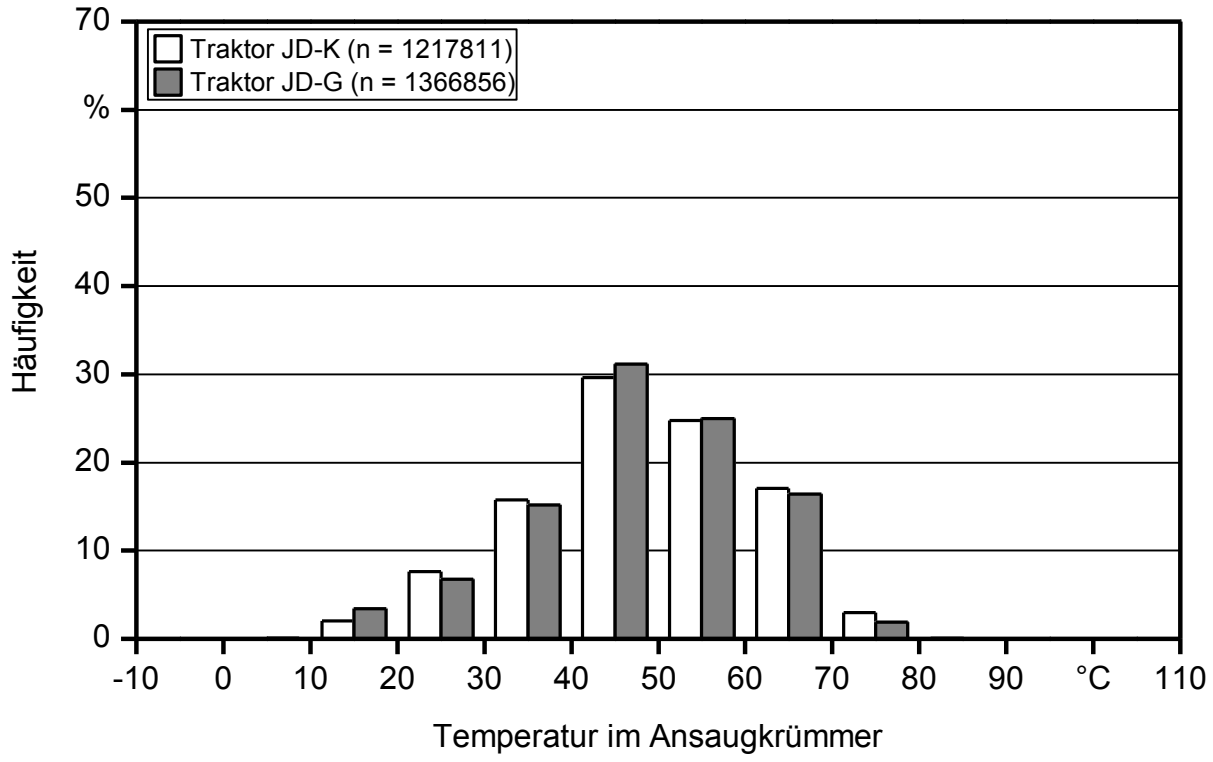


Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung der Temperatur im Ansaugkrümmer der beiden John Deere Traktoren während des Feldbetriebs 2010

6.1.3 Kraftstoffqualität

Die Qualität der verwendeten Pflanzenöle wurde bei allen Versuchsgütern bei Anlieferung einer frischen Charge kontrolliert. In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Kraftstoffqualität von Traktor JD-K dargestellt. Im Jahr 2009 kam bei diesem Traktor ausschließlich Rapsöl zur Verwendung, welches den Anforderungen der DIN 51605 genügte. Im Jahr 2010 kam neben der Restmenge des Rapsöles aus 2009 auch Maiskeimöl und Jatrophaöl zum Einsatz. Mit Ausnahme der Oxidationsstabilität erfüllte das Maiskeimöl alle anderen Anforderungen der DIN 51605 [8] für Rapsölkraftstoff bzw. des Entwurfs DIN SPEC 51623 [9] für Pflanzenölkraftstoff. Das verwendete Jatrophaöl wies eine deutlich zu hohe Säurezahl und einen leicht erhöhten Wassergehalt auf. Alle anderen untersuchten Parameter erfüllten die Anforderungen an den Entwurf der DIN SPEC 51623. Den Pflanzenölen wurde nach der Analyse in einer Konzentration von 0,1 Vol.-% das Additiv zur Ablagerungsminderung John Deere Biodiesel Protect 100 und in einer Konzentration von 0,1 Masse-% Ethyl-Hexyl-Nitrat als Zündverbesserer zugegeben.

Tabelle 18: Verwendete Kraftstoffqualität zum Betrieb des Traktors JD-K (Grenzwertüberschreitungen der DIN 51605 hervorgehoben)

Kenngröße	Einheit	Grenzwert	2009 Charge (Rapsöl) 1	2009 Charge (Rapsöl) 2	2010 Charge 1[2)]	2010 Charge 2[2)]
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	12	17	8	22
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	1,2	0,8	1,6	**4,4**
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	7,1	7,0	**4,1**	20,2
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	570	719	601	**873**
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	2	4	4	4
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 12[1)]	1	<1	2	<1
Summengehalt Calcium und Magnesium	mg/kg	max. 20[1)]	1	<1	<1	<1

[1)] Grenzwerte mit Gültigkeit bis 31. Dezember 2011
[2)] Charge 1: Maiskeimöl; Charge 2: Jatrophaöl

Die niedrigere Oxidationsstabilität des Maiskeimöls liegt im Fettsäuremuster begründet. Im Vergleich zu Rapsöl enthält Maiskeimöl einen größeren Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren, die zu einer kürzeren Lagerstabilität führen. Das Jatrophaöl weist, aufgrund eines zugegebenen Oxidationsstabilisators, eine deutlich höhere Oxidationsstabilität auf. In Tabelle 19 ist die Fettsäurezusammensetzung des im Feldbetrieb verwendeten Maiskeim- und Jatrophaöles im Vergleich zu einem auf dem Traktorenprüfstand verwendeten Rapsöles dargestellt. In allen Fällen sind die Öl- und die Linolsäure die Hauptbe-

standteile der Triacylglyceride der Pflanzenöle. Rapsöl weist jedoch einen deutlich geringeren Anteil an der zweifach ungesättigten Linolsäure auf.

Tabelle 19: Fettsäurezusammensetzung der verwendeten Pflanzenöle ermittelt nach ISO 5508 (Hauptbestandteile hervorgehoben)

Fettsäure	Anzahl Kohlenstoff-atome	Anzahl Doppel-bindungen	Einheit	Jatrophaöl	Rapsöl	Maiskeimöl
Capronsäure	6	0	Masse-%	<0,1	<0,1	<0,1
Caprylsäure	8	0	Masse-%	<0,1	<0,1	<0,1
Caprinsäure	10	0	Masse-%	<0,1	<0,1	<0,1
Laurinsäure	12	0	Masse-%	<0,1	<0,1	<0,1
Myristinsäure	14	0	Masse-%	<0,1	<0,1	<0,1
Palmitinsäure	16	0	Masse-%	13,5	4,8	10,9
Palmitoleinsäure	16	1	Masse-%	0,9	0,3	0,1
Stearinsäure	18	0	Masse-%	5,7	1,7	1,9
Ölsäure	18	1	Masse-%	**39,0**	**62,2**	**30,8**
Linolsäure	18	2	Masse-%	**39,9**	**20,5**	**53,3**
Linolensäure	18	3	Masse-%	0,5	7,8	1,3
Arachinsäure	20	0	Masse-%	0,2	0,6	0,6
Gadoleinsäure	20	1	Masse-%	<0,1	1,2	0,3
Behensäure	22	0	Masse-%	<0,1	0,3	0,2
Erucasäure	22	1	Masse-%	<0,1	0,3	<0,1
Lignocerinsäure	24	0	Masse-%	<0,1	0,1	0,2

In Tabelle 20 sind die Ergebnisse der Analysen der Rapsölproben des im Traktor JD-G verwendeten Pflanzenöles dargestellt. Im Unterschied zu Traktor JD-K wurde dieser Traktor ausschließlich mit Rapsöl betrieben. Mit Ausnahme von einer Charge im Jahr 2010 zeigte sich das Rapsöl von sehr guter Qualität. Im Jahr 2010 wurden die Grenzwerte der DIN 51605 zur Oxidationsstabilität und Gesamtverschmutzung knapp überschritten. Die ermittelten Messwerte liegen jedoch innerhalb der Ablehnungsgrenzwerte der allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der zehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [6]. Dem verwendeten Rapsöl wurde nach der Beprobung der Zündwilligkeitsverbesserer Ethyl-Hexyl-Nitrat in einer Konzentration von 0,1 Masse-% und ein, im Vergleich zum Traktor JD-K unterschiedliches, Additiv zur Ablagerungsminderung in einer Konzentration von 0,02 Vol.-% zugegeben.

Tabelle 20: Verwendete Rapsölqualität zum Betrieb des Traktors JD-G (Grenzwertüberschreitungen der DIN 51605 hervorgehoben)

Kenngröße	Einheit	Grenzwert	2009 Charge 1	2009 Charge 2	2010 Charge 1	2011 Charge 1
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	22	3	**29**	n.e.
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	0,9	0,8	0,9	n.e.
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	6,8	6,1	**5,7**	n.e.
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	746	655	651	n.e.
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	3	2	2	n.e.
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 12[1)]	<1	<1	<1	2
Summengehalt Calcium und Magnesium	mg/kg	max. 20[1)]	<1	<1	<1	4

[1)] Grenzwerte mit Gültigkeit bis 31. Dezember 2011
n.e.: nicht ermittelt

Die bei Traktor FE-A verwendete Rapsölqualität ist in Tabelle 21 dargestellt. Insbesondere bei der ersten Lieferung waren bei mehreren Kenngrößen deutliche Grenzwertüberschreitungen festzustellen. Nachdem der Lieferant keine bessere Rapsölqualität bereitstellen konnte, wurde eine bereits angelieferte Charge zurückgegeben und das Rapsöl von einer anderen Ölmühle bezogen. Die erste angelieferte Charge im Jahr 2011 zeigte sich dann von besserer Qualität, jedoch waren auch hier bei den Parametern Phosphor und Summengehalt Calcium und Magnesium Überschreitungen der Grenzwerte festzustellen.

Tabelle 21: Verwendete Rapsölqualität zum Betrieb des Traktors FE-A (Grenzwertüberschreitungen der DIN 51605 hervorgehoben)

Kenngröße	Einheit	Grenzwerte	2010 Charge 1	2011 Charge 1	2011 Charge 2
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	**77**	18	6
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	1,8	1,4	0,8
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	6,7	6,6	7,6
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	**762**	579	662
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	**12**	4	3
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 12[1)]	**27**	**14**	8
Summengehalt Calcium und Magnesium	mg/kg	max. 20[1)]	**49**	**29**	9

[1)] Grenzwerte mit Gültigkeit bis 31. Dezember 2011

Aufgrund der anfänglich ungenügenden Rapsölkraftstoffqualitäten wurden vor Anlieferung der dritten Charge von mehreren dezentralen Ölmühlen in der Umgebung Rapsölkraftstoffproben angefordert und analysiert. Durch dieses Vorgehen konnte ein Lieferant gefunden werden, der eine ausreichende Qualität zur Verfügung stellen konnte (2. Charge im Jahr 2011) und dabei auch die weiteren Anforderungen hinsichtlich der Nachhaltigkeitszertifizierung erfüllte.

Die ermittelten Qualitätsprobleme sind zum Teil auf ungenügende Rapssaatqualitäten zurückzuführen, welche insbesondere im Jahr 2010 aufgrund von schlechteren Erntebedingungen gehäuft auftraten.

6.1.4 Motorölqualität

Traktor JD-K

Bei diesem Traktor wurden im Zeitraum von Anfang des Jahres 2009 bis Ende 2011 insgesamt vier Motorenölwechsel vorgenommen. Um erste Erfahrungen zu sammeln wurde nach dem ersten Motorölwechsel der nächste Ölwechsel nach der Hälfte des vom Hersteller für den Dieselbetrieb vorgegebenen Wechselintervalls von 500 Bh durchgeführt. Nach Vorliegen der ersten Ergebnisse wurde, in Absprache mit dem Landmaschinenhersteller, der nächste Ölwechsel erst nach mehr als 600 Bh durchgeführt. Der Wechsel der Motorenölsorte bei 1330 Bh war notwendig, da aufgrund des Einbaus eines Abgasnachbehandlungssystems ein darauf abgestimmtes Motoröl verwendet werden sollte. Die letzte Motorölprobe wurde bei 1825 Bh gezogen, dass Motoröl wurde jedoch noch nicht gewechselt. Tabelle 22 gibt einen Überblick zur Einsatzdauer und die verwendeten Motorölsorten.

Tabelle 22: Überblick zur Einsatzdauer und verwendeten Motorölsorte im Traktor JD-K

Traktor Betriebsstunden beim Ölwechsel	Einsatzdauer des Motoröls	Motorölsorte
137	137	Einlauföl
390	253	Lubrizol ACEA E7
1018	628	Lubrizol ACEA E7
1330	312	Lubrizol ACEA E7
1825	495[1)]	Lubrizol ACEA E9

[1)] *Betriebsstunden bei letzter Analyse ohne Ölwechsel*

Die Qualität des Motorenöls wurde an insgesamt 26 Motorölproben untersucht. Einen wichtigen Parameter zur Einordnung der Qualität stellt der Pflanzenölgehalt im Motorenöl dar. Ein erhöhter Pflanzenölgehalt im Motoröl kann zu unerwünschten Reaktionen und zu einer Beschleunigung der Schmierölalterung führen [46][52]. In Abbildung 21 ist der

Pflanzenölgehalt im Motorenöl gemeinsam mit dem Rußgehalt über den Beobachtungszeitraum dargestellt. Der maximal ermittelte Anteil betrug 3,7 % nach einer Motoröleinsatzdauer von 495 Bh und ist im Vergleich zu den Ergebnissen von HASSEL et al. (2005) [17], RATHBAUER et al. (2008) [38] und THUNEKE et al. (2010) [51] als gering einzuschätzen. Der von SCHÜMANN et al. (2011) [46] empfohlene Grenzwert von 10 % wird ohne Verkürzung des Schmierölwechselintervalls im Vergleich zum Dieselbetrieb mit genügend Abstand eingehalten. Der Anstieg des Pflanzenölgehaltes erfolgte weitgehend linear mit einer Steigung von etwa 0,007 Masse-% pro Betriebsstunde. Beim Rußgehalt waren keine besonderen Auffälligkeiten festzustellen, der maximal ermittelte Wert liegt bei 0,6 Masse-% und liegt auf einem niedrigen Niveau.

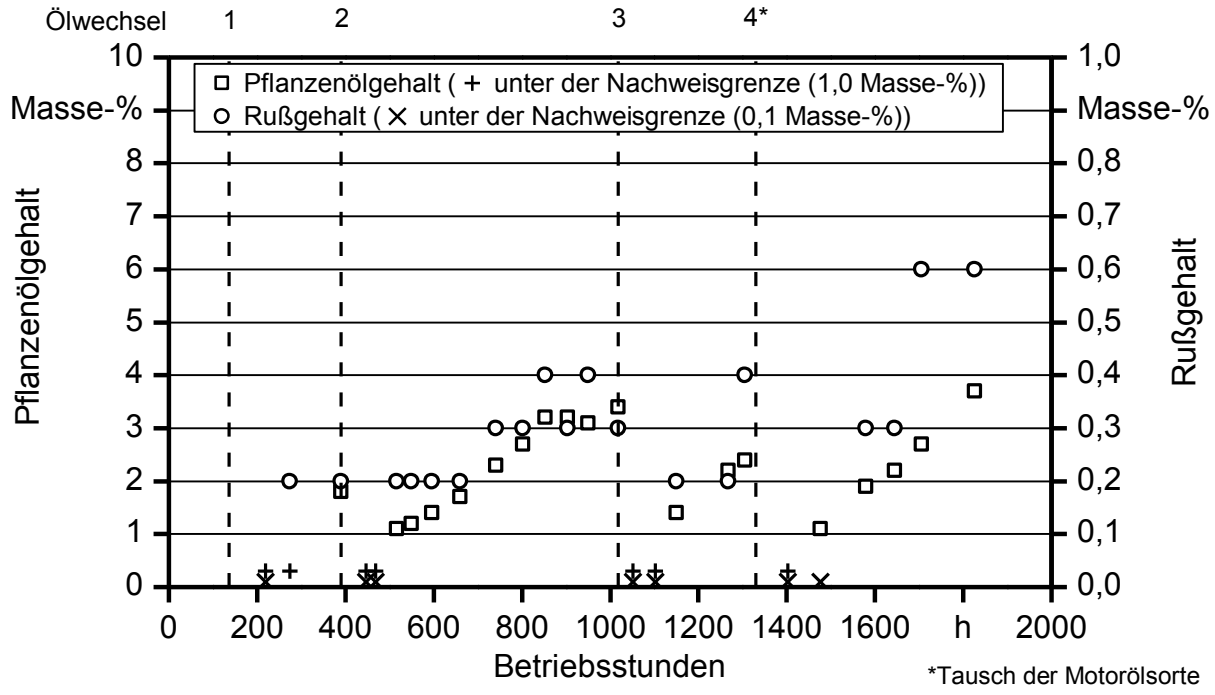


Abbildung 21: Verlauf des Kraftstoff- und Rußgehalts des Motorenöls des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse zur Messung der kinematischen Viskosität bei 100 °C und 40 °C der Motorölproben dargestellt. Die bei 100 °C gemessene Viskosität war über alle Proben weitgehend konstant und liegt innerhalb der Anforderungen nach SAE J300. Die kinematische Viskosität bei 40 °C zeigte zum Teil einen leichten Abfall während der ersten 100 bis 200 Bh, der sich jedoch dann umkehrte. Die Streubreite um den Mittelwert war beim Motoröl, welches zwischen 390 und 1018 Bh eingesetzt wurde, mit ± 3 % auf einem unbedenklichen Niveau. Bei allen anderen Ölwechselintervallen war die Streubreite der Messergebnisse geringer.

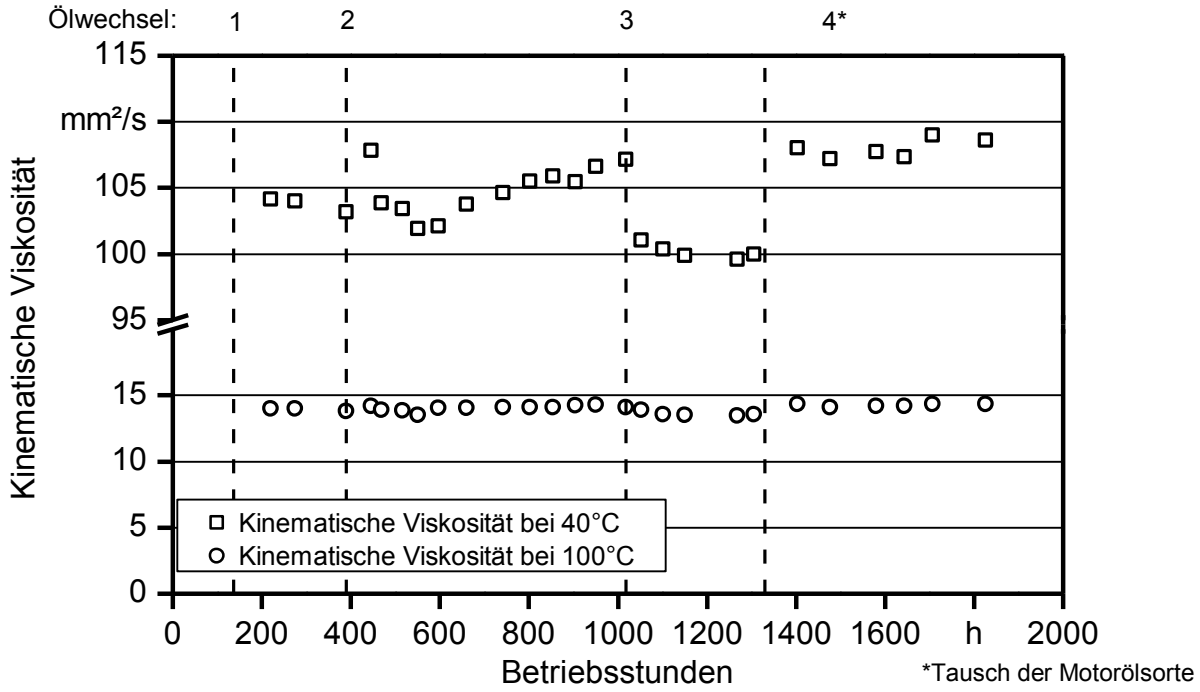


Abbildung 22: Verlauf der kinematischen Viskosität des Motorenöls bei 40 °C und bei 100 °C des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum

In Abbildung 23 ist die Konzentration der Verschleißmetalle im Motorenöl angegeben. Über die Motoröleinsatzzeit kommt es erwartungsgemäß zu einem Anstieg der Verschleißmetalle, insbesondere von Eisen. Der Gehalt an Eisen betrug nach einer Motorölstandzeit von 628 Bh maximal 67 mg/kg und liegt damit unter den Warnwerten der Oelcheck GmbH von 80 bis 180 mg/kg [32]. Eine durchgeführte Regressionsanalyse mit der Motoröleinsatzzeit als unabhängige Variable und dem Eisengehalt im Motorenöl ergibt mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,981 einen Anstieg von 0,098 ± 0,002 mg/(kg*Bh). Der John Deere Warnwert für den Eisengehalt mit 0,5 mg/(kg*Bh) [34] wird deutlich unterschritten. Der Gehalt an Aluminium und Blei liegt bei allen analysierten Proben ebenfalls auf einem unkritischen Niveau. Anders stellt sich dies hinsichtlich des Kupfergehaltes dar. Bis zu einer Motoröleinsatzzeit von etwa 450 Bh war eine Kupferkonzentration von weniger als 10 mg/kg festzustellen. Der John Deere Warnwert liegt bei 20 mg/kg. Bei einer längeren Motoröleinsatzzeit kommt es jedoch sehr schnell zu einem deutlichen Anstieg über diesen Warnwert.

Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Total Acid Number (TAN) und der Total Base Number (TBN). Die TAN bleibt über die Öleinsatzzeit in etwa konstant und die TBN nimmt bei längerer Einsatzdauer um etwa 20 % ab. Die TBN ist ein Maß für die Aufnahmekapazität von sauren Bestandteilen aus dem Verbrennungsgas und sollte nicht unter 60 % des Ausgangswertes des Frischöls fallen [31]. Die TBN liegt somit bei allen Proben im unbedenklichen Bereich und in Verbindung mit der weitgehend konstanten TAN zeigen die Proben, dass das Motorenöl auch beim Ölwechsel noch über ausreichend Neutralisationsvermögen verfügt.

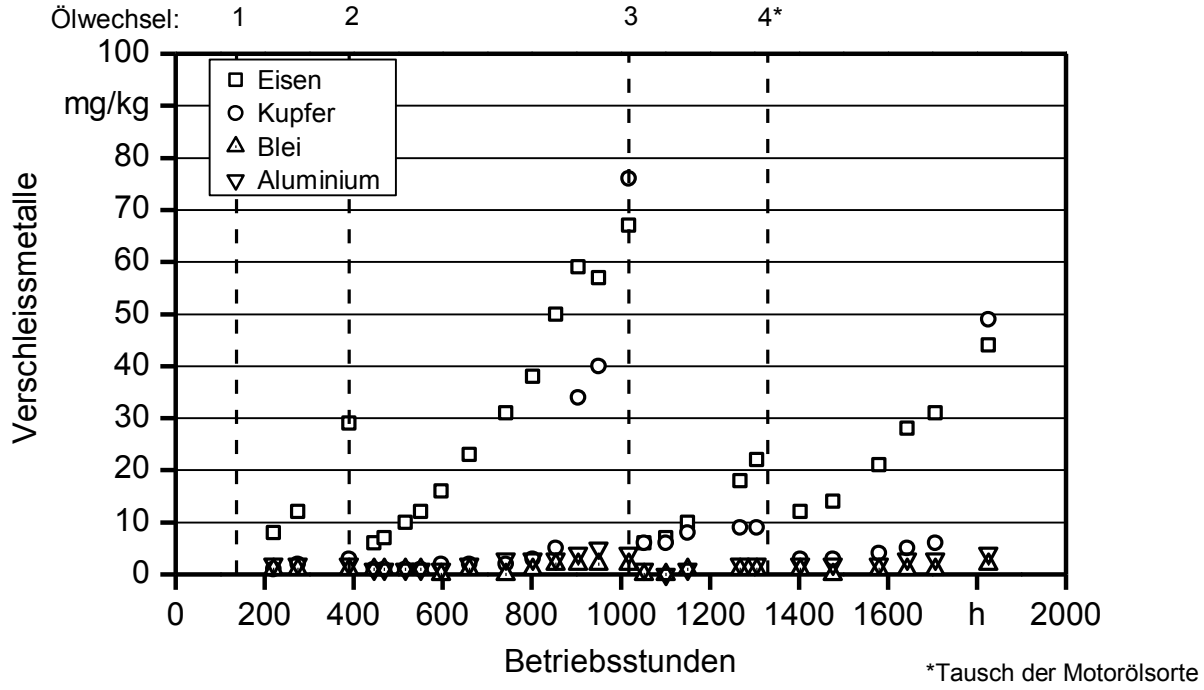


Abbildung 23: Verlauf der Elementgehalte der Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motorenöls des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum

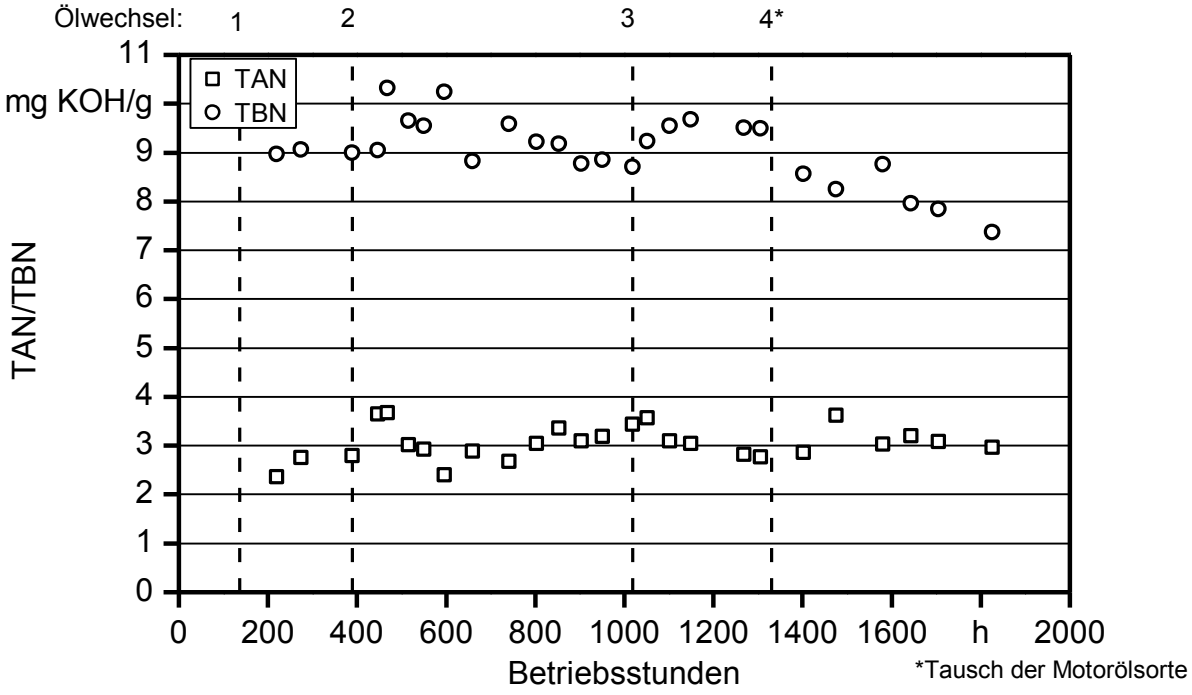


Abbildung 24: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TAN) des Motorenöls des Traktors JD-K über den Versuchszeitraum

Traktor JD-G

Bei dem Traktor, der in Grub eingesetzt wird, wurden während des Berichtszeitraumes ebenfalls 26 Motorölproben untersucht. Beim Traktor JD-G wurden insgesamt fünf Ölwechsel durchgeführt. Der Ölwechsel bei 1090 Bh erfolgte im Rahmen des Einbaus eines Abgasnachbehandlungssystems und der bei 1225 Bh aufgrund einer Motorabschlussinspektion im Rahmen des 2nd VegOil Projektes, bei der der Motor zerlegt und wieder zusammengebaut wurde. In Tabelle 23 sind die Einsatzdauern und verwendeten Motorölsorten im Überblick dargestellt.

Tabelle 23: Überblick zu Einsatzdauer und verwendeter Motorölsorte im Traktor JD-G

Traktor Betriebsstunden beim Ölwechsel	Einsatzdauer des Motoröls	Motorölsorte
96	96	Einlauföl
355	259	Lubrizol ACEA E9
940	585	Lubrizol ACEA E9
1090	312	Lubrizol ACEA E9
1225	135	Lubrizol ACEA E9
1455*	230	Lubrizol ACEA E9

* *Betriebsstunden bei letzter Analyse ohne Ölwechsel*

In Abbildung 25 ist der Verlauf des Pflanzenöl- und Rußgehalts im Motorenöl über die Betriebsdauer des Traktors JD-G dargestellt. Auch bei diesem Traktor erfolgt der Anstieg des Pflanzenölgehalts nahezu linear und liegt mit 0,008 Masse-% pro Betriebsstunde auf einem gleichen Niveau wie bei Traktor JD-K. Der maximal ermittelte Kraftstoffgehalt lag bei einer Motoröleinsatzdauer von 585 Bh bei 4,7 Masse-% und ist als gering einzuschätzen. Der Rußgehalt im Motorenöl betrug maximal 0,4 Masse-% und liegt somit auf einem niedrigen Niveau.

Abbildung 26 zeigt die kinematische Viskosität der Motorölproben über die Betriebsdauer. Sowohl die kinematische Viskosität bei 40 °C, als auch bei 100 C veränderten sich während der Öleinsatzzeit kaum. Auffällig ist, dass die letzte Ölfüllung generell niedrigere Viskositäten aufwies. Das verwendete Motorenöl unterschied sich dahingehend von den anderen Motorenölen. Der Gehalt der Additivelementen Schwefel, Phosphor, Zink und Calcium war bei allen Motorölen gleich und veränderte sich über die Einsatzzeit kaum.

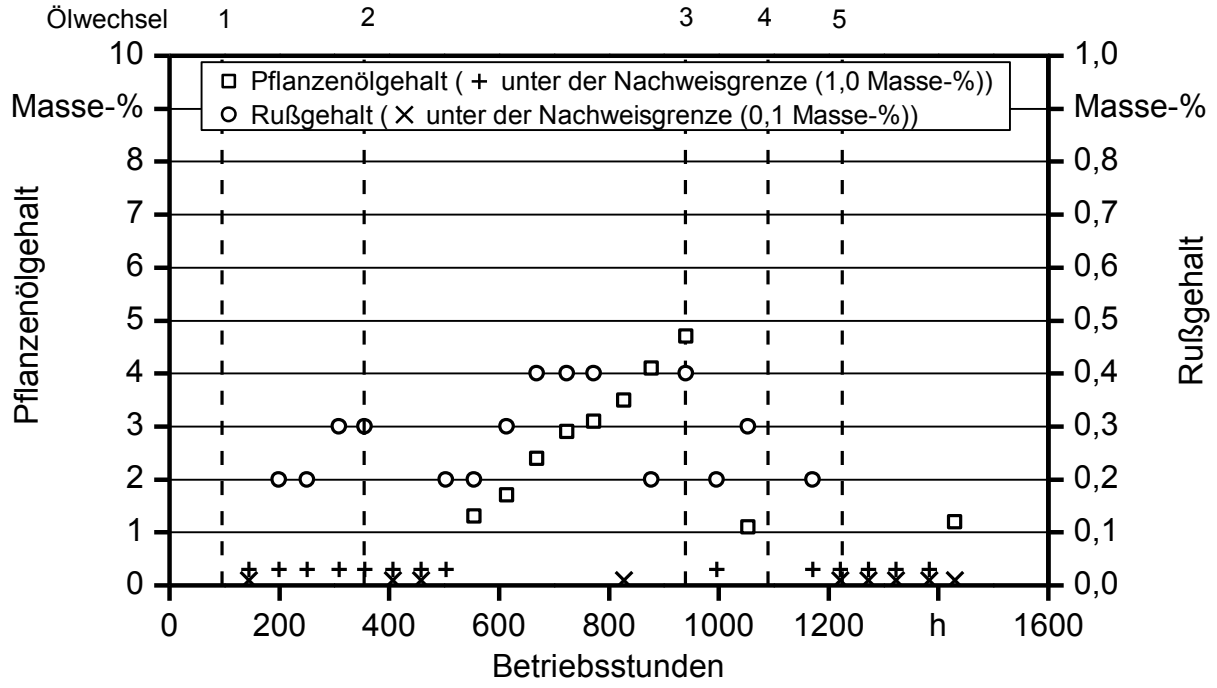


Abbildung 25: Verlauf des Kraftstoff- und Rußgehalts des Motorenöls des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum

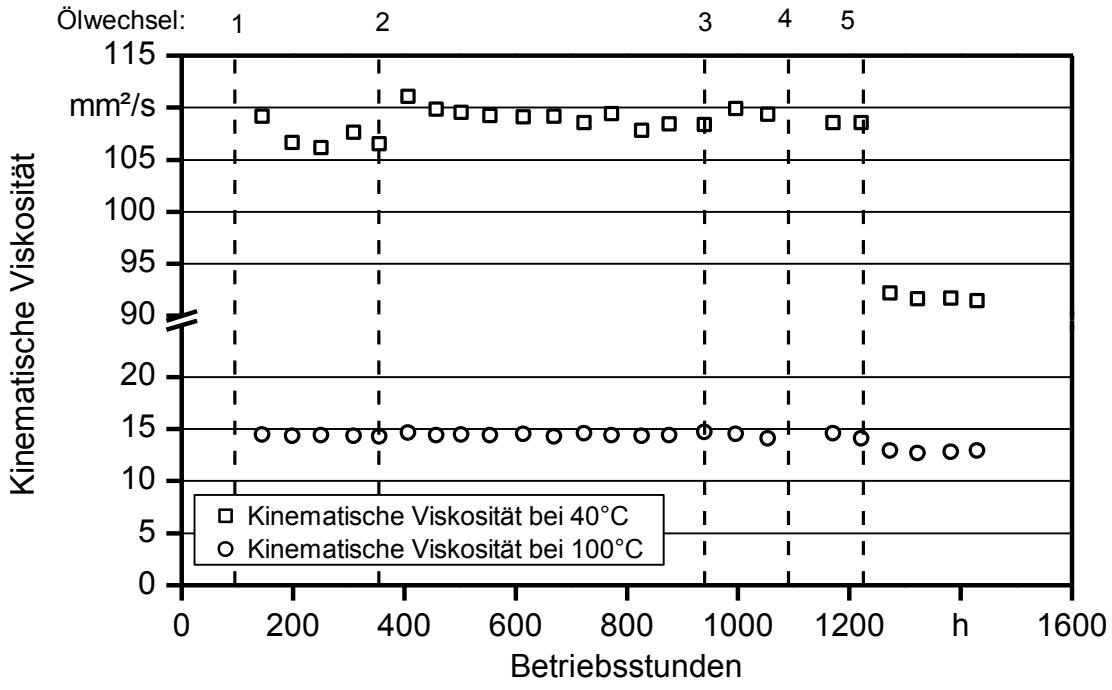


Abbildung 26: Verlauf der kinematischen Viskosität des Motorenöls bei 40 °C und bei 100 °C des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum

Die Entwicklung des Gehalts an Verschleißmetallen im Motorenöl des Traktors JD-G ist in Abbildung 27 dargestellt. Ähnlich wie bei Traktor JD-K war ein linearer Anstieg von Eisen mit einer Steigung von 0,072 ± 0,002 mg/(kg*Bh) (korrigiertes Bestimmtheitsmaß 0,974) festzustellen und liegt damit innerhalb der zulässigen Werte. Auch hinsichtlich Aluminium und Blei sind keine Auffälligkeiten bei den analysierten Proben festzustellen. Hinsichtlich des Kupfergehaltes kam es, wie bei Traktor JD-K, ab einer Motoröleinsatzdauer von etwa 500 Bh zu einem sehr schnellen Anstieg.

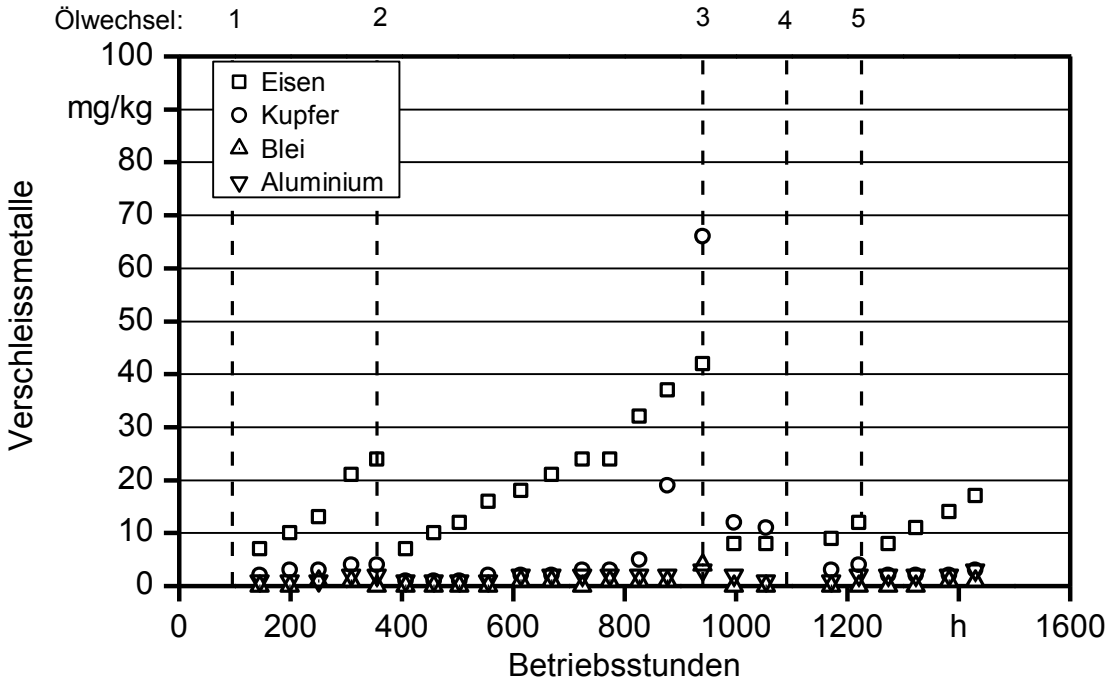


Abbildung 27: Verlauf der Elementgehalte der Verschleißkomponenten Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium des Motorenöls des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum

Abbildung 28 zeigt abschließend für den Traktor JD-G die Entwicklung der TAN und TBN. Die Ergebnisse entsprechen wiederum in etwa denen von Traktor JD-K. Die TAN blieb über die Einsatzdauer des Motorenöls weitgehend gleich und die TBN nahm ab, jedoch nicht auf ein kritisches Niveau.

Anhand der für beide Traktoren ermittelten Ergebnisse erscheint eine Halbierung des Motorölwechselintervalls als nicht notwendig. Bis zu einer Einsatzdauer von 400 Bh zeigte das verwendete Motorenöl sehr gute Eigenschaften und der Pflanzenöleintrag in das Motorenöl lag auf einem sehr geringen Niveau. Zwischen 400 und 500 Bh des Motorenöls war bei beiden Traktoren ein schnelles Ansteigen des Verschleißmetalls Kupfer festzustellen, das letztlich gegen eine Verwendung des Motorenöls über 400 h hinaus spricht. Genaue Ursachen hierfür konnten im Rahmen der Untersuchungen nicht gefunden werden.

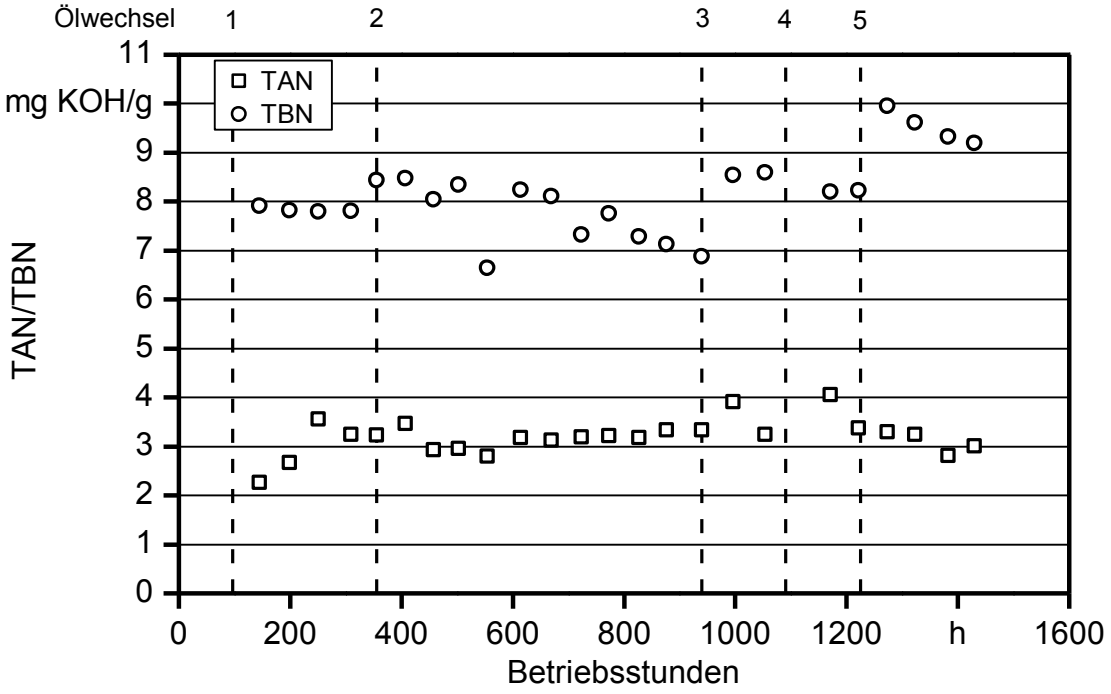


Abbildung 28: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TAN) des Motorenöls des Traktors JD-G über den Versuchszeitraum

Traktor FE-N

Die Motorenölqualität des Traktors wurde zweimal beim regulären Ölwechsel nach jeweils ca. 250 Bh (im Vergleich zum Dieselkraftstoffbetrieb halbiertes Ölwechselintervall) untersucht. Der Pflanzenölgehalt im Motorenöl lag bei 4,1 bzw. 4,3 Masse-% und ist somit als unkritisch zu erachten. Alle weiteren untersuchten Parameter waren ebenfalls unauffällig.

Traktor FE-A

Im Projektzeitraum wurden insgesamt neun Beprobungen des Motorenöles durchgeführt. Das Motorenöl des Traktors wurde gemäß Herstelleranforderung alle 250 Bh gewechselt. Der Pflanzenölgehalt im Motorenöl lag bei maximal 2,4 % und bewegte sich damit auf einem niedrigen Niveau. Bezüglich aller weiteren Analyseparameter zeigten sich, wie bei Traktor FE-N, ebenfalls keine Auffälligkeiten. In weiteren Untersuchungen sollte geprüft werden, ob eine Verlängerung des Motorenölwechselintervalls möglich ist. Die Voraussetzungen hierfür scheinen gegeben zu sein.

6.1.5 Notwendige Reparaturen

Im Folgenden werden die im Berichtszeitraum notwendigen Reparaturen aufgeführt, die in einem Zusammenhang mit der Verwendung von Pflanzenöl stehen könnten. In den

meisten Fällen kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass auch im Betrieb mit Dieselkraftstoff eine Reparatur notwendig gewesen wäre. Bei den John Deere Traktoren bleibt weiterhin zu berücksichtigen, dass dies Prototypen und keine Serienmaschinen sind, bei denen während des Betriebs zum Teil Anpassungsmaßnahmen vorgenommen wurden (z.B. Änderungen an der Motorsteuerung). Darüber hinaus wurde ein Abgasnachbehandlungssystem integriert, welches ebenfalls nicht dem Stand einer Serie entspricht.

Traktor JD-K

Beim Traktor JD-K wurden im Berichtszeitraum Änderungen im Bereich der Ansteuerung der Injektorvorwärmung notwendig. Nach den Änderungen waren hier keine Fehlfunktionen festzustellen. Mit Ausnahme dieser Änderung waren keine Reparaturen notwendig, die in Zusammenhang mit dem Betrieb mit Pflanzenöl stehen könnten. An der Abgasnachbehandlung wurde im Feldbetrieb eine Undichtigkeit entdeckt, die jedoch einfach behoben werden konnte und den Betrieb der Maschine nicht beeinträchtigte.

Traktor JD-G

Auch bei Traktor JD-G wurde durch den Landmaschinenhersteller im Bereich der Injektorvorwärmung eine Änderung vorgenommen. Zusätzlich war bei Traktor JD-G im Bereich des Kraftstoffsystems der Austausch von Ventilen notwendig, die eine Fehlfunktion aufwiesen. Die Fehlfunktion konnte nicht direkt auf den Betrieb mit Pflanzenöl zurückgeführt werden. Nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems traten bei diesem Traktor darüber hinaus kurz nach der Auslieferung Leistungsschwankungen auf, die durch ein Update des Motorsteuergerätes durch den Landmaschinenhersteller behoben werden konnten. Weitere Störungen wurden nicht festgestellt.

Traktor FE-N

Bei Traktor FE-N wurden vom Betreiber keine Störungen gemeldet. Am Prüfstand des TFZ kam es zu Problemen im Bereich der Umschaltung zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoff in Verbindung mit Fehlercode 1.2.08 (Druck von Rapsölkraftstoff im Niederdruckteil zu niedrig). Die Fehlersuche wurde in Zusammenarbeit mit der BayWa Straubing durchgeführt. Im Rahmen dessen wurde festgestellt, dass sich immer wieder Luft im Niederdrucksystem des Rapsölkraftstoffkreislaufs befand, die nicht entweichen konnte. Aufgrund der Luft im Kraftstoffsystem sank der Kraftstoffdruck für Rapsölkraftstoff unter den Sollwert, der Fehler wurde ausgelöst und damit umgehend auf den Dieselbetrieb zurückgeschaltet. Da anfänglich der Verdacht auf einen porösen Kraftstoffschlauch im Saugbereich des Kraftstoffkreislaufes bestand, wurden alle betreffenden Kraftstoffschläuche im Rapsölkraftstoff-Niederdrucksystem erneuert. Trotzdem war wieder Luft im System festzustellen, so dass weiterhin die Rapsölkraftstofffförderpumpe und die Rapsölvorfiltereinheit getauscht wurden, jedoch trat das Problem zeitweise immer noch auf. Bei der weiteren Fehlersuche wurden unregelmäßige Fehlfunktionen des Entlüftungsventils festgestellt. Nach dem auch dieses erneuert wurde, war keine Luft im Rapsölkraftstoff-Niederdrucksystem mehr vorhanden und die Maschine funktionierte wieder ordnungsgemäß.

Traktor FE-A

Auch bei Traktor FE-A kam es mehrfach zu Problemen im Bereich der Umschaltung zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoff. Die Maschine wurde aufgrund dessen im August 2010 direkt ins Werk zurückgerufen. Welche Maßnahmen zur Behebung der Probleme getroffen wurden, konnte nicht recherchiert werden. Die Probleme traten jedoch im September 2011 nochmals auf und die Maschine musste in der Werkstatt repariert werden. Hierbei wurden, ähnlich wie bei Traktor FE-N, die Rapsölkraftstoffförderpumpe und die Rapsölvorfiltereinheit getauscht. Mit Ausnahme der Umschaltprobleme waren keine weiteren Störungen zu verzeichnen.

6.2 Leistung, Drehmoment und Kraftstoffverbrauch

Bei allen vier Traktoren wurden Leistung, Drehmoment und Kraftstoffverbrauch mehrmals im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff ermittelt. Die Ergebnisse hierzu werden im Folgenden dargestellt.

Traktor JD-K

In Abbildung 29 sind die Zapfwellenleistung, das äquivalente Motordrehmoment und der spezifische Kraftstoffverbrauch des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff dargestellt. Mit Ausnahme der Messungen nach Einbau der Abgasnachbehandlung (AGN), liegen die ermittelte Leistung, das Drehmoment und der spezifische Kraftstoffverbrauch auf gleichem Niveau. Eine Veränderung war somit während der Betriebszeit vor dem Einbau der Abgasnachbehandlung nicht festzustellen. Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff lag die Leistung des Traktors in etwa um 15 % unter der mit Dieselkraftstoff erzielten. Der Grund für die geringere Leistung liegt in der zugeführten Brennstoffenergiemenge. Während die gravimetrisch pro Hub eingespritzte Einspritzmenge bei Diesel- und Rapsölkraftstoff in etwa gleich ist, ergibt sich aufgrund des gravimetrischen Heizwertunterschiedes von ca. 14 % auch ein entsprechender Leistungsunterschied. Der Wirkungsgrad des Traktors ist im Betrieb mit beiden Kraftstoffen jedoch nahezu gleich.

Nach dem Einbau der AGN wurde am Traktor eine um etwa 5 % geringere Leistung und ein etwa 5 % höherer spezifischer Kraftstoffverbrauch im Vergleich zur letzten Messung vor dem Einbau festgestellt.

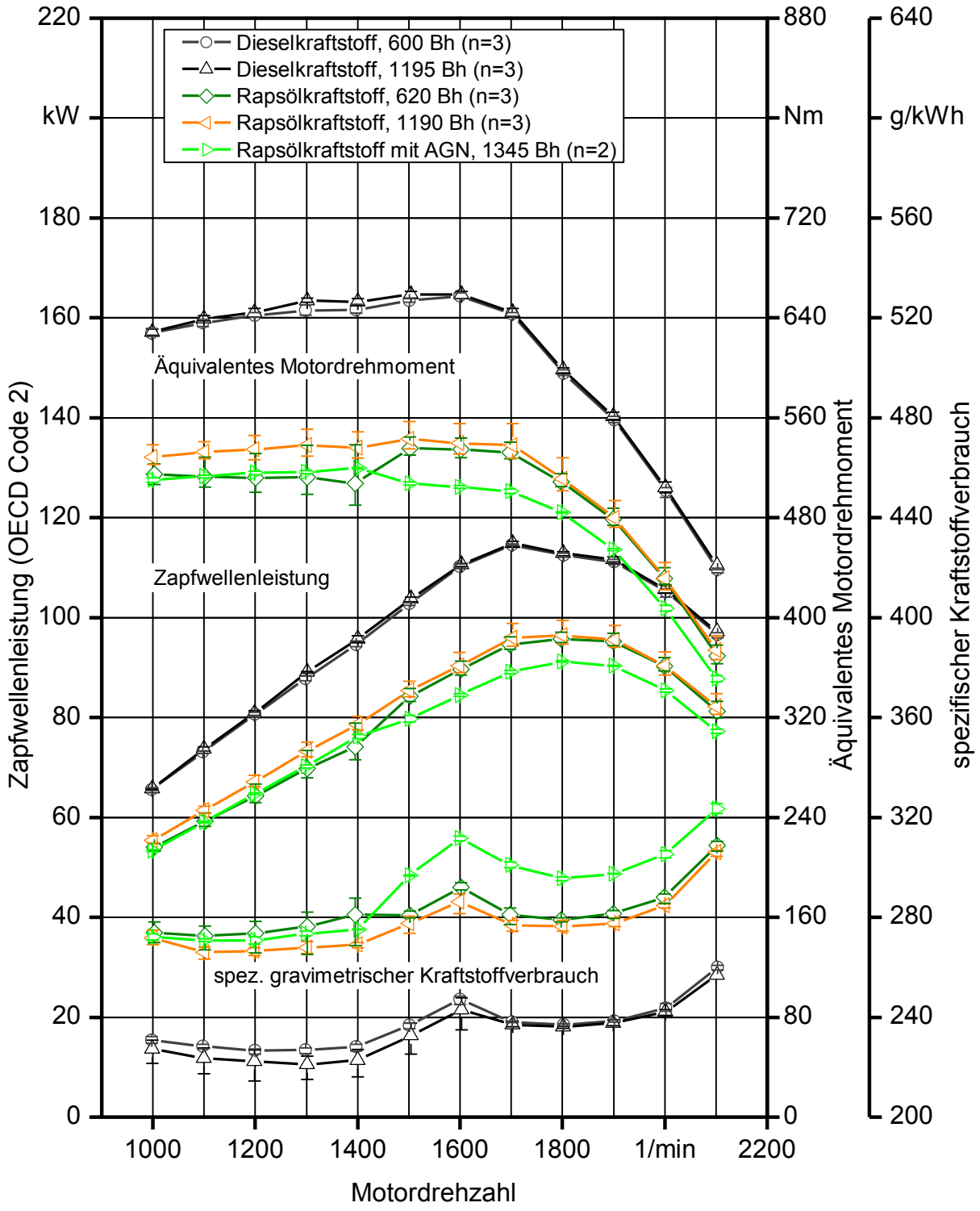


Abbildung 29: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff (n = Anzahl der Messungen)

Traktor JD-G

Die Ergebnisse der Messungen des baugleichen Traktors JD-G zeigt Abbildung 30. Vor dem Einbau der AGN schwankte die Zapfwellenleistung zwischen den Messungen im Jahr 2009, 2010 und 2011 um maximal ± 3 %. Vor dem Hintergrund wechselnder Umgebungsbedingungen wie zum Beispiel dem Umgebungsdruck und der Zeiträume zwischen den Messungen kann von keiner Leistungsänderung ausgegangen werden. Der Traktor JD-G zeigte somit ein gleiches gutes Verhalten wie Traktor JD-K. Auch die geringere Leistung und der höhere spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch im Betrieb mit Rapsölkraftstoff entsprechen in Ihrer Höhe den Ergebnissen, die mit Traktor JD-K gesammelt wurden.

Etwas geringer ausgeprägt zeigte sich jedoch der Leistungsverlust durch den Einbau der AGN, der im Vergleich zur Messung vor dem Einbau bei lediglich ca. 1 % lag. Der spezifische Kraftstoffverbrauch erhöhte sich um ca. 2 %. Die im Detail unterschiedlichen AGN-Systeme unterscheiden sich somit hinsichtlich ihres Einflusses auf das Leistungsverhalten und waren bei Traktor JD-G deutlich geringer als bei Traktor JD-K.

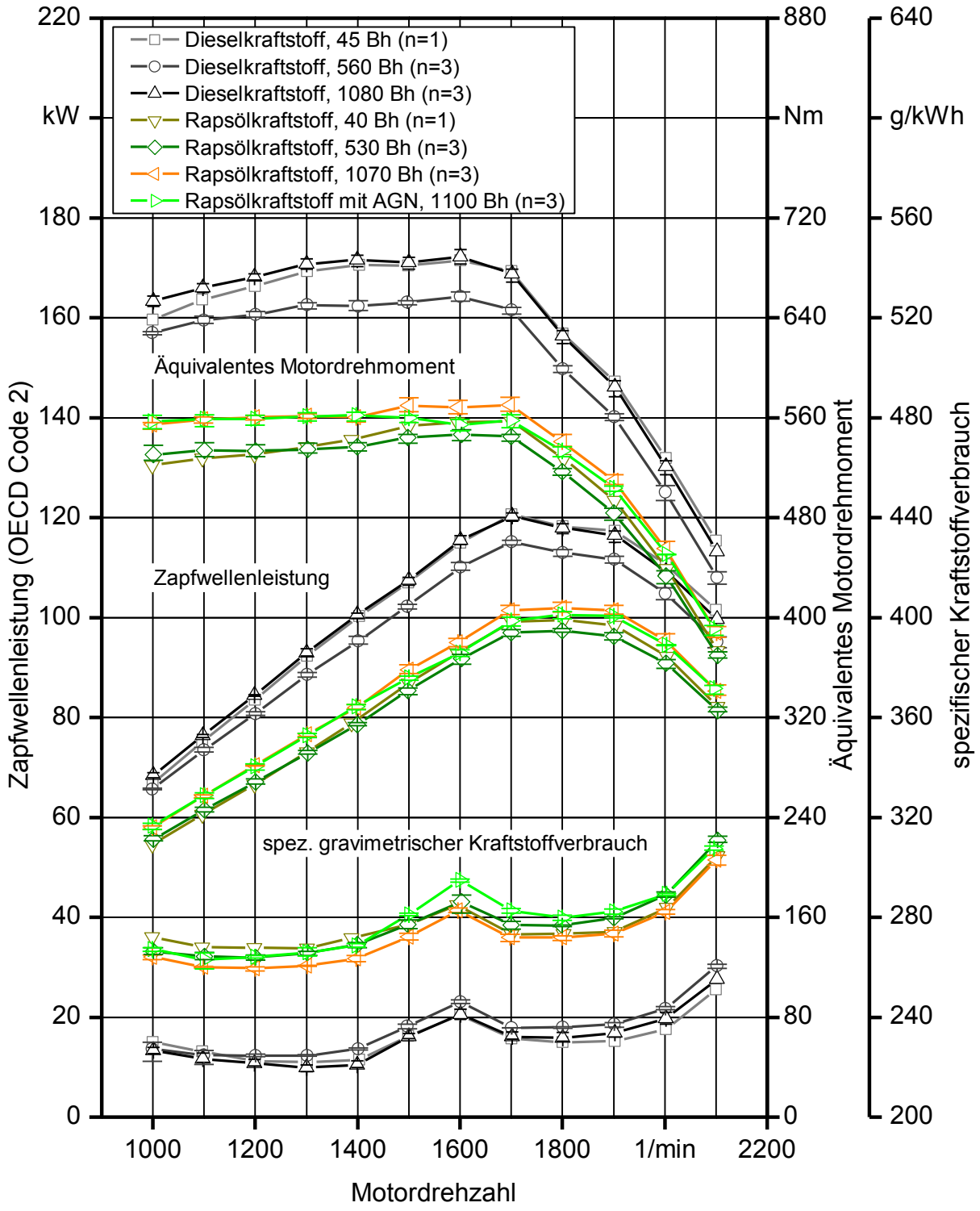


Abbildung 30: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch des Traktors JD-G im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff (n = Anzahl der Messungen)

Traktor FE-A

Zapfwellenleistung, äquivalentes Motordrehmoment und spezifischer Kraftstoffverbrauch von Traktor FE-A sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Messungen wurden vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010 durchgeführt. Sowohl im Betrieb mit Rapsöl- als auch mit Dieselkraftstoff wurden zwischen den Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsmessungen Veränderungen festgestellt. In einem Drehzahlbereich von über 1700 min^{-1} war mit beiden Kraftstoffen ein Leistungsanstieg von bis zu 7 % im Vergleich zur Messung vor dem Feldeinsatz zu beobachten, während es im Drehzahlbereich von unter 1500 min^{-1} zu einem Leistungsabfall von bis zu 5 % kam. Im Mittel über alle Drehzahlen veränderte sich die Leistung jedoch nicht. Hinsichtlich des spezifischen Kraftstoffverbrauchs war bei der Messung nach dem Feldeinsatz im Schnitt ein um etwa 2 % geringerer Kraftstoffverbrauch, sowohl mit Rapsöl- als auch mit Dieselkraftstoff feststellbar. Insgesamt kann somit festgestellt werden, dass sich Leistung und Kraftstoffverbrauch insgesamt kaum änderten und somit keine Anzeichen für etwaigen Verschleiß bestehen.

Beim Vergleich von Rapsöl- mit Dieselkraftstoff sind ähnliche Ergebnisse, wie bei den John Deere Traktoren festzustellen. Die Zapfwellenleistung war im Betrieb mit Rapsöl vor und nach dem Feldeinsatz um etwa 10 % geringer als mit Dieselkraftstoff. Der Leistungsverlust ist somit etwas geringer als bei den Traktoren JD-K und JD-G. Dies liegt an den unterschiedlichen Veränderungen der Einspritzmengen im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff. Während die Einspritzmenge mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei den Traktoren JD-K und JD-G in etwa gleich war, wurde bei Traktor FE-A mit Rapsölkraftstoff eine um etwa 3 bis 5 % höhere gravimetrische Einspritzmenge als mit Dieselkraftstoff ermittelt. Der geringere gravimetrische Heizwertunterschied wird somit durch eine höhere Einspritzmenge zum Teil kompensiert und der heizwertbedinge Leistungsverlust etwas vermindert. Der spezifische Kraftstoffverbrauch des Traktors FE-A lag im Betrieb mit Rapsölkraftstoff um ca. 15 % über dem mit Dieselkraftstoff ermittelten.

Traktor FE-N

Die Ergebnisse der Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsmessungen des Traktors FE-N, der baugleich mit dem Traktor FE-A ist, zeigt Abbildung 32. Der Traktor wurde im Jahr 2010 vor und nach dem Feldeinsatz am Traktorenprüfstand gemessen. Der Verlauf von Leistung, Kraftstoffverbrauch und Drehmoment über die Drehzahl ist bei den Messungen vor und nach dem Feldeinsatz nahezu gleich. Die Unterschiede im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff entsprechen in ihrer Höhe denen, die mit Traktor FE-A ermittelt wurden.

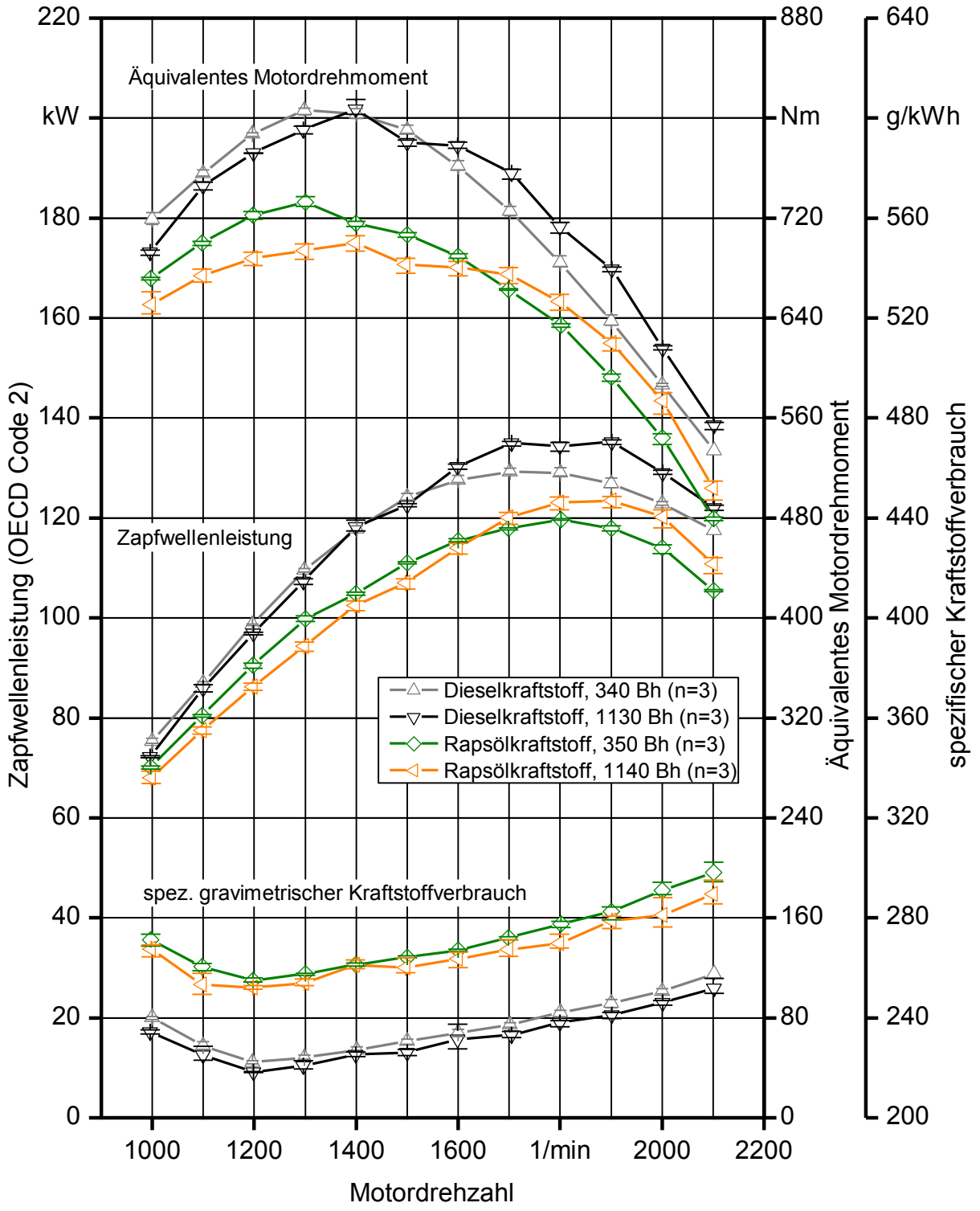


Abbildung 31: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch des Traktors FE-A im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff (n = Anzahl der Messungen)

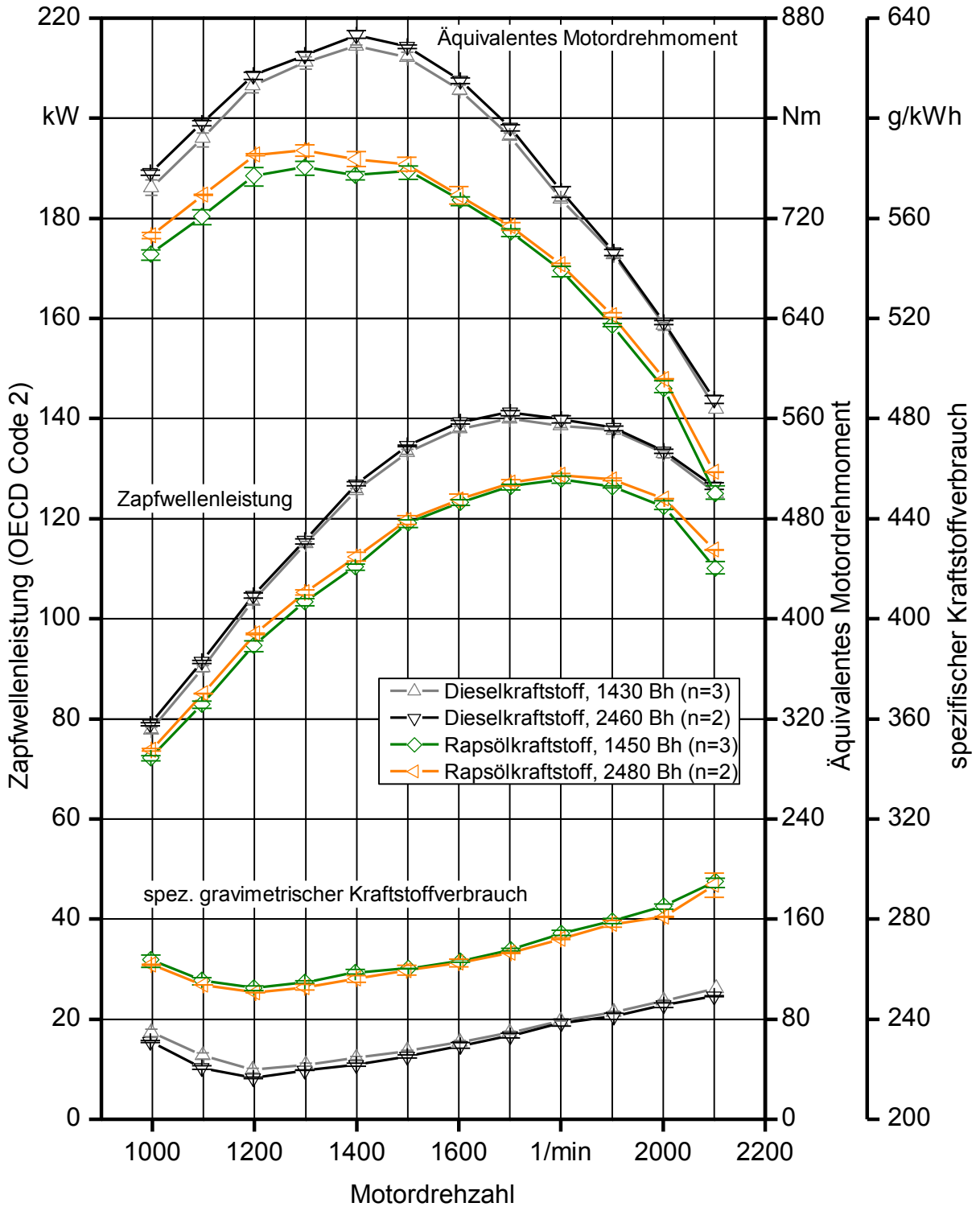


Abbildung 32: Mittelwerte und Spannweiten von Zapfwellenleistung, äquivalentem Motordrehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch des Traktors FE-N im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff (n = Anzahl der Messungen)

Alle vier untersuchten Traktoren mit Common-Rail Motoren zeigen bisher keine Leistungsänderungen, die auf übermäßigen Verschleiß oder einen beginnenden Schaden schließen lassen. Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurde bei allen Traktoren eine geringere Zapfwellenleistung als im Betrieb mit Dieselkraftstoff festgestellt. Grund ist der Heizwertunterschied zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoff. Bei gleichbleibender Einspritzmenge, wie im Falle der John Deere Traktoren, beträgt der Leistungsverlust in etwa 15 bis 17 %. Die Fendt Traktoren weisen mit Rapsölkraftstoff eine um etwa 5 % erhöhte Einspritzmenge auf, aufgrund dessen beträgt der Leistungsverlust lediglich ca. 9 bis 11 %. Bei älteren Traktoren mit mechanischen Einspritzsystemen war zum Teil kein Leistungsverlust, sondern oftmals eine Leistungserhöhung beim Wechsel von Diesel- auf Rapsölkraftstoff festzustellen, siehe z.B. THUNEKE et al. (2009) [51]. Die physikalischen Unterschiede von Rapsölkraftstoff, beispielsweise höhere Viskosität, höhere Dichte und geringere Kompressibilität, führten hier zu höheren Einspritzmengen als im Betrieb mit Dieselkraftstoff. Der Heizwertunterschied wurde somit kompensiert. In Abhängigkeit von der Ausführung und Regelung des Einspritzsystems wirken sich die physikalischen Unterschiede zwischen Pflanzenölen und Dieselkraftstoff unterschiedlich aus, so dass allgemeingültige Aussagen, ob es zu einer Leistungssteigerung oder -verminderung kommt nicht getroffen werden können.

6.3 Emissionsverhalten (wiederkehrende Messungen)

Traktor JD-K

Der Traktor JD-K wurde je viermal im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff vermessen. Als Prüfzyklus wurde der C1-Zyklus nach ISO 8178 mit der entsprechenden Gewichtung angewendet.

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse der NO_X-Emissionen. Die Stickstoffoxid-Emissionen (NO_X) waren im Januar 2009 (45 bis 60 Bh) im Betrieb mit Rapsölkraftstoff mit 7,1 g/kWh$_{ZW}$ an der Zapfwelle um 17 % höher als mit Dieselkraftstoff. Um die NO_X-Emissionen zu reduzieren wurden im Juli 2009 durch den Traktorenhersteller Änderungen an der Software der Engine-Control-Unit durchgeführt. Durch diese Optimierung konnten die NO_X-Emissionen im Rapsölbetrieb um ca. 14 % und im Dieselbetrieb um ca. 15 % reduziert werden. Bezogen auf die Zapfwellenarbeit betrugen die NO_X-Emissionen 6,1 g/kWh$_{ZW}$ mit Rapsölkraftstoff und 5,2 g/kWh$_{ZW}$ mit Dieselkraftstoff. Bei den weiteren Emissionsmessungen nach jeweils ca. 600 Bh zeigte der Traktor sowohl mit Dieselkraftstoff als auch mit Rapsölkraftstoff ein Emissionsverhalten auf gleichem Niveau. Eine Veränderung über die beobachtete Laufzeit von ca. 1200 Bh konnte nicht festgestellt werden.

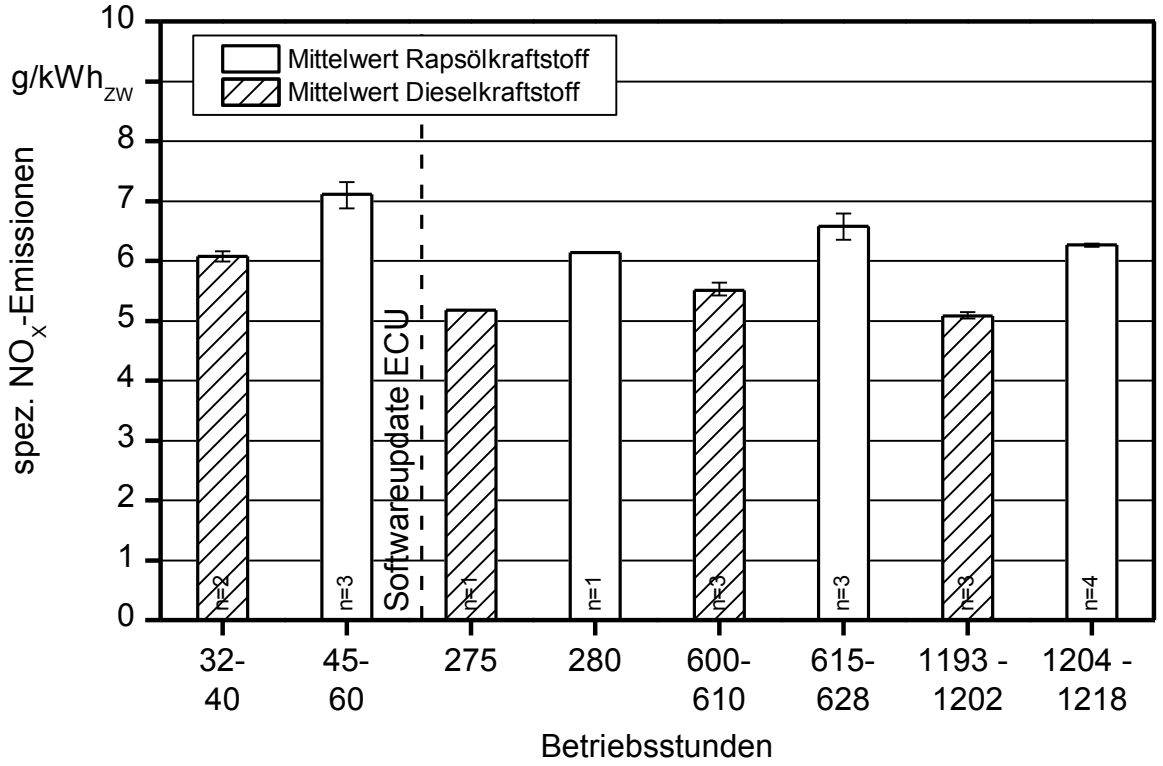


Abbildung 33: Spezifische NO_X-Emissionen des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff während des Berichtszeitraumes

In Abbildung 34 sind die Kohlenstoffmonoxid-Emissionen (CO) dargestellt. Die CO-Emissionen lagen im Januar 2009 im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei 1,1 g/kWh$_{ZW}$ und damit um 20 % höher als die Emissionen im Dieselbetrieb. Durch das Softwareupdate im Juli 2009 bei 269 Bh kam es zu einer Erhöhung der CO-Emissionen um 20 % beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff und um 33 % beim Betrieb mit Dieselkraftstoff. Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurde bei den weiteren Messungen keine wesentliche Veränderung der CO-Emissionen festgestellt. Im Betrieb mit Dieselkraftstoff war bei den Messungen bei ca. 600 Bh gegenüber der Messung bei 275 Bh ein Abnahme von ca. 1,2 auf 1,0 g/kWh$_{ZW}$ zu verzeichnen, wohingegen bei 1200 Bh wieder ein geringfügiger Anstieg auf 1,1 g/kWh$_{ZW}$ erfolgte. Generell liegen die CO-Emissionen auf einem niedrigen Niveau und sind als nicht kritisch zu betrachten.

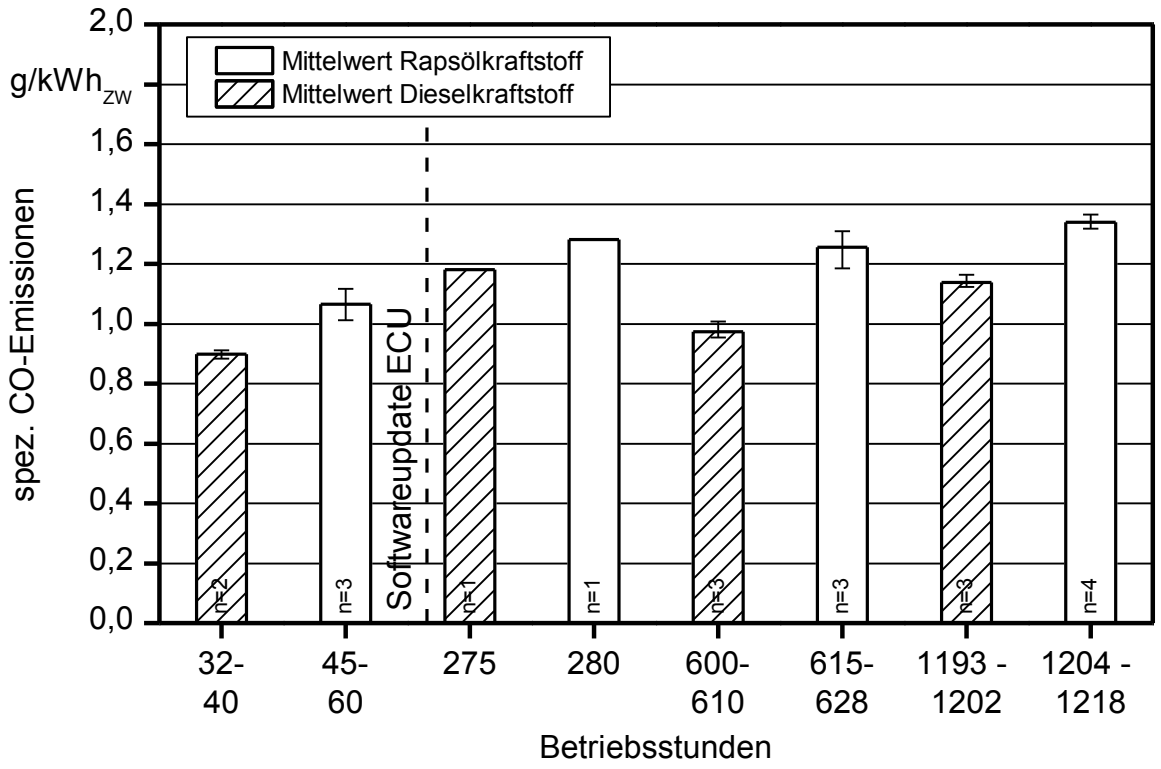


Abbildung 34: Spezifische CO-Emissionen des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff während des Berichtszeitraumes

Die Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC) lagen insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau nahe der Nachweisgrenze (siehe Abbildung 35). Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff zeigte der Traktor vor dem Softwareupdate um ca. 50 % geringere HC-Emissionen als im Betrieb mit Dieselkraftstoff. Die Optimierung der Software führte im Dieselbetrieb zu einer deutlichen Reduzierung der HC-Emissionen. Bei den weiteren Messungen lagen die HC-Emissionen, wie auch schon die NO_X- und CO-Emissionen, auf etwa gleichem Niveau. Mit Rapsölkraftstoff konnten immer zwischen 33 und 48 % geringere HC-Emissionen festgestellt werden.

Auffällig ist, dass die Messergebnisse bei ca. 50 und 600 Bh im Betrieb mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zur Messreihe bei ca. 1200 Bh eine hohe Schwankungsbreite aufweisen. Grund für die bessere Wiederholbarkeit der letzten Messreihen waren Optimierungsmaßnahmen beim zeitlichen Ablauf einer Messung.

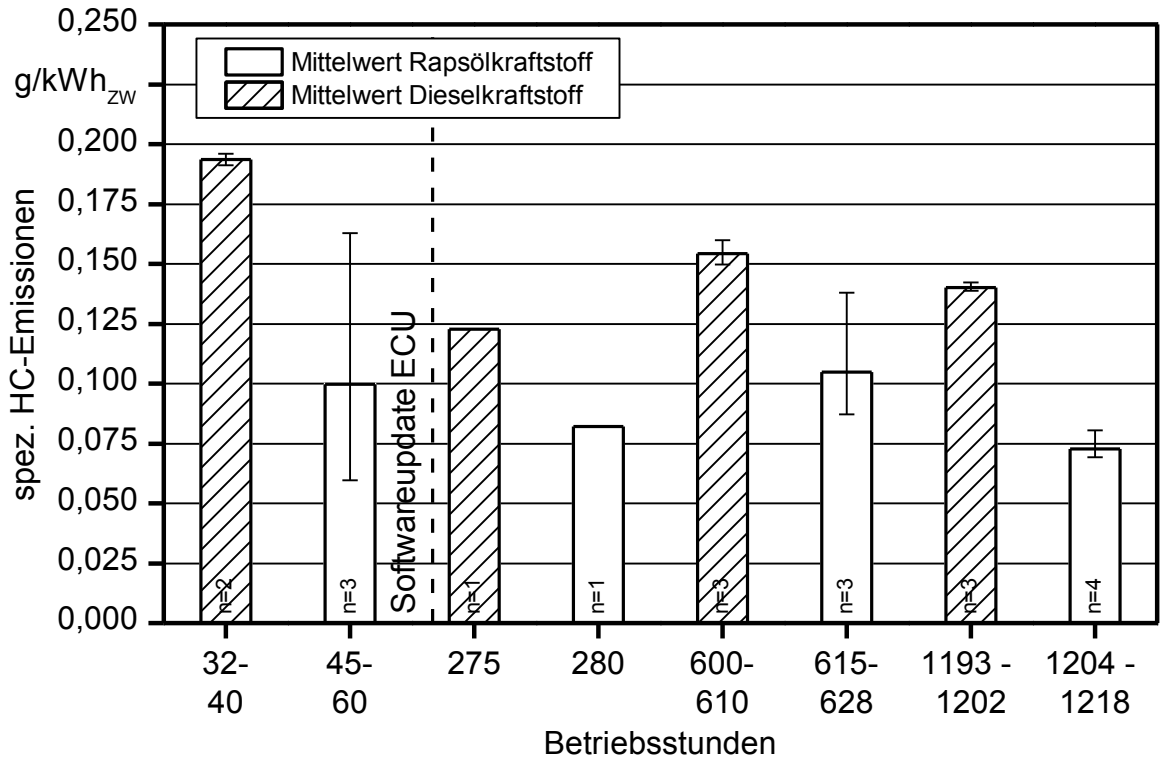


Abbildung 35: Spezifische HC-Emissionen des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff während des Berichtszeitraumes

Die Partikelmasse-Emissionen (PM) waren, wie auch die HC-Emissionen, auf einem sehr geringen Niveau (Abbildung 36). Vor dem Softwareupdate betrug die Partikelmasse-Emission des Traktors im Betrieb mit Rapsölkraftstoff 0,031 g/kWh$_{ZW}$. Im Vergleich zum Dieselkraftstoff entspricht dies einer Reduzierung um ca. 31 %. Durch das Softwareupdate zur Optimierung der NO_X-Emissionen stieg die Partikelmasse-Emission für Rapsölkraftstoff um ca. 19 % und für Dieselkraftstoff um ca. 36 % an. Die nachfolgenden-Emissionsmessungen bei ca. 600 Bh waren auf gleichem Niveau. Bei den letzten Emissionsmessungen bei ca. 1200 Bh war ein leichter Anstieg der PM-Emissionen zu verzeichnen, der für Dieselkraftstoff etwas stärker ausgeprägt war als für Rapsölkraftstoff.

Durch die Anpassung der ECU-Software konnte, wie beabsichtigt, eine Reduzierung der NO_X-Emissionen erreicht werden, wenngleich dies erwartungsgemäß zu einem geringfügigen Anstieg von CO- und PM-Emissionen führte.

Insgesamt konnte am Traktor JD-K während des Berichtszeitraumes nach dem ECU-Update kein Trend zu einer Veränderung des Emissionsverhaltens mit zunehmender Betriebsstundenzahl von NO_X, CO, HC und PM festgestellt werden.

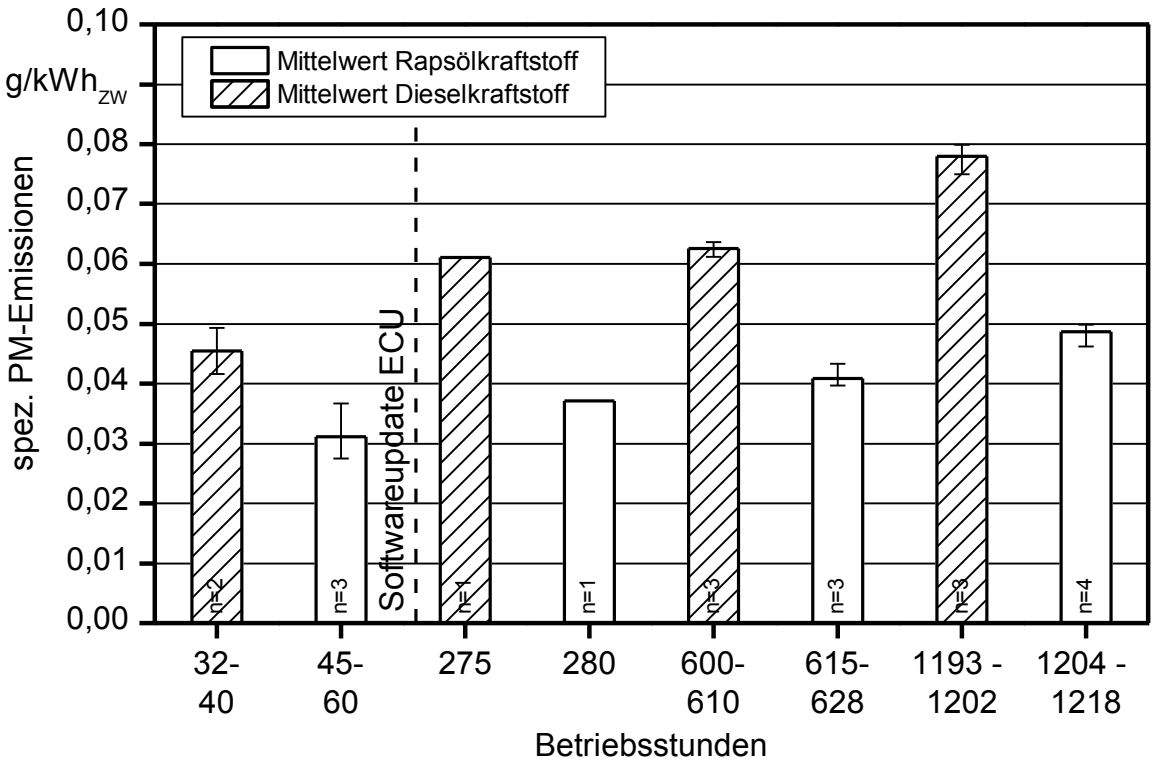


Abbildung 36: Spezifische Partikelmasse-Emissionen (PM) des Traktors JD-K im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff während des Berichtszeitraumes

Traktor JD-G

Im Unterschied zum Traktor JD-K konnte der Traktor JD-G noch im Serienzustand vor der Umrüstung hinsichtlich seines Emissionsverhaltens untersucht werden. Die NO_X-Emissionen betrugen im Serienzustand 5,0 g/kWh$_{ZW}$ und veränderten sich durch die mechanischen Anpassungen kaum. Durch eine Optimierung der Einstellungen der ECU-Software im Rahmen der Umrüstung konnten die NO_X-Emissionen um 9 % auf 4,6 g/kWh$_{ZW}$ reduziert werden und lagen somit unter den Werten des Serienzustandes. Durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff erhöhten sich die NO_X-Emissionen um 24 % auf 5,7 g/kWh$_{ZW}$ und lagen somit 14 % über den Werten im Serienzustand. Bei den weiteren Emissionsmessungen nach je ca. 500 Bh konnten keine deutlichen Veränderungen des Emissionsverhaltens im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff festgestellt werden. In Abbildung 37 sind die Ergebnisse der NO_X-Emissionen dargestellt.

Beim Vergleich der NO_X-Emissionen des Traktors JD-G mit dem baugleichen Traktor JD-K, bewegten sich die Unterschiede im Bereich von max. 14 %. Bis auf eine Ausnahme mit Dieselkraftstoff, zeigte der Traktor JD-G immer ein geringfügig besseres Emissionsverhalten als der Traktor JD-K.

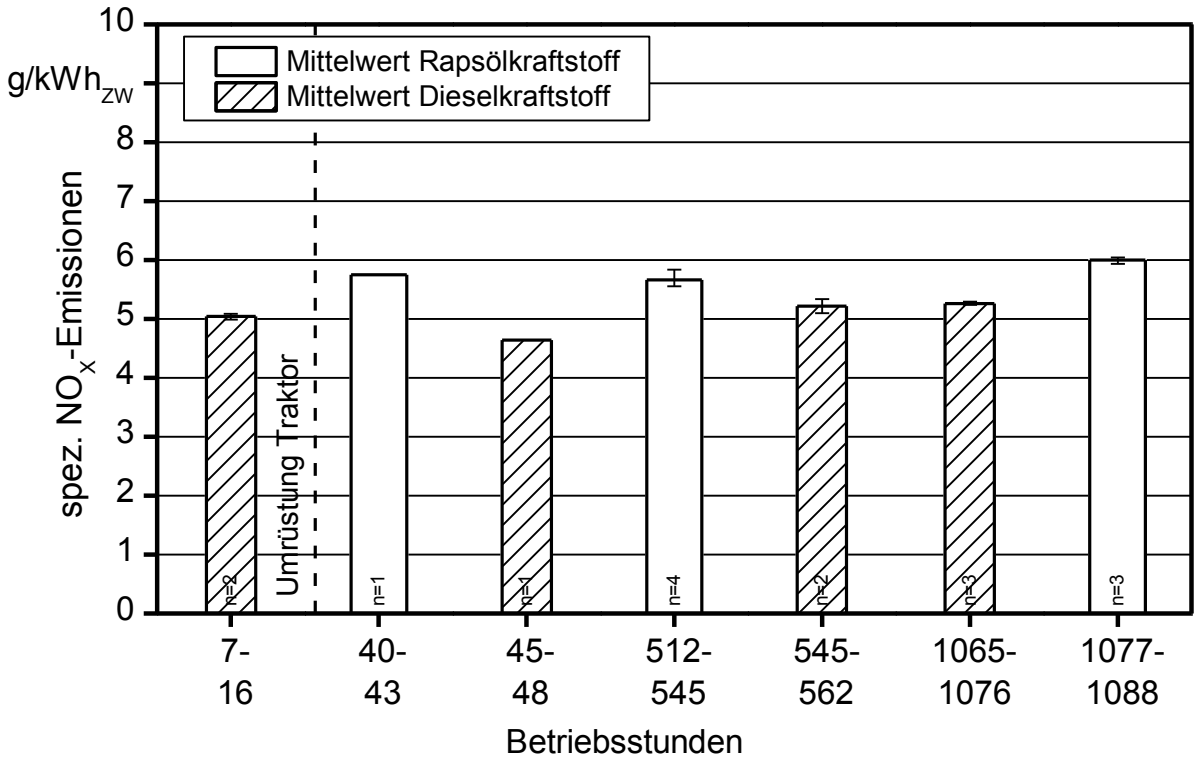


Abbildung 37: Spezifische NO_X-Emissionen des Traktors JD-G im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Originalzustand, sowie Diesel- und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung während des Berichtszeitraumes

Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, erhöhten sich die spezifischen CO-Emissionen im Dieselbetrieb durch die Umrüstung des Traktors von 0,84 g/kWh$_{ZW}$ auf 1,01 g/kWh$_{ZW}$. Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff lagen (nach der Umrüstung) die CO-Emissionen mit 1,31 g/kWh$_{ZW}$ ca. 30 % über dem Wert im Dieselbetrieb. Bei den weiteren Messungen bei 512 und 1077 Bh wurden niedrigere Werte für CO im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ermittelt. Im Vergleich zu Dieselkraftstoff waren mit Rapsölkraftstoff immer 20 bis 30 % höhere spezifische CO-Emissionen zu verzeichnen. Die CO-Emissionen bei ca. 550 Bh und ca. 1100 Bh waren sowohl im Betrieb mit Diesel- als auch im Betrieb mit Rapsölkraftstoff nahezu gleich.

Die CO-Emissionen des Traktors JD-G und JD-K unterscheiden sich im Rapsölbetrieb um max. 15 % und im Dieselbetrieb um max. 20 %. Auch hier war bei den NO_X-Emissionen festzustellen, dass der Traktor JD-G ein besseres Emissionsverhalten aufweist als der Traktor JD-K.

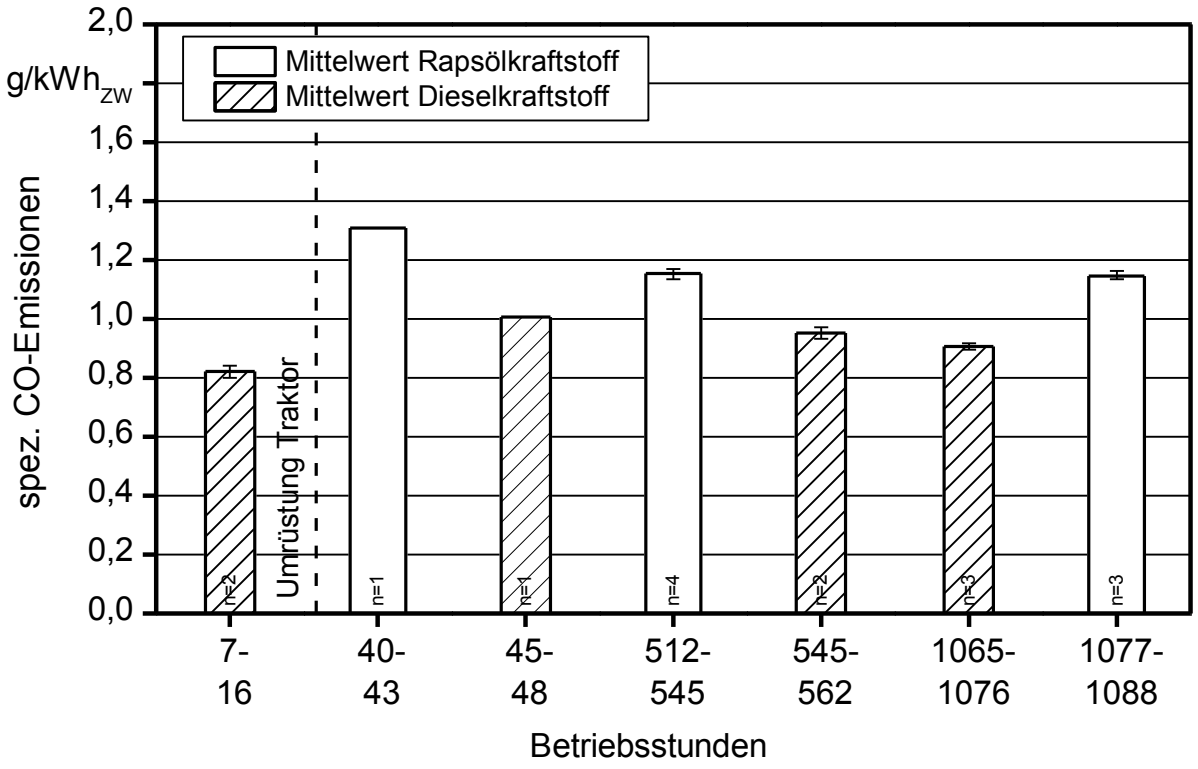


Abbildung 38: Spezifische CO-Emissionen des Traktors JD-G im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Originalzustand, sowie Diesel- und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung während des Berichtszeitraumes

Die HC-Emissionen lagen, wie auch beim Traktor JD-K, auf einem sehr geringen Niveau. Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse der Messungen der spezifischen HC-Emissionen. Über den Berichtszeitraum schwankten die spezifischen HC-Emissionen nur geringfügig. Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurden im Vergleich zu Dieselkraftstoff immer um ca. 25 bis 40 % geringere HC Werte zu ermittelt.

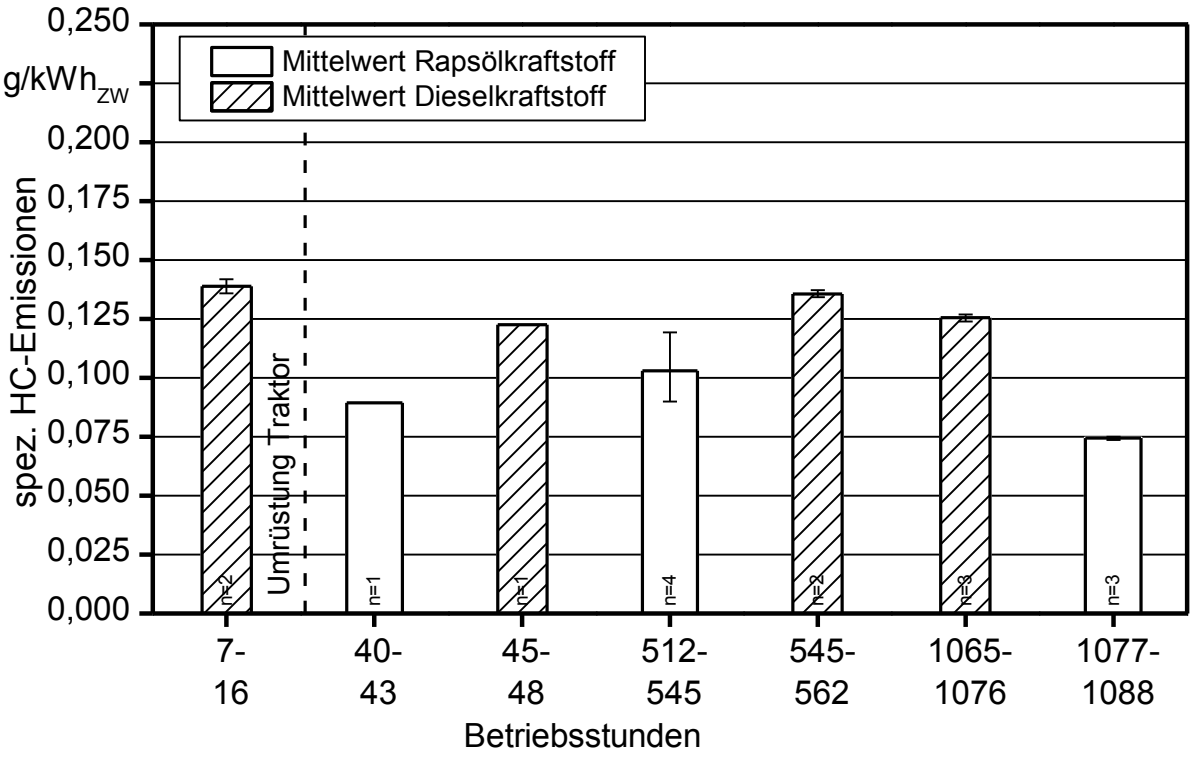


Abbildung 39: Spezifische HC-Emissionen des Traktors JD-G im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Originalzustand, sowie Diesel- und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung während des Berichtszeitraumes

In Abbildung 40 sind die spezifischen Partikelmasse-Emissionen (PM-Emissionen) des Traktors JD-G während des Berichtszeitraumes dargestellt. Nach der Umrüstung war ein Anstieg der spezifischen Partikelmasse-Emissionen von ca. 15 % im Dieselbetrieb zu verzeichnen. Durch den Wechsel von Dieselkraftstoff auf Rapsölkraftstoff reduzierten sich die Emissionen jedoch wieder um ca. 20 %. Bei den nachfolgenden Emissionsmessungen waren weder für den Betrieb mit Rapsöl- noch mit Dieselkraftstoff größere Änderungen des Partikelmasse-Ausstoßes zu verzeichnen. Mit Rapsölkraftstoff wurden immer um ca. 20 % geringere spezifische Partikelmasse-Emissionen festgestellt als mit Dieselkraftstoff.

Auch beim Traktor JD-G konnten während des Berichtszeitraumes keine Auffälligkeiten hinsichtlich des Emissionsverhaltens von NO_X, CO, HC und PM beobachtet werden. Eine Abhängigkeit des ermittelten Emissionsverhaltens von den Betriebsstunden war in den ersten ca. 1100 Bh nicht festzustellen.

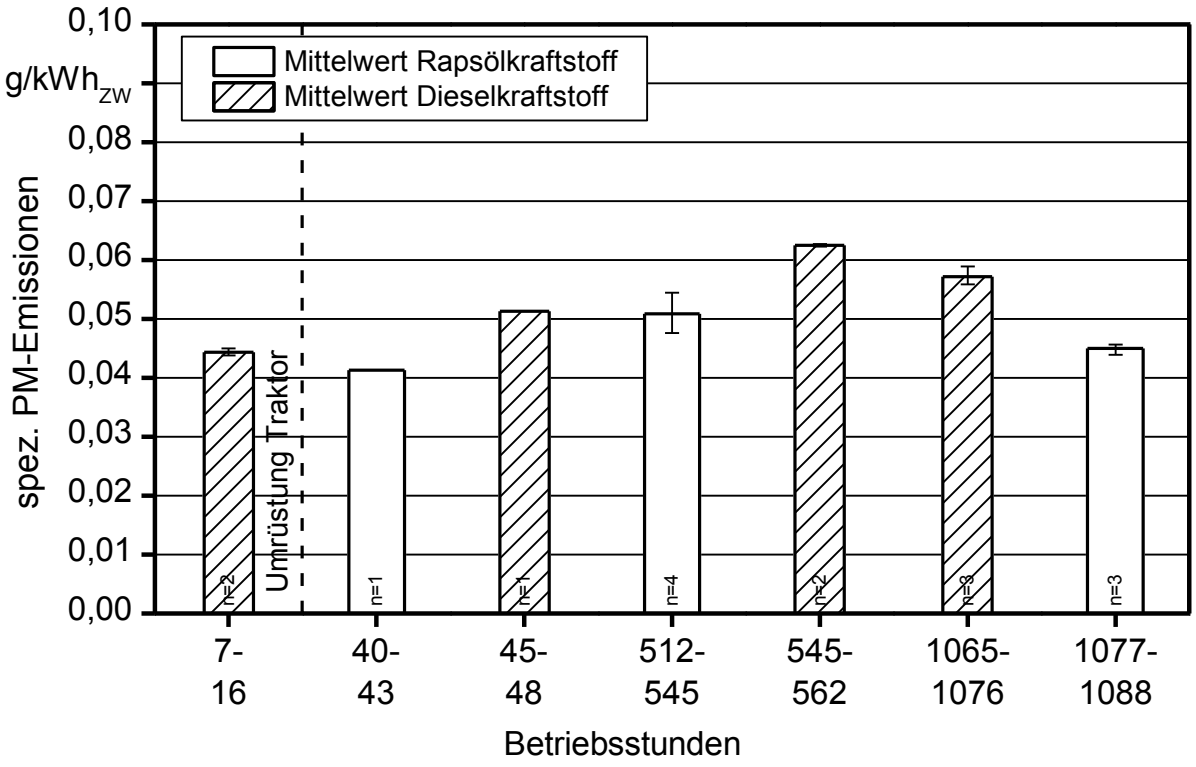


Abbildung 40: Spezifische Partikelmasse-Emissionen des Traktors JD-G im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Originalzustand, sowie Diesel- und Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung während des Berichtszeitraumes

Traktor FE-A

Der Traktor FE-A wurde während des Berichtszeitraumes zweimal hinsichtlich seines Emissionsverhaltens im Betrieb mit Rapsölkraftstoff und Dieselkraftstoff untersucht. Die erste Messreihe wurde im Februar 2010, die zweite im Januar 2011 durchgeführt. Zwischen den Messreihen war der Traktor für ca. 750 Bh am LVFZ Achselschwang im Einsatz. Aufgrund von Problemen mit dem Kraftstoffmanagementsystem wurde der Traktor im August 2010 für ca. drei Wochen in das Werk nach Marktoberdorf zurückgeholt.

Bei den Emissionsmessungen mit Rapsölkraftstoff ist das Ergebnis sowohl mit aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem (KMS) als auch mit erzwungenem Rapsölbetrieb angegeben. Bei aktivem KMS wurden die ersten sieben Prüfpunkte des Prüfzyklus mit Rapsölkraftstoff gefahren, im achten Prüfpunkt (Leerlauf) stellte das KMS auf Dieselkraftstoff um.

Bei den spezifischen NO_X-Emissionen war zwischen der ersten und zweiten Messreihe keine Veränderung feststellbar (Abbildung 41). Auch im Betrieb mit Dieselkraftstoff im Vergleich zu Rapsölkraftstoff waren keine Unterschiede in den spezifischen NO_X-Emissionen zu verzeichnen.

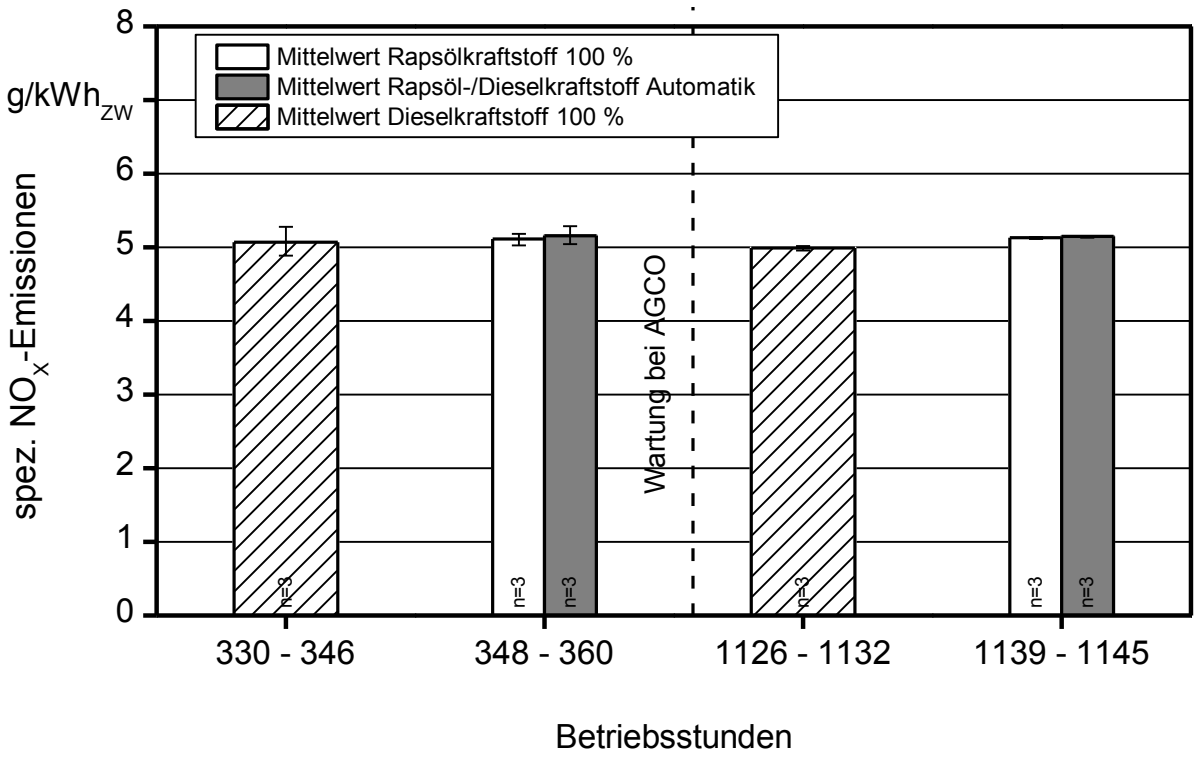


Abbildung 41: Spezifische NO_X-Emissionen des Traktors FE-A im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010

In Abbildung 42 sind die spezifischen CO-Emissionen des Traktors der beiden Messreihen dargestellt. Zwischen der ersten und zweiten Messreihe sind für Dieselkraftstoff um ca. 30 % geringere und für Rapsölkraftsoff um ca. 24 % geringere spezifische CO-Emissionen festzustellen. Bei beiden Messreihen waren im Betrieb mit Rapsölkraftstoff geringere spezifische CO-Emissionen feststellbar als mit Dieselkraftstoff. Beim Vergleich der Emissionen mit aktiviertem KMS gegenüber erzwungenem Rapsölbetrieb, sind mit dem KMS ca. 12 % geringere spezifische CO-Emissionen zu verzeichnen.

Auch hinsichtlich der spezifischen HC-Emissionen (Abbildung 43) wurde zwischen der ersten und zweiten Messreihe eine Abnahme festgestellt, wenngleich nicht in dem Ausmaß wie bei den spezifischen CO-Emissionen. Im Dieselkraftstoffbetrieb waren bei der zweiten Messreihe um ca. 17 % geringere und im Rapsölbetrieb um 27 bis 35 % geringere spezifische HC-Emissionen zu verzeichnen. Bei beiden Messserien waren die spezifischen HC-Emissionen des Traktors mit Dieselkraftstoff in etwa doppelt so hoch wie mit Rapsölkraftstoff. Beim Vergleich der spezifischen HC-Emissionen im Betrieb mit aktivem KMS gegen erzwungenen Rapsölbetrieb war bei der ersten Messreihe kein Unterschied feststellbar, während bei der zweiten Messreihe mit dem KMS geringfügig höhere Emissionen zu beobachten waren.

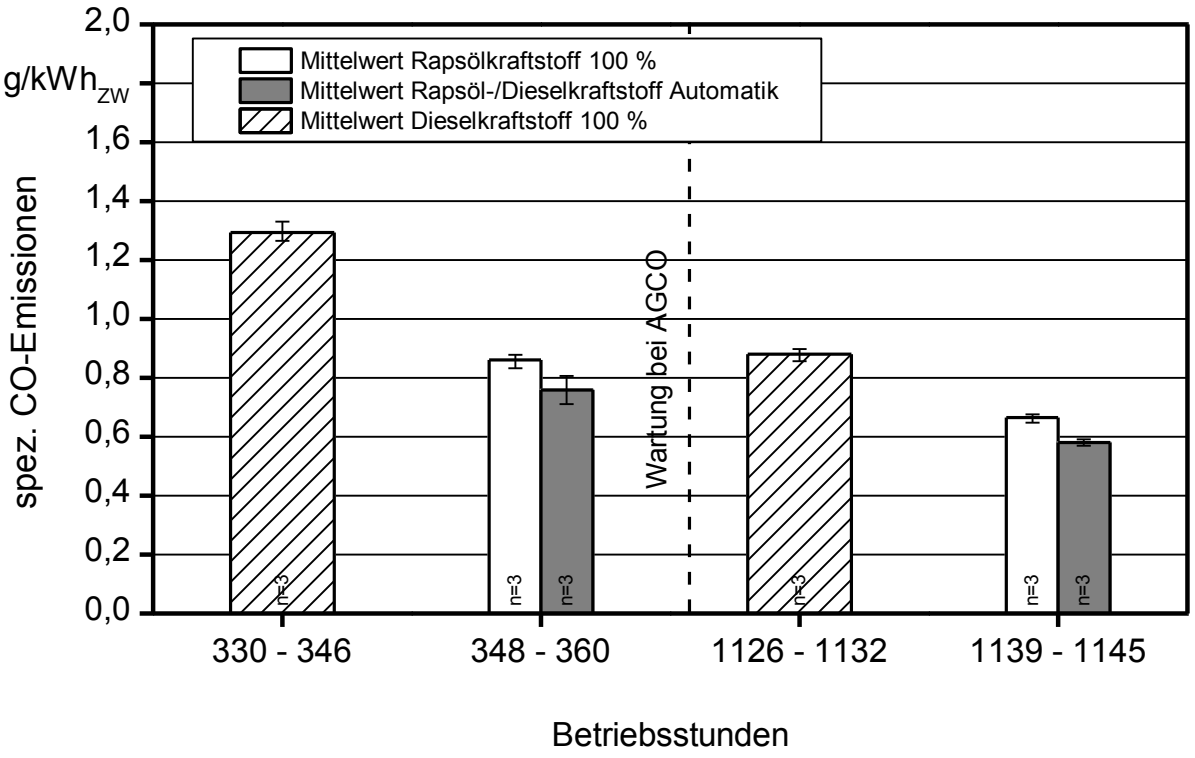


Abbildung 42: Spezifische CO-Emissionen des Traktors FE-A im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010

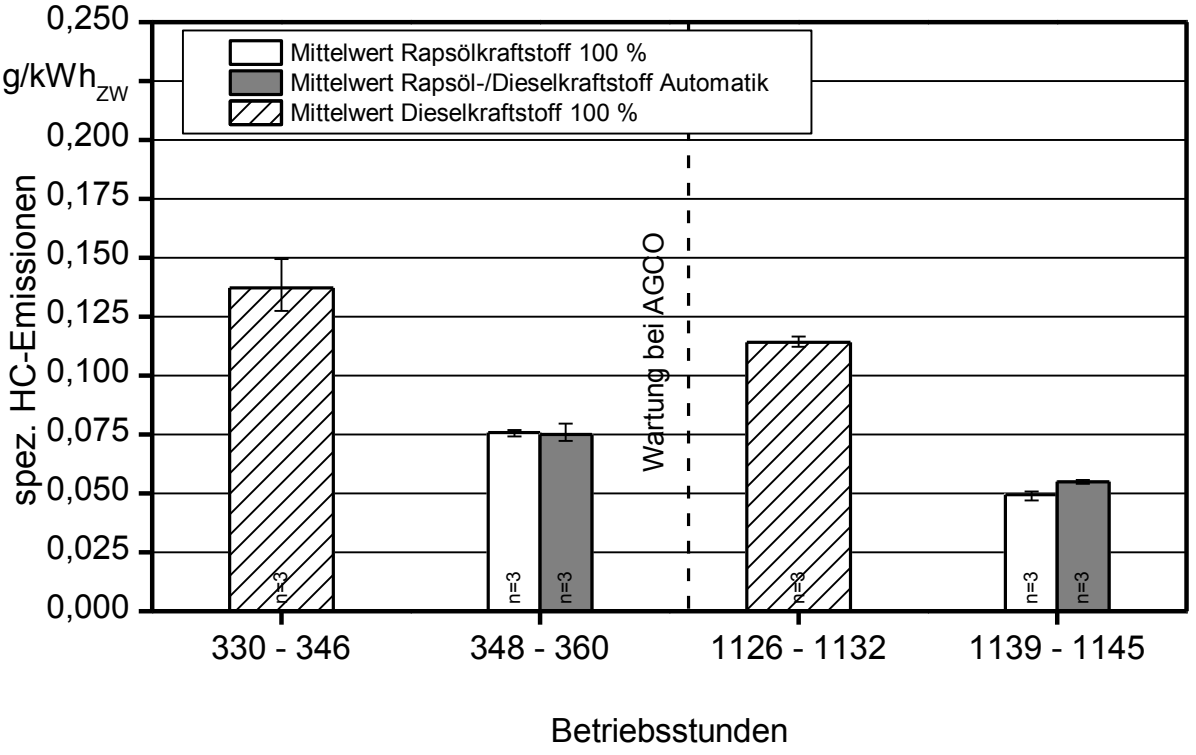


Abbildung 43: Spezifische HC-Emissionen des Traktors FE-A im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010

Abbildung 44 zeigt die spezifischen Partikelmasse-Emissionen (PM-Emissionen) des Traktors. Wie bei den spezifischen HC- und CO-Emissionen sind auch hier Differenzen zwischen den Ergebnissen der beiden Messreihen zu erkennen. Im Dieselbetrieb wurden bei der zweiten Messreihe um ca. 30 % geringere und im Rapsölbetrieb um ca. 20 bis 24 % geringere spezifische PM-Emissionen über den Prüfzyklus ermittelt. Bei beiden Messreihen waren die spezifischen PM-Emissionen im Betrieb mit Dieselkraftstoff in etwa doppelt so hoch als mit Rapsölkraftstoff. Mit aktivem KMS konnten im Mittel ca. 5 bis 10 % geringere spezifische PM-Emissionen festgestellt werden als im erzwungenen Rapsölkraftstoffbetrieb. Grund hierfür ist, dass in Prüfphase 8 (Leerlauf) Dieselkraftstoff verwendet wurde mit dem der Traktor in diesem Betriebspunkt geringere PM-Emissionen aufwies als mit Rapsölkraftstoff

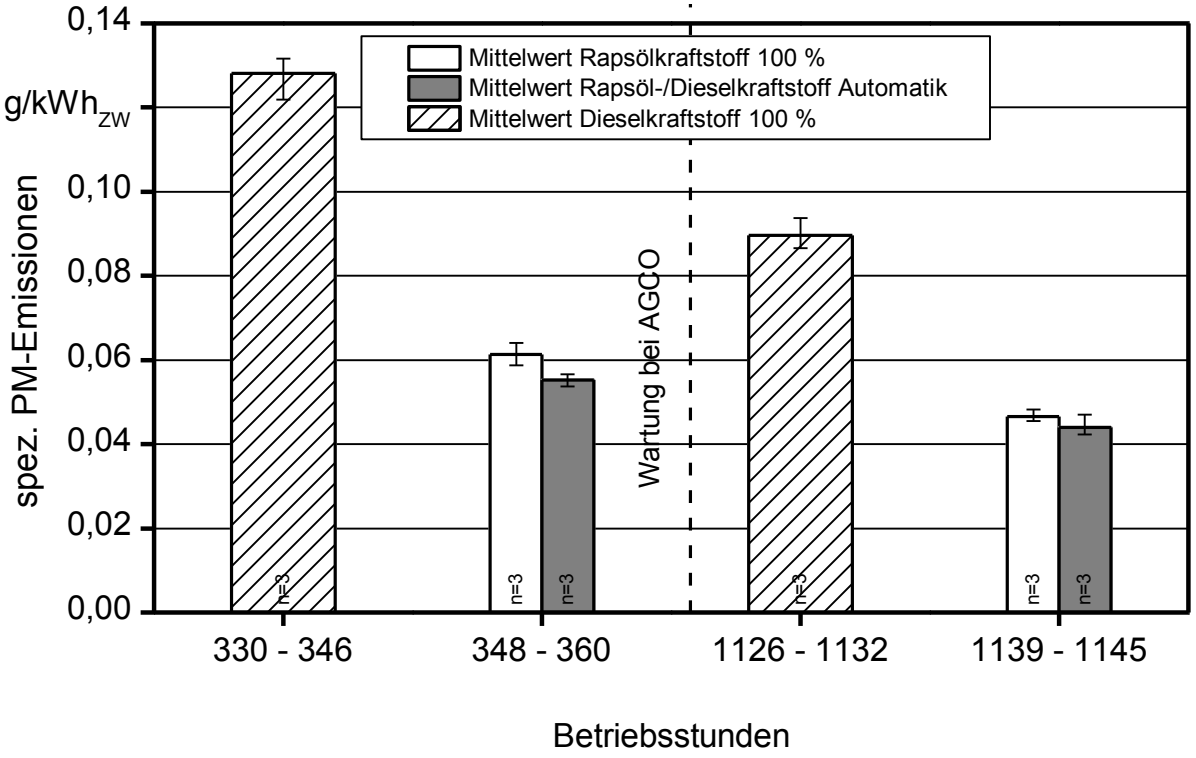


Abbildung 44: Spezifische Partikelmasse-Emissionen des Traktors FE-A im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010

Traktor FE-N

Auch der Traktor FE-N wurde während des Berichtszeitraumes zweimal hinsichtlich seines Emissionsverhaltens im Betrieb mit Rapsölkraftstoff und Dieselkraftstoff untersucht werden. Die erste Messreihe wurde im März 2010, vor dem Feldeinsatz durchgeführt, die zweite Messreihe im Februar 2011 nach ca. 800 Bh.

In Abbildung 45 sind die spezifischen NO_X-Emissionen des Traktors vor und nach dem Feldeinsatz dargestellt. Bei der zweiten Messreihe wurden im Dieselkraftstoffbetrieb im Mittel 10 % höhere und im Rapsölbetrieb ca. 4 % höhere spezifische NO_X-Emissionen festgestellt. Insbesondere für Rapsölkraftstoff liegen diese Abweichungen im Bereich der Spannweite der Wiederholungsmessungen, so dass hier keine deutliche Änderung des Emissionsverhaltens ersichtlich ist. Zwischen dem Betrieb mit aktiviertem Kraftstoffmanagement (Automatik) und erzwungenem Rapsölkraftstoffbetrieb waren keine Unterschiede zu beobachten. Im Vergleich zum Betrieb mit Dieselkraftstoff waren im Rapsölkraftstoffbetrieb im Mittel ca. 0 bis 7 % höhere spezifische NO_X-Emissionen zu verzeichnen, die Werte lagen wiederum im Bereich der Spannweiten zwischen den Wiederholungsmessungen. Im Vergleich zum Traktor FE-A wurden bei der zweiten Messreihe um ca. 10 % geringere spezifische NO_X-Emissionen gemessen, der Traktor FE-N weist somit ein etwas besseres Emissionsverhalten hinsichtlich NO_X auf.

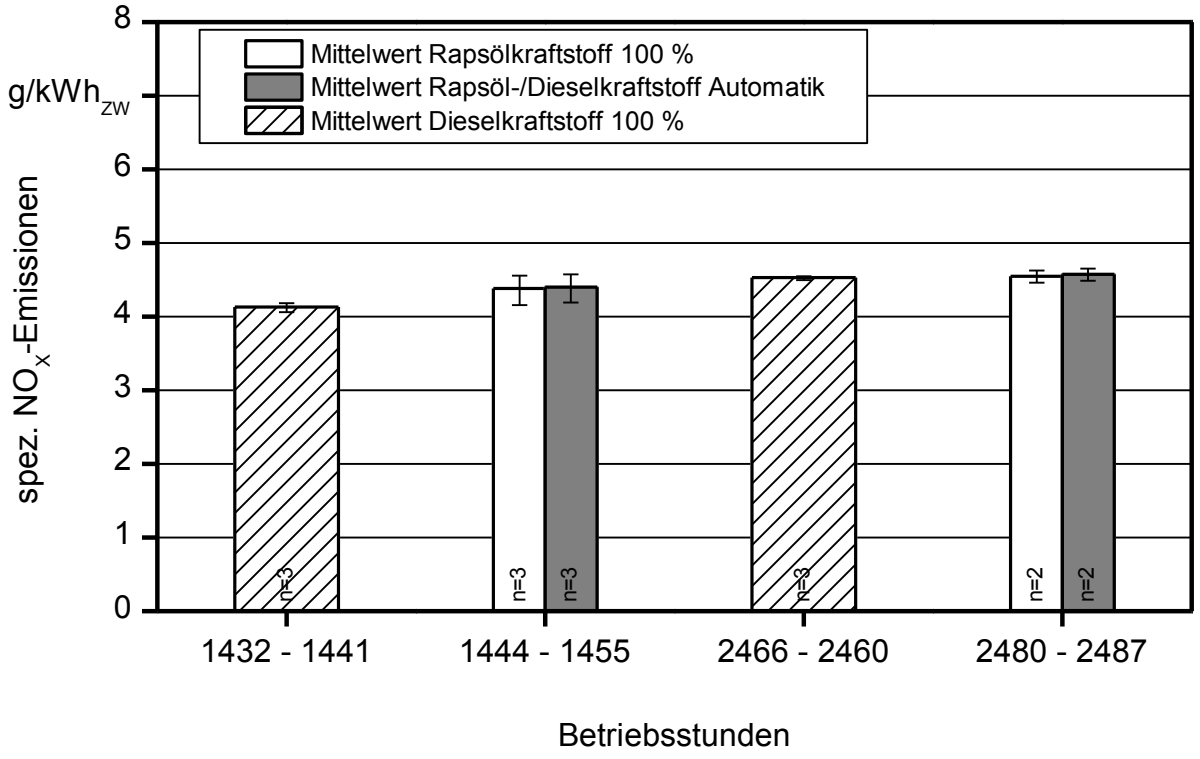


Abbildung 45: Spezifische NO_X-Emissionen des Traktors FE-N im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010

Die CO-Emissionen unterscheiden sich deutlich zwischen der ersten und der zweiten Messreihe (Abbildung 46). Insbesondere im Betrieb mit Dieselkraftstoff wurden bei der zweiten Messreihe um ca. 40 % geringere CO-Emissionen festgestellt. Auch im Betrieb mit Rapsölkraftstoff war ein geringerer CO-Ausstoß zu beobachten, wenngleich auf deutlich niedrigerem Niveau. Waren bei der ersten Messreihe noch um 26 bis 37 % geringere CO-Emissionen feststellbar, so waren bei der zweiten Messreihe im erzwungenen Raps-

ölbetrieb um ca. 8 % höhere und mit aktiviertem Kraftstoffmanagement um ca. 12 % geringere CO-Emissionen im Vergleich zum Dieselbetrieb zu verzeichnen. Mit aktivem Kraftstoffmanagement lagen bei beiden Messreihen die CO-Emissionen um 15 – 20 % unter denen des erzwungenen Rapsölbetriebs.

Beim Traktor FE-N wurden auch bei den spezifischen CO-Emissionen um ca. 30 bis 45 % geringere Werte ermittelt als beim Traktor FE-A.

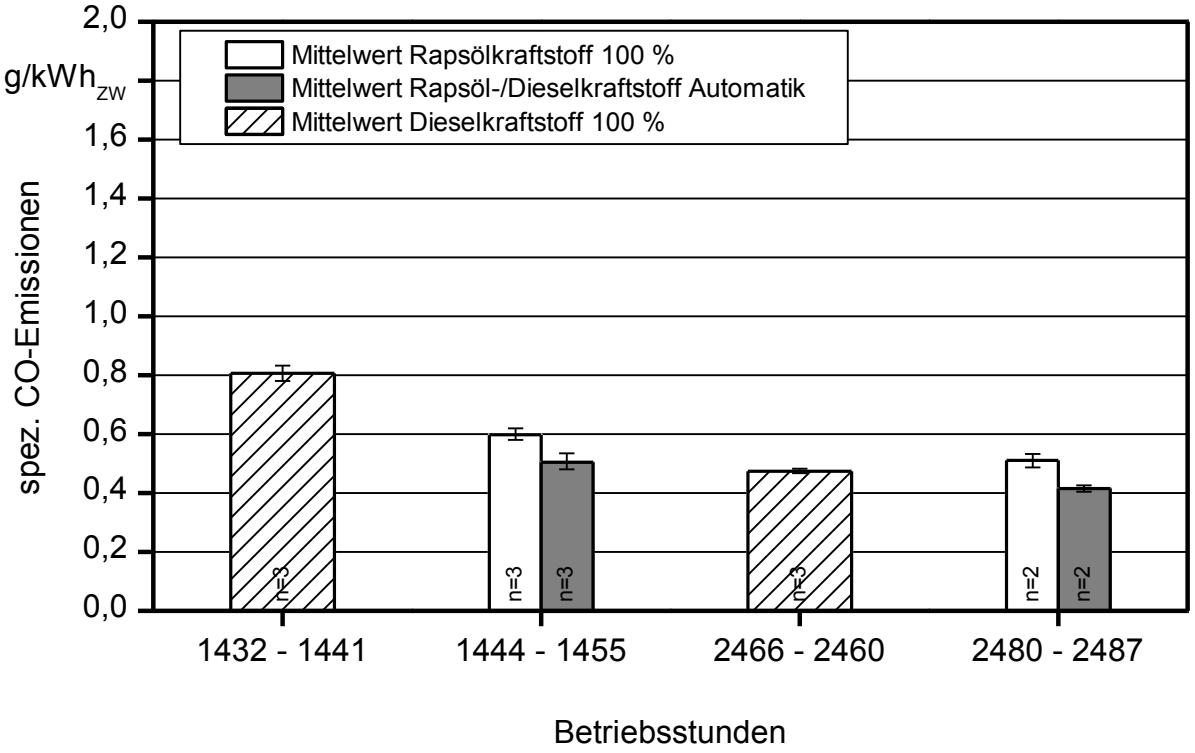


Abbildung 46: Spezifische CO-Emissionen des Traktors FE-N im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010

In Abbildung 47 sind die spezifischen HC-Emissionen dargestellt. Beim Vergleich der ersten mit der zweiten Messreihe wurden sowohl für den Betrieb mit Diesel- als auch mit Rapsölkraftstoff um ca. 10 % geringere HC-Emissionen ermittelt. Bei beiden Messreihen waren mit Rapsölkraftstoff ca. 45 bis 50 % geringere HC-Emissionen als mit Dieselkraftstoff feststellbar.

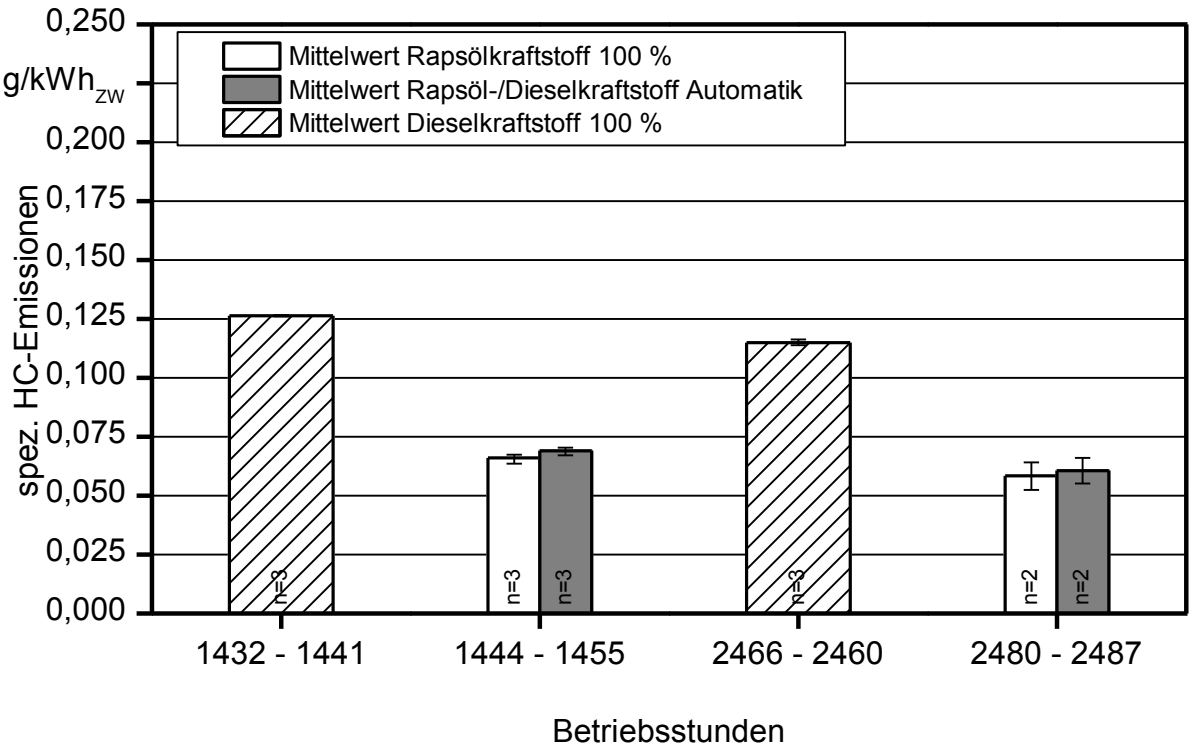


Abbildung 47: Spezifische HC-Emissionen des Traktors FE-N im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010

Abbildung 48 zeigt die PM-Emissionen des Traktors. Ähnlich wie bei den CO-Emissionen war zwischen der ersten und zweiten Messreihe ein deutliches Absinken des PM-Ausstoßes zu verzeichnen. Insbesondere im Betrieb mit Dieselkraftstoff halbierten sich die PM-Emissionen im Vergleich zu den ersten Messungen. Bei allen Messungen waren im Betrieb mit Rapsölkraftstoff deutlich geringere PM-Emissionen zu verzeichnen, die sich bei aktiviertem KMS weiter verringerten.

Beim Vergleich der Traktoren FE-A und FE-N war bei beiden Traktoren mit zunehmender Betriebsstundenzahl eine Abnahme der CO- und PM-Emissionen feststellbar, welche für den Betrieb mit Dieselkraftstoff deutlicher war als für Rapsölkraftstoff. Bei in etwa gleicher Betriebsstundenzahl bewegten sich beide Traktoren auf einem ähnlichen Emissionsniveau für CO, HC und PM, während bei NO_X der Traktor FE-A etwas höhere Werte aufwies als der Traktor FE-N.

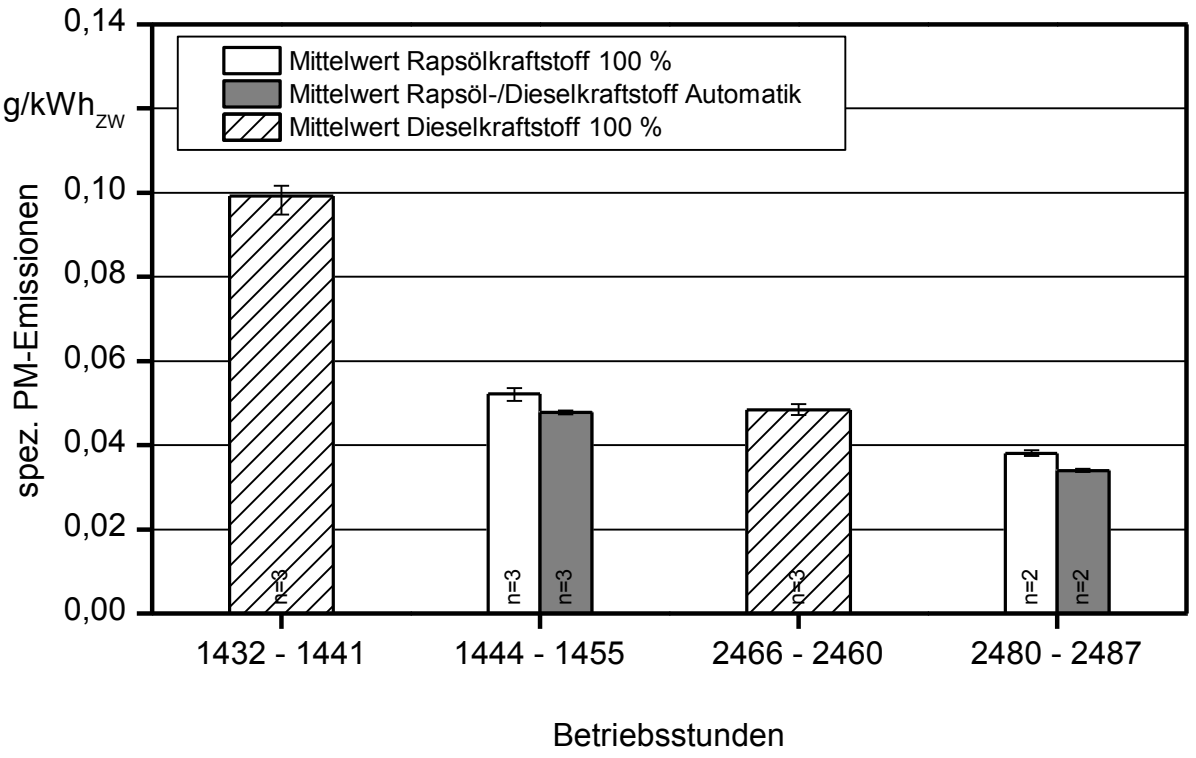


Abbildung 48: Spezifische Partikelmasse-Emissionen des Traktors FE-N im Betrieb mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff und Rapsöl-/Dieselkraftstoff bei aktiviertem Kraftstoffmanagementsystem vor und nach dem Feldeinsatz im Jahr 2010

6.4 Emissionsverhalten bei verschiedenen Prüfzyklen

Die Ergebnisse beruhen auf den Messergebnissen mit Traktor JD-K im Betrieb mit Rapsölkraftstoff. Insgesamt kamen drei verschiedene Prüfzyklen zur Anwendung (siehe hierzu auch Kapitel 5.5). Während für den 8-Phasen-Zyklus und den 6-Stufen-Test die einzustellenden Prüfbedingungen vorgegeben sind, wurde der 31-Punkte-Zyklus anhand von Ergebnissen der sekündlich aufgezeichneten Betriebsdaten der Traktoren JD-K und JD-G erstellt. Ausgangsbasis hierfür waren die im Feldbetrieb 2010 gesammelten Daten (siehe hierzu auch Kapitel 6.1.2). Insgesamt standen in etwa 2,6 Millionen aufgezeichnete Messwerte zu Drehzahl und Kraftstoffverbrauch aus dem CAN-Bus des Traktors zur Verfügung, die hinsichtlich der Häufigkeit ihres Auftretens den 31 Prüfpunkten zugeordnet werden sollten. Im Abgleich mit den am Traktorenprüfstand während der Emissionsmessung aufgezeichneten Messwerte der Betriebsdatenerfassung wurden 31 Kategorien zur Zuordnung der im Feld ermittelten Messdaten festgelegt. In Tabelle 24 sind die Daten zu den einzelnen Kategorien im Überblick dargestellt. Hierbei bleibt zu berücksichtigen, dass der vom CAN-Bus abgefragte Kraftstoffverbrauch nicht mit dem am Prüfstand gemessenen übereinstimmt und aufgrund dessen, trotz der präziseren Messtechnik am Prüfstand, die Kategorisierung anhand der CAN-Bus-Daten erfolgt, da nur diese im Feldbetrieb aufgezeichnet wurden. Im Mittel liegt der am Prüfstand gemessene Kraftstoffverbrauch um etwa 2 bis 3 l unter dem vom CAN-Bus. Mit Hilfe der Matrix nach Ta-

belle 24 konnten 70 % der im Feldbetrieb aufgezeichneten Messwerte eingeordnet werden. Die restlichen 30 % der aufgezeichneten Daten konnten nicht zugeordnet werden.

Tabelle 24: Kategorien der vom CAN-Bus des Traktors abgerufenen Drehzahlen und Kraftstoffverbräuche zur Zuordnung der im Feldbetrieb anhand der Betriebsdatenerfassung ermittelten Messwerte

Drehzahlkategorie in min^{-1}	Kraftstoffverbrauchskategorie in l/h bei einer Motorlast von					
	0 %	10 %	25 %	50 %	75 %	100 %
840 - 860	0,75 - 2,00					
1000 - 1200		1,50 - 4,00	4,01 - 8,00	8,01 - 13,00	13,01 - 18,00	> 18,01
1201 - 1400		1,50 - 4,50	4,51 - 10,00	10,01 - 16,50	16,51 - 21,50	> 21,51
1401 - 1600		2,00 - 5,50	5,51 - 11,50	11,51 - 19,00	19,01 - 25,50	> 25,51
1601 - 1800		2,50 - 7,00	7,01 - 13,50	13,51 - 22,00	22,01 - 29,00	> 29,01
1801 - 2000		2,80 - 7,50	7,51 - 14,00	14,01 - 23,00	23,01 - 29,00	> 29,01
2001 - 2200		3,00 - 7,50	7,51 - 14,00	14,01 - 22,00	22,01 - 27,50	> 27,51

Unter Anwendung der in Tabelle 24 definierten Kategorien können die in Tabelle 25 aufgeführten Häufigkeiten der Messwerte zugeordnet werden. Die prozentuale Häufigkeit entspricht der Gewichtung der Kategorie bzw. des Prüfpunktes bei der Berechnung der spezifischen Emissionen.

Tabelle 25: Anteil der Messwerte pro Kategorie bzw. Gewichtung der Kategorien

Drehzahlkategorie in min^{-1}	Häufigkeit der Messwerte bei einer Motorlast von					
	0 %	10 %	25 %	50 %	75 %	100 %
840 - 860	13,28 %					
1000 - 1200		1,70 %	3,19 %	2,19 %	0,75 %	0,59 %
1201 - 1400		1,75 %	4,57 %	2,57 %	0,70 %	0,95 %
1401 - 1600		1,66 %	4,63 %	2,91 %	1,02 %	1,97 %
1601 - 1800		1,39 %	2,30 %	2,35 %	1,03 %	5,88 %
1801 - 2000		1,00 %	1,47 %	1,87 %	2,43 %	17,52 %
2001 - 2200		1,02 %	1,74 %	3,97 %	4,60 %	6,98 %

In Abbildung 49 sind die Ergebnisse zu den spezifischen Emissionen von NO_X, CO, HC und PM unter Anwendung der verschiedenen Prüfzyklen dargestellt. Die spezifischen

NO_X-Emissionen sind mit dem 8-Phasen-Zyklus mit etwa 6,3 g/kWh$_{ZW}$ am geringsten und unter Anwendung des neu definierten 31-Punkte-Zyklus mit etwa 8,7 g/kWh$_{ZW}$ am höchsten. Die verschiedenen Prüfzyklen zeigen kaum einen Einfluss auf die spezifischen CO- und HC-Emissionen. Die spezifischen PM-Emissionen bewegen sich generell auf einem niedrigen Niveau. Die mit dem 8-Phasen-Zyklus und 6-Stufen-Test ermittelten Werte unterscheiden sich kaum. Die unter Anwendung des 31-Punkte-Zyklus resultierenden PM-Emissionen liegen um etwa 10 % unter denen, der mit den anderen Testzyklen ermittelten.

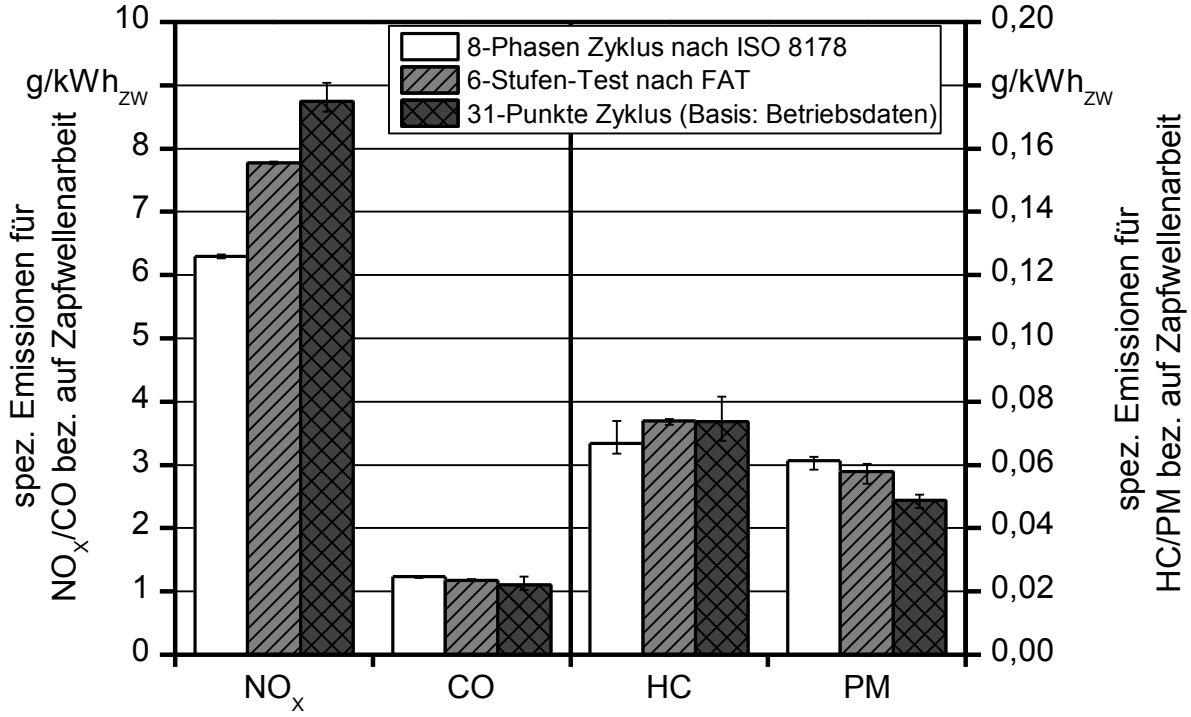


Abbildung 49: Spezifische Emissionen von NO_X, CO, HC und Partikelmasse des Traktors JD-K unter Anwendung verschiedener Prüfzyklen

Die Wahl des Prüfzyklus beeinflusst die NO_X-Emissionen am stärksten. Die Unterschiede liegen unter anderem darin begründet, dass je nach Betriebspunkt die Abgasrückführrate des Traktors variiert. Insbesondere bei Messpunkten mit niedriger Drehzahl und geringer Last wird die Abgasrückführung zum Teil vollständig abgeschaltet. Solche Messpunkte sind beim 31-Punkte-Zyklus häufiger vorhanden als bei den anderen beiden Prüfzyklen.

6.5 Emissionsverhalten mit Abgasnachbehandlung (AGN)

In die Traktoren JD-K und JD-G wurden experimentelle Abgasnachbehandlungssysteme mit gleichem Aufbau, jedoch zum Teil unterschiedlichen Komponenten eingebaut. Auf-

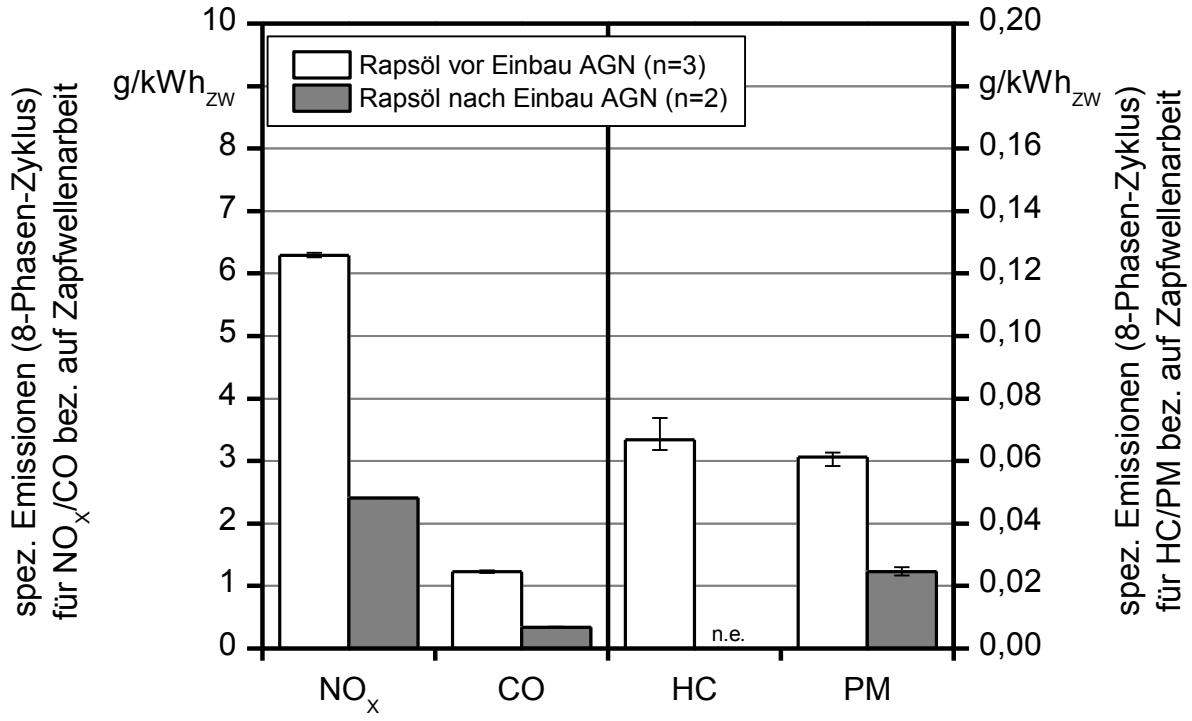
grund dessen sind unterschiedliche Schadstoffemissionen und Minderungsraten mit den beiden AGN-Systemen zu erwarten. Die im Rahmen des Projektes verwendeten Abgasnachbehandlungssysteme entsprechen keinem Serienstand und werden in dieser Form nicht in weiteren Maschinen eingesetzt.

6.5.1 Prüfzyklus Emissionen

Traktor JD-K

Durch den Einbau der AGN reduzierten sich die Emissionen der Schadstoffkomponenten NO_X, CO und Partikelmasse deutlich. Für HC konnten nach dem Einbau der AGN aufgrund eines Defektes am Flammen-Ionisations-Detektor keine Messwerte ermittelt werden.

Die spezifischen NO_X-Emissionen waren nach der Installation der AGN im Mittel um 62 %, die spezifischen CO-Emissionen um 72 % und die Partikelmasseemissionen um 60 % geringer als vor dem Einbau der AGN. In Abbildung 50 sind die Ergebnisse der gewichteten spezifischen Emissionen zusammenfassend dargestellt.



n.e.: nicht ermittelt aufgrund eines technischen Defekts

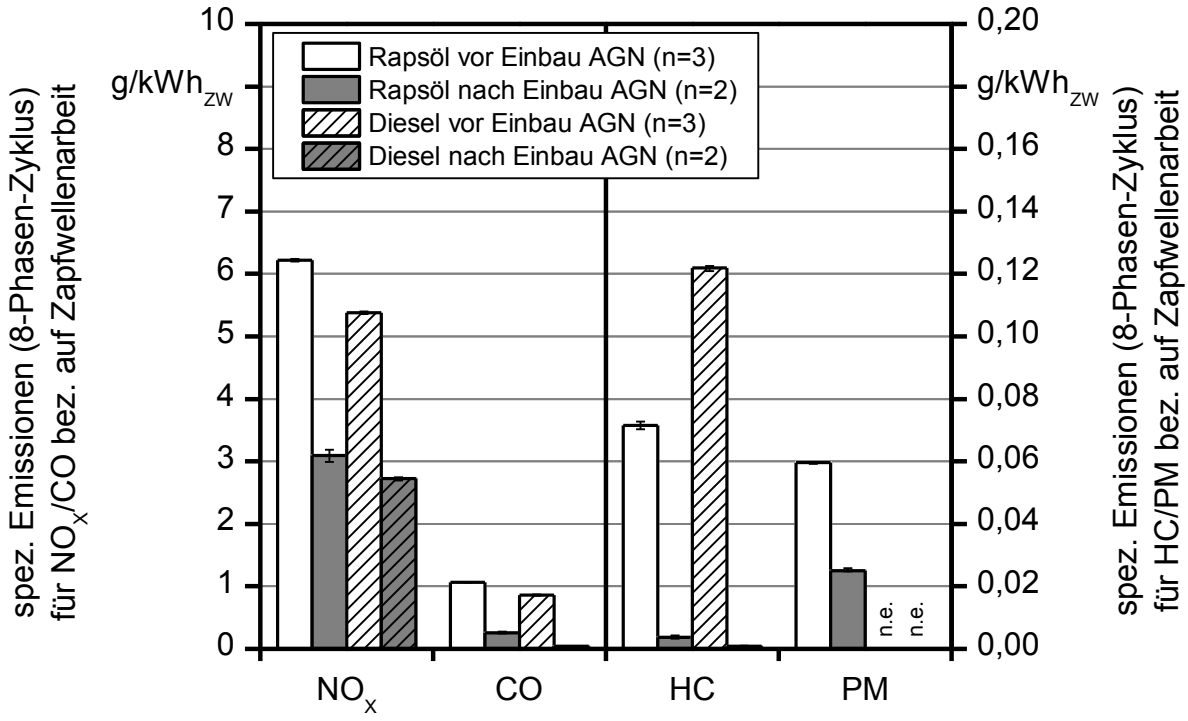
Abbildung 50: Spezifische Emissionen von NO_X, CO, HC und Partikelmasse des Traktors JD-K vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage

Traktor JD-G

Auch bei Traktor JD-G führte der Einbau der AGN zu einem deutlichen Rückgang aller spezifischen Emissionen.

Die spezifischen NO_X-Emissionen wurden von 6,2 g/kWh$_{ZW}$ auf 3,1 g/kWh$_{ZW}$ um 50 % reduziert. Dies ist etwas weniger als bei Traktor JD-K. Die spezifischen CO-Emissionen sanken von 1,1 g/kWh$_{ZW}$ auf 0,3 g/kWh$_{ZW}$. Die Minderungsrate betrug hier 76 % und liegt im Bereich wie bei Traktor JD-K, wo die Minderungsrate bei 72 % lag. Die spezifischen HC-Emissionen wurden um 95 % auf 0,04 g/kWh$_{ZW}$ vermindert. Bei den spezifischen Partikelmasse-Emissionen kam es zu einer Reduzierung von 0,060 g/kWh$_{ZW}$ auf 0,025 g/kWhZW. Die Minderungsrate betrug somit in etwa 58 % und lag etwas niedriger als bei Traktor JD-K.

In Abbildung 51 sind die Ergebnisse der spezifischen Emissionen von Traktor JD-K dargestellt.



n.e.: nicht ermittelt

Abbildung 51: Spezifische Emissionen von NO_X, CO, HC und Partikelmasse des Traktors JD-G vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen)

6.5.2 Limitierte Emissionen in den Prüfphasen

Da die Schadstoffemissionen abhängig vom Betriebszustand des Traktors sind, werden im Folgenden die Schadstoffkonzentrationen im Abgas bei den einzelnen Prüfphasen dargestellt.

Traktor JD-K

In Abbildung 52 bis Abbildung 54 sind die NO_X-, CO- und PM-Konzentrationen im Abgas bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau der AGN dargestellt. Mit Ausnahme des Leerlaufs und der Teillastbetriebsphase wurden die NO_X-Emissionen um ca. 60 bis 80 % reduziert. Im Teillastbetrieb sind geringere Minderungsraten festzustellen und im Leerlauf wird die Harnstoffeinspritzung deaktiviert, da die Temperaturen unterhalb der Betriebstemperatur des Katalysators liegen. Auch hinsichtlich der CO-Konzentration ist im Leerlauf eine geringe Verminderung von in etwa 20 % zu beobachten, während bei allen anderen Prüfphasen CO durch den Oxidationskatalysator nahezu vollständig umgesetzt wird. Die Partikelmasse-Konzentration wird in den meisten Prüfphasen um etwa 40 bis 60 % reduziert. Ausnahmen stellen die Prüfphasen 3 und 4 dar. In der Prüfphase 3 war kaum eine Verminderung zu erkennen, während bei Prüfphase 4 die Partikelmasse-Konzentration um 80 % gesenkt wurde. Die Effektivität der AGN zur Minderung der Partikelmasse-Emissionen zeigte sich weitgehend unabhängig von den Betriebszuständen. Bei den NO_X- und CO-Emissionen wurden im Leerlauf und zum Teil in der Niedriglastbetriebsphase geringe Schadstoffminderungen festgestellt.

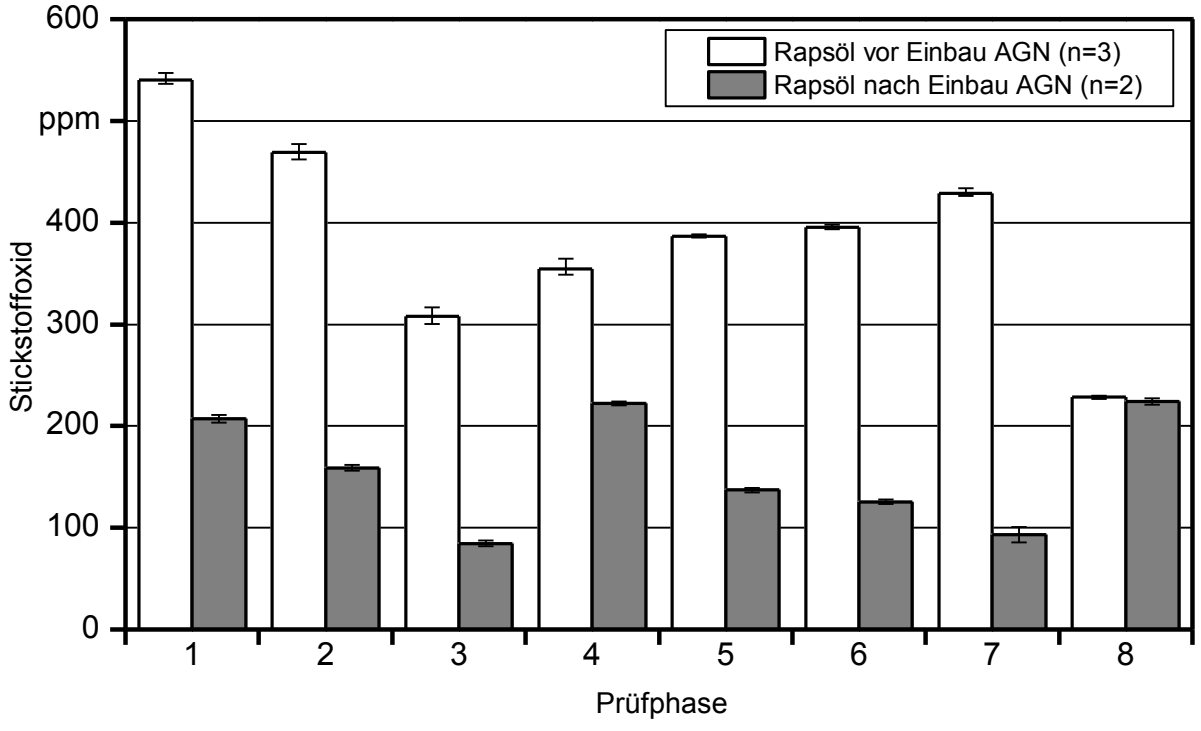


Abbildung 52: Stickstoffoxid-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-K

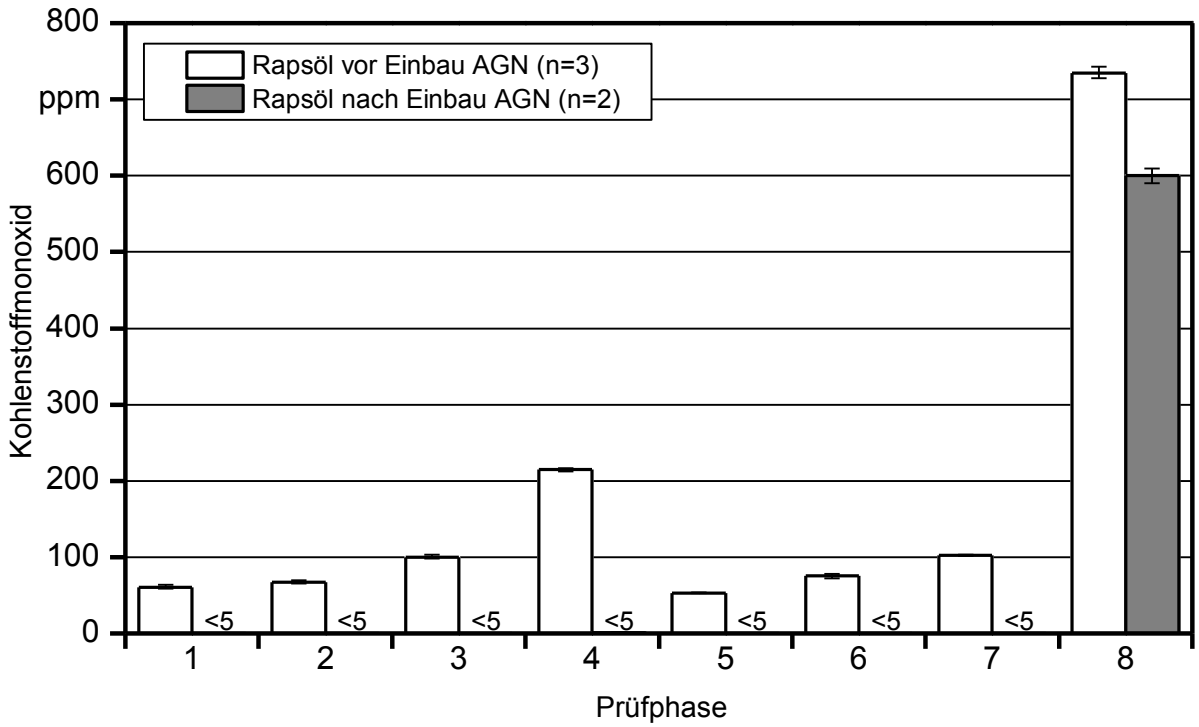


Abbildung 53: Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-K

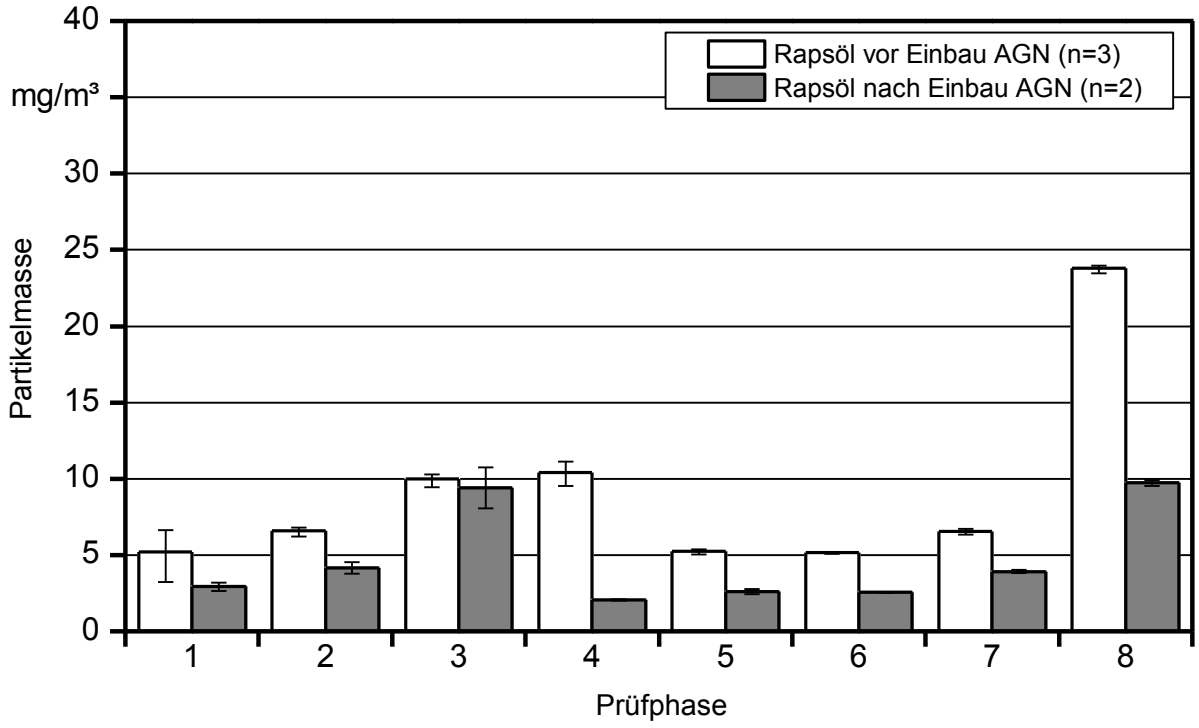


Abbildung 54: Partikelmasse-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-K

Traktor JD-G

Das am Traktor JD-G installierte Abgasnachbehandlungssystem zeigte prinzipiell in etwa das gleiche Verhalten wie das System von Traktor JD-K. Aufgrund der im Detail unterschiedlichen Komponenten ergaben sich jedoch auch spezifische Unterschiede. So waren die Reduktionsraten für NO_X mit ca. 50 % für die Prüfphasen mit einer Leistung von ≥ 50 % auf einem geringeren Niveau, siehe hierzu Abbildung 55.

Für CO und PM, dargestellt in Abbildung 56 und Abbildung 57, wurden in etwa gleiche Minderungsraten wie bei Traktor JD-K festgestellt. Die bei Traktor JD-K in Prüfphase 3 kaum zu beobachtende Reduktion von PM war bei Traktor JD-G nicht zu erkennen. Bei diesem Traktor wurde auch bei Prüfphase 3 die Partikelmasse-Konzentration um ca. 44 % vermindert.

Die HC-Emissionen (Abbildung 58) werden, wie auch die CO-Emissionen, in allen Prüfphasen mit Ausnahme des Leerlaufs nahezu vollständig reduziert. Im Unterschied zu CO war jedoch auch im Leerlauf eine Verminderung von knapp 90 % zu beobachten.

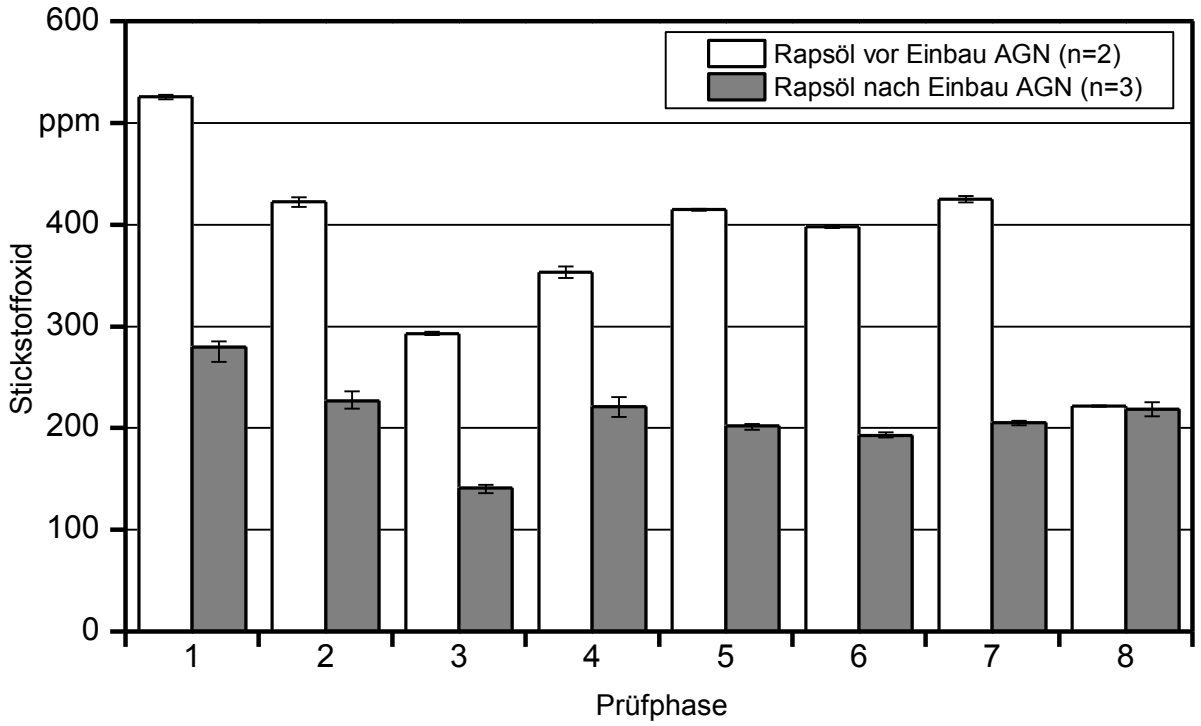


Abbildung 55: Stickstoffoxid-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-G

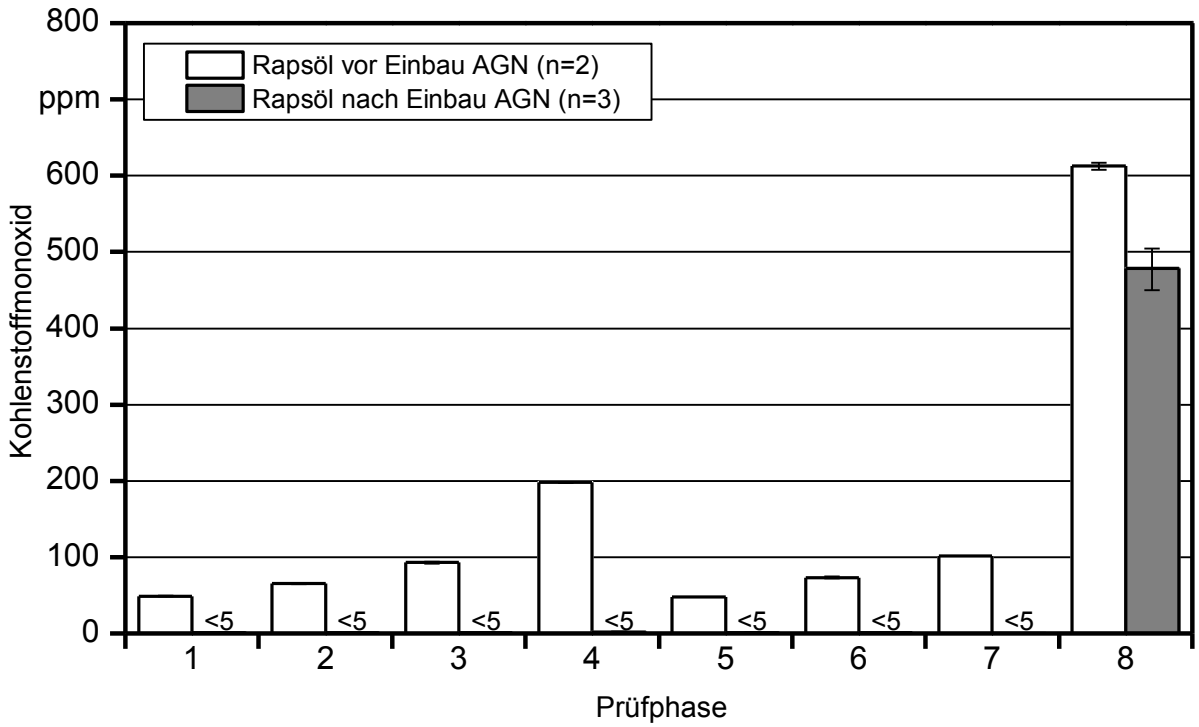


Abbildung 56: Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-G

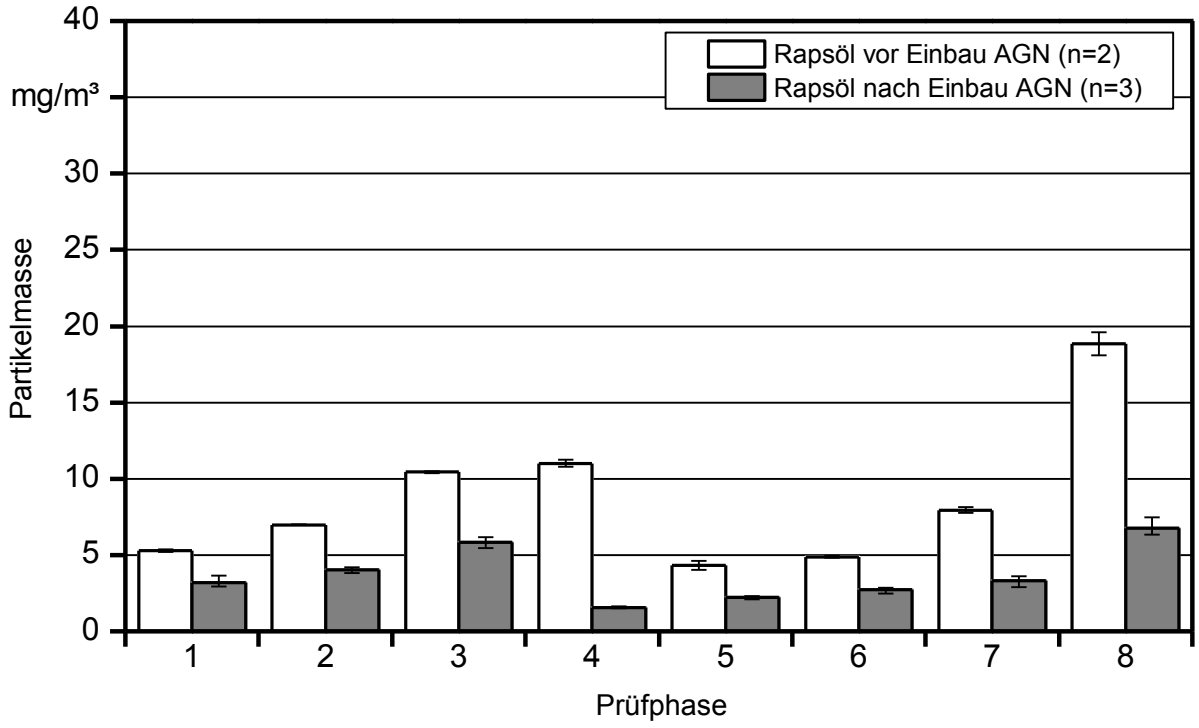


Abbildung 57: Partikelmasse-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-G

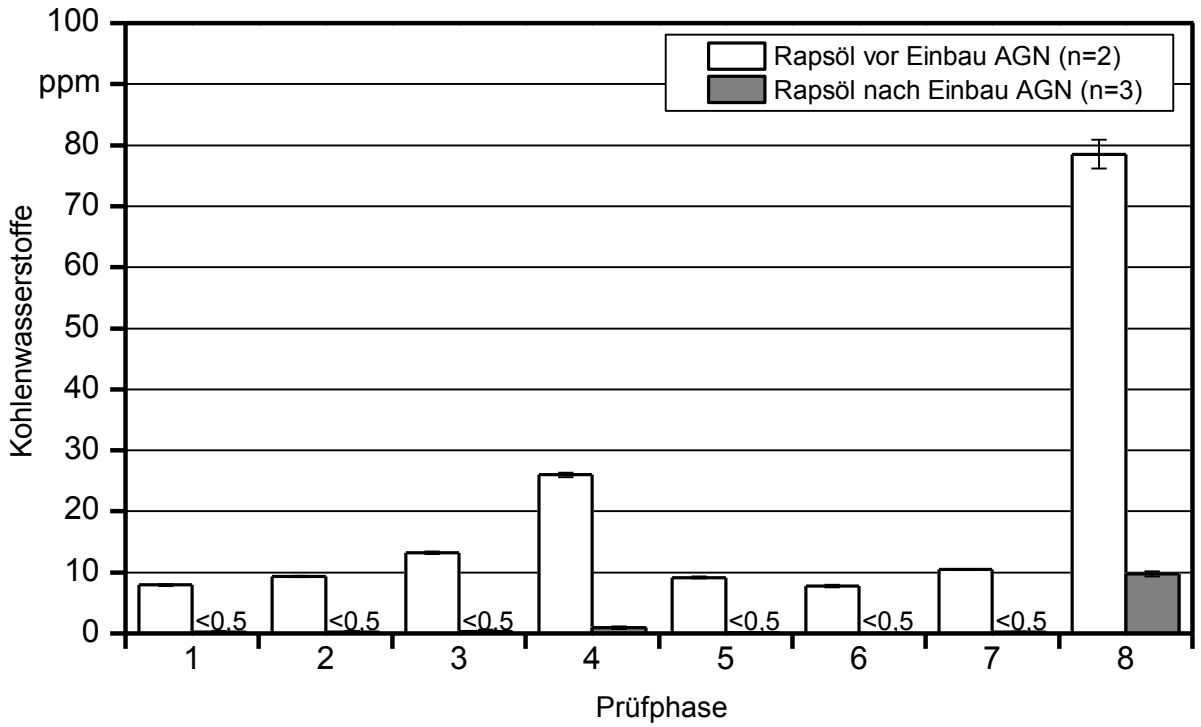


Abbildung 58: Kohlenwasserstoff-Konzentrationen bei den einzelnen Prüfphasen vor und nach dem Einbau des Abgasnachbehandlungssystems in Traktor JD-G

6.5.3 Nicht-limitierte Emissionen in den Prüfphasen

Im Rahmen der Arbeit wurden die nicht-limitierten Emissionen mit einem FTIR erfasst. Mit Ausnahme von Ammoniak und Formaldehyd, konnten mit dieser Messtechnik jedoch keine weiteren Schadstoffkomponenten identifiziert werden.

Die Ammoniak-Konzentrationen im Abgas der beiden Traktoren für die verschiedenen Prüfphasen sind in Abbildung 59 und Abbildung 60 dargestellt. Bei beiden Traktoren treten Ammoniak-Konzentrationen im Abgas über der Nachweisgrenze erst nach dem Einbau der AGN auf. Ammoniak entsteht nicht bei der Verbrennung der Kraftstoffe, sondern bei der Hydrolyse der wässrigen Harnstofflösung und dient im Folgenden als Reduktionsmittel um die NO_X-Emissionen zu reduzieren (siehe hierzu auch Kapitel 4.3.2).

Im Leerlaufbetriebspunkt ist die SCR deaktiviert und es kommt zu einer Eindüsung der Harnstofflösung, aufgrund dessen ist auch kein Ammoniak-Schlupf feststellbar. Bei allen anderen Betriebspunkten ist der Ammoniak-Schlupf zu beobachten (zur Beurteilung der Funktionalität und Effizienz der AGN wurde kein Sperrkatalysator für Ammoniak eingebaut). Bei den Prüfphasen mit einer Leistung von mehr als 50 % lag die Abgastemperatur sicher über 300 °C. Die Reaktion, bei der das NO/NO_2-Verhältnis von großer Bedeutung ist, liegt hier nicht zu einem dominierenden Anteil vor. Die NO_X-Reduktion beträgt je nach Traktor und Prüfphase zwischen 50 und 80 %. Aufgrund dessen deutet der Schlupf auf eine ungleichmäßige Verteilung des Ammoniaks in der SCR hin. Dadurch ist an manchen Stellen lokal zu wenig Ammoniak vorhanden, um die Stickoxide entsprechend

zu reduzieren. An anderen Stellen liegen zu viel Ammoniak und zu wenig Stickoxide vor, so dass das Reduktionsmittel nicht reagieren kann und unverbraucht die AGN verlässt.

Beim Betriebspunkt 4 (Teilllastbetrieb) betrugen die Abgastemperaturen zwischen 250 und 300 °C. Bei diesen Betriebspunkt ist für eine gute Ausnutzung des Reduktionsmittels ein NO/NO_2 Verhältnis von 1:1 wichtig (siehe hierzu auch Kapitel 4.3.2). Bei den Messungen war dies jedoch nicht der Fall (lag bei etwa 4:1 bis 6:1). Dadurch ist der Anteil an NO_2 im Abgas zu gering und die Reduktionsreaktionen können nur in geringem Umfang ablaufen. Das Reduktionsmittel (Ammoniak), welches an den Reaktionen nicht teilnimmt, verlässt die AGN unverbraucht.

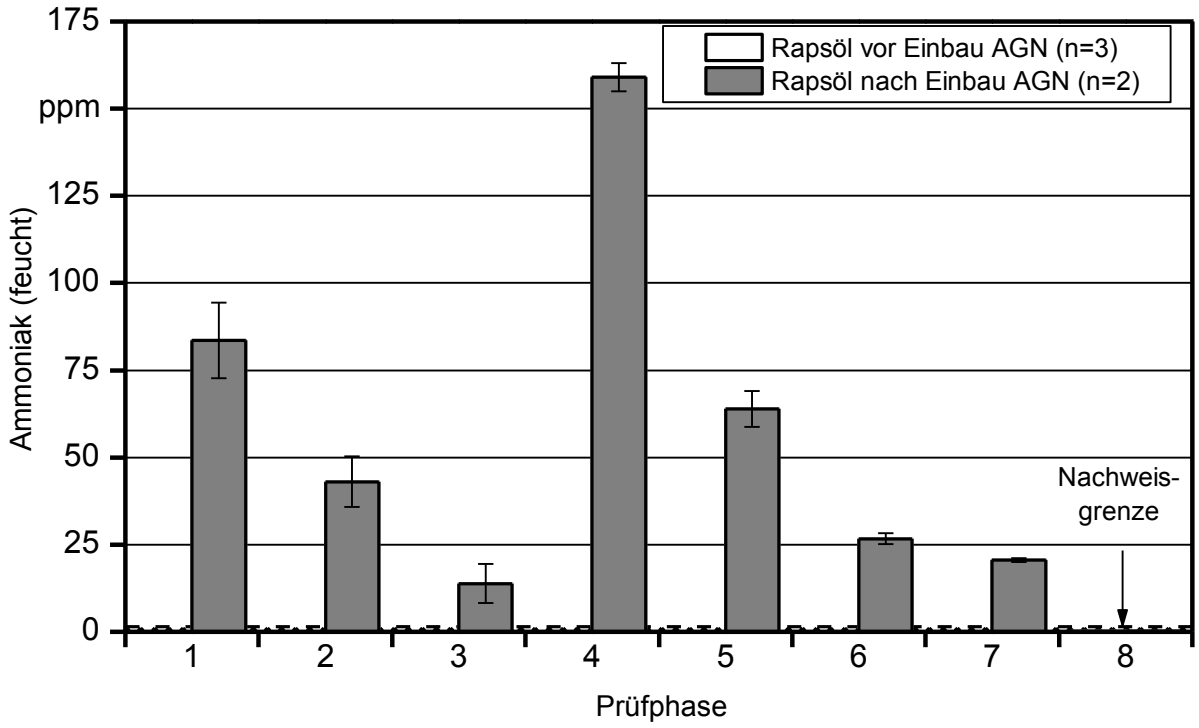


Abbildung 59: Ammoniak-Emissionen des Traktors JD-K vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen)

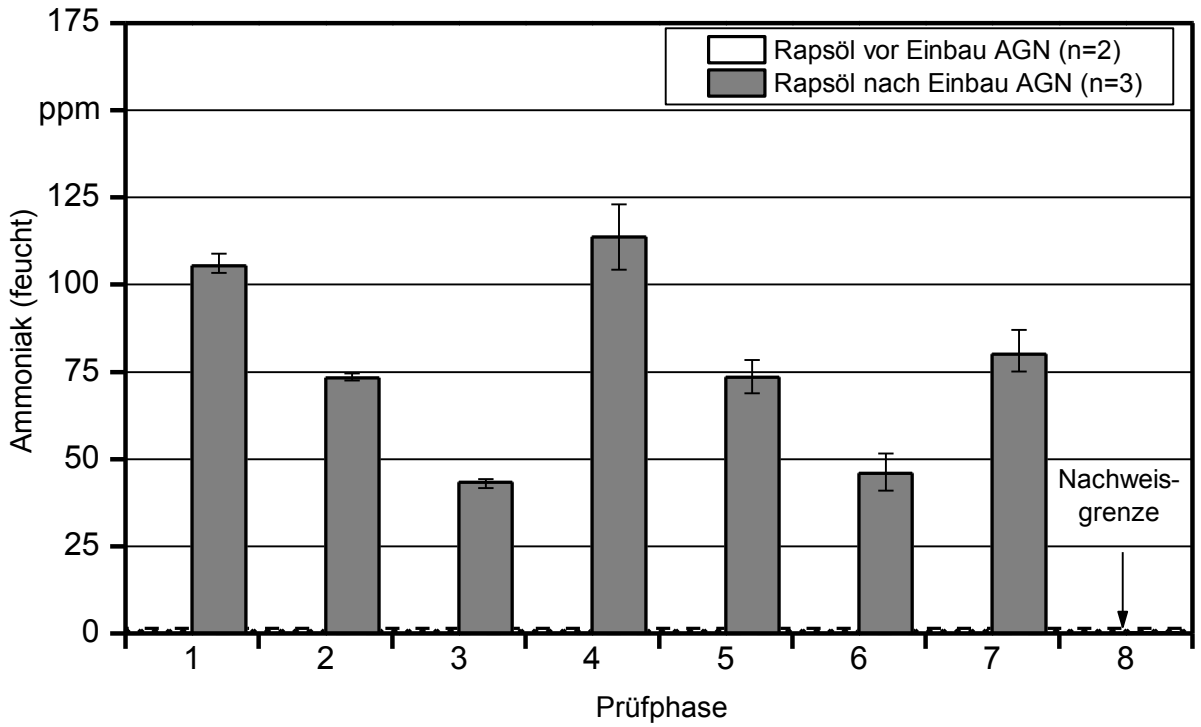


Abbildung 60: Ammoniak-Emissionen des Traktors JD-G vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen)

Die Formaldehyd-Emissionen bewegten sich in den meisten Prüfphasen unterhalb der Nachweisgrenze (definiert als die dreifache Standardabweichung bei Messung von Umgebungsluft).

In Abbildung 61 und Abbildung 62 sind die die Formaldehyd-Konzentrationen für die beiden Traktoren in den Prüfphasen des 8-Phasen-Prüfzyklus dargestellt. Beide Traktoren weisen in allen Betriebspunkten annähernd gleich hohe Konzentrationen an Formaldehyd im Abgas auf. Nur in der Teillast- und der Leerlaufprüfphase überstiegen die Konzentrationen die Nachweisgrenze. Durch den Einbau der AGN sinken die Konzentrationen weiter ab. Der Formaldehyd-Gehalt im Abgas lag in der Teillastprüfphase nur knapp über der Nachweisgrenze, nach dem Einbau der AGN konnte diese Komponente nicht mehr gemessen werden. Durch den im AGN-System vorhandenen Oxidationskatalysator werden die Formaldehyde oxidiert. Im Leerlauf sind nach der Installation der AGN um ca. 20 bis 25 % geringere Formaldehyd-Emissionen feststellbar. In diesem Betriebspunkt liegen die Abgastemperaturen unter 170 °C und der Oxidationskatalysator erreicht seine Betriebstemperatur nicht, so dass kaum noch eine Oxidation der Formaldehyde feststellbar ist.

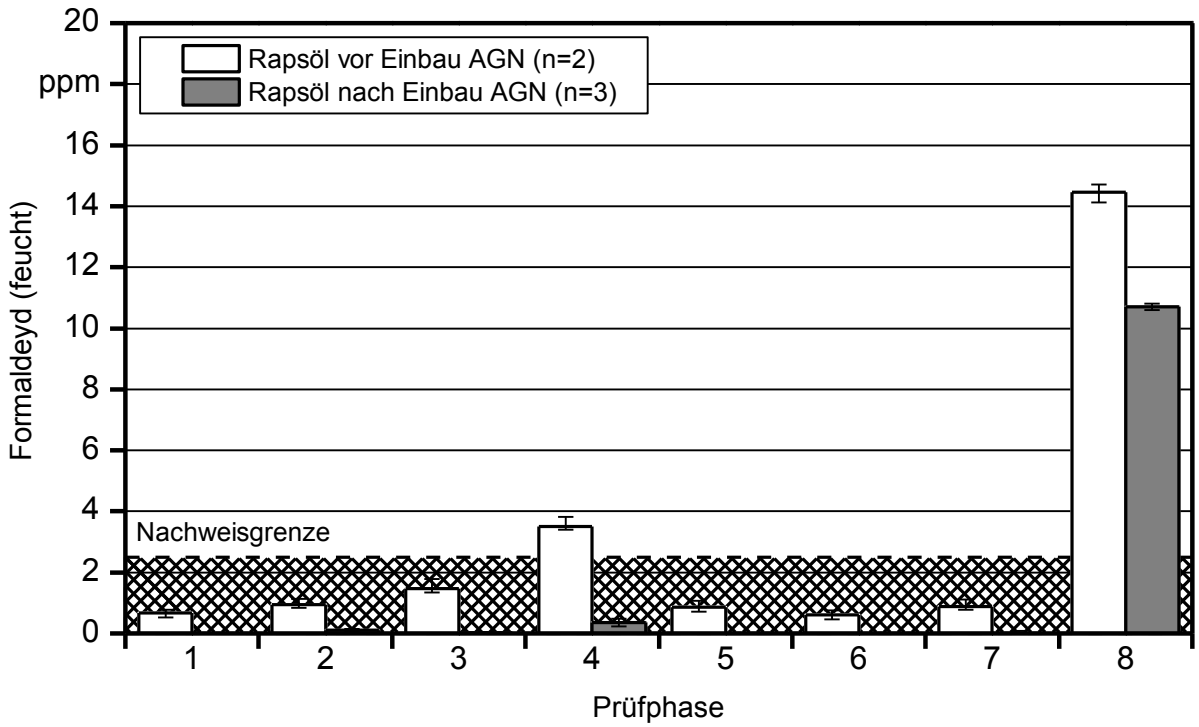


Abbildung 61: Formaldehyd-Emissionen des Traktors JD-K vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen)

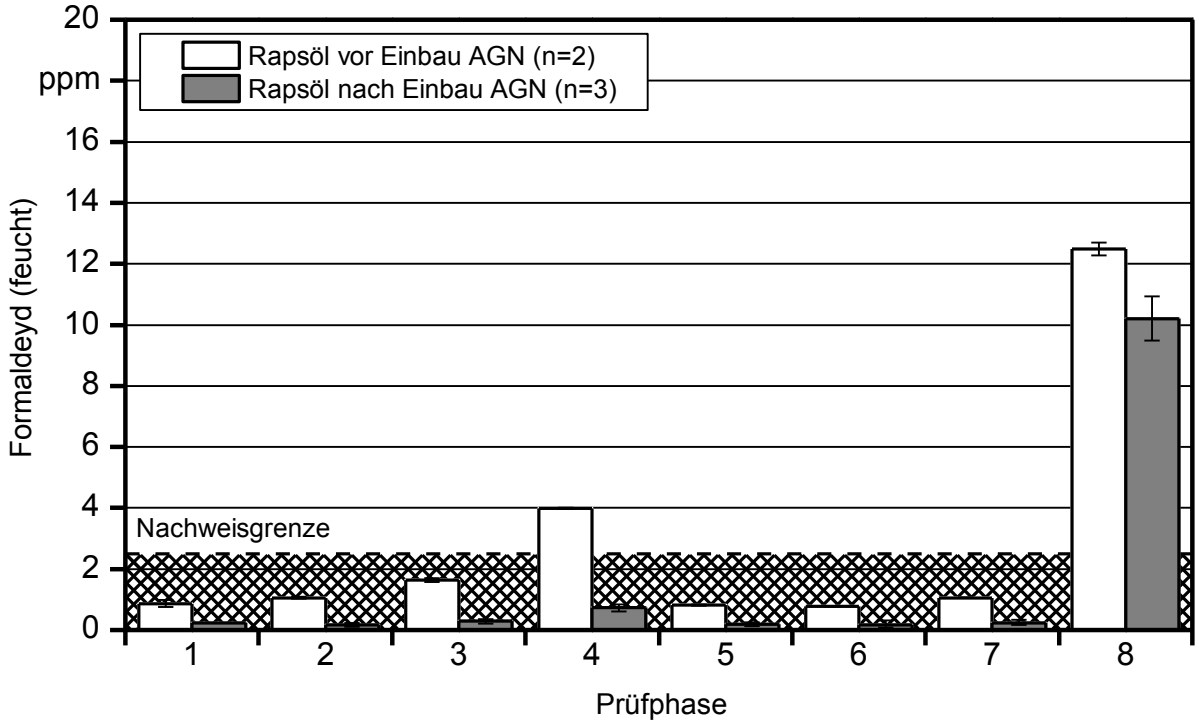


Abbildung 62: Formaldehyd-Emissionen des Traktors JD-G vor und nach Einbau einer Abgasnachbehandlungsanlage (n = Anzahl der Messungen)

6.5.4 Zusammenfassung

Durch den Einbau des experimentellen AGN-Systems konnten bei beiden Traktoren die Emissionen von NO_X, CO, HC und Partikelmasse reduziert werden, insbesondere in Prüfphasen mit einer Leistung von ≥ 50 %. In der Teillastbetriebsphase erreicht die AGN zum Teil nicht optimale Betriebsbedingungen und im Leerlauf wird die Harnstoff-Eindüsung deaktiviert, so dass sich hier bei den NO_X-Emissionen geringere oder keine Reduktion durch die AGN ergab. Bei allen anderen erfassten Schadstoffkomponenten wurden jedoch auch in diesen Betriebspunkten verminderte Konzentrationen festgestellt. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die AGN-Systeme durch weitergehende Optimierung noch größere Reduktionsraten erzielen können. Insbesondere eine bessere Verteilung des Reduktionsmittels könnte hierzu beitragen. Hierbei ist anzumerken, dass die installierten AGN-Systeme keinem Serienstand entsprechen und in dieser Form nicht in weiteren Traktoren zum Einsatz kommen.

Anhand der spezifischen gewichteten Emissionen über den stationären Prüfzyklus kann abgeschätzt werden, dass durch den Einbau der AGN bei beiden Abgasstufe IIIA Traktoren auch die Vorgaben der Abgasstufe IIIB für diesen Prüfzyklus erfüllt werden können.

Es kann somit festgestellt werden, dass Abgasnachbehandlungssysteme im Betrieb mit Pflanzenöl eine gute Funktion zeigen. Durch weitere Optimierungsmaßnahmen am AGN-System können vermutlich auch zukünftige Abgasgrenzwerte sicher eingehalten werden. Erfahrungen zum Langzeitverhalten in der Praxis fehlen jedoch derzeit noch und müssen gesammelt werden, um die Funktionalität der AGN-Systeme festzustellen.

Zusammenfassung

Die Nutzung von Rapsöl als Kraftstoff kann einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz liefern. Bei der Produktion von Rapsöl in dezentralen Anlagen kann die Wertschöpfung im ländlichen Raum gesteigert und Produktions- und Nutzungskreisläufe können bei der gekoppelten Futtermittel- und Kraftstofferzeugung geschlossen werden.

Mit Traktoren der Abgasstufen I und II wurden in den letzten Jahren bereits einige Erfahren mit Rapsöl als Kraftstoff gesammelt. Unter Beachtung von bestimmten Anforderungen hinsichtlich Wartung und Kraftstoffqualität ist ein sicherer Betrieb von pflanzenöltauglichen Traktoren möglich. Untersuchungen mit moderneren Motoren der Abgasstufe IIIA wurden bisher nur in geringem Umfang durchgeführt, so dass hierzu kaum Erfahrungen zum Emissions- und Betriebsverhalten in der Praxis vorliegen.

Aufgrund dessen war es Ziel dieses Vorhabens, das Emissions- und Betriebsverhalten über einen längeren Zeitraum im Feld- und Prüfstandsbetrieb zu erfassen. Am Prüfstand sollten dabei die Einflüsse von verschiedenen Motorbetriebsbedingungen und Prüfzyklen, der zunehmenden Betriebsdauer und von Abgasnachbehandlungssystemen auf das Leistungs- und Emissionsverhalten im Betrieb mit Rapsöl- und zum Teil mit Dieselkraftstoff ermittelt werden. Die Praxistauglichkeit im täglichen Betrieb wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum (LVFZ) für Milchvieh- und Rinderhaltung Achselschwang, dem LVFZ für Ökologischen Landbau Kringell und der Versuchsstation Grub an drei Traktoren demonstriert.

Die verwendeten Traktoren waren zwei pflanzenöltaugliche Prototypen des Herstellers John Deere vom Typ 6930 Premium, die für die Durchführung der Versuche vom Landmaschinenhersteller zur Verfügung gestellt wurden. Der dritte Traktor, der im Feldeinsatz betrieben wurde, war ein Fendt 820 Vario^{greentec}. Für die Untersuchung des Emissionsverhaltens wurde darüber hinaus ein vierter Traktor, ebenfalls ein Fendt 820 Vario^{greentec}, vom Landmaschinenhändler und -hersteller bereitgestellt.

Betriebsverhalten im Feldeinsatz

Über den Projektzeitraum von drei Jahren absolvierten die drei Traktoren im Feldeinsatz insgesamt 3919 Bh und verbrauchten hierbei 47.869 l Pflanzenöl (dies entspricht einer CO_2-Einsparung von 90.951 kg $CO_{2,eq}$[1]).

Die während dem Feldeinsatz überwachte Motorölqualität zeigte im Rahmen des Motorölwechselintervalls von 250 Bh bei allen Traktoren keine Auffälligkeiten. Bei den John Deere Maschinen wurden zudem verlängerte Ölwechselintervalle von mehr als 500 Bh untersucht. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Verlängerung des Motorölwechselintervalls auf etwa 400 bis 500 Bh möglich ist. Auch bei den Fendt Traktoren waren die Analysewerte beim Motorölwechsel unauffällig, so dass auch hier eine Verlängerung des Ölwechselintervalls möglich erscheint. Weitere Untersuchungen mit einer

[1] $CO_{2,eq}$: CO_2-Equivalent berechnet nach Schmitz et al. (2009) [45]

größeren Anzahl an Traktoren sind jedoch notwendig, um eine ausreichende Datenmenge zu erhalten, die Grundlage für eine Verlängerung des Ölwechselintervalls sein können.

Die im Feldeinsatz geprüfte Pflanzenölqualität zeigte sich insgesamt zufriedenstellend, bis auf wenige Ausnahmen wurden die während des Berichtszeitraumes gültigen Grenzwerte der DIN 51605 eingehalten.

Insgesamt haben sich die Traktoren im Praxiseinsatz bewährt, es waren keine Motorschäden zu verzeichnen. Die zwei John Deere Traktoren zeigten sich sehr zuverlässig und es waren keine nennenswerten Probleme zu verzeichnen (für Details siehe Kapitel 6.1.5), trotz der nachträglichen Integration eines Abgasnachbehandlungssystems. Der Fendt 820 Vario^{greentec} lief ebenfalls weitgehend zuverlässig. Probleme waren im Bereich der Umschaltung zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoff festzustellen, die im Rahmen von Reparaturarbeiten beim Landmaschinenhersteller und in einer örtlichen Werkstätte behoben wurden.

Leistung und Kraftstoffverbrauch

Leistung und Kraftstoffverbrauch aller Traktoren wurden mehrmals am Traktorenprüfstand ermittelt. Es zeigten sich bei allen untersuchten Traktoren mit Common-Rail-Motoren bisher keine Veränderungen, so dass keine Anzeichen für etwaigen übermäßigen Verschleiß oder einen beginnenden Schaden bestehen. Bei den Traktoren wurden auch vergleichende Messungen mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff durchgeführt. Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff wurde bei allen Traktoren eine geringere Zapfwellenleistung als im Betrieb mit Dieselkraftstoff festgestellt. Grund ist der Heizwertunterschied zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoff. Bei gleichbleibender Einspritzmenge, wie im Falle der John Deere Traktoren, beträgt der Leistungsverlust in etwa 15 bis 17 %. Die Fendt Traktoren weisen mit Rapsölkraftstoff eine um etwa 5 % erhöhte Einspritzmenge auf, aufgrund dessen beträgt der Leistungsverlust ca. 9 bis 11 %. In Abhängigkeit von der Ausführung und Regelung des Einspritzsystems wirken sich die physikalischen Unterschiede zwischen Pflanzenölen und Dieselkraftstoff unterschiedlich aus, so dass allgemeingültige Aussagen, ob es zu einer Leistungssteigerung oder -verminderung kommt nicht getroffen werden können.

Emissionsverhalten

Um den Einfluss der zunehmenden Betriebsdauer auf das Emissionsverhalten zu untersuchen, wurden über den Berichtszeitraum bei allen Traktoren mehrmals Messungen der Schadstoffkomponenten Stickoxide (NO_X), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM) am Traktorenprüfstand des TFZ durchgeführt. Bei den zwei John Deere Traktoren lag das Niveau des Schadstoffausstoßes in etwa gleich hoch. Insgesamt waren bei diesen Traktoren bei keiner Schadstoffkomponente größere Veränderungen zu beobachten und das Emissionsverhalten zeigte sich über die jeweils etwa 1100 bis 1200 Bh stabil. Bei den Fendt Traktoren waren leichte Veränderungen des Emissionsverhaltens bei CO, HC und PM festzustellen, während sich die NO_X-Emissionen nicht änderten. An beiden Traktoren war bei den CO- und PM- und bei ei-

nem Traktor auch bei den HC-Emissionen mit zunehmender Betriebsdauer ein leichtes Absinken zu erkennen. Wenngleich hierfür direkt keine Erklärungen gefunden werden konnten, sind diese Veränderungen unproblematisch, zumal es sich um eine Verbesserung des Schadstoffausstoßes über die Betriebsdauer handelt.

Neben dem in der Gesetzgebung angewandten 8-Phasen-Prüfzyklus wurde ein Traktor auch unter Verwendung des FAT 6-Stufen-Tests und eines eigenen Prüfzyklus auf Basis von 31-Punkten hinsichtlich des Emissionsverhaltens im Betrieb mit Rapsölkraftstoff untersucht. Die Gewichtung der Prüfpunkte zur Bestimmung der spezifischen Emissionen über den 31-Punkte-Zyklus erfolgte anhand der Daten aus dem Feldbetrieb der beiden John Deere Traktoren. Die spezifischen, mit den jeweiligen Prüfzyklen ermittelten Ergebnisse von CO, HC und PM wurden nicht oder nur gering durch die Wahl des Prüfzyklus beeinflusst. Die spezifischen NO_X-Emissionen wurden durch die Wahl des Prüfzyklus stärker beeinflusst. Die Unterschiede sind hier unter anderem auf unterschiedliche Abgasrückführraten bei den einzelnen Betriebspunkten zurückzuführen.

An zwei der untersuchten Traktoren wurde gegen Ende des Berichtszeitraumes ein nicht- serienmäßiges Abgasnachbehandlungssystem (AGN), bestehend aus Oxidationskatalysator, offenem Partikelfilter und SCR-Katalysator nachgerüstet. Vor und nach dem Einbau der AGN wurden Emissionsmessungen im Betrieb mit Rapsölkraftstoff durchgeführt, um die Funktionalität und die Minderungsraten bei der Verwendung dieses Kraftstoffs bewerten zu können. An beiden Traktoren konnten die Emissionen von NO_X, CO, HC und Partikelmasse deutlich reduziert werden, insbesondere in Prüfphasen mit einer Leistung von ≥ 50 %. In der Teillastbetriebsphase erreicht die AGN zum Teil nicht optimale Betriebsbedingungen und im Leerlauf wird die Harnstoff-Eindüsung deaktiviert, so dass sich hier bei den NO_X-Emissionen geringere oder keine Reduktion durch die AGN ergab. Bei allen anderen erfassten Schadstoffkomponenten wurden jedoch auch in diesen Betriebspunkten verminderte Konzentrationen festgestellt. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die AGN-Systeme durch weitergehende Optimierung noch bessere Reduktionsraten erzielen können. Insbesondere eine bessere Verteilung des Reduktionsmittels könnte hierzu beitragen, was anhand der Ergebnisse zu den gesetzlich nicht limitieren Emissionen von Ammoniak zu erkennen ist. Hierbei ist anzumerken, dass die verwendeten AGN-Systeme keinem Serienstand entsprechen und in dieser Form nicht in weiteren Traktoren verwendet werden.

Anhand der spezifischen gewichteten Emissionen über den stationären Prüfzyklus kann abgeschätzt werden, dass durch den Einbau der AGN bei beiden Abgasstufe IIIA Traktoren auch die Vorgaben der Abgasstufe IIIB für diesen Prüfzyklus erfüllt werden können. Es kann somit festgestellt werden, dass Abgasnachbehandlungssysteme im Betrieb mit Pflanzenöl eine gute Funktion zeigen. Durch weitere Optimierungsmaßnahmen am AGN-System können vermutlich auch zukünftige Abgasgrenzwerte sicher eingehalten werden. Erfahrungen zum Langzeitverhalten in der Praxis fehlen jedoch derzeit noch und müssen gesammelt werden um die Funktionalität festzustellen.

Quellenverzeichnis

[1] ADAM, H. (2005): Trends in der Motorenentwicklung im Kontext der Abgasgesetzgebung. Auflagen und Entwicklungstrends Motoren, Umfeld und Kraftstoffe. In: MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK IM VDI (Hrsg.): Landtechnik für Profis 2005; Tagung, Magdeburg, 26.1.2005. VDI-Berichte, Nr. 1868. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 65-73

[2] AMMERER, A. M.; BREINESBERGER, J.; RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; ZELLER, R.; SCHAUFLER, H.; PRANKL, H. (2006): Rapsöl als Treibstoffalternative für die Landwirtschaft (Pflanzenöltraktoren), 2. Zwischenbericht, Kurzfassung. St. Pölten: Agrar Plus, FJ BLT Wieselburg, 27 Seiten

[3] BASSHUYSEN, R. V.; SCHÄFER, F. (Hrsg.) (2004): Lexikon Motorentechnik. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 1078 Seiten

[4] BLASSENEGGER, J.; KNAUER, M.; CARRARA, M.; NIESSNER, R.; URBANEK, M.; GERINGER, B.; SCHRAMM, K.-W.; KUNZE, J. (2009): Untersuchung: Emissionen bei der motorischen Verbrennung von Biokraftstoffen und Kraftstoffmischungen. Endbericht. Graz: Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 146 Seiten

[5] BROLL, P.; SCHRAML, S. (2009): Zukünftige Abgasnachbehandlungssysteme für Off-Road-Anwendungen. In: ZIKORIDSE, G. (Hrsg.): 8. Dresdner Motorenkolloquium, 17-18 Juni 2009. Dresden: Förderkreis Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren (FAD) e.V., S. 220-244

[6] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2009): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der zehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 17. Juli 2009. Bundesanzeiger, Nr. 106, S. 2483

[7] 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

[8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2010): DIN 51605 - Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren - Rapsölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. September 2010. Berlin: Beuth Verlag, 16 Seiten

[9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2011): Entwurf DIN SPEC 51623 - Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren - Pflanzenölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. Mai 2011. Berlin: Beuth Verlag, 17 Seiten

[10] DICKERSON, R. E.; GEIS, I. (1986): Chemie. Weinheim: Verlag Chemie, 688 Seiten

[11] DOBIASCH, A. (2000): Einfluss der chemischen und physikalischen Eigenschaften von regenerativen Kraftstoffen auf das Emissionsverhalten von Verbrennungsmotoren. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 428. Düsseldorf: VDI-Verlag, 187 Seiten

[12] DÖNGES, P.; TRAULSEN, H. (2006): Felderprobung Rapsöl pur. Rendsburg: DEULA Schleswig-Holstein GmbH, 51 Seiten

[13] 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

[14] EUROPÄISCHE UNION (1997): Richtlinie 97/68/EG des europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. Amtsblatt der Europäischen Union,. Nr. L 59 vom 27.02.1998, zuletzt geändert durch Richtlinie 2010/26/EU (ABl. Nr. L 86 vom 1.04.2010) der Kommission

[15] EUROPÄISCHE UNION (2000): Richtlinie 2000/25/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Motoren, die für den Antrieb von land- und forstwirtschaftlichen Zugmaschinen bestimmt sind, und zur Änderung der Richtlinie 74/150/EWG. Amtsblatt der Europäischen Union, Nr. L 173 vom 12.07.2000, zuletzt geändert durch Richtlinie 2005/13/EG (ABl. Nr. L 55 v. 01.03.2005) der Kommission

[16] HANSSON, P.-A.; NORÉN, O.; BOHM, M. (1999): Effects of specific operational weighting factors on standardized measurements of tractor engine Emissions. Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 74, Nr. 4, S. 347-353

[17] HASSEL, E.; PRESCHER, K.; BERNDT, S.; FLÜGGE, E.; GOLISCH, J.; HARKNER, W.; SCHÜMANN, U.; SY, G.; WICHMANN, V. (2006): Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöltauglichen Traktoren. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock, Eigenverlag, 222 Seiten

[18] KOHLER, M.; KNECHTGES, H. J.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; WICHMANN, V.; DÖNGES, P.; TRAULSEN, H.; GEORGIEVA, T.; DÖHLER, H.; HARTMANN, S. (2009): Pflanzenöl als Kraftstoff in landwirtschaftlichen Maschinen. KTBL-Schrift, Nr. 478. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), 90 Seiten

[19] KRAHL, J.; KNOTHE, G.; MUNACK, A.; RUSCHEL, Y.; SCHRÖDER, O.; HALLIER, E.; WESTPHAL, G.; BÜNGER, J. (2009): Comparison of exhaust Emissions and their mutagenicity from the combustion of biodiesel, vegetable oil, gas-to-liquid and petrodiesel fuels. Fuel, Jg. 88, S. 1064-1069

[20] KRAHL, J.; SCHWARZ, S.; MUNACK, A.; RUSCHEL, Y.; SCHROEDER, O.; GROPE, N.; BUENGER, J. (2007): Emissions, Ultra Fine Particles and Health Effects from Heavy-Duty Engine Exhaust Gas. In: BARTZ, W. J. (Hrsg.): Fuels 2007 - 6th International Colloquium, January 10-11, 2007. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 77-90

[21] LANDIS, M. (2005): Einsatz von Partikelfiltern in landwirtschaftlichen Fahrzeugen. In: VDI Verein Deutscher Ingenieure Max-Eyth-Gesellschaft (Hrsg.): High Tech für die nachhaltige Landwirtschaft. 63. Tagung Landtechnik, 4. - 5. 11. 2005, Hannover; Conference Agricultural Engineering VDI-MEG 2005. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 91-97

[22] LANDIS, M.; SCHIESS, I.; WOLFENSBERGER, U. (2007): Partikelfilter-Nachrüstung bei Traktoren. Abstimmung des Filtersystems auf den Fahrzeugeinsatz nötig. ART-Berichte, Nr. 677. Ettenhausen: Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 12 Seiten

[23] LEA-LANGTON, A.; LI, H.; ANDREWS, G. E. (2008): SAE Technical Paper 2008-01-1811 Comparison of Particulate PAH Emissions for Diesel, Biodiesel and Cooking Oil using a Heavy Duty DI Diesel Engine. In: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE) (Hrsg.): SAE International, 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Shanghai, China, June 23-25, 2008. Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers (SAE), S. 1-14

[24] LEA-LANGTON, A.; LI, H.; ANDREWS, G. E. (2009): SAE Technical Paper 2009-01-1515 Investigation of Aldehyde and VOC Emissions during Cold Start and Hot Engine Operations using 100% Biofuels for a DI Engine. In: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE) (Hrsg.): SAE World Congress & Exhibition, April 2009, Detroit, MI, USA, Session: Emission Measurement and Testing (Part 2 of 3). SAE Special Publication, Nr. 2256. Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers (SAE), S. 283-293

[25] LINDGREN, M. (2004): Engine exhaust gas Emissions from non-road mobile machinery. Effects of transient load conditions. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Biometry and Engineering. Acta Universitatis agriculturae Sueciae. Agraria, Nr. 481. Uppsala: SLU, 60 Seiten ISBN 91-576-6753-5

[26] MAY, H.; DIETRICH, W.; HATTINGEN, U.; BIRKNER, C. (1994): Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener Dieselmotoren. In: ENERGIETECHNIK, VDI-GESELLSCHAFT (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; VDI-Berichte. Nr. 1126. 1. Aufl., Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 183-204

[27] MEYER-PITTROFF, R.; DOBIASCH, A.; LACHENMAIER, J. (2002): Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke Teil 2. Nr. 172. München: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU), 106 Seiten

[28] MOLLENHAUER, K. (2002) (Hrsg.): Handbuch - Dieselmotoren. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1069 S.

[29] MOLLENHAUER, K.; TSCHÖKE, H. (Hrsg.) (2007): Handbuch Dieselmotoren. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 702 Seiten

[30] MUNACK, A.; PABST, C.; RUSCHEL, Y.; SCHAAK, J.; SCHMIDT, L.; SCHRÖDER, O.; BÜNGER, J.; KRAHL, J. (2010): Vergleichende Bestimmung der Mutagenität von Motorabgasen aus der Verbrennung von Rapsöl und Dieselkraftstoff. Endbericht. Braunschweig, Coburg: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Steinbeis-Transferzentrum Biokraftstoffe und Umweltmesstechnik, 110 Seiten

[31] OELCHECK GMBH (Hrsg.) (1999): Gasmotorenöle: Zusatztests damit das Öl nicht "sauer" wird. OelChecker Winter 1999. Brannenburg: Oelcheck GmbH, S. 6

[32] OELCHECK GMBH (Hrsg.) (2010): Typische Limitwerte für Motorenöle aus (nicht stationären) Dieselmotoren - Verschleißmetalle, Verunreinigungen und Additive. OelChecker Frühjahr 2010. Brannenburg: Oelcheck GmbH, S. 6-7

[33] ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD) (2007): Code 2. OECD standard code for the official testing of agricultural and forestry tractor performance. 61 Seiten

[34] PEAL, S.; JONES, C. (2012): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage WP4 Engine Oil Development. Deliverable No. 4.8. Publishable. Version 2.0. S. 9. URL: http://www.2ndvegoil.eu (Zugriff am 26.03.2012)

[35] PICKEL, P.; DIERINGER, S. (2009): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage WP2 Engine development. Publishable summary. Version 1. 24 Seiten. URL: http://www.2ndvegoil.eu (Zugriff am 17.07.2011)

[36] PICKEL, P.; DIERINGER, S.; LANG, M.; RÜTZ, D.; INNERHOFER, S. (2009): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage 5 Engine Demonstration. Deliverable No. 5.8. Publishable summary. Version 3. S. 19. URL: http://www.2ndvegoil.eu (Zugriff am 03.07.2011)

[37] PRESCHER, K.; STANEV, A. (1998): Die Aldehydemission von Dieselmotoren in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität und Maßnahmen zur Verringerung. In: Essers, U. (Hrsg.): Dieselmotorentechnik 98. Nr. 553. 1st, Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, S. 152-173

[38] RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; KRIECHBAUM, T.; PRANKL, H.; BREINESBERGER, J. (2008): Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft. Wieselburg; St. Pölten: HBLFA Francisco Josephinum; BLT Biomass, Logistic, Technology; AGRAR PLUS GmbH, 1078 Seiten

[39] REIF, K. (Hrsg.) (2010): Dieselmotor-Management im Überblick. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 210 Seiten, ISBN 978-3-8348-1313-8

[40] REMMELE, E. (2002): Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff - Untersuchungen zu Kenngrößen, Prüfverfahren und Grenzwerten. Dissertation. Forschungsbericht Agrartechnik Nr. 400. München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Landtechnik, 194 Seiten

[41] RINALDI, M.; ERZINGER, S.; STARK, R. (2005): Treibstoffverbrauch und Emissionen von Traktoren bei landwirtschaftlichen Arbeiten. Ausführliche Darstellung der Methoden, Messungen und Ergebnisse. FAT-Schriftenreihe, Nr. 65. Ettenhausen: Agroscope FAT Tänikon, 92 Seiten, ISBN 3-9523054-6-4

[42] RINALDI, M.; NÄF, E. (1992): Motorauslastung von Landwirtschaftstraktoren. FAT-Berichte, Nr. 426, 6 Seiten

[43] RINALDI, M.; STADLER, E. (2002): Trends im Abgasverhalten landwirtschaftlicher Traktoren. FAT-Berichte, Nr. 577, 7 Seiten

[44] ROBERT BOSCH GMBH (2004): Dieselmotor-Management. Systeme und Komponenten. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 501 Seiten

[45] SCHMITZ, N.; HENKE, J.; KLEPPER, G. (2009): Biokraftstoffe. Eine vergleichende Analyse. Gülzow: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 165 Seiten

[46] SCHÜMANN, U.; BERNDT, S.; FLÜGGE, E.; WICHMANN, V.; HARNDORF, H. (2011): Unerwünschte Wechselwirkungen von Biokraftstoffkomponenten mit dem Motorenschmieröl - Einflussgrößen und Prävention. In: NELLES, M. (Hrsg.): 5. Rostocker Bioenergieforum, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Rostock, 2011. Putbus: Wissenschaftsverlag Putbus, S. 181-195

[47] SY, G.; FLÜGGE, E.; WICHMANN, V.; KLAAßEN, G. (2009): Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz. Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben. Aktenzeichen: 22021107 (07NR211). Rostock: Universität Rostock, 106 Seiten

[48] THE 2ND VEGOIL CONSORTIUM (2011): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage 7 Dissemination. Deliverable No. 7.7. Final Results. Version 1. URL: http://www.2ndvegoil.eu (Zugriff am 20.04.2012)

[49] THUNEKE, K. (2009): Untersuchungen zu Abgasemissionen und zum Einsatz von Partikelfiltersystemen bei rapsölbetriebenen Blockheizkraftwerken. Dissertation. Forschungsbericht Agrartechnik, Nr. 478. Straubing: Technologie- und Förderzentrum, 191 Seiten

[50] THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; GASSNER, T.; REMMELE, E.; WIDMANN, B.; FISCHER, H.; KRIST, H.-J.; SCHNELLE-KREIS, J.; HOPPENHEIDT, K. (2007): Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff betriebenen Traktors. Berichte aus dem TFZ, Nr. 14. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 97 Seiten

[51] THUNEKE, K.; GASSNER, T.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2009): Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell. Berichte aus dem TFZ, Nr. 17. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 177 Seiten

[52] THUNEKE, K.; WILHARM, T.; STOTZ, K.; ROCKTÄSCHEL, A.; RABA, F.; BREUN, J.; WIDMANN, B. (2003): Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöltauglichen Motoren. Berichte aus dem TFZ, Nr. 7. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 104 Seiten

[53] TSCHÖKE, H. (1997): Rapsöl als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren - Chance oder Irrweg? In: BARTZ, W. J. (Hrsg.): Fuels - 1st International Colloquium 16-17 January 1997. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen, S. 405-419

[54] WAHL, T.; E. JACOB UND W. WEISWEILER (1987): NOx-Verminderung bei Dieselmotoren - Teil 1: Modellgasuntersuchungen mit stickstofffreien Reduktionsmitteln. AAJOURNAL367, Vol. 57, Nr. 9, S. 506-514

[55] WICHMANN, V. (2008): Konzepte und Betriebsstrategien für die Nutzung von Rapsölen in Verbrennungsmotoren für den Einsatz in Landmaschinen. Dissertation. Rostock: Universität Rostock, Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik, 132 Seiten

[56] WIDMANN, B.; REMMELE, E. (2008): Biokraftstoffe. Fragen und Antworten. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 16 Seiten

Anhang

Anhang 1: Verwendete Prüfverfahren zur Analyse der Rapsölkraftstoffqualität und Grenzwerte der DIN 51605

Kenngröße	Prüfverfahren	Anforderung DIN 51605
Dichte	DIN EN ISO 3675	910 bis 925
Flammpunkt (Pensky-Martens)	DIN EN ISO 2719	min. 101
Kinematische Viskosität (40 °C)	DIN EN ISO 3104	max. 36,0
Heizwert	DIN 51900-2	min. 36,0
Zündwilligkeit (Abgeleitete Cetanzahl)	IP 498	min. 40
Iodzahl	DIN EN 14111	max. 125
Gesamtverschmutzung	DIN EN 12662	max. 24
Säurezahl	DIN EN 14104	max. 2,0
Oxidationsstabilität	DIN EN 14112	min. 6
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	max. 750
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	max. 10
Phosphorgehalt	DIN EN 14107	max. 12[1)]
Summengehalt Calcium und Magnesium	DIN EN 14538	max. 20[1)]

[1)] *Grenzwerte mit Gültigkeit bis 31. Dezember 2011*

Anhang 2: Verwendete Prüfverfahren zur Analyse der Dieselkraftstoffqualität und Anforderungen an Prüfdiesel nach 97/68/EG

Kenngröße	Prüfverfahren	Anforderung 97/68/EG
Dichte	DIN EN ISO 3675	833-837
Flammpunkt	DIN EN ISO 2719	min. 55
Cetanzahl	DIN EN ISO 5165	52,0-54,0
Kinematische Viskosität (40 °C)	DIN EN ISO 3104	2,30-3,30
Koksrückstand	DIN EN ISO 10370	max. 0,20
Cold Filter Plugging Point	DIN EN 116	max. -5
Schwefelgehalt	ASTM D 5453	max. 10
Oxidationsstabilität	DIN EN ISO 12205	max. 0,025
Schmierfähigkeit (HFFR)	CEC F-06-A-96	max. 400
PAK[1)]	IP 391	3,0-6,0
Aschegehalt	DIN EN ISO 6245	0,01
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937	0,0200
Fettsäuremethylestergehalt	-	Unzulässig

Anhang 3: Eingestellte Drehzahlen und Motorlast, Verweildauer vor der Partikelprobenahme sowie Partikelprobenahmedauer für Traktor JD-K zur Ermittlung der Emissionen bei 31 Prüfpunkten

Prüfpunkt	Drehzahl in min^{-1}	Motorlast in %	Verweildauer vor Partikelprobenahme in min	Partikelprobe-nahmedauer in min
1	2100	100	30	8
2	2100	75	5	8
3	2100	50	5	8
4	2100	25	5	8
5	2100	10	5	8
6	1900	100	12	8
7	1900	75	5	8
8	1900	50	5	8
9	1900	25	5	8
10	1900	10	5	8
11	1700	100	12	8
12	1700	75	5	8
13	1700	50	5	8
14	1700	25	5	8
15	1700	10	5	8
16	1500	100	12	8
17	1500	75	5	8
18	1500	50	5	8
19	1500	25	5	8
20	1500	10	5	8
21	1300	100	12	8
22	1300	75	5	8
23	1300	50	5	8
24	1300	25	5	8
25	1300	10	5	8
26	1100	100	12	8
27	1100	75	5	8
28	1100	50	5	8
29	1100	25	5	8
30	1100	10	5	8
31	850	0	5	8

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 pflanzenöltauglichen 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 Dieselkraftstoff betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzscheit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung

21	Kleine Biomassefeuerungen – Marktbetrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

TFZ

ISSN 1614-1008