Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe

80

Berichte aus dem TFZ

Klimafreundliche Landmaschinen im Feldtest



Klimafreundliche Landmaschinen im Feldtest

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe

Klimafreundliche Landmaschinen im Feldtest

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

Berichte aus dem TFZ 80

Straubing, September 2023

Titel: Klimafreundliche Landmaschinen im Feldtest

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

Projektleitung: Dr. Edgar Remmele

Mitarbeiter: Martin Speiseder
Roland Fleischmann

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Klimaschutz mit regenerativen Antriebssystemen auf staatlichen Versuchsgütern", mit einer Projektlaufzeit vom 01.07.2018 bis zum 30.06.2022, wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen G2/KS/18/01 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2023
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

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

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

ISSN: 1614-1008
Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Dr. Johannes Ettl, Georg Huber, Dr.-Ing. Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke, Dr. Edgar Remmele, Anna Grundner
Gestaltung: Dr. Johannes Ettl
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2023

Fotos: TFZ

Danksagung

Wir danken dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung des Vorhabens. Besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Werner Ortinger, Herrn Dr. Wolfram Schaecke und Herrn Florens Dittrich für die stets sehr gute Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen.

Großer Dank gebührt den Versuchsbetrieben der Bayerischen Staatsgüter (BaySG), der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG), den Bayerische Staatsforsten (BaySF) und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) für die Bereitstellung von Versuchsmaschinen sowie die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Bedanken möchten wir uns auch bei der John Deere GmbH & Co. KG, insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel, Herrn Andreas Schröder und Herrn Timothy Schwartz für die Überlassung mehrerer Pflanzenöltraktoren für die Versuche, den nutzbringenden fachlichen Austausch und die hohe Kooperationsbereitschaft. Der AGCO Valtra GmbH, insbesondere Herrn Peter Kogel und Herrn Tobias Wasner, möchten wir für die hervorragende Zusammenarbeit und die Bereitstellung von zwei Versuchstraktoren herzlichst danken. Unser Dank geht auch an Neste Corporation, insbesondere an Frau Dr.-Ing. Rupali Tripathi und an die TOOL-FUEL Services GmbH für die Bereitstellung von Versuchskraftstoff. Ein herzliches Dankeschön geht schließlich an die BayWa AG, besonders an Herrn Daniel Steffl und Herrn Hermann Schwankner, sowie an die AGCO Fendt GmbH, insbesondere an Herrn Walter Wagner, für die Unterstützung des Forschungsvorhabens durch Bereitstellung eines Pflanzenöltraktors und die stets sehr gute Kooperation.

Die Autoren

Abstract (deutsch)

Deutschland macht sich mit dem Klimaschutzgesetz auf den Weg, bis 2045 klimaneutral zu werden. Durch die Umstellung von fossilen auf klimaschonende Kraftstoffe bzw. Antriebe kann ein wichtiger Beitrag zur Minderung von Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) in der Land- und Forstwirtschaft geleistet werden. Neben dem Aspekt des Klimaschutzes wird so auch die Abhängigkeit von erdöl- und erdgasfördernden Staaten verringert.

Die bayerischen Staatsbetriebe der Landwirtschafts- und Justizverwaltung sollen nach dem Bayerischen Klimaschutzgesetz bei der Verwendung regenerativer Energieträger (BayKlimaG) eine Vorreiterrolle einnehmen. Für elektrische Antriebssysteme in Landmaschinen sowie für alternative Kraftstoffe in modernen Traktoren der aktuellen Abgasstufe V liegen jedoch kaum Erfahrungen zum Betriebs- und Emissionsverhalten, insbesondere über längere Betriebszeiträume, vor. Ziel der Begleitforschung ist es daher, Land- und Forstmaschinen mit Abgasnachbehandlungssystemen hinsichtlich Funktionalität, Verbrauch und Abgasverhalten im Feld und am Traktorenprüfstand beim Einsatz alternativer Antriebe zu untersuchen.

Die Studie umfasst 27 Land- und Forstmaschinen, die mit Rapsölkraftstoff, Biodiesel oder paraffinischem Dieselkraftstoff aus Rest- und Abfallstoffen betrieben werden. Daneben sind auch drei Arbeitsmaschinen mit elektrischem Antrieb Teil der Untersuchungen. In Summe wurden bislang mehr als 100.000 Betriebsstunden mit diesen Traktoren und einem Harvester auf den Versuchsbetrieben weitgehend problemlos absolviert. Dabei konnten mehr als eine Million Liter fossiler Diesel eingespart werden. Die Betreiber sind mit der Praxistauglichkeit zufrieden. Sofern motorsystembedingte Störungen auftraten, betrafen diese meist Komponenten des Kraftstoffniederdrucksystem, wie Pumpen oder Ventile. Wiederkehrende Messungen von Leistung und Abgasverhalten am Traktorenprüfstand und im realen Betrieb mit einem PEMS zeigen, dass die mobilen Arbeitsmaschinen mit den erneuerbaren Kraftstoffen sparsam und schadstoffarm laufen. Die Abgasemissionen von Traktoren der neuesten Abgasstufe V am Prüfstand beim Einsatz von Biokraftstoffen sind auf einem geringen Niveau. Ein rapsöltauglicher Forstharvester hat auch nach fast 80 Prozent seiner theoretischen Lebensbetriebszeit niedrige Abgaswerte. Im Feldtest erweisen sich zudem elektrisch betriebene Hoflader und Allzwecktransporter als praktikabel.

Alternative Antriebe können in moderner Land- und Forsttechnik bereits heute zu einer deutlichen Reduzierung der THG-Emissionen sowie zu einer von Mineralöl unabhängigeren Kraftstoffversorgung beitragen. Die bayerischen Staatsbetriebe vermissen jedoch ein breitgefächertes Angebot der Landtechnikindustrie an Maschinen mit Typgenehmigung für erneuerbare Kraftstoffe.

Abstract (englisch)

The German government wants to become climate-neutral by 2045. By switching from fossil fuels to climate-friendly fuels and drives, an important contribution can be made to reducing greenhouse gas emissions (GHG emissions) in agriculture and forestry. In addition to the aspect of climate protection, this also reduces dependence on fossil oil- and gas-producing countries.

The Bavarian state-owned agricultural and judicial institutions are to play a pioneering role in the use of renewable energy sources. However, for electric drive systems in agricultural machinery as well as for alternative fuels in modern tractors of the current exhaust gas stage V, there is hardly any experience available on the operating and emission behaviour, especially over longer operating periods. The aim of this research project is therefore to investigate agricultural and forestry machinery with exhaust aftertreatment systems in terms of functionality, fuel consumption and exhaust behaviour in the field and on the tractor test stand when using alternative drives.

The study includes 27 agricultural and forestry machines that run on rapeseed oil fuel, biodiesel or paraffinic diesel fuel from residual and waste materials. In addition, three working machines with electric drives are also part of the investigations. In total, these tractors and one harvester have run for more than 100,000 hours on the test farms, largely without any problems. More than one million liters of fossil diesel were saved in the process. The operators are happy with the practicality of the system. Where engine system-related malfunctions occurred, they mostly affected parts of the low-pressure fuel system, such as pumps or valves. The exhaust emissions of tractors of the latest exhaust stage V on the tractor test stand and in real-world operation when using biofuels are at a low level. A forestry harvester suitable for rapeseed oil use has low exhaust emissions even after almost 80 percent of its theoretical service life. In field tests, electrically powered yard loaders and all-purpose transporters have proved their capability.

In modern agricultural and forestry technology, alternative drives can already contribute to a significant reduction in GHG emissions and to less dependence on fossil fuels. However, Bavarian state farms would like to have a broader variety of type-approved machines for renewable fuels supplied by the agricultural machinery industry.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch) 7

Abstract (englisch) 8

Abbildungsverzeichnis 11

Tabellenverzeichnis 15

1 Einleitung 17

2 Problemstellung 19

3 Zielstellung 21

4 Stand der Wissenschaft und Technik 23

4.1 Alternative Kraftstoffe und dafür geeignete Maschinen 23

4.1.1 Pflanzenöl 23
4.1.2 Biodiesel 25
4.1.3 Paraffinischer Dieselkraftstoff 26
4.1.4 Biomethan (CNG) 27

4.2 Elektrifizierte Antriebssysteme 29

5 Material und Methoden 31

5.1 Maschinen und Geräte 31

5.2 Traktorenprüfstand 45

5.3 Portable Emissionsmessungen 48

6 Ergebnisse und Diskussion 51

6.1 Feldtestergebnisse 51

6.1.1 Störungen 51
6.1.2 Maschinen und Geräte mit Elektroantrieb 63
6.1.3 Kraftstoffanalysen 65
6.1.4 Startverhalten 66

6.2 Emissions- und Leistungsmessung 67

6.2.1 Steyr 4075 kompakt (ST-S) 68
6.2.2 Kubota M8560 (KU-S) 74
6.2.3 John Deere 6210R (JD-P) 76
6.2.4 Fendt 724 S4 Vario (FE-S) 81
6.2.5 Valtra T214 Direct (VA-K) und Valtra T215 (VA-K2) 83
6.2.6 John Deere 6250R (JD-M6) 93
6.2.7 John Deere 1470 Harvester (JD-SF) 95
6.2.8 Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F) 99
6.2.9 Fendt 211 V Vario (FE-V) 102

6.3 Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien 105

Zusammenfassung 113

Quellenverzeichnis 117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prototyp Deutz-Fahr-Traktor mit monovalentem Gasmotor 28

Abbildung 2: Serien-Traktor New Holland T6 Methane Power 28

Abbildung 3: Vollelektrischer Kompakttraktor Fendt e100 Vario..... 29

Abbildung 4: Steyr 4075 kompakt (ST-S)..... 33

Abbildung 5: John Deere 6210R (JD-P) am BaySG Standort Achselschwang..... 34

Abbildung 6: Fendt Vario 724 S4 am TFZ Straubing (FE-S) 36

Abbildung 7: Kubota M8560 (KU-S) am TFZ Straubing 37

Abbildung 8: Valtra T215 (links) und T214 Direct (rechts)..... 38

Abbildung 9: John Deere 6250R am Traktorenprüfstand des TFZ Straubing..... 39

Abbildung 10: Forstwirtschaftlicher Vollernter (Harvester) John Deere 1470G der Bayerischen Staatsforsten 41

Abbildung 11: Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F) mit einem Zwei-Tank-System der Fa. bioltec am Traktorenprüfstand..... 42

Abbildung 12: Fendt 211 V Vario (FE-V) am Traktorenprüfstand 43

Abbildung 13: Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstands zur Leistungs- und Emissionsmessung 45

Abbildung 14: Exemplarischer Verlauf der Soll- und Ist-Werte am Traktorenprüfstand des TFZ im NRTC 47

Abbildung 15: Portable Emissionsmessung am Traktor VA-K bei einer Straßenfahrt 48

Abbildung 16: Leistungsmessung am John Deere 6930 Premium 53

Abbildung 17: Fehlersuche am Traktor JD6R-B (links) und Überdruckventil an der Common-Rail-Hochdruckeinspritzung (rechts)..... 53

Abbildung 18: Fehlerhafte Steckverbindung für die Stromversorgung der Kraftstoffpumpe..... 54

Abbildung 19: Beschädigter Kolben am Zylinder 2 (links) und intakter Kolben am Zylinder 4 (rechts) des Traktors DE-N..... 55

Abbildung 20: Injektoren von Zylinder 1 bis 6 (von links nach rechts) des Traktors DE-N bei 3.500 Bh unmittelbar nach einem Motorschaden..... 56

Abbildung 21: Zylinderkopf des Traktors DE-N bei 3.500 Bh unmittelbar nach einem Motorschaden (Reihenfolge 1–6, von rechts nach links) 57

Abbildung 22: Honriefen an den Zylindern 2 und 6 bei 3.500 Bh unmittelbar nach einem Motorschaden..... 57

Abbildung 23: Beschädigte Kabelisolierung an der Verkabelung des Kraftstoffsystems am Traktors FE-S..... 58

Abbildung 24: Nahaufnahme des Honbilds der Zylinderwand bei 2.100 Bh 59

Abbildung 25: Kolbenboden am zweiten und fünften Zylinder des Traktors FE-S bei 2.100 Bh 60

Abbildung 26: Nahaufnahme der Korrosionsstellen am fünften Kolbenboden des Traktors FE-S bei 2.100 Bh 61

Abbildung 27: Zylinderkopf des Traktors FE-S bei 2.100 Bh 61

Abbildung 28: Einlassventile (links) und Auslassventile (rechts) des Traktors FE-S bei 2.100 Bh 62

Abbildung 29: Partikelfilter des Traktors FE-S bei 2.100 Bh 63

Abbildung 31: Weidemann e-Hoftrac 1160 am LfL Standort Starnberg (links) und integrierter Ladeelektronik (rechts) 65

Abbildung 32: Bewertung des Startverhaltens rapsöltauglicher Traktoren..... 67

Abbildung 33: Volllastkennlinien des Traktors (ST-S) im Betrieb mit Dieselkraftstoff (DK), paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel (B100) 69

Abbildung 34: Stickstoffoxidemissionen (Rohemissionen vor Abgasnachbehandlung) des Steyr-Traktors (ST-S) im Betrieb mit Dieselkraftstoff (DK), paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel (B100) bei den NRSC-Prüfphasen und als gewichteter Mittelwert (MW) 70

Abbildung 35: Partikelanzahl (Rohemissionen vor Abgasnachbehandlung) des Steyr-Traktors (ST-S) im Betrieb mit Dieselkraftstoff, paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel bei den NRSC-Prüfphasen und als gewichteter Mittelwert (MW)..... 71

Abbildung 36: Stickstoffoxid- und Partikelanzahlemissionen des Steyr-Traktors (ST-S) im Betrieb mit Dieselkraftstoff (DK), paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel (B100) im NRTC-Zyklus..... 72

Abbildung 37: Verteilung der spezifischen NO_X-Emissionen bei Straßenfahrten des Traktors ST-S im Betrieb mit Dieselkraftstoff, paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel 73

Abbildung 38: Verteilung der spezifischen HC-Emissionen bei Straßenfahrten des Traktors ST-S im Betrieb mit Dieselkraftstoff, paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel 74

Abbildung 39: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs und des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Traktors Kubota M8560 (KU-S) beim Betrieb mit Diesel- und Biodieselkraftstoff 75

Abbildung 40: Ablagerungen im AGR-Kühler des John Deere 6210R (JD-P)..... 77

Abbildung 41: Spezifische Stickstoffoxid- (NO_x) und Partikelmasseemissionen (PM) des Traktors John Deere 6210R (JD-P) mit Rapsölkraftstoff (R100) nach der Umrüstung auf Pflanzenölbetrieb im Jahr 2013 sowie vor und nach Reinigung des Abgasrückführsystems (AGR)

im März 2019 (Mittelwerte und Schwankungsbreite von je drei Wiederholungsmessungen) 78

Abbildung 42: Abgasgegendruck des Traktors John Deere 6210R (JD-P) im Volllastbetrieb bei Verwendung von Rapsölkraftstoff und eines passiv regenerierenden Partikelfilters im Beobachtungszeitraum 79

Abbildung 43: Volllastkennlinien des Traktors (JD-P) beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Untersuchungszeitraumes 80

Abbildung 44: Leistung an der Zapfwelle, spezifischer gravimetrischer Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle des Fendt 724 S4 (FE-S) mit Rapsöl-, Biodiesel- und Dieselkraftstoff 81

Abbildung 45: Mittelwerte und Spannweiten der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Traktors Valtra T214 Direct (VA-K) beim Betrieb mit DK und HVO 83

Abbildung 46: NO_X-, CO- und HC-Emissionen des Traktors VA-K beim NRSC und NRTC vor der AGN im Rohabgas mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) 85

Abbildung 47: NO_X-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Traktors VA-K beim NRSC und NRTC nach der AGN im Reinabgas mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff 86

Abbildung 48: PN-Emissionen des Traktors VA-K beim NRSC und NRTC vor und nach der AGN, aufgeteilt in Warm- und Kaltstartbedingungen im Betrieb mit DK und HVO 87

Abbildung 49: Mittelwerte und Spannweiten der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Traktors Valtra T215 (VA-K2) beim Betrieb mit HVO 88

Abbildung 50: NO_X-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Traktors VA-K2 beim NRSC und NRTC nach der AGN im Reinabgas mit paraffinischem Dieselkraftstoff 89

Abbildung 51: Messungen der tatsächlichen Abgasemissionen am Traktor VA-K beim Straßentransport (links) und Säen (rechts) 90

Abbildung 52: Kumulierte Häufigkeit der NO_X-Emissionen im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors VA-K mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff 91

Abbildung 53: Kumulierte Häufigkeit der CO-Emissionen im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors VA-K mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff 92

Abbildung 54: Kumulierte Häufigkeit der HC-Emissionen im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors VA-K mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff 92

Abbildung 55: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Verbrauchs an Harnstofflösung, des Wirkungsgrads an der Zapfwelle sowie des

Abgasgegendrucks des Traktors John Deere 6250R (JD-M6) beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff 94

Abbildung 56: NO_X-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Traktors JD-M6 beim NRSC und NRTC nach der AGN im Reinabgas mit Rapsölkraftstoff 95

Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Übereinstimmungsfaktoren für Stickstoffoxide der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz des Harvesters John Deere 1470 (JD-SF) im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster) 96

Abbildung 58: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Übereinstimmungsfaktoren für Kohlenstoffmonoxid der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz des Harvesters John Deere 1470 (JD-SF) im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster) 97

Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Übereinstimmungsfaktoren für Kohlenwasserstoffe der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz des Harvesters John Deere 1470 (JD-SF) im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster) 98

Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Übereinstimmungsfaktoren für Partikelanzahl (PN) der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen des Harvesters John Deere 1470 (JD-SF) im realen Einsatz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster) 99

Abbildung 61: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle am Traktor DE-F mit Diesel- und Rapsölkraftstoff 100

Abbildung 62: NO_X-, PM- und PN-Emissionen des Traktors DE-F beim NRSC und NRTC nach der AGN mit Diesel- und Rapsölkraftstoff 101

Abbildung 63: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Wirkungsgrads an der Zapfwelle sowie des Verbrauchs an Harnstofflösung des Traktors Fendt 211 Vario im Betrieb mit DK, HVO und B100 103

Abbildung 64: NO_X-, PM-, und PN-Emissionen des Traktors Fendt 211 V Vario beim NRSC und NRTC nach der AGN im Betrieb mit DK, HVO und B100 104

Abbildung 65: Stickoxide (NO_X), Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN) von Traktoren der Abgasstufe V mit Rapsölkraftstoff (R100), Biodiesel (B100), hydriertem Pflanzenöl (HVO) und fossilem Dieselkraftstoff (DK) 109

Abbildung 66: Standardwerte für Well-to-Tank-Treibhausgasemissionen ausgewählter Biokraftstoff-Produktionspfade gegenüber dem fossilen Referenzwert von 94 g CO_{2eq} je MJ nach der EU-Richtlinie 2018/2001 [34] (Quelle der Abbildung: [47]) 110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Literaturübersicht zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Landmaschinen (Auswahl) 24

Tabelle 2: Biokraftstofftaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB, die im Rahmen von KlimaTrak wissenschaftlich begleitet wurden (Stand: Juni 2022) 31

Tabelle 3: Biokraftstofftaugliche Traktoren der Abgasstufen IV bzw. V, die im Rahmen von KlimaTrak wissenschaftlich begleitet wurden (Stand: Juni 2022) 32

Tabelle 4: Technische Daten Steyr 4075 kompakt (ST-S) 33

Tabelle 5: Technische Daten John-Deere-Pflanzenöltraktor 6210R (JD-P) 34

Tabelle 6: Technische Daten Fendt Vario 724 S4 (FE-S) 35

Tabelle 7: Technische Daten des Kubota M8560 (KU-S) 37

Tabelle 8: Technische Daten Valtra T214 Direct und T215 38

Tabelle 9: Technische Daten des John Deere 6250R 40

Tabelle 10: Technische Daten des Harvesters John Deere 1470G 41

Tabelle 11: Technische Daten Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F) 43

Tabelle 12: Technische Daten Fendt 211 V Vario (FE-V) 44

Tabelle 13: Non-Road Steady Cycle (NRSC) 47

Tabelle 14: Durchfluss der Injektoren des Traktors DE-N bei zwei verschiedenen Betriebspunkten, ermittelt mit einem Prüfgerät Bosch EPS 200 56

Tabelle 15: Kraftstoffanalysen von Rapsölkraftstoff im Feld 65

Tabelle 16: Bewertung der alternativen Antriebssysteme Verbrennungsmotor mit Rapsölkraftstoff (R100), Biodiesel (B100), Biomethan (CNG) und paraffinischem Diesel (HVO) sowie batterieelektrischer Antrieb (Elektro) im Vergleich zu Dieselkraftstoff (DK) 106

1 Einleitung

Deutschland soll bis 2045 klimaneutral werden. Das ist der Kern der im Mai 2021 durch die Bundesregierung beschlossenen Novelle des Klimaschutzgesetzes. Das Zwischenziel für 2030 wird durch eine Gesetzesänderung von 55 auf 65 Prozent Treibhausgasminderung gegenüber 1990 erhöht. Um diese Ziele zu erreichen, müssen alle Sektoren, auch die, die nicht in den Treibhausgasemissionshandel eingebunden sind, wie zum Beispiel die Landwirtschaft, ihren Beitrag leisten [14].

Die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) der Landwirtschaft betrugen im Jahr 2020 rund 66 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente, das sind rund neun Prozent der THG-Emissionen in Deutschland [9]. Damit lagen die THG-Emissionen etwa um 24 % unter dem Niveau von 1990. Wesentliche Rückgänge fanden in den Jahren 1990 bis 1994 statt und sind überwiegend mit dem Strukturwandel in den neuen Bundesländern zu erklären. Zwischen 1995 und 2015 gab es keine großen Veränderungen. Mittlerweile gehen die THG-Emissionen in der Landwirtschaft im fünften Jahr in Folge leicht zurück [9].

In der Land- und Forstwirtschaft werden jährlich rund zwei Milliarden Liter Dieselkraftstoff verbraucht [38]. Der Anteil Dieselkraftstoff am gesamten Kraftstoffbedarf des Agrarsektors betrug dabei rund 99,9 %, der Anteil Biodiesel und Pflanzenöl als Reinkraftstoffe in Summe nur 0,1 %. Durch den Kraftstoffeinsatz in der Land- und Forstwirtschaft werden in Deutschland jährlich rund 5,4 Millionen Tonnen Treibhausgase (Tank-to-Wheel) emittiert [58] [59]. Ein leicht auszuschöpfendes Potenzial zur Minderung von THG-Emissionen steckt in der Umstellung auf klimaschonende Kraftstoffe bzw. Antriebe [47] [23].

Die Staatsgüter der Landwirtschaftsverwaltung sowie die landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Betriebe der Justizvollzugsanstalten sollen bei der Verwendung regenerativer Energieträger eine Vorreiterrolle einnehmen. Um der Klimaneutralität von Staat und Kommunen bis 2030 – als wichtigem Ziel des Klimaschutzprogramms nach dem Bayerischen Klimaschutzgesetz (BayKlimaG) [36] – einen Schritt näher zu kommen, sollen die Maschinen und Geräte dieser Betriebe künftig nur noch mit Erneuerbaren Energieträgern angetrieben werden [36].

Neben dem Aspekt des Klimaschutzes ist es auch aus Gründen der Sicherstellung der heimischen Nahrungsmittelproduktion durch Verringerung der Abhängigkeit von erdöl- und erdgasfördernden Staaten geboten, alternative und regenerative Antriebe in der Land- und Forstwirtschaft zu nutzen. Weitere positive Nebeneffekte der Nutzung regenerativer Antriebssysteme sind der vorbeugende Boden- und Gewässerschutz bei Havarien, die Vermeidung der Kontamination von Nahrungs- und Futtermitteln mit Mineralöl und die Stimulierung der heimischen Eiweißfuttermittelproduktion durch den Anbau von Öl- bzw. Eiweißpflanzen. Aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Landwirtschaft im internationalen Vergleich sind insbesondere kostengünstige Lösungen von Interesse.

Mit Biokraftstoffen, wie Biodiesel, Rapsölkraftstoff, Pflanzenölkraftstoff sowie Biomethan, können THG-Emissionen bereits jetzt deutlich reduziert werden. Mit Rapsölkraftstoff werden beispielsweise im Vergleich zu Dieselkraftstoff die THG-Emissionen um über 90 % gemindert [22]. Das in bayerischen dezentralen Ölmühlen erzeugte Rapsöl ist ein Eckpfei-

ler regionaler Wirtschaftskreisläufe und fördert die Entwicklung des ländlichen Raums. Die Nutzung von Rapsölkraftstoff ist kosteneffektiv und gilt als mögliche Option beim Umbau der Energieversorgung von Landmaschinen, um die im Klimaschutzgesetz beschlossenen sektoralen THG-Minderungsziele zu erreichen.

Unternehmen, Verbände und Forschungseinrichtungen aus den Bereichen Landwirtschaft und Landtechnik haben sich zur „Branchenplattform Biokraftstoffe in der Land- und Forstwirtschaft“ zusammengeschlossen, um den Einsatz von Biokraftstoffen in der Land- und Forstwirtschaft zu unterstützen. Die Branchenplattform hat das Ziel, eine umfassende und neutrale Information zu den Vor- und Nachteilen sowie den technischen Aspekten des Einsatzes von Biokraftstoffen in der Land- und Forstwirtschaft bereitzustellen. [11]

2 Problemstellung

An Standorten der Bayerischen Staatsgüter (BaySG) wird seit vielen Jahren eine Traktorenflotte mit Rapsölkraftstoff aus regionalen Ölmühlen betrieben. Das Technologie- und Förderzentrum (TFZ) begleitet den Einsatz der Traktoren durch Forschungsarbeiten im Auftrag des StMELF und StMWi (z. B. Forschungsvorhaben BayTrak [EW712/20] und MoniTrak [BE/15/02]). Im Zeitraum der Begleitforschung durch das TFZ wurden bis zum Jahr 2017 etwa 60.000 Betriebsstunden mit Rapsölkraftstoff absolviert und dabei auf den Betrieben rund 1.600 Tonnen Treibhausgase eingespart [32]. Die BaySG nahmen mit dem Aufbau dieser Rapsöltraktorenflotte bei der Umstellung der Kraftstoffnutzung auf regenerative Energieträger ihre Vorbildfunktion wahr. Die energetische Umstellung der land- und forstwirtschaftlichen Maschinen der Staatsverwaltung soll nach den Vorgaben des Klimaschutzprogramms bereits bis zum Jahr 2025 umgesetzt sein [36].

Durch die fortschreitende Verschärfung von Abgasgrenzwerten und Einführung neuer Anforderungen, zum Beispiel hinsichtlich der Überprüfung von Emissionen im Praxisbetrieb (In-Service-Monitoring nach EU-Verordnung 2017/655 [33]), wird von der Landmaschinenindustrie das System Motor–Abgasnachbehandlung–Kraftstoff stetig weiterentwickelt. Ob diese neuen Entwicklungen die Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Leistung, Kraftstoffverbrauch und Emissionsverhalten über einen langen Zeitraum erfüllen, ist bis dato noch nicht untersucht. Insbesondere ist die Dauerhaltbarkeit der Abgasnachbehandlungssysteme, zum einen aus Kostengründen (Instandhaltung) und zum anderen aufgrund der Emissionen, von besonderem Interesse.

Darüber hinaus werden neue oder verbesserte Antriebstechnologien von der Landmaschinenindustrie als Prototypen vorgestellt oder als Neuentwicklungen am Markt angeboten, wie zum Beispiel Traktoren mit batterieelektrischem Antrieb oder Methan-Traktoren, über deren Betriebsverhalten und Praxistauglichkeit oft noch keine Aussagen getroffen werden können.

Solange nicht aufgrund einer längerfristigen, kundenseitig hohen Nachfrage nach Traktoren mit klima- und ressourcenschonenden Antriebssystemen solche Maschinen in großer Stückzahl von der Landmaschinenindustrie hergestellt und auf dem Markt angeboten werden, ist es Aufgabe der Begleitforschung, verschiedene Systeme vergleichend zu untersuchen, technische Schwachstellen aufzudecken, aber auch die Machbarkeit zu demonstrieren.

3 Zielstellung

Auf den Bayerischen Staatsgütern sollen die vorhandenen Rapsöltraktoren, Umrüstungen auf regenerative Antriebe und künftige Neuanschaffungen landwirtschaftlicher Maschinen mit regenerativem Antrieb sowie von der Landmaschinenindustrie zu Testzwecken zur Verfügung gestellte Prototypen im Rahmen eines Langzeitmonitorings hinsichtlich Betriebs- und Emissionsverhalten untersucht werden.

Die Ergebnisse bei Leistungs- und Emissionsmessungen am Prüfstand sollen mit verschiedenen Kraftstoffvarianten und auch unter erschwerten Betriebsbedingungen (Kaltstart, Lastwechsel) ermittelt werden. Durch den Abgleich der Prüfstandergebnisse mit den Erfahrungen aus dem Feld sollen neue Impulse für die weitere Entwicklung und Optimierung alternativer Antriebe entstehen.

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

Identifizierte Schwachstellen sollen aufgezeigt und die Systemoptimierung soll vorangetrieben werden. Die Bayerischen Staatsgüter sollen in ihrem Bestreben, den Anteil regenerativer Antriebssysteme am Gesamtmaschinenbestand zu erhöhen, unterstützt werden. Landwirte sollen auf Basis fundierter Untersuchungen regelmäßig über die Möglichkeiten zur Treibhausgasminderung durch die Substitution von Dieselkraftstoff informiert und zur Umstellung auf regenerative Antriebssysteme motiviert werden.

Übergeordnetes Ziel ist es, die Vorbildfunktion der Bayerischen Staatsgüter beim aktiven Klimaschutz zu stärken und im Bereich der Antriebstechnologien landwirtschaftlicher Maschinen die technischen Möglichkeiten treibhausgasmindernder Maßnahmen aufzuzeigen und in der Praxis zu demonstrieren.

4 Stand der Wissenschaft und Technik

Das folgende Kapitel fasst den aktuellen Stand der Technik bezüglich Landmaschinen mit alternativen Antriebssystemen zusammen. Der Themenkomplex wird zudem in REMMELE et al. (2020) [47] detailliert erläutert.

4.1 Alternative Kraftstoffe und dafür geeignete Maschinen

4.1.1 Pflanzenöl

Die Qualität von Rapsölkraftstoff und Pflanzenölkraftstoff ist in den Normen DIN 51605 [19] und DIN 51623 [18] definiert. Zeitweise wurden von namhaften Landmaschinenherstellern für den Betrieb mit diesen Kraftstoffen angepasste und freigegebene Traktoren auf dem Markt angeboten. Derzeit ist jedoch kein Hersteller bekannt, der aktuell derartige Fahrzeuge ab Werk anbietet. Es sind lediglich Umrüstlösungen verfügbar bzw. es werden im Rahmen von Forschungsprojekten einzelne Fahrzeuge von den Herstellern selbst für den Pflanzenölbetrieb modifiziert. In Bayern sind nur noch einige wenige dezentrale Ölmühlen existent, die Rapsölkraftstoff in Norm-Qualität produzieren und vertreiben.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind Forschungs- und Demonstrationsvorhaben aufgelistet, in denen der Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff in Traktoren untersucht wurde.

Ein einwandfreies Betriebsverhalten wurde bei einzelnen Traktoren mit Pflanzenöltechnik bis ca. 8000 Betriebsstunden (Bh) dokumentiert. Das Emissionsverhalten von Rapsöltraktoren nach mehreren Tausend Betriebsstunden im Feldeinsatz ist hingegen noch kaum erforscht. Begleitende Untersuchungen an Pflanzenöltraktoren mit aktuellen Abgasnachbehandlungssystemen bis zum Erreichen der Emissions-Dauerhaltbarkeitsperiode (EDP) von 8000 Bh sind noch nicht erfolgt. Die meisten Einsatzerfahrungen liegen dabei für Motoren bis zur Abgasstufe IIIB vor.

Das Leistungs- und Emissionsverhalten rapsölbetriebener Motoren der neuen Abgasstufen IV und V sind derzeit Gegenstand der Forschung. Die Ergebnisse zeigen, dass rapsölbetriebene Motoren der Abgasstufe IV im realen Betrieb in der Land- und Forstwirtschaft geringe Schadstoffemissionen emittieren [25] [30]. Durch die Anpassung der Motorsteuerungssoftware kann zudem das Zünd- und Brennverhalten rapsölbetriebener Motoren wirksam verbessert werden [2]. Weitere Ergebnisse zeigen, dass Motoren mit erweiterter Sensorik die Eigenschaften des getankten Biokraftstoffs erfassen und so das optimale Leistungs- und Emissionsverhalten eingestellt werden kann [52].

Insgesamt zeigt sich, dass der Einsatz von Rapsölkraftstoff in aktueller Motorentechnik sehr gut möglich ist. Es fehlen bisher jedoch Erfahrungen aus dem praktischen Einsatz für moderne Traktoren der Abgasstufen IV und V.

Tabelle 1: Literaturübersicht zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Landmaschinen (Auswahl)

Autoren und Erscheinungsjahr	Titel der Vorhaben
APFELBECK et al. (1992) [1]	Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht – Teil II: Untersuchung der Abgaszusammensetzung von Dieselmotoren beim Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester sowie deren Mischungen
HÖCK et al. (1994) [40]	Betriebserfahrungen mit pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren (Natur- und Biodiesel)
HASSEL et al. (2005) [39]	Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöltauglichen Traktoren
DÖNGES et al. (2006) [21]	Felderprobung Rapsöl pur
RATHBAUER et al. (2008) [46]	Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft
SY et al. (2009) [53]	Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz
THUNEKE et al. (2009) [56]	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
THE 2nd VEGOIL CONSORTIUM (2011) [54]	Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines
GASSNER et al. (2013) [37]	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöltauglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
EMBERGER et al. (2013) [27]	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II
EMBERGER et al. (2013) [28]	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA
HUBER et al. (2015) [42]	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe Tier 4/EU-Stufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
ETTL et al. (2016) [31]	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöltauglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern
ETTL et al. (2019) [32]	Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV. Abgasemissionen, Effizienz und Betriebssicherheit pflanzenöltauglicher Traktoren auf den bayerischen Versuchsbetrieben
EMBERGER et al. (2019) [25]	Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)
KODER (2020) [43]	Einspritz-, Zünd- und Verbrennungsverhalten von reinen Pflanzenölkraftstoffen in modernen Common-Rail-Dieselmotoren
ALTMANN et al. (2020) [2]	Zünd- und Brennverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf einen Motor der Abgasstufe V
FELDHOFF et al. (2020) [35]	Strategien zur Ablagerungsvermeidung an Einspritzdüsen beim Multi-Fuel-Einsatz biogener Kraftstoffe

ETTL (2021) [30]	Reales Abgasemissionsverhalten von Traktoren am Prüfstand und im Feldeinsatz
BUCHNER (2022) [7]	Einordnung und Bewertung von alternativen Antriebssystemen für Traktoren und Emissionsmessungen mit ausgewählten Kraftstoffen
SPIEGEL et al. (2022) [52]	Entwicklung und Feldtest eines Abgasstufe-5-Multi-Fuel-Traktors; Teilvorhaben 2: Sensortests und Untersuchung des Gesamtsystems auf dem Traktorenprüfstand und im Feldeinsatz

4.1.2 Biodiesel

Die Qualitätsanforderungen von Biodiesel bzw. Fettsäuremethylester (FAME) sind in der Norm DIN EN 14214 [16] geregelt. Biodiesel kann als Reinkraftstoff (B100) in einigen Bestandsmaschinen bis etwa zur Abgasstufe IIIA eingesetzt werden, wenn dafür Herstellerfreigaben bestehen. Traktoren neuerer Bauart können teilweise mit Biodieselanteilen von 20 (B20) oder 30 (B30) Prozent in Dieselkraftstoff betrieben werden. Motorenhersteller, wie z. B. die Deutz AG geben ihre Motoren für die Nutzung von Biodiesel (B100) frei, was allerdings nicht bedeutet, dass auch die Traktoren, in denen diese Motoren verbaut sind, automatisch für Biodiesel geeignet sind. Üblicherweise beschränkt sich die herstellerseitige Freigabe für Traktoren und mobile Maschinen ab der Abgasstufe IV auf Dieselkraftstoff gemäß DIN EN 590, der einen Anteil von bis zu sieben Prozent Biodiesel (B7) enthalten darf.

An öffentlichen Tankstellen wird Biodiesel als Reinkraftstoff praktisch nicht mehr vertrieben. Es sind jedoch hohe Produktionskapazitäten von 1,47 Millionen Tonnen in Deutschland vorhanden [5] und der B100-Kraftstoff kann direkt über den Handel für Hoftankstellen bezogen werden. Es ist dabei eine einfache Lagerung und Handhabung möglich, da Biodiesel keinen Gefahrstoff darstellt.

Die meisten Einsatzerfahrungen mit B100 beziehen sich auf ältere Traktormodelle mit der damals gebräuchlichen Motortechnik. Informationen zur Biodieselfreigabe von verschiedenen Traktorherstellern finden sich auf der Homepage der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP) unter www.ufop.de/schlepperfreigabe.

Prüfstanduntersuchungen an der Universität Rostock weisen bei einem modernen Traktor der Abgasstufe IV ein ordnungsgemäßes Betriebs- und Emissionsverhalten bis 1.000 Bh nach [50]. Durch die B100-Freigabe in Motoren der DEUTZ AG mit der Abgasstufe IV ist der B100-Einsatz in einigen Traktoren der Marken Deutz-Fahr und Same möglich [61].

Trotz guter technischer Voraussetzungen sind derzeit keine Landmaschinen der aktuellen Abgasstufe V ab Werk für den B100-Betrieb freigegeben. Mögliche Gründe aus Sicht der Hersteller sind die derzeit geringe Nachfrage nach biodieseltauglichen Traktoren und die hohen Kosten für die Typgenehmigung des Motors für einen zusätzlichen Kraftstoff.

4.1.3 Paraffinischer Dieselkraftstoff

Die Norm DIN EN 15940 [20] definiert die Anforderungen an paraffinischen Dieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren. Derzeit sind zwei unterschiedliche Verfahren üblich, mit denen Kraftstoff dieser Spezifikation hergestellt und auch in größeren Mengen vertrieben wird: die Hydrierung von Pflanzenöl, Abfallfetten und Abfall-Fettsäuren (HVO) sowie die Synthese aus Methan (GtL, Gas-to-Liquid). Paraffinischer Dieselkraftstoff bzw. synthetischer Kraftstoff kann auch über andere Synthesewege hergestellt werden, beispielsweise aus Kohlendioxid und Wasserstoff (PtL, Power-to-Liquid) oder aus Biomasse (BtL, Biomass-to-Liquid). Da unabhängig von der Herstellungsweise weitgehend identische Eigenschaften der Produkte zu erwarten sind bzw. eingestellt werden können, sind die Erkenntnisse aus dem Einsatz von HVO und GtL voraussichtlich auch auf zukünftige XtL-Varianten übertragbar.

Die Spezifikationen und typischen Eigenschaften von hydriertem Pflanzenöl des Herstellers Neste sind in ENGMAN et al. [29] beschrieben und in der DIN EN 15940 [20] festgelegt. Des Weiteren sind in dieser Veröffentlichung des Herstellers Neste auch Erfahrungen aus Feldtests sowie zu Emissionen und Leistung von Fahrzeugen im Betrieb mit diesem erneuerbaren Kraftstoff zusammengestellt. In der Renewable Energy Directive nach EU-Richtlinie 2018/2001 (RED II) [34] werden als Standardwerte THG-Minderungsraten zwischen 47 und 83 % angegeben.

Das in Deutschland im Jahr 2020 verwendete nachhaltigkeitszertifizierte HVO wies nach Angaben der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) eine mittlere Treibhausgas-Einsparung (THG-Einsparung) von 79 % gegenüber Diesel auf, bei CP-HVO (Co-Processing HVO) liegt der Wert bei 81 %. Allerdings schwanken die THG-Emissionen stark je nach Art und Herkunft des Rohstoffs sowie der Technologie der Herstellung [8].

In SHELL GLOBAL SOLUTIONS INTERNATIONAL B. V. (2016) [51] sind die technischen Details von GtL sowie Erfahrungen aus der Praxis und Umweltwirkungen zusammengefasst. Die Treibhausgasemissionen von GtL aus fossilem Erdgas werden mit denen von Produkten aus einer konventionellen Raffinerie als vergleichbar angegeben. Die Hersteller werben des Weiteren u. a. mit geringeren lokalen Emissionen wie Stickstoffoxiden und Partikeln sowie einer geringeren Ökotoxizität und besserer biologischen Abbaubarkeit als Dieselkraftstoff. In den durchgeführten umfangreichen Feldversuchen wurden die GtL-Kraftstoffe in nicht speziell angepassten Diesel-Fahrzeugen eingesetzt, dabei wurden keine kraftstoffbedingten Störungen festgestellt. Eine Reduktion der limitierten Schadstoffkomponenten durch den Einsatz von reinem GtL gegenüber fossilem Dieselkraftstoff beschreiben unter anderem auch CZERWINSKI et al. (2009) [12] und VERBEEK (2014) [60].

HVO als paraffinischer Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 wird bereits in manchen europäischen Ländern, darunter Finnland, die Niederlande und Schweden, an öffentlichen Tankstellen als Reinkraftstoff angeboten und insbesondere in schweren Nutzfahrzeugen eingesetzt. In Deutschland erfolgt der Vertrieb entweder in Reinform oder als Beimischung bzw. als Co-Processing-Produkt mit fossilem Dieselkraftstoff an öffentlichen Tankstellen, ausschließlich zur Nutzung in betrieblichen Eigenverbrauchs-Tankstellen für nicht stra-

ßengebundene Fahrzeuge oder zu Forschungs- und Demonstrationszwecken, da paraffinischer Dieselkraftstoff nicht in der 10. BImSchV [10] gelistet ist. HVO-Kraftstoff nach DIN EN 15940 ist heute bereits für einen Großteil der neuen Dieseltraktoren von den Herstellern freigegeben [57] [61].

Mit dem Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote) ist die Verwendung von Palmöl als HVO-Ausgangsstoff ab dem Jahr 2023 nicht mehr zulässig [15]. Beispielsweise stellt das finnische Unternehmen Neste Oyj – neben weiteren Produkten – HVO aus Altspeisefetten und Reststoffen aus der Pflanzenölverarbeitung her, das in Deutschland von der Firma Tool-Fuel Services GmbH unter der Marke C.A.R.E.-Diesel vertrieben wird.

Im Folgenden wird der in den Versuchen verwendete paraffinische Dieselkraftstoff aus Rest- und Abfallstoffen vereinfachend mit der Abkürzung HVO bezeichnet.

4.1.4 Biomethan (CNG)

Biomethan ist ein aus Biomasse oder aus Deponiegas bzw. Klärgas hergestellter gasförmiger Kraftstoff, der wie Erdgas überwiegend aus Methan besteht, die Qualitätsanforderungen von CNG (Compressed Natural Gas) gemäß DIN EN 16723-2 erfüllt und in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden kann. Erfahrungen beim Einsatz von CNG als Kraftstoff für Traktoren wurden unter anderem im Vorhaben „Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor“ von MAUTNER et al. (2017) [44] gesammelt. Des Weiteren wurde von PREHN et al. (2016) [45] auf Basis eines Landmaschinen-Dieselmotors ein monovalenter Gasmotor entwickelt, in einen Deutz-Fahr-Traktor integriert und im Praxiseinsatz erprobt (siehe Abbildung 1). Der Landmaschinenhersteller CNH Industrial bietet seit Mitte des Jahres 2021 einen serienmäßig mit CNG betriebenen Traktor der Marke New Holland an. Der Prototyp des Biomethantraktors New Holland T6 Methane Power wurde auf der Agritechnica 2019 präsentiert (Abbildung 2).

In Deutschland gibt es derzeit ca. 800 CNG-Tankstellen, vor allem in den Ballungsräumen [62]. Die Zahl der Tankstellen ist tendenziell rückläufig. Einige davon bieten entweder anteilmäßig oder ausschließlich Biomethan an, das – wenn es aus Rest- und Abfallstoffen hergestellt wird – eine sehr hohe Treibhausgaseinsparung aufweist. Es ist zu erwarten, dass zukünftig auch die Power-to-Gas-Technologie verstärkt eingesetzt wird, um erneuerbares Methan aus überschüssigem Ökostrom und Kohlendioxid zu erzeugen, das in das Erdgasnetz eingespeist werden kann.



Abbildung 1: Prototyp Deutz-Fahr-Traktor mit monovalentem Gasmotor



Abbildung 2: Serien-Traktor New Holland T6 Methane Power

4.2 Elektrifizierte Antriebssysteme

Bislang sind nur wenige Landmaschinen mit elektrifizierten Antriebssystemen auf dem Markt. Vollelektrische Konzepte mit Akku finden sich vor allem für Einsatzbereiche mit geringem Leistungsbedarf und kurzer täglicher Einsatzdauer, beispielsweise Hoflader oder Futtermischwagen. Für energieintensivere Anwendungen und längere Einsatzzeiten wären sehr große und schwere Akkus notwendig, die dem begrenzten Angebot an Bauraum und Nutzlast entgegenstehen. Der Traktorenhersteller Fendt erprobt derzeit einen ersten batterieelektrischen Kompakttraktor mit 50 kW Antriebsleistung und bis zu fünf Stunden Betriebszeit mit einer Akkuladung unter realen Einsatzbedingungen (Abbildung 3). Berichte zu Praxiserfahrungen und ein möglicher Markteinführungstermin sind noch nicht bekannt. Vorteil des batterieelektrischen Systems ist eine signifikante CO_2-Einsparung, wenn regenerativer Strom geladen wird, der z. B. auf dem Hof erzeugt wird. Zudem reduzieren sich Wartungszeiten und -kosten, da verschiedene Verschleißteile und Betriebsstoffe entfallen [1].



Abbildung 3: Vollelektrischer Kompakttraktor Fendt e100 Vario

5 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die untersuchten Fahrzeuge und Kraftstoffe sowie das Vorgehen bei den Abgasemissionsmessungen beschrieben.

5.1 Maschinen und Geräte

Im Rahmen des Vorhabens werden zum Zeitpunkt Juni 2022 26 biokraftstofftaugliche Traktoren und ein Forstharvester wissenschaftlich begleitet. Diese Maschinen der Abgasstufen I bis IIIB werden in Tabelle 2 und Maschinen der aktuellen Abgasstufen IV und V in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 2: Biokraftstofftaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB, die im Rahmen von KlimaTrak wissenschaftlich begleitet wurden (Stand: Juni 2022)

Biokraftstofftraktor	Kurzbez.	Abgasstufe	Betriebsstunden	Biokraftstoff	Standort
Fendt Farmer Vario 412	FE-K	I	8.400	R100	Kringell
Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160	DE-K	II	6.137	R100	Kringell
Deutz-Fahr Agrotron 650 M	DE-N	IIIA	4.200	R100	Neuhof
Fendt 820 Vario^{greentec}	FE-A	IIIA	9.130	R100	Achselschwang
Fendt 820 Vario^{greentec}	FE-Al	IIIA	8.940	R100	Almesbach
John Deere 6630 Premium	JD-B	IIIA	2.740	R100	Baumannshof
John Deere 7830 Premium	JD7-G	IIIA	3.150	R100	Grub
John Deere 6930 Premium	JD-G	IIIA	6.340	R100	Grub
John Deere 6930 Premium	JD-K	IIIA	5.900	R100	Kringell
John Deere 6630 Premium	JD-O	IIIA	4.340	R100	Osterseeon
John Deere 5080R	JD5-O	IIIA	1.810	R100	Osterseeon
John Deere 6125R	JD-Ka	IIIB	950	R100	Karolinenfeld
Fendt Vario 718 SCR	FE-Ka	IIIB	1.890	R100	Karolinenfeld
John Deere 6115R	JD6R-B	IIIB	1.030	R100	Baumannshof
John Deere 6100RC	JD-Pu	IIIB	2.840	R100	Puch
John Deere 6125R	JD-N	IIIB	4.380	R100	Straßmoos
John Deere 6210R	JD-P	IIIB	5.140	R100	Achselschwang
Steyr 4075 kompakt	ST-S	IIIB	1.920	B100	Straubing
Kubota M8560	KU-S	IIIB	1.050	B100	Straubing

Tabelle 3: Biokraftstofftaugliche Traktoren der Abgasstufen IV bzw. V, die im Rahmen von KlimaTrak wissenschaftlich begleitet wurden (Stand: Juni 2022)

Biokraftstofftraktor	Kurz-bez.	Abgas-stufe	Betriebs-stunden	Biokraft-stoff	Standort
John Deere 6210R	JD-P4	IV	4.060	R100	Grub
Fendt Vario 724 S4	FE-S	IV	2.680	R100	Straubing
John Deere 1470G	JD-SF	IV	8.100	R100	Staatsforsten
John Deere 6135R	JD-M4	V	750	R100	Grub
John Deere 6250R	JD-M6	V	1.350	R100	Almesbach
Valtra T214 Direct	VA-K	V	930	HVO	Kringell
Valtra T215	VA-K2	V	100	HVO	Kringell
Fendt 211 V Vario	FE-V	V	150	B100	Veitshöchheim
Deutz-Fahr 6165.4 TTV	DE-F	V	340	R100	Freising

Die Arbeitsmaschinen werden auf den Standorten der Bayerischen Staatsgüter (BaySG), der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), an der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG), an den Bayerischen Staatsforsten (BaySF) sowie am TFZ Straubing betrieben.

Der John Deere 7830 Premium (JD7-G) der Abgasstufe IIIA wurde bei ca. 3.000 Bh aufgrund verschiedener Probleme vom Rapsöl- auf Dieselbetrieb zurückgebaut (siehe Kapitel 6.1). Daher wird er im Vorhaben nicht weiter berücksichtigt. Der Traktor Deutz-Fahr Agrotron TTV 1160 (DE-K) der Abgasstufe II wurde im Jahr 2020 bei 6170 Bh aufgrund eines Getriebeschadens von den BaySG verkauft. Der Motor und das Kraftstoffsystem des Traktors DE-K funktionierten bis zu diesem Zeitpunkt ordnungsgemäß.

Als Biokraftstoffe kommen in den untersuchten Traktoren Rapsölkraftstoff (R100), Biodiesel (B100) sowie ein paraffinischer Dieselkraftstoff aus Rest- und Abfallstoffen (HVO) zum Einsatz. Nachfolgend werden die technischen Daten besonders relevanter Traktoren in der Flotte, an denen Abgasemissionsmessungen durchgeführt werden, näher beschrieben.

Steyr 4075 kompakt (ST-S)
Im Jahr 2018 wurde am TFZ ein Steyr 4075 kompakt mit herstellerseitiger Biodiesel-Freigabe beschafft (Abbildung 4). Der Traktor wird mit Biodiesel (B100) nach DIN EN 14214 [16] aus der TFZ-Betriebstankstelle betankt. Er kommt bei Feldarbeiten zum Energie- und Rohstoffpflanzenanbau zum Einsatz. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Im Vorhaben werden an dem Traktor vergleichende Leistungs- und Emissionsmessungen mit Dieselkraftstoff, Biodiesel und paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) durchgeführt.



Abbildung 4: Steyr 4075 kompakt (ST-S)

Tabelle 4: Technische Daten Steyr 4075 kompakt (ST-S)

Traktortyp	Steyr 4075 kompakt
Motortyp	FPT F5C
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	4/3,4
Nennleistung (EG 97/68 in kW/PS)	55/75
Einspritzsystem	Common-Rail
Baujahr	2018
Abgasstufe	IIIB
Getriebe	Schaltgetriebe
Kraftstoffsystem	Standard-Diesel
Abgasnachbehandlung und Emissionsminderung	Abgasrückführung, Oxidationskatalysator, Partikelfilter

John Deere 6210R (JD-P)

Der Traktor John Deere 6210R (JD-P) ist ein Prototyp, der direkt vom Hersteller für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst wurde. Der Traktor ist in Abbildung 5 zu sehen und diente zunächst als Versuchsträger in den Forschungsprojekten PraxTrak [42] sowie MoniTrak [32]. Im Vorhaben werden an dem Traktor wiederkehrende Leistungs- und Emissionsmessungen durchgeführt.



Abbildung 5: John Deere 6210R (JD-P) am BaySG Standort Achselschwang

Mit einem Oxidationskatalysator und geschlossenem, beschichtetem Dieselpartikelfilter erfüllt der Traktor gemäß der Typgenehmigungsprüfung die Abgasstufe IIIB. Der Dieselpartikelfilter des Pflanzenöltraktors JD-P wird ausschließlich passiv regeneriert. Die Nacheinspritzung von Kraftstoff in den Abgasstrang, die zur thermischen Regeneration des Filters beim Betrieb mit Dieselkraftstoff notwendig ist, wurde vom Landmaschinenhersteller deaktiviert. Bei der passiven Regeneration wird ein Fließgleichgewicht von abgeschiedener und oxidierter Pflanzenölrußmenge im DPF erreicht. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Technische Daten John-Deere-Pflanzenöltraktor 6210R (JD-P)

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

Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Der Fendt Vario 724 S4 ist mit einem 6-Zylinder-Common-Rail-Deutz-Motor der Abgasstufe IV mit 174 kW Nennleistung und mit einem Common-Rail-Einspritzsystem mit Magnetventil-Injektoren ausgerüstet. Um den Traktor mit Rapsölkraftstoff betreiben zu können, wurde ein Zwei-Tank-System mit Komponenten des Herstellers ATG von der BayWa AG eingebaut. Dabei wird Dieselkraftstoff während der Start- und Spülphasen unmittelbar vor dem Abstellen aus einem zusätzlich installierten 100-l-Kraftstofftank entnommen. Der serienmäßig vorhandene Tank mit 300 l Fassungsvermögen, der vor der Umrüstung als Dieseltank diente, wird für den Rapsölkraftstoff verwendet. Die Umrüstung erfolgt ohne Eingriff ins Management des Einspritzsystems. Auch die Motorsteuerungssoftware wird im Werkszustand belassen und bleibt somit auf den Betrieb mit Dieselkraftstoff optimiert. Der Feldeinsatz des Traktors FE-S findet bei landwirtschaftlichen Arbeiten und bei der Parzellenbewirtschaftung im Versuchswesen der Abteilung Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse am Technologie- und Förderzentrum (TFZ) statt. Für die Ergebnisdarstellung werden auch Messreihen früherer Untersuchungen im Zeitraum von 240 bis ca. 2.000 Bh des Traktors FE-S [35] [32] berücksichtigt und neu ausgewertet.

Tabelle 6: Technische Daten Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

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



Abbildung 6: Fendt Vario 724 S4 am TFZ Straubing (FE-S)

Kubota M8560 (KU-S)

Der Kubota M8560 (KU-S) besitzt einen 4-Zylinder-Motor mit einem Hubraum von 3,8 l sowie einer Nennleistung von 67,0 kW. Der Traktor in Abbildung 7 besitzt eine Common-Rail-Einspritzung und erfüllt die Abgasstufe IIIB mithilfe einer Abgasrückführung, eines Oxidationskatalysators (DOC) und eines Dieselpartikelfilters (DPF). Im Feld arbeitet der Traktor im Versuchswesen des Technologie- und Förderzentrums (TFZ). Im Zuge des Klimaschutzprogramms wurde der Kubota M8560 im April 2021 bei 820 Bh auf den Betrieb mit Biodiesel (B100) umgestellt. Der Traktor ist ab Werk nur für den Dieselkraftstoffbetrieb (DK) freigegeben. Die Kraftstoffumstellung wurde daher mit Leistungs- und Verbrauchsmessungen begleitet, um Erfahrungen mit dem B100-Einsatz bei diesem nicht freigegebenen Motor zu sammeln. Die technischen Daten sind in Tabelle 7 aufgelistet.



Abbildung 7: Kubota M8560 (KU-S) am TFZ Straubing

Tabelle 7: Technische Daten des Kubota M8560 (KU-S)

Traktortyp	Kubota M8560
Motortyp	V3800CR-TE 4
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	4/3,8
Maximale Leistung (kW/PS)	67/91
Einspritzsystem	Common-Rail
Baujahr	2014
Abgasstufe	IIIB
Getriebe	mechanische Schaltung
Kraftstoffsystem	Standard-Diesel
Abgasnachbehandlung und Emissionsminderung	Abgasrückführung, Oxidationskatalysator, Partikelfilter

Valtra T214 Direct (VA-K) und Valtra T215 (VA-K2)

Der Valtra T214 Direct erfüllt die aktuelle Abgasstufe V und wird in den Emissionsmessungen mit paraffinischem und fossilem Dieselkraftstoff betrieben. Abbildung 8 zeigt den Traktor VA-K. Der AGCO Power Motor ist mit sechs Zylindern mit 7,4 Litern Hubraum ausgestattet und leistet laut Herstellerangaben maximal 169 kW an der Kurbelwelle. Der Traktor

VA-K2 besitzt mit Ausnahme des nicht stufenlosen Fahrgetriebes vergleichbare technische Daten zum Vorgängermodell VA-K, wie in Tabelle 8 zu sehen ist.



Abbildung 8: Valtra T215 (links) und T214 Direct (rechts)

Tabelle 8: Technische Daten Valtra T214 Direct und T215

Traktortyp	Valtra T214 Direct	Valtra T215
Motortyp	AGCO Power 74 LFTN-D5	
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/7,4	
Maximale Leistung (kW/PS)	169/230	
Einspritzsystem	Common-Rail	
Baujahr	2020	2021
Abgasstufe	V	
Getriebe	stufenlos	Lastschaltung
Kraftstoffsystem	Standard-Diesel	
Abgasnachbehandlung und Emissionsminderung	Abgasrückführung, Oxidationskatalysator, Partikelfilter, SCR-System	

Das Ansaug- und Abgassystem ist ohne externe Abgasrückführung (AGR) ausgeführt. Zur Abgasemissionsreduktion kommen ein Oxidationskatalysator (DOC), ein Partikelfilter (DPF) und ein SCR-System zum Einsatz. Die technischen Daten des Valtra T214 Direct (VA-K) sind in Tabelle 8 aufgelistet. Der Traktor wird über zwei Jahre auf den BaySG am Standort Kringell im praktischen Einsatz mit paraffinischem Dieselkraftstoff auf Basis von

Rest- und Abfallstoffen erprobt. Nach dem zweijährigen Feldtest des Traktors VA-K wird dieser durch die neueste Generation Valtra T215 (VA-K2) ersetzt und ebenso am Traktorenprüfstand und im Feld auf die Betriebstauglichkeit mit HVO-Kraftstoff untersucht.

John Deere 6250R (JD-M6)

Der John Deere 6250R wird mit einem 6-Zylinder-Motor der Abgasstufe V mit 183 kW Nennleistung angetrieben. Der Traktor in Abbildung 9 wurde auf den Betrieb mit Rapsöl umgerüstet und kann am Traktorenprüfstand als Multi-Fuel-Variante mit Rapsöl, Biodiesel und Diesel betrieben werden. Die Abgase werden durch ein SCR-System und einen Dieselpartikelfilter nachbehandelt. Der John Deere 6250R (JD-M6) wurde im Projekt „Entwicklung und Feldtest eines Abgasstufe V Multi-Fuel-Traktors“ [52] auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff optimiert. Im Projekt KlimaTrak soll in Abstimmung mit dem Hersteller die Forschungsfrage geklärt werden, ob der aktuelle Traktorentyp der Abgasstufe V im Rapsölbetrieb auch ohne aktive Regeneration dauerhaft funktionstüchtig bleibt.



Abbildung 9: John Deere 6250R am Traktorenprüfstand des TFZ Straubing

Tabelle 9: Technische Daten des John Deere 6250R

Traktortyp	John Deere 6250R
Motortyp	John Deere PowerTech PVS
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/6,8
Maximale Leistung (kW/PS)	154/210
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2018
Abgasstufe	V
Getriebe	stufenlos
Kraftstoffsystem	Ein-Tank-System
Abgasnachbehandlung und Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator, Dieselpartikelfilter

John Deere 1470 Harvester (JD-SF)

Im Rahmen des Projekts Rapster [44] wurde ein forstwirtschaftlicher Vollernter (Harvester) John Deere 1470G der Bayerischen Staatsforsten auf Rapsölbetrieb umgerüstet. Die Maschine ist mit einem aufgeladenen 9-l-Dieselmotor der Abgasstufe IV ausgestattet. Das maximale Drehmoment liegt bei 1.315 Nm (1.400 min^{-1}). Bei Nenndrehzahl (2.000 min^{-1}) leistet das Aggregat 200 kW, weitere technische Daten der Versuchsmaschine sind in Tabelle 10 aufgeführt. Das John Deere European Technology und Innovation Center erarbeitete ein Konzept für die Umrüstung des Harvestermotors auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605. In diesem Projekt KlimaTrak wird (nach dem Projektende Rapster [44]) die Dauerhaltbarkeit der Abgasgasnachbehandlung des Harvesters durch portable Emissionsmessungen überprüft sowie Unterstützung bei Reparaturen geleistet.



Abbildung 10: Forstwirtschaftlicher Vollernter (Harvester) John Deere 1470G der Bayerischen Staatsforsten

Tabelle 10: Technische Daten des Harvesters John Deere 1470G

Harvester	John Deere 1470G
Motormodell	John Deere PowerTech Plus 6090
Motorfamilie	GJDXL09
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	6/9
Nennleistung (Dieselbetrieb) in kW	200
Einspritzsystem	Common-Rail
Baujahr	2016
Abgasstufe	IV
Kraftstoffsystem	Ein-Kraftstoffsystem
Abgasnachbehandlung und Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter SCR-System

Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F)

Im Jahr 2021 wurde der Pflanzenöltraktor Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F) im Zuge des Klimaschutzprogramms von den BaySG für den Standort Freising beschafft. Der Traktor in Abbildung 11 wurde vor der Auslieferung mit einem Zwei-Tank-Kraftstoffsystem der Fa. bioltec ausgestattet.



Abbildung 11: Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F) mit einem Zwei-Tank-System der Fa. bioltec am Traktorenprüfstand

Das bioltec-System sorgt vollautomatisch dafür, dass dem Motor je Betriebszustand der optimale Kraftstoff bzw. das optimale Kraftstoffgemisch zugeführt wird. Dabei wird der Motor überwiegend mit Rapsölkraftstoff angetrieben, nur in Leerlauf- und Teillastzuständen wird Dieselkraftstoff zugemischt. Der Traktor wird nach dem ersten Feldeinsatz am TFZ auf das Leistungs- und Emissionsverhalten geprüft und anschließend im Feldtest begleitet. Die technischen Daten des Traktors sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Technische Daten Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F)

Traktortyp	Deutz-Fahr 6165.4
Motortyp	Deutz TCD 4.1 L04
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	4/4,0
Maximale Leistung (kW/PS)	115/157
Einspritzsystem	Common-Rail
Baujahr	2021
Abgasstufe	V
Getriebe	stufenlos
Kraftstoffsystem	Zwei-Tank-System
Abgasnachbehandlung und Emissionsminderung	Abgasrückführung, Oxidationskatalysator, Partikelfilter, SCR-System

Fendt 211 V Vario (FE-V)

Der Fendt V 211 Vario in Abbildung 12 wurde von der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) im Jahr 2021 neu beschafft. Die technischen Daten des Schmalspurtraktors sind in Tabelle 12 aufgelistet.



Abbildung 12: Fendt 211 V Vario (FE-V) am Traktorenprüfstand

Tabelle 12: Technische Daten Fendt 211 V Vario (FE-V)

Traktortyp	Fendt 211 V Vario
Motortyp	AGCO Power
Anzahl der Zylinder/Hubraum in l	3/3,3
Maximale Leistung (kW/PS)	77/105
Einspritzsystem	Common-Rail
Baujahr	2021
Abgasstufe	V
Getriebe	stufenlos
Kraftstoffsystem	Standard-Dieselkraftstoffsystem
Abgasnachbehandlung und Emissionsminderung	Abgasrückführung, Oxidationskatalysator, Partikelfilter, SCR-System

Für diesen Motorentyp der Abgasstufe V liegen laut Hersteller und Händler noch keine Erfahrungen im Biokraftstoffbetrieb vor. In einer Versuchsreihe am Traktorenprüfstand mit den Dieselkraftstoff (DK), Biodieselkraftstoff (B100) und paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) wird untersucht, ob Motor und Abgasnachbehandlung mit den Biokraftstoffen ordnungsgemäß funktionieren. Es ist bei einem erfolgreichen Ergebnis geplant, den Traktor auch im Feld mit Biodieselkraftstoff (B100) zu betreiben.

Maschinen und Geräte mit Elektroantrieb

Im Zuge des Klimaschutzprogramms wurden an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) an den Standorten Grub und Starnberg elektrisch angetriebene Maschinen und Geräte beschafft. Die Praxiserfahrungen mit den Elektro-Radladern Kramer Radlader KL25.5e (Ka-G) bzw. Weidemann 1160 eHoftrac (We-S) sowie mit dem Allzwecktransporter Iseki Goupil Indistrie G4 (Is-G) sollen mit Betreiberbefragungen dokumentiert werden (siehe Kapitel 6.1).

5.2 Traktorenprüfstand

Am Traktorenprüfstand werden die Leistung, der Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen gemessen. Der Aufbau des Prüfstands ist in Abbildung 13 dargestellt.

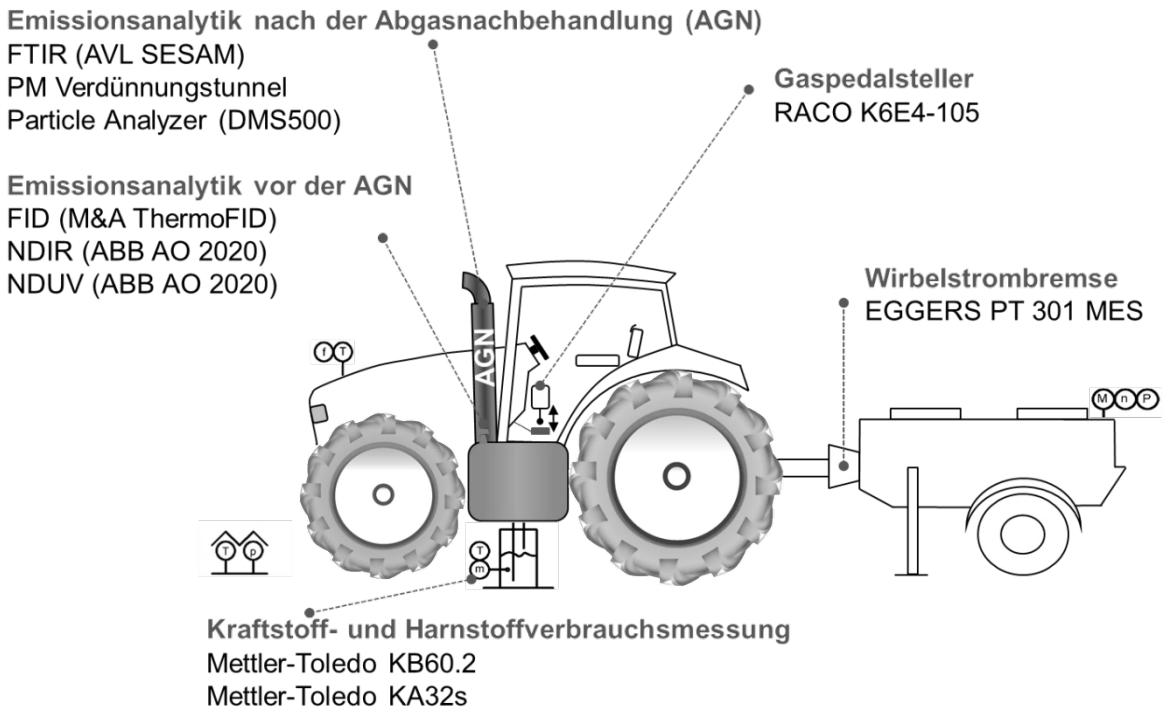


Abbildung 13: Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstands zur Leistungs- und Emissionsmessung

Am Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums wird die Leistung an der Zapfwelle nach „OECD Standard Code 2“ bestimmt. Die Leistung an der Zapfwelle P_{ZW} wird über eine Wirbelstrombremse (EGGERS PT 301 MES, max. 340 kW, Auflösung 0,1 kW) durch Messung von Drehmoment und Drehzahl ermittelt. Die Änderung der Motordrehzahl erfolgt mithilfe eines elektrischen Fahrpedalstellers (RACO K6E4-105).

Der Kraftstoffverbrauch und die Einspritzmenge werden gravimetrisch mittels einer Tischwaage (Mettler-Toledo KB60.2) erfasst. Dazu wird am Traktor das Kraftstoffsystem am Tank aufgetrennt und der Kraftstoffvorlauf und -rücklauf in einen Versuchskraftstoffbehälter geleitet, dessen Masse über die Waage kontinuierlich erfasst wird. Der Verbrauch an wässriger Harnstofflösung des SCR-Systems wird ebenfalls gravimetrisch bestimmt. Dazu wird ein externer Harnstofftank auf einer Tischwaage (Mettler-Toledo KA32s) platziert und mit dem SCR-System des Traktors verbunden. Der Wirkungsgrad an der Zapfwelle beschreibt das Verhältnis aus der Leistung an der Zapfwelle zur zugeführten Brennstoffleistung. Die Brennstoffleistung wird anhand des gemessenen Kraftstoffverbrauchs und des Heizwerts berechnet.

Die Abgaskomponenten Stickstoffoxide (NO_X), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) werden an Messstellen vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) erfasst. Die gasförmigen Emissionen im Rohabgas vor der AGN misst ein Gasanalysesystem mit einem nicht dispersiven Infrarot-Spektroskop (NDIR), einem nicht dispersiven Ultraviolett-Analysator (NDUV) und einem Flammenionisations-Detektor (FID). Nach der AGN werden die NO_X-, CO- und HC-Emissionen durch das Gasanalysesystem AVL SESAM 4 mit Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop (FTIR) und einen FID gemessen. Die Partikelmasse-Emissionen (PM) werden mit einem Teilstromverdünnungstunnel nach der AGN erfasst.

Bei dem Messgerät Differential Mobility Spectrometer DMS 500 handelt es sich um ein „Electrical-Sensing Mobility Spectrometer“. Mit dem Spektrometer kann die Partikelgrößenverteilung von Dieselmotorabgasen gemessen und daraus die Partikelanzahl bestimmt werden. Erfasst werden die für Dieselmotorabgas relevanten Partikel im Bereich von 5 nm bis 1000 nm. Bei der Auswertung wurde die Gesamtpartikelanzahl betrachtet und dadurch keine Aufteilung in Nukleations- oder Akkumulationspartikel vorgenommen. Das Messgerät wird vorwiegend zur Messung der Rohemissionen vor der Abgasnachbehandlung eingesetzt.

Das Partikelanzahlmessgerät CPN der Fa. Sensors Inc. misst kontinuierlich die Anzahl der Kondensationspartikel ab einer Größe von 23 nm. Partikel unter 23 nm werden durch einen Katalysator neutralisiert und daher nicht gezählt. Dieses Messprinzip des Kondensationspartikelzählers ist in der Typgenehmigungsprüfung der Abgasstufe V verankert. Dieses Modul arbeitet als eigenständiges Gerät am Traktorenprüfstand oder kann auch in das portable Emissionsmesssystem (PEMS) integriert werden.

Betriebsstoffe

Am Traktorenprüfstand werden im Rahmen des Vorhabens Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 (R100), Biodieselkraftstoff nach DIN EN 14214 (B100), paraffinischer Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 (HVO) und fossiler Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 (DK) eingesetzt. Das SCR-System der Traktoren wurde mit wässriger Harnstofflösung nach DIN 70070 bzw. ISO 22241 versorgt.

Prüfvorschriften und Zyklen

Im Rahmen der Untersuchungen am Traktorenprüfstand werden die Messungen in Anlehnung an die EU-Verordnungen 2016/1628 und 2017/654 unter Verwendung der Prüfzyklen Non-Road Steady Cycle (NRSC) und Non-Road Transient Cycle (NRTC) durchgeführt.

Der NRSC besteht aus acht stationären Prüfphasen, die in einer festgelegten Reihenfolge einzustellen sind. In Tabelle 13 sind die Prüfphasen im Motorenkennfeld aufgelistet.

Tabelle 13: Non-Road Steady Cycle (NRSC)

Prüfphase	1	2	3	4	5	6	7	8
Drehzahl	Nenndrehzahl				Zwischendrehzahl			Leerlauf
Last in %	100	75	50	10	100	75	50	0
Gewichtungsfaktor	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15

Bei den ersten vier Prüfphasen wird die vom Hersteller angegebene Nenndrehzahl angefahren und vier verschiedene Laststufen eingestellt. Für die nächsten drei Prüfphasen wird die Zwischendrehzahl (Drehzahl mit höchstem Motordrehmoment) angefahren und drei unterschiedliche Laststufen geprüft. Liegt das höchste Drehmoment bei unter 60 % der Nenndrehzahl, so wird die Zwischendrehzahl bei 60 % der Nenndrehzahl festgelegt, liegt es bei mehr als 75 %, werden 75 % der Nenndrehzahl als Zwischendrehzahl definiert. Die letzte Prüfphase des Prüfzyklus ist der Leerlaufbetriebspunkt. Bei der Berechnung der spezifischen Emissionen über einen Prüfzyklus fließen die Messwerte aus den einzelnen Prüfphasen mit unterschiedlicher Gewichtung in das Endergebnis ein.

Beim Non-Road Transient Cycle (NRTC) nach EU-Verordnung 2016/1628 ändern sich Drehzahl- und Drehmomentverhältnisse des Motors sekündlich (Abbildung 14).

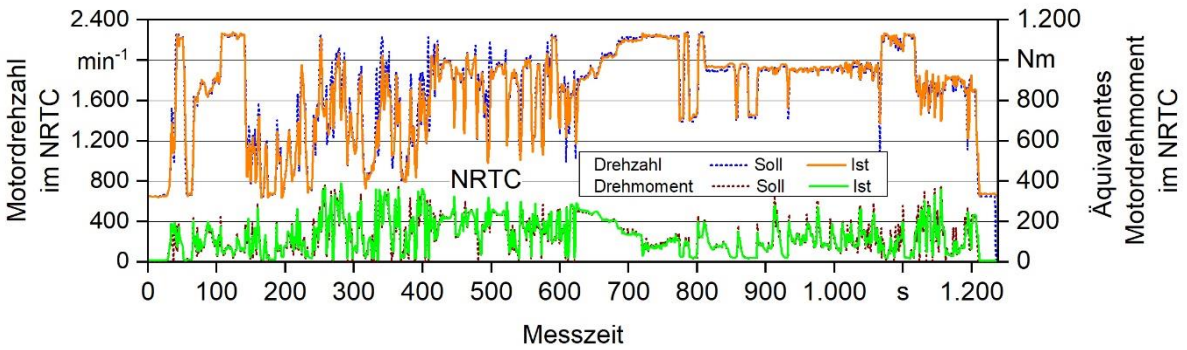


Abbildung 14: Exemplarischer Verlauf der Soll- und Ist-Werte am Traktorenprüfstand des TFZ im NRTC

Der Prüfzyklus besteht aus einer Kaltstart- und einer Warmstartphase. Dazwischen liegt eine Abkühlphase, die nicht in die Auswertung einfließt. In der Berechnung des Endergebnisses werden die Emissionen im Kaltstart zu 10 % und im Warmstart zu 90 % gewertet. Das gewichtete Ergebnis der limitierten Abgaskomponenten kann wie beim NRSC mit den gesetzlichen Grenzwerten verglichen werden. Der hochdynamische NRTC, der primär für den Motorenprüfstand entwickelt wurde, kann trotz zusätzlicher Trägheitsmomente am Traktorenprüfstand bei den meisten Traktoren mit geringen Abweichungen von den Soll-Vorgaben absolviert werden (Abbildung 14). Bei Traktoren mit besonders hohen Trägheitsmomenten werden die Drehzahl- und Drehmomentvorgaben des NRTC in Zehn-Se-

kunden-Intervallen gemittelt (10sNRTC), wodurch sich die Dynamik etwas reduziert [31] [32]. Die während des NRTC geleistete Arbeit bleibt dabei konstant. Um die Wiederholbarkeit der Messungen am Traktorenprüfstand zu erfassen, wird der Prüfzyklus (entspricht einer Wiederholung) mindestens dreimal durchlaufen.

Die Prüfzyklen NRTC und NRSC beziehen sich auf die Arbeit an der Zapfwelle. Die Arbeit an der Zapfwelle fällt bei Traktoren üblicherweise rund 15 bis 20 % geringer aus als die vom Hersteller bei der Typgenehmigung geprüfte Arbeit an der Kurbelwelle, da bei der Messmethode am Traktorenprüfstand (Arbeit an der Zapfwelle) Leistungsverluste durch Nebenaggregate und Getriebekomponenten hinzukommen.

Der Traktorenprüfstand und die Methodik bei Emissions- und Leistungsmessungen sind in ETTL et al. (2019) [32] und ETTL (2021) [30] weiterführend beschrieben.

5.3 Portable Emissionsmessungen

Bei den Traktoren Steyr 4075 kompakt (ST-S) und Valtra T214 Direct (VA-K) werden die Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb (Real Driving Emissions, RDE) mit dem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) Semtech Ecostar PEMS der Firma Sensors erfasst. Das in einem staub- und wassergeschützten Gehäuse am Heckkraftheber des Traktors montierte PEMS ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Stromversorgung des Messgeräts erfolgt unabhängig vom Fahrzeug wahlweise über einen Generator oder eine Batterie.



Abbildung 15: Portable Emissionsmessung am Traktor VA-K bei einer Straßenfahrt

Die RDE-Messungen im Vorhaben erfolgen bei Straßenfahrten ohne Anhängelast oder bei landwirtschaftlichen Arbeiten. Insbesondere Straßenfahrten können durch die vergleichsweise geringe Last mit niedrigen Betriebstemperaturen eine Herausforderung für

die Abgasnachbehandlung darstellen und werden deshalb als Worst-Case-Bedingung für die RDE herangezogen.

Die RDE-Messungen werden nach der Methode der gleitenden Mittelungsfenster (Moving Averaging Window, MAW) nach EU-Verordnung 2016/1628 sowie der delegierten EU-Verordnung 2017/655 ausgewertet. Die gesetzeskonformen Berechnungen erfolgen mit der Software EMROAD 6.03 Build 3, die zu diesem Zweck von der gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (Joint Research Centre, JRC) veröffentlicht wurde.

Die Auswertungsprozedur beginnt, wenn die Kühlmitteltemperatur zum ersten Mal 70 °C nach dem Motorstart erreicht hat, aber spätestens 20 Minuten nach dem Motorstart. Bei der MAW-Methode werden die Messdaten in sekündlich beginnende Mittelungsfenster unterteilt. Jedes Fenster umfasst dieselbe mittlere Arbeit, wie sie im gesamten NRTC am Traktorenprüfstand erreicht wird.

Für alle Fenster werden Übereinstimmungsfaktoren (Conformity Factors, CF) gebildet, die sich aus dem Verhältnis der mittleren Emissionen jedes Fensters (in g/kWh) zu den gültigen Emissionsgrenzwerten für die Messungen im NRSC bzw. NRTC am Prüfstand errechnen. Beispielsweise entspricht ein CF von 1 für NO_X bei einem Traktor der Abgasstufe V einem Emissionswert von 0,4 g NO_X/kWh. Für die Berechnung der spezifischen Emissionen in g/kWh nach der EU-Verordnung 2016/1628 ist die Leistung an der Kurbelwelle aus Messungen am Motorenprüfstand heranzuziehen. Da diese Daten für Biokraftstoffe meist nicht vorliegen, wird die Leistung an der Zapfwelle unter Volllast nach OECD-Code 2 verwendet. Bei der Verwendung der Zapfwellenleistung fallen die spezifischen Emissionen durch die geringere geleistete Arbeit um ca. 10 bis 20 % geringer aus als bei den Messungen an der Kurbelwelle am Motorenprüfstand. Ein Grenzwert für die RDE ist aktuell in der Gesetzgebung nicht definiert.

Für jede Messung wird eine definierte Prüfdauer (PD) in der EU-Verordnung 2017/655 gefordert, wonach die Messung das Fünf- bis Siebenfache der Referenzarbeit aus dem NRTC enthalten muss. Zudem werden Messdaten mit sogenannten Nicht-Betriebsereignissen (Non-Working Events) ausgeschlossen. Insbesondere länger dauernde Zeitabschnitte mit einer Motorleistung von weniger als 10 % der maximalen Nutzleistung des Motors werden als ungültig gekennzeichnet und bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

6 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Abgasemissionsmessungen am Traktorprüfstand und im realen Betrieb sowie die Resultate des Feldtests präsentiert.

6.1 Feldtestergebnisse

Die 27 Biokraftstoffarbeitsmaschinen leisteten in Summe 102.000 Bh auf den Versuchsbetrieben. Im täglichen Praxiseinsatz arbeiteten die Biokraftstofftraktoren mit hoher Betriebssicherheit. Vergleichbar mit vorangegangenen Vorhaben [42] [31] [32] beschränkten sich einzelne kraftstoffbedingte Störungen meist auf das Kraftstoffniederdrucksystem, die Programmierung der Motorsteuerung oder defekte elektronische Bauteile, wie z. B. Sensoren. Während des Feldtests kam es bisher nur zu wenigen Meldungen von Problemen, die längere Ausfallzeiten zur Folge hatten. Im Folgenden werden die Feldtesterfahrungen mit den Traktoren im Berichtszeitraum geschildert. Das Startverhalten wurde von den Betreibern überwiegend sehr positiv beurteilt.

6.1.1 Störungen

Fendt 718, Karolinenfeld (FE-Ka)
Der Betreiber des Traktors Fendt 718 (FE-Ka, Baujahr 2012) bemängelte bei ca. 1.500 Bh einen deutlichen Rückgang der Leistung im Rapsölbetrieb. Es wurde vereinbart, dass in der örtlichen Werkstatt eine Leistungsmessung im Diesel- und im Rapsölbetrieb durchgeführt wird. Nach den nach 1.500 Bh üblichen Wartungsmaßnahmen inklusive eines Tauschs der Kraftstofffilter und eines Zurücksetzens gespeicherter Fehlermeldungen wurden bei 1.518 Bh die Messungen an der Zapfwellenbremse durchgeführt und mit den bisherigen Erhebungen am Traktorenprüfstand des TFZ verglichen. Im Dieselbetrieb wies die Maschine vergleichbare Werte wie bei früheren Messungen auf. Im Rapsölbetrieb wurde sogar im Durchschnitt eine etwas höhere Leistung als bei den früheren Erhebungen bestimmt. Dies ist vermutlich durch den Dieselanteil im Rapsöltank zu begründen. Beim Spülen des Kraftstoffsystems mit Diesel vor dem Abstellen des Motors und im Leerlauf erfolgt ein Eintrag in den Rapsöltank. Da Dieselkraftstoff einen etwas höheren Heizwert als Rapsölkraftstoff aufweist, kann dies die etwas höhere Leistung erklären. Es ist davon auszugehen, dass der Leistungsverlust durch die Wartungsarbeiten und das Zurücksetzen von Fehlercodes behoben wurde.

John Deere 6930, Kringell (JD-K)
Bei einem Besuch des Betriebs in Kringell im Herbst 2018 wurde von den Betreibern ein sehr schlechtes Startverhalten des Traktors John Deere 6930 (JD-K, Baujahr 2008) mit Rapsölkraftstoff bemängelt. Die Maschine wurde daraufhin bei 4.480 Bh zur Fehlersuche nach Straubing an das TFZ überführt, wo eine defekte Kraftstoffpumpe als Ursache identifiziert werden konnte. Nach dem Tausch dieser Pumpe war das Startverhalten mit

Rapsölkraftstoff wieder einwandfrei. Bei der Durchsicht wurden unabhängig vom alternativen Antriebssystem noch weitere Mängel am Fahrzeug entdeckt, die im Nachgang von den Betreibern beseitigt wurden.

Im Mai 2019 informierte der Betreiber bei Betriebsstundenzählerstand 5.050 Bh über einen Defekt des Motorsteuergeräts. Dieses wurde von einer lokalen Werkstatt ausgetauscht und mit Standard-Diesel-Software ausgeliefert, da die Pflanzenöl-Software für den Händler nicht zugänglich ist. Ein Problem, das durch diese für den Pflanzenölbetrieb ungeeignete Software auftritt, ist wiederum ein schlechtes Startverhalten. Am 22.05.2019 wurde vor Ort in Kringell vom TFZ mit Unterstützung von John Deere ETIC eine geeignete Software für den Rapsölbetrieb per Fernwartung aufgespielt. Das Startverhalten war danach wieder einwandfrei.

Bei 5.450 Bh im Frühjahr 2020 verschlechterte sich das Startverhalten erneut und die Fehlermeldung „Kraftstoffdruck zu niedrig“ wurde vom Traktor ausgegeben. Ein Kraftstofffilterwechsel brachte keine Verbesserung. Die Niederdruckkraftstoffpumpe hatte im Rapsölbetrieb bei einer Überprüfung eine ausreichende Pumpleistung. Wie bei anderen Traktoren in früheren Untersuchungen [32] schon mehrfach beobachtet wurde, war das Druckbegrenzungsventil defekt und öffnete bei einem zu geringen Raildruck. Zudem wurde von der Fachwerkstatt vorsorglich der Raildrucksensor getauscht. Die Leistung und das Startverhalten stuft der Betreibers nach der Reparatur als „sehr gut“ ein.

John Deere 6930, Grub (JD-G)

Der Traktor John Deere 6930 (JD-G, Baujahr 2008) lief im Feldtest störungsfrei. Der Betreiber bemerkte jedoch beim Pflügen oder beim Straßentransport mit voller Beladung, dass die Leistung des Traktors geringer war als im Neuzustand. Bei Messungen bei 6.154 Bh am BaySG-Betrieb Grub (Abbildung 16) zeigte sich, dass die maximale Leistung an der Zapfwelle mit 82 kW geringer war als die maximale Leistung im Neuzustand mit 99 kW. In einem Versuch wurde Biodiesel eingesetzt, da sich im B100-Betrieb Ablagerungen an den Kraftstoffinjektoren verringern können [35] und damit die Leistung des Traktors wieder ansteigen kann. Eine Reinigung des Kraftstoffsystems mit einer Tankfüllung Biodiesel hatte jedoch bei diesem Traktor keinen Effekt auf die Leistung. Das Leistungsverhalten des Traktors soll weiter beobachtet werden, um zu prüfen, ob die Leistungsminderung dauerhaft ist. Möglich wäre, dass sich temporäre Injektorablagerungen über die Betriebszeit wieder abbauen.



Abbildung 16: Leistungsmessung am John Deere 6930 Premium

John Deere 6115R (JD6R-B)

Der Motor des Rapsöltraktors John Deere 6115R (JD6R-B, Baujahr 2014) mit der Abgasstufe IIIB und einer Laufleistung von 1.000 Bh ging ohne Fehlermeldung im Betrieb mit Rapsölkraftstoff aus und startete nicht mehr. Erste Untersuchungen zur Fehlerursache (Kraftstoffdurchflussmessung, Kraftstoffpumpentausch und Dieselbetrieb aus einem externen Tankbehälter) am BaySG-Standort Kringell (Abbildung 17, links) zeigten keinen unmittelbaren Schaden am Niederdruckkraftstoffsystem an. Nach dem Ausbau und der Reinigung des Überdruckventils an der Common-Rail-Hochdruckeinspritzung (SN: RE536274) sprang der Traktor wieder an. Das Ventil wurde nach ca. 30 min Betriebszeit wieder undicht, wodurch der Raildruck absank und die Motordrehzahl zu schwanken begann. Nach dem Einbau eines neuen Überdruckventils (Abbildung 17, rechts) lief der Traktor wieder zuverlässig. Ferner wurden bei diesen Reparaturarbeiten Mängel an der Steckerverbindung für die Stromversorgung der Kraftstoffpumpe behoben. Die Servicewerkstatt berichtete, dass dieses Problem mit dem Überdruckventil auch bei Dieseltraktoren mit vergleichbarer Laufleistung auftreten kann.



Abbildung 17: Fehlersuche am Traktor JD6R-B (links) und Überdruckventil an der Common-Rail-Hochdruckeinspritzung (rechts)

John Deere 6210 R (JD-P)

Der Traktor John Deere 6210 (JD-P, Baujahr 2012) hatte bei 4.400 Bh (April 2021) anhaltende Probleme mit der Kraftstoffversorgung. Der Fehler ECU 94.18 „Signal für Niederdruckkraftstoff mäßig niedrig“ und eine Leistungsreduzierung waren die Folge. Nach mehrstündiger Fehlersuche konnte ein Schaden an der Steckverbindung für die Stromversorgung der Kraftstoffpumpe identifiziert werden. Das Schadensbild war vergleichbar mit dem am Traktor JD6R-B und ist in Abbildung 18 zu sehen.



Abbildung 18: Fehlerhafte Steckverbindung für die Stromversorgung der Kraftstoffpumpe

Es kann davon ausgegangen werden, dass mangels Zugentlastung in der Verkabelung zur Kraftstoffpumpe der Kontakt zwischen Stecker und Kraftstoffpumpe vermindert war. Nach dem Einbau eines neuen Steckers traten die Fehler nicht mehr auf. Der Hersteller wurde über das Schadensbild an den Traktoren JD-P und JD6R-B informiert.

John Deere 7830, Grub (JD-7G)

Der Traktor John Deere 7830 (JD-7G, Baujahr 2010) wurde im Jahr 2010 von einem externen Umrüster ohne Mitwirken des Herstellers John Deere auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet. Bereits in früheren Vorhaben [31] [32] zeigte der Traktor im Rapsölbetrieb vermehrt die Fehlermeldungen ECU 1180.00 (Einlasstemperatur der Turbolader-Turbine extrem hoch) sowie ECU 1569.31 (Kraftstoffminderung) an. Die Störung ist auf die ungenügende Auslegung der Motorsteuerungssoftware sowie des Kraftstoffsystems durch den Umrüster zurückzuführen. Am 16.05.2019 erfolgte eine telefonische Information vom Betreiber des Traktors, dass dieser trotz vieler Bemühungen des Herstellers und des Umrüsters des Traktors nicht zufriedenstellend funktioniere und eine zu geringe Leistung im Rapsölbetrieb aufweise. Die Maschine wurde auf Veranlassung der Versuchsstation Grub bei ca. 3000 Bh auf Dieselbetrieb zurückgerüstet.

Deutz-Fahr Agrotron 650 M, Neuhof (DE-N)

Am Deutz-Fahr Agrotron 650 M (DE-N, Baujahr 2010) trat bei 3.500 Bh beim Pflügen im Herbst 2019 ein Motorschaden auf, ausgelöst durch einen defekten Injektor. Die Erosions-

spuren am Kolbenboden des zweiten Zylinders (Abbildung 19) deuten auf eine hohe Hitzeeinwirkung hin. Grund dafür könnte eine zu hohe Einspritzmenge gewesen sein. Bei hohen Verbrennungstemperaturen wird das Kolbenmaterial angegriffen und die zirkulierenden Verbrennungsgase können einzelne Partikel aus der Oberfläche abtragen (Erosion).

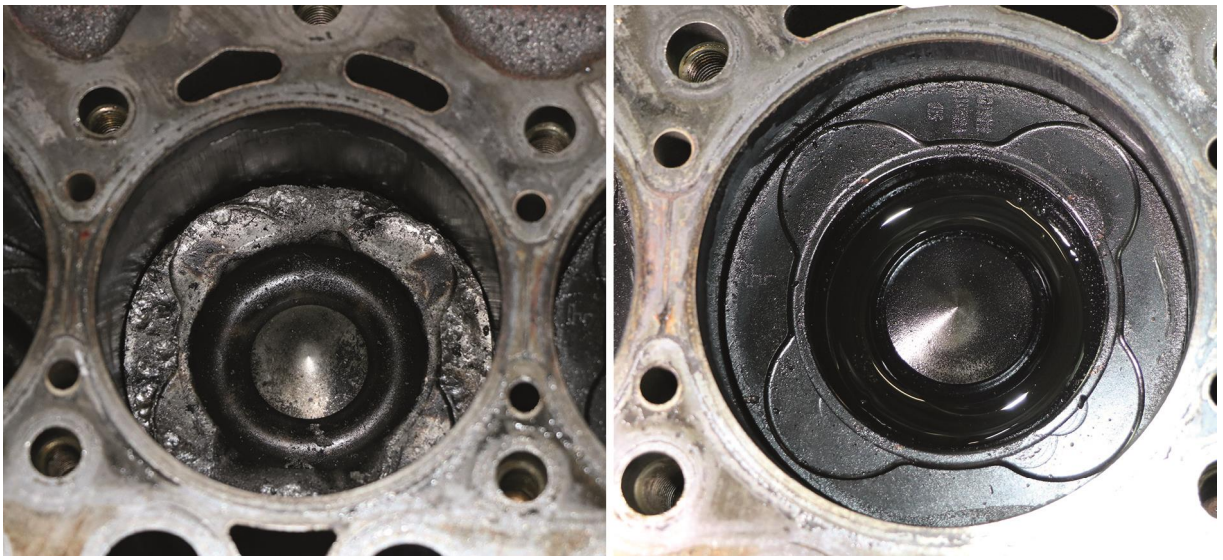


Abbildung 19: Beschädigter Kolben am Zylinder 2 (links) und intakter Kolben am Zylinder 4 (rechts) des Traktors DE-N

Die Vermessung der Injektoren an einem Prüfgerät Bosch EPS 200 bei der Fa. regineering GmbH ergab einen zu hohen Durchfluss an den Injektoren 2, 4 und 5, wie in Tabelle 14 zu sehen ist. Beim Injektor 2 lag der Durchfluss sogar über dem Messbereich des Prüfgeräts, wodurch kein diskreter Messwert angegeben werden konnte.

Tabelle 14: Durchfluss der Injektoren des Traktors DE-N bei zwei verschiedenen Betriebspunkten, ermittelt mit einem Prüfgerät Bosch EPS 200

Ansteuerdauer	µs	1.300	2.500
Druck	MPa	130	80
Durchfluss Soll-Wert	mm³/Hub	125 ± 6,8	173,3 ± 7,6
Durchfluss Injektor 1	mm³/Hub	130,5	178,3
Durchfluss Injektor 2	mm³/Hub	–*	–*
Durchfluss Injektor 3	mm³/Hub	128,6	176,1
Durchfluss Injektor 4	mm³/Hub	**148,2**	**193,0**
Durchfluss Injektor 5	mm³/Hub	**167,9**	**207,5**
Durchfluss Injektor 6	mm³/Hub	131,3	175,3

* Höher als Maximum im Messbereich

Mögliche Ursachen für die Undichtigkeiten am Injektor 2 sind z. B. eine verklemmte Düsennadel oder eine defekte Injektoransteuerung.

In Abbildung 20 sind die Injektoren unmittelbar nach dem Motorschaden abgebildet. Bei allen Einspritzlöchern waren die Austrittskanten frei von äußeren Ablagerungen. Je nach Injektor sind die Ablagerungen außerhalb des Wirkungsbereichs des Einspritzkegels unterschiedlich stark ausgeprägt. Die gut sichtbaren und freien Einspritzdüsenlöcher deuten darauf hin, dass die äußeren Ablagerungen das Einspritzverhalten nicht wesentlich beeinflussen. Vergleichbare Ergebnisse liegen bereits für Injektoren von Traktoren im Betrieb mit Rapsölkraftstoff vor [31] [32]. Optisch heben sich der Injektor und die weiteren Bauteile des Zylinders 2 von den Injektoren und Bauteilen der restlichen Zylinder ab. Ruß- und Ölreste sind am Zylinder 2 nicht feststellbar, da diese aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen wohl abbrannten.

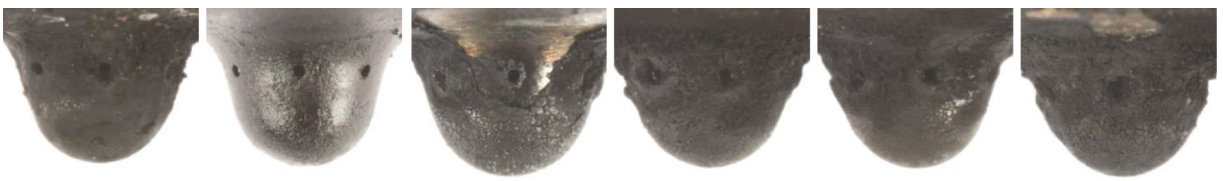


Abbildung 20: Injektoren von Zylinder 1 bis 6 (von links nach rechts) des Traktors DE-N bei 3.500 Bh unmittelbar nach einem Motorschaden

Die weiteren befundeten Motorbauteile waren in einem ordnungsgemäßen Zustand, wie z. B. der Zylinderkopf in Abbildung *21* und die Honung der Laufbuchsen in Abbildung 22 zeigen. Die Verschleißmetallwerte im Motoröl lagen unmittelbar nach dem Motorschaden im Bereich deutlich unter 10 mg/kg und damit auf einem sehr niedrigen Niveau. Auch der Rapsölgehalt im Motoröl war mit 4,8 % bei einer Motoröleinsatzzeit von 399 Bh unterhalb des kritischen Werts von 10 %. Die Motorölanalysewerte deuten darauf hin, dass der

Schaden durch eine abrupte Fehlfunktion des Injektors verursacht wurde und nicht etwa infolge eines schleichenden Verschleißprozesses auftrat.

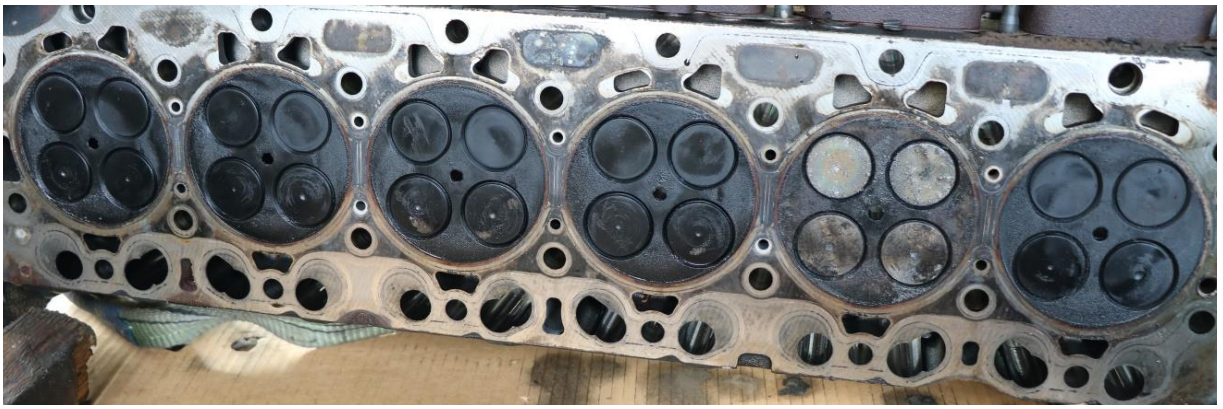


Abbildung 21: Zylinderkopf des Traktors DE-N bei 3.500 Bh unmittelbar nach einem Motorschaden (Reihenfolge 1–6, von rechts nach links)

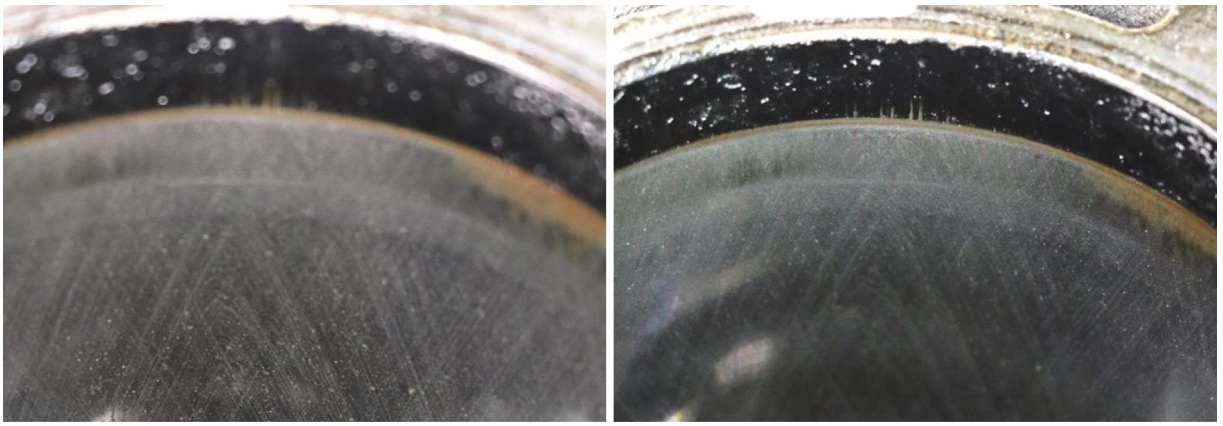


Abbildung 22: Honriefen an den Zylindern 2 und 6 bei 3.500 Bh unmittelbar nach einem Motorschaden

Der Traktor DE-N wird nun mit einem Austauschmotor weiterhin mit Rapsölkraftstoff betrieben. Bei den baugleichen Motoren in den Rapsöltraktoren Fendt 820 Vario^{greentec} (FE-Al und FE-A) gab es während der bisherigen Laufzeit von 7.440 bzw. 7.840 Bh keine vergleichbaren Schäden.

Fendt 724 S4 Vario, TFZ Straubing (FE-S)

Störungen und Fehlermeldungen

Im Zeitraum von Juni 2020 bis Juni 2021 (2.220 Bh bis 2.440 Bh) traten beim Traktor 724 S4 (FE-S, Baujahr 2014) Störungen am Kraftstoffsystem auf. Eine Fehlfunktion in der Schaltung des Rücklaufventils führte mehrfach dazu, dass die Rücklaufmenge im Rapsölbetrieb nicht in den Rapsöltank, sondern in den Dieseltank gefördert wurde. Dadurch stieg der Füllstand im Dieseltank an, was schließlich zum Überlaufen und zu Kraftstoffaustritt führte. Dieser Fehler trat sporadisch im Abstand von wenigen Tagen auf. Die Fehlerursache konnte am Traktorenprüfstand nicht reproduziert werden. Die Servicewerkstatt tauschte daraufhin im Juli 2020 bei 2.268 Bh das Bedienteil der Kraftstoffumschaltung sowie die Umschaltventile für Vor- und Rücklauf aus. Nach ca. 20 Bh trat der Fehler trotz neuer Komponenten erneut auf. Daraufhin wurde in Absprache mit der Servicewerkstatt die Kraftstoffumschaltung bis zum Ende des Feldtestjahrs 2020 deaktiviert und das Kraftstoffsystem auf den alleinigen Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgebaut. Damit konnte ein Überlaufen des Dieselkraftstofftanks bis zur Lösung des Problems ausgeschlossen werden. Nach Abschluss des Feldtestjahrs 2020 erfolgten bei 2.415 Bh eine weitere Fehlersuche am Traktorenprüfstand und eine Befundung des Kabelstrangs. Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, wurde deutlich, dass die Ummantelung der Kabel zum Vor- und Rücklaufventil spröde und rissig war.



Abbildung 23: Beschädigte Kabelisolierung an der Verkabelung des Kraftstoffsystems am Traktors FE-S

Bei Feuchteeinwirkung oder Vibrationen könnte die defekte Verkabelung die Funktion der Ventile beeinträchtigt haben. Möglicherweise setzten auch die hohen Temperaturen am Einbauort nahe der Motorabluft der Kabelisolierung dauerhaft zu. Ferner funktionierte die Nachrüst-Tankanzeige für den Dieseltank nicht zuverlässig, sodass der im Dieseltank steigende Füllstand vom Fahrer nicht bemerkt werden konnte. Es wurde daher eine frei programmierbare Tankanzeige installiert, die auch mit dem Ausgabewiderstand (500 Ω) des Fendt-Tankgebers kompatibel ist.

Die Fehlfunktion trat nach der Teilinstandsetzung des Kabelstrangs nach ca. 50 Bh im Feldeinsatz erneut auf. Die Fahrer konnten den steigenden Kraftstofffüllstand über die

neue Tankanzeige erkennen, sodass kein Dieselkraftstoff ausgetreten ist. Der Traktor wurde der Servicewerkstatt zur weiteren Fehlersuche überlassen. Dort wurde im Juni 2021 bei 2.440 Bh der komplette Kabelstrang der Kraftstoffumschaltung getauscht und eine Notentlüftung des Tanks installiert. Der Traktor lief seit den Reparaturen störungsfrei und wird nun im Feldeinsatz am TFZ weiter begutachtet.

Motorbefundung

Am Fendt 724 S4 Vario (FE-S, Baujahr 2014) wurde bei 2.100 Bh nach dem Feldtestjahr 2019 eine Motorbefundung durchgeführt. Bis auf leichte Verschmutzungen durch Kraftstoff- und Motorölreste zeigten sich äußerlich keine Mängel. Nachfolgend werden wesentliche Motorbauteile beurteilt.

Zylinderwand und Honbild

Die Honriefen in den Zylinderwänden waren deutlich sichtbar. Die Zylinderwände waren frei von Spiegelbildung, wie exemplarisch in Abbildung 24 zu sehen ist. An den Laufbuchsen des Zylinders konnten keine eventuell durch Partikel aus der Verbrennungsluft oder Ablagerungen am Feuersteg verursachte tiefen Längsspuren festgestellt werden. Die Zylinderwände waren in einem technisch einwandfreien Zustand. Aufgrund der sehr deutlichen Ausprägung der Honriefen ohne erkennbaren Abrieb kann auf geringe Kraftstoff- und Motorölablagerungen am Feuersteg geschlossen werden.

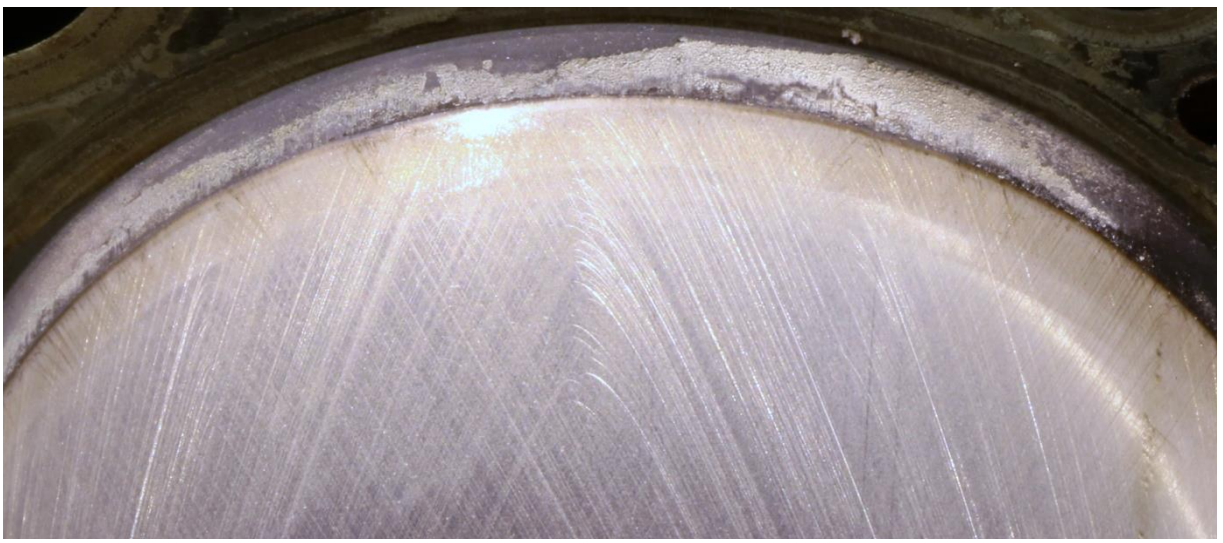


Abbildung 24: Nahaufnahme des Honbilds der Zylinderwand bei 2.100 Bh

Kolbenboden

Die Kolbenböden präsentierten sich nach Öffnen des Zylinderkopfs in einem technisch einwandfreien Zustand, wie in Abbildung 25 zu sehen ist. Es wurden weder kritische Ablagerungen noch ein hoher Materialabtrag festgestellt.

Geringfügige Korrosionsspuren deuten auf einen Wassereintrag z. B. durch Undichtigkeiten an der Zylinderkopfdichtung oder am AGR-Kühler hin. Es waren jedoch kein erhöhter Verbrauch an Kühlmittel und kein Schaden am Kühlsystem festzustellen. Möglichweise kann auch Kondensatbildung im Kaltstart des Motors (im Dieselbetrieb) für die Roststellen verantwortlich sein. Der Schaden scheint nach Auskunft der Fachwerkstatt unabhängig von der Verwendung des Rapsölkraftstoffs entstanden zu sein.

Der Kolben zeigt ein symmetrisches Strahlbild am Kolbenboden. Die acht Strahlauftrefffläche sind einheitlich groß, was auf gleichmäßiges Einspritzen bzw. eine gute Zerstäubung hindeutet. Die Strahlauftrefffläche liegen innerhalb des Muldenrands. Dies lässt vermuten, dass die Einspritzung zum richtigen Zeitpunkt erfolgt. Der Kraftstoff wird dadurch nicht zu weit an die Zylinderwand verteilt, was eine übermäßige Motorölverdünnung verhindert.

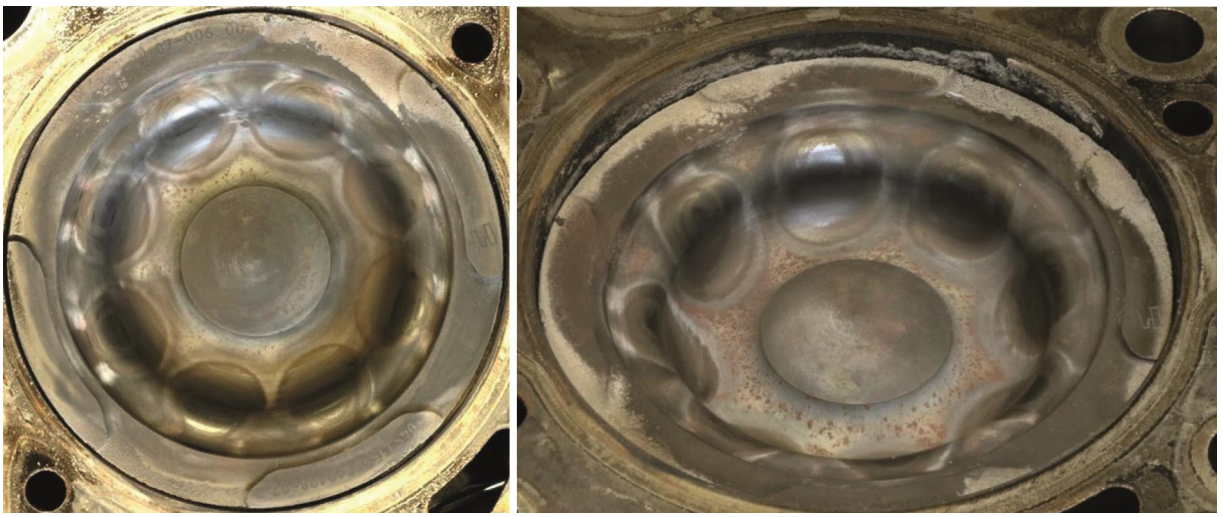


Abbildung 25: Kolbenboden am zweiten und fünften Zylinder des Traktors FE-S bei 2.100 Bh

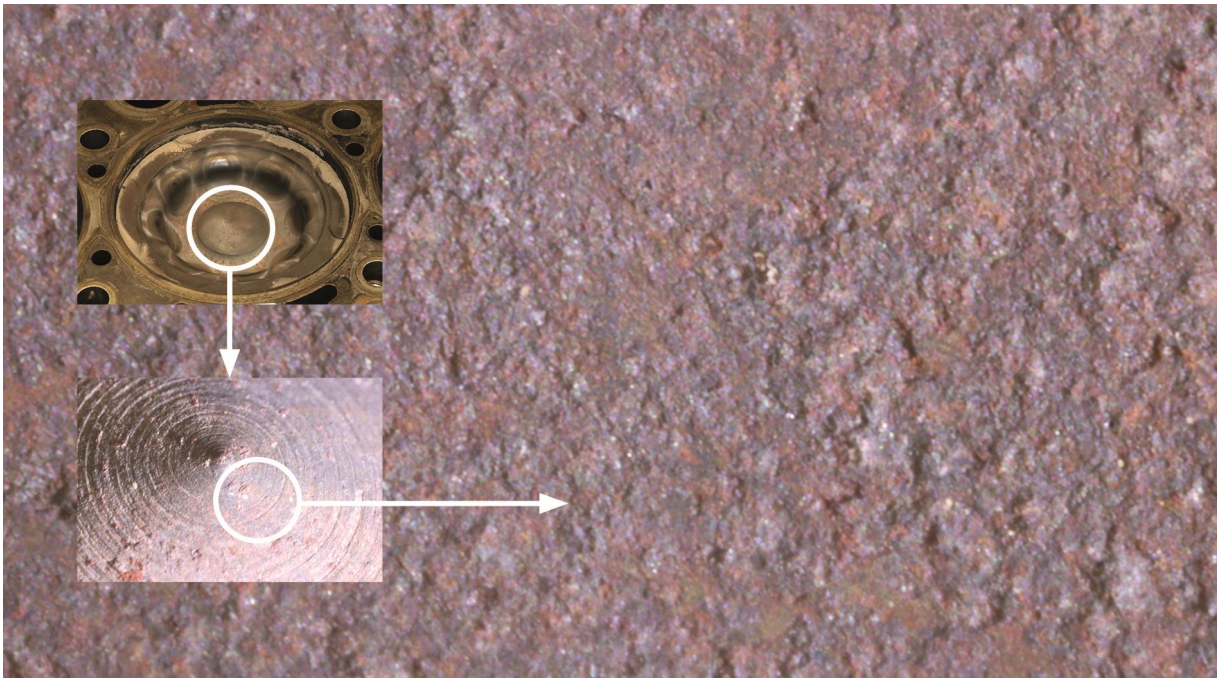


Abbildung 26: Nahaufnahme der Korrosionsstellen am fünften Kolbenboden des Traktors FE-S bei 2.100 Bh

Zylinderkopf, Ventilsitze, Ein- und Auslasskanäle

Der Zylinderkopf aus Abbildung 27 weist keine Schäden oder festsitzende Ablagerungen auf. Abbildung 28 zeigt, dass die Auslassventilschäfte im Zylinderkopf mit weniger Ablagerungen belegt sind als die Einlassventilschäfte. Dies liegt vor allem an den höheren Abgastemperaturen an den Auslassventilen. Auch werden die Ablagerungen an den Einlassventilen hauptsächlich durch die Abgasrückführung verursacht. Die deutlich sichtbaren Ablagerungen an den Schäften der Einlassventile des Traktors FE-S (Abbildung 28) werden von der Fachwerkstatt als praxisüblich eingestuft. Im ungünstigen Fall könnte der verengte Querschnitt zu einer ungenügenden Zufuhr von Verbrennungsluft und damit zu höheren HC-, CO- und PM-Emissionen führen, die aber beim Traktor FE-S nicht aufgetreten sind.

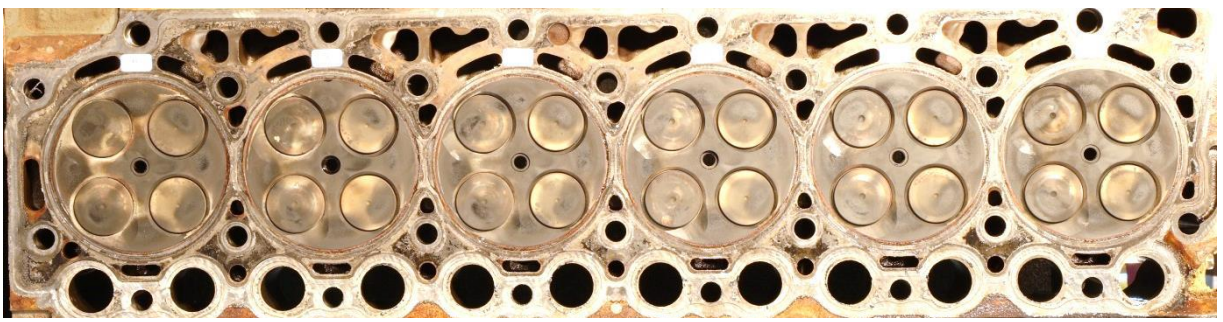


Abbildung 27: Zylinderkopf des Traktors FE-S bei 2.100 Bh

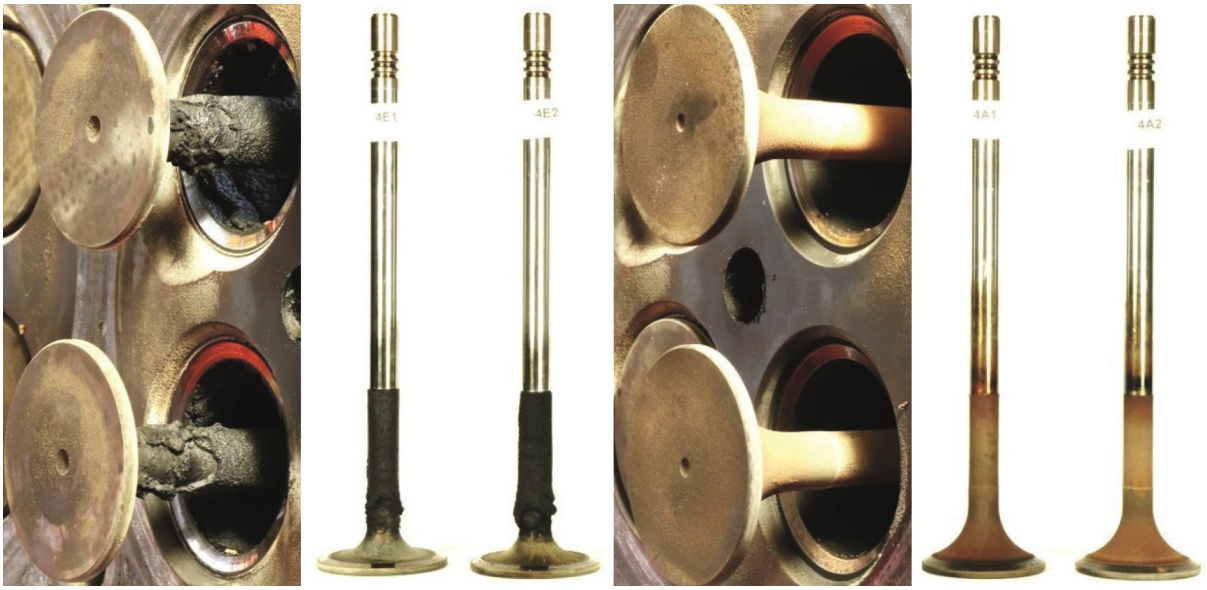


Abbildung 28: Einlassventile (links) und Auslassventile (rechts) des Traktors FE-S bei 2.100 Bh

Partikelfilter (DPF)

Der ausgebaute Partikelfilter des Traktors FE-S wurde optisch begutachtet. Abbildung 29 zeigt, dass an der Oberfläche des Partikelfilters (Gaseintrittsseite) nahezu kein Belag vorhanden ist. Auch eventuelle Anhäufungen von Ablagerungen oder verstopfte Kanäle waren nicht ersichtlich. Dies deutet auf eine geringe Asche- und Rußbildung im Pflanzenölbetrieb hin. Bei einer früheren Untersuchung bei 1.480 Bh war der DPF in einem vergleichbar guten Zustand [32].

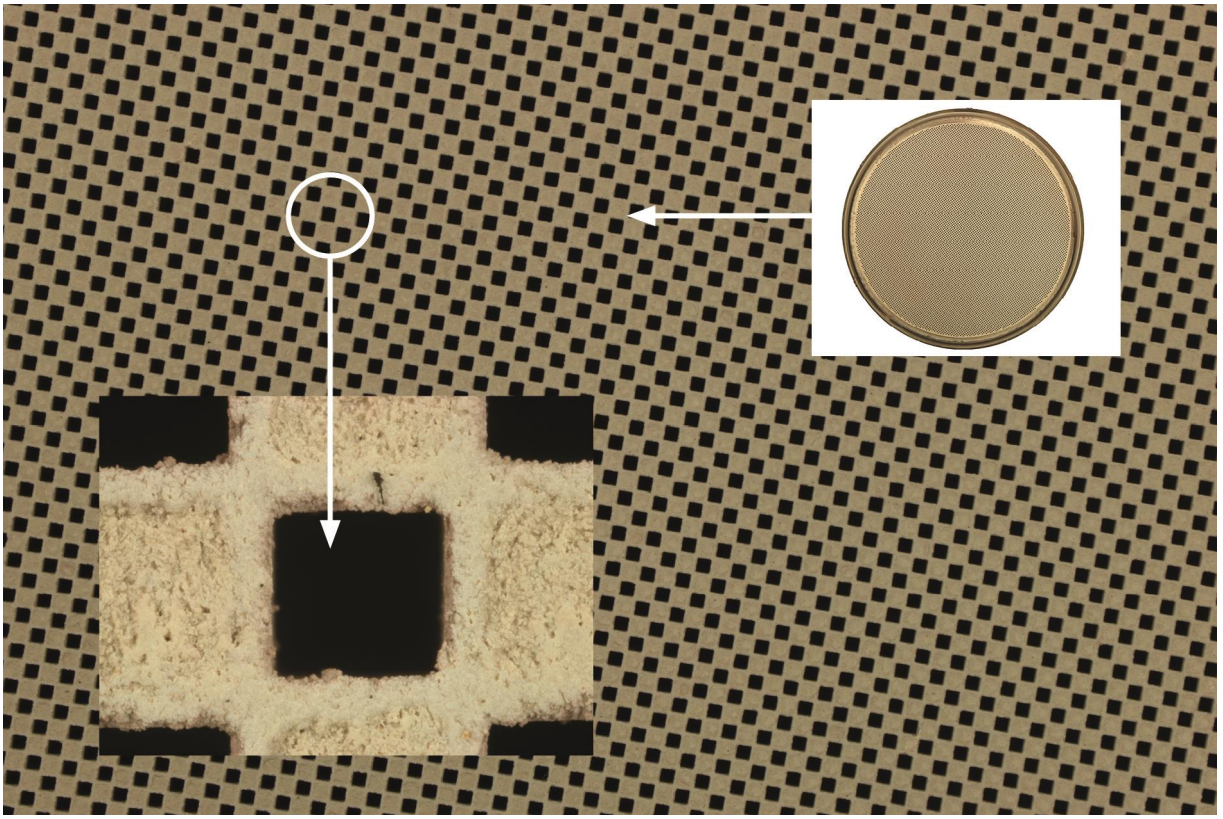


Abbildung 29: Partikelfilter des Traktors FE-S bei 2.100 Bh

Abschließend kann festgestellt werden, dass sich der Zweikraftstoffbetrieb über den Zeitraum von mehr als 2.000 Bh nicht negativ auf die Bauteile von Motor- und Abgasnachbehandlungssystem dieses Abgasstufe-IV-Traktors vom Typ Fendt 724 S4 Vario ausgewirkt hat.

6.1.2 Maschinen und Geräte mit Elektroantrieb

Mobile Arbeitsmaschinen im unteren Leistungssegment werden in der Landwirtschaftsverwaltung zunehmend mit elektrischem Antrieb beschafft. Zur Einschätzung der Praxistauglichkeit der Maschinen wurde eine Befragung der Betreiber bzw. der Fahrer durchgeführt.

Am LfL-Standort in Grub wird ein Kramer Radlader KL25.5e (Ka-G) mit einem Betriebsgewicht von 3,8 Tonnen und einer elektrischen Leistung von 15 kW betrieben. Der Lader mit dem Baujahr 2019 wird für ca. 150 bis 200 Bh pro Jahr in der Innenwirtschaft zur Erdarbeit sowie zu Garten- und Transportarbeiten eingesetzt. Die Hauptgründe für die Anschaffung eines E-Fahrzeugs waren die Vermeidung lokaler Schadstoffemissionen bei Arbeiten in Gebäuden und die Reduzierung der Lärmemissionen für Anlieger. Die Reichweite bei einer vollgeladenen Batterie (416 Ah) beträgt je nach Einsatzzweck drei bis fünf Betriebsstunden und wird vom Betreiber als sehr gut eingestuft (Schulnote 1). Bei geringen Umgebungstemperaturen reduziert sich laut Betreiber die Reichweite jedoch spürbar. Der Radlader wird täglich an einer CEE-Starkstromsteckdose mit 16 Ampere aufgeladen. Der Ladevorgang dauert bis zu acht Stunden. Der Betreiber würde sich für leistungsintensive

Arbeitstage eine Schnelllademöglichkeit wünschen, die jedoch für dieses Modell nicht lieferbar ist. Auch für weitere Fahrstrecken oder Arbeiten im Feld (z. B. Ballen verladen) hält der Betreiber das E-Fahrzeug für weniger geeignet. Der Betreiber würde das Fahrzeug dennoch in derselben Ausführung wieder beschaffen.

Der Allzwecktransporter Iseki Goupil G4 (Is-G) mit Ladepritsche ist seit dem Jahr 2020 ein weiteres E-Fahrzeug am LfL-Standort Grub. Der Transporter hat eine Nennleistung von 10 kW und wird laut Betreiber für ca. 150 Bh pro Jahr beim Transport von Kleinmaschinen, Handgeräten und Verbrauchsmaterialien auf dem Betrieb sowie für den Personentransport genutzt. Ebenso wie beim E-Radlader (Ka-G) werden als Beschaffungsgründe die Schadstoffemissionsvermeidung im Arbeitsumfeld und die Lärmvermeidung genannt. Die Beladung des Akkumulators ist an einer 230-V-Steckdose möglich. Die Reichweite wird vom Betreiber als sehr praxistauglich eingestuft (Schulnote 1), da die für den Betrieb relevanten Entfernungen zu den Arbeitseinsätzen im Radius von ca. 20 km mehrfach ohne Probleme bewältigt werden können. Geladen wird der Akku in der Regel einmal pro Arbeitswoche. Im Vergleich zu den Ladearbeiten des Radladers (Ka-G) werden die Transportarbeiten vom Betreiber als deutlich weniger leistungsintensiv eingeschätzt, wodurch kürzere Ladeintervalle nicht notwendig sind. Der Fahrer würde die Beschaffung dieses E-Fahrzeugs in gleicher Ausführung für seine Arbeiten wieder befürworten.

Seit dem Jahr 2019 wird am LfL-Institut für Fischerei in Starnberg ein elektrisch angetriebener Weidemann 1160 eHoftrac (We-S) mit einem 6,5-kW-Fahrmotor und 8,5 kW Hubmotor eingesetzt (Abbildung 30). Dabei arbeitet der Hoflader hauptsächlich zusammen mit einer Transportbox für die Fischzucht. Mit der Transportbox werden die Fische zwischen Versuchsanlagen umgesetzt und verwogen. Die Sauerstoffversorgung während des Fischtransports wird über einen nachgerüsteten, hydraulisch angetriebenen Druckluftkompressor realisiert (Abbildung 30, links). Der Betreiber ordnet die Angaben des Herstellers zur Ladezeit der Batterie (240 Ah) von ca. 6 h über eine 230-V-Steckdose (Abbildung 30, Mitte) als realitätsnah ein. Eine Schnelllademöglichkeit ist für diese Maschine nicht verfügbar, wäre jedoch laut Betreiber sehr wünschenswert. So war der Lader oftmals nicht einsatzbereit, da der tägliche Ladevorgang vergessen wurde. Die vom Hersteller angegebene Reichweiten von 1,5 Bh im harten Dauereinsatz und bis zu 4 Bh bei leichten Tätigkeiten können vom Betreiber auch in der Praxis bestätigt werden. Der nahezu geräuschlose Betrieb wird als sehr vorteilhaft bewertet, jedoch wird die fehlende akustische Warnung als Gefahrenquelle für Dritte in der Nähe des Arbeitsbereichs der Maschine genannt. Der Betreiber würde sich für schwere Lasten eine höhere Hubleistung und eine bessere Standsicherheit auf unebenem Gelände wünschen. Insgesamt ist der Betreiber jedoch sehr zufrieden mit dem elektrischen Hoflader.

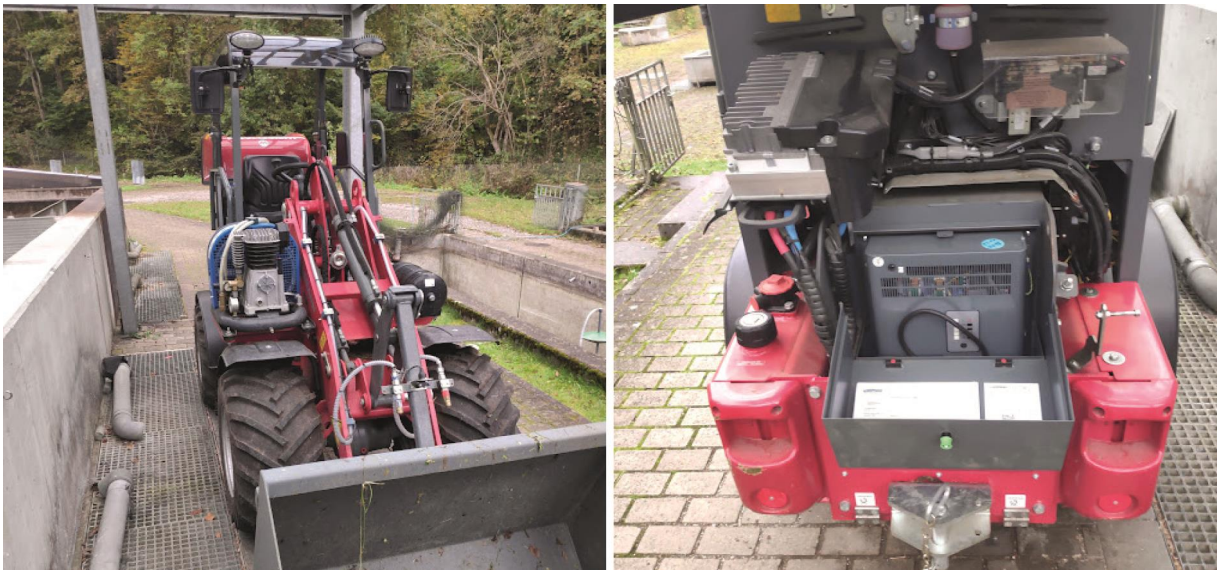


Abbildung 30: Weidemann e-Hoftrac 1160 am LfL Standort Starnberg (links) und integrierter Ladeelektronik (rechts)

6.1.3 Kraftstoffanalysen

Die überwiegende Anzahl an Biokraftstofftraktoren im Versuch wird mit kaltgepresstem Rapsölkraftstoff betrieben. Um eine ordnungsgemäße Kraftstoffqualität zu gewährleisten, wurden zusätzlich zu Kraftstoffanalysen für die Leistungs- und Emissionsmessungen auch Proben im Feldtest gezogen.

Die Qualität des erworbenen Rapsölkraftstoffs wird bei der Lieferung neuer Chargen überprüft. Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse der Analysen aus dem Feldtest. Die fettgedruckten Werte in den Tabellen kennzeichnen die Nichteinhaltung der Anforderungen nach DIN 51605 für Rapsölkraftstoff.

Tabelle 15: Kraftstoffanalysen von Rapsölkraftstoff im Feld

Kenngröße	R100 I	R100 II	R100 III	R100 IV	R100 V	R100 VI	R100 VII	R100 VIII	Einheit
Gesamtverschmutzung	12,4	4,4	–	20	10	14	9	–	mg/kg
Säurezahl	0,82	1,90	1,88	0,91	0,78	1,73	1,67	1,88	mg KOH/g
Oxidationsstabilität	7,8	**5,8**	**5,1**	6,7	7,2	**0,8**	7,5	**3,6**	h
Wassergehalt	750	**763**	729	561	620	627	474	721	mg/kg
Phosphorgehalt	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	mg/kg
Calciumgehalt	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	mg/kg
Magnesiumgehalt	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	mg/kg
Schwefelgehalt	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	mg/kg

Die Probe der Charge R100 II weist einen geringfügig erhöhten Wassergehalt und die Proben der Chargen R100 II und R100 III eine geringfügig zu niedrige Oxidationsstabilität außerhalb des geforderten Grenzwerts nach DIN 51605 auf. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Überschreitungen der Grenzwerte im Bereich der Messgenauigkeit der Prüfverfahren für die Oxidationsstabilität und den Wassergehalt liegen und daher als noch unkritisch bewertet werden können.

Es zeigt sich, dass die sichere und zuverlässige Einhaltung der Qualitätsanforderungen für die Ölmühlen nach wie vor eine Herausforderung darstellt, wenngleich insgesamt in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erzielt werden konnten. Im Vergleich zu den Vorgängerprojekten [31] lagen Phosphor-, Calcium- und Magnesiumgehalt bei keiner Probe über dem Grenzwert nach DIN 51605.

Einzig bei den Chargen R100 VI und VIII war die Oxidationsstabilität mit 0,8 h bzw. 3,6 h in der Probe wenige Monate nach der Anlieferung deutlich unter dem Grenzwert von 6,0 h. Trotz der guten Lagerbedingungen über die Wintermonate in einem doppelwandigen Stahltank (ohne Buntmetalleinsatz) war das Rapsöl bereits sehr stark gealtert. Da bei der Anlieferung von den Betreibern keine Probenahme erfolgt ist, war eine Reklamation bei den Ölmühlen nicht möglich. Die Chargen wurden daher mit einem Oxidationsstabilisator additiviert und unmittelbar verbraucht.

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

6.1.4 Startverhalten

Das Startverhalten der Pflanzenöltraktoren wurde überwiegend mit der besten Bewertungsangabe „gut“ bewertet. Die Startvorgänge, die mit „kein Start“ möglich oder „schlecht“ bewertet wurden, haben einen sehr geringen Anteil an allen aufgezeichneten Startvorgängen. Abbildung 31 zeigt die Bewertung des Startverhaltens der rapsöltauglichen Traktoren aus dem Betriebstagebuch im Feldtest.

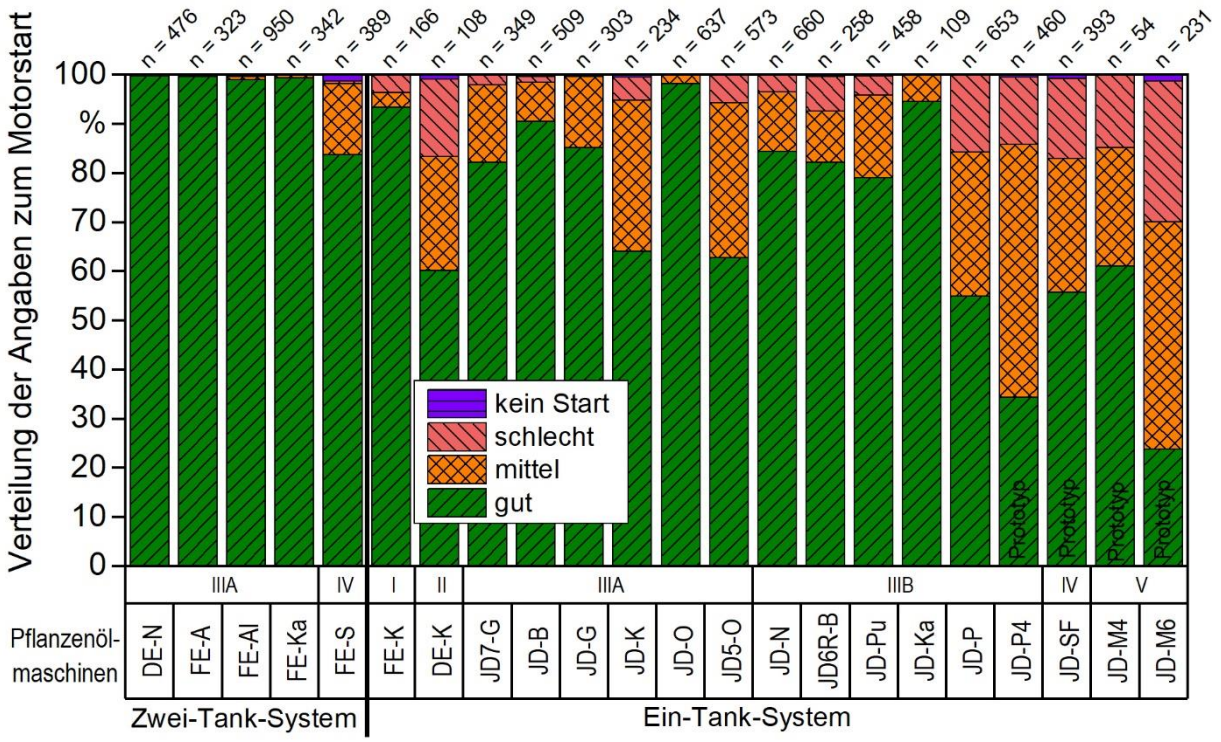


Abbildung 31: Bewertung des Startverhaltens rapsöltauglicher Traktoren

Durchweg positive Resultate waren erwartungsgemäß bei den Traktoren mit Zwei-Tank-System zu beobachten. Der Traktor FE-S startete bereits vor der Umrüstung auf den Pflanzenölbetrieb mit leichter Verzögerung. Nach Aussage der Servicewerkstatt liegt hier keine Störung vor. Auch die Traktoren der Abgasstufen IIIA und IIIB mit einem Ein-Tank-System konnten überwiegend problemlos über die gesamte jährliche Nutzungsdauer mit Pflanzenöl gestartet werden.

Das Startverhalten der Traktoren JD-P4, JD-SF, JD-M4 und JD-M6 wurde in den Jahren im Durchschnitt am schlechtesten bewertet, wenngleich ein Start der Traktoren fast immer möglich war. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei zum Teil um Prototyptraktoren handelt. Wird der Motorblock bzw. das Kühlwasser über eine an der Netzsteckdose angeschlossene Heizung vorgewärmt, ist ein Start auch bei tiefen Temperaturen ohne Verzögerung möglich. Der Hersteller arbeitet an einer Verbesserung des Startverhaltens durch Optimierungen im Niederdruckkraftstoffsystem und der Motorsteuergerätesoftware.

6.2 Emissions- und Leistungsmessung

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse der Untersuchungen mit alternativen Kraftstoffen am Traktorenprüfstand und mit der portablen Emissionsmesstechnik zusammengefasst.

6.2.1 Steyr 4075 kompakt (ST-S)

Am Steyr Traktor (ST-S) wurden Emissions- und Leistungsmessungen mit Diesel (DK), Biodiesel (B100) und paraffinischem Kraftstoff (HVO) vorgenommen. In Abbildung 32 sind die Volllastkennlinien dargestellt. Die höchste Leistung hat der Traktor beim Betrieb mit HVO erreicht. Vor allem bei höheren Drehzahlen wird mit diesem Kraftstoff die Leistung gegenüber dem Dieselbetrieb um durchschnittlich 2 % übertroffen. Beim Betrieb mit B100 ist die Leistung im Mittel um 13 % geringer als mit DK. Dies ist hauptsächlich auf den geringeren Heizwert durch den Sauerstoffanteil im Biodiesel zurückzuführen und spiegelt sich auch im höheren Kraftstoffverbrauch wider. Der höhere Kraftstoffverbrauch konnte aber den Leistungsrückgang nicht kompensieren. Der volumetrische Kraftstoffverbrauch ist mit B100 am höchsten, gefolgt von HVO und fossilem Dieselkraftstoff. Aufgrund der geringen Dichte von HVO ist dessen massebezogener Heizwert am höchsten von allen drei Kraftstoffen. Daraus resultiert der geringste gravimetrische Kraftstoffverbrauch von HVO gegenüber DK und B100.

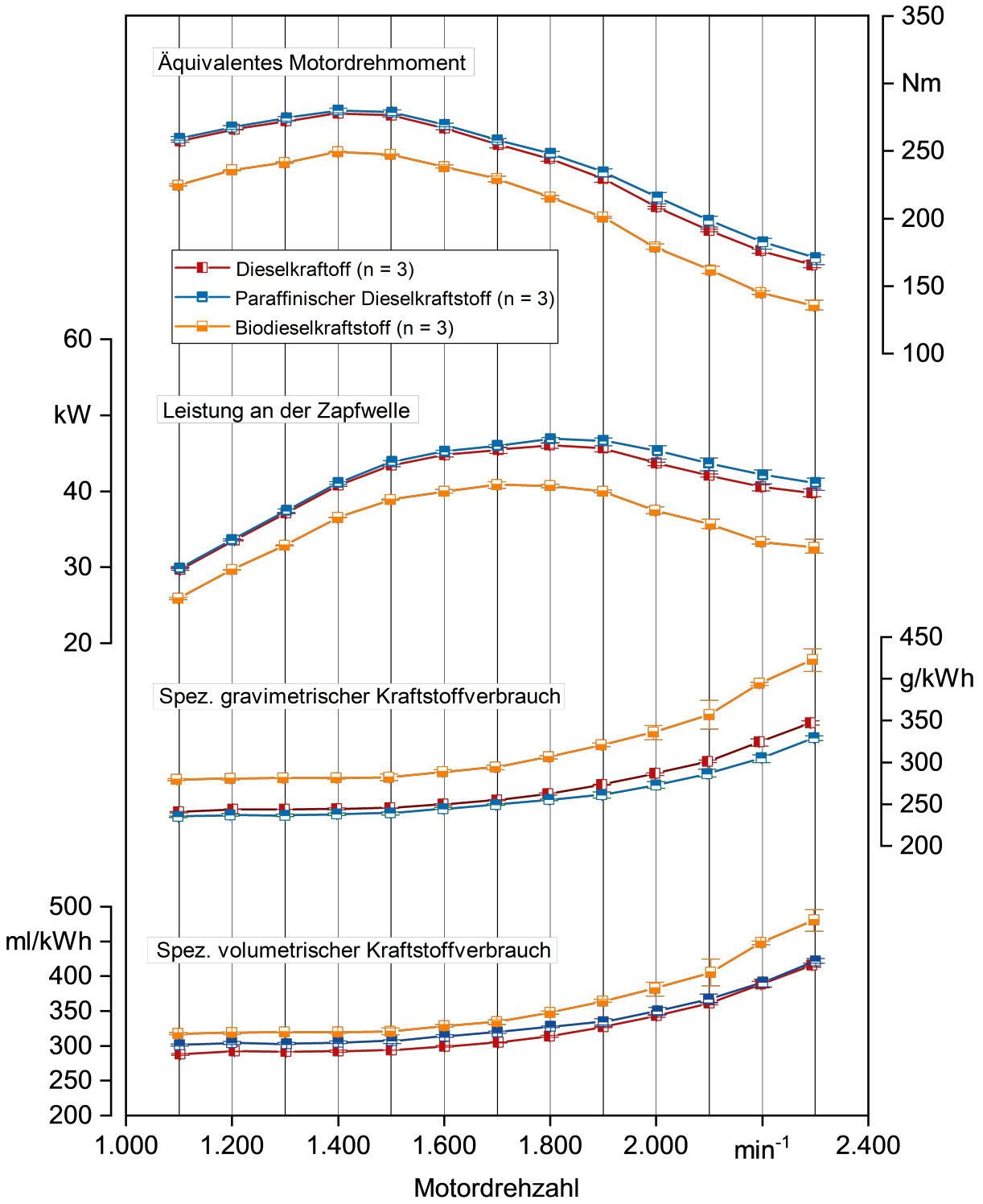


Abbildung 32: Volllastkennlinien des Traktors (ST-S) im Betrieb mit Dieselkraftstoff (DK), paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel (B100)

Emissionen vor der Abgasnachbehandlung am Traktorenprüfstand

In Abbildung 33 sind die Stickstoffoxide (NO_x) im Abgas vor Abgasnachbehandlung dargestellt. Die Messungen fanden im Rohabgas statt, da hierbei die Unterschiede zwischen den Kraftstoffen besser erkennbar sind. Bei den NO_x-Emissionen weist HVO im Mittel geringfügig niedrigere Werte auf als Diesel und Biodiesel, die wiederum vergleichbare Werte liefern.

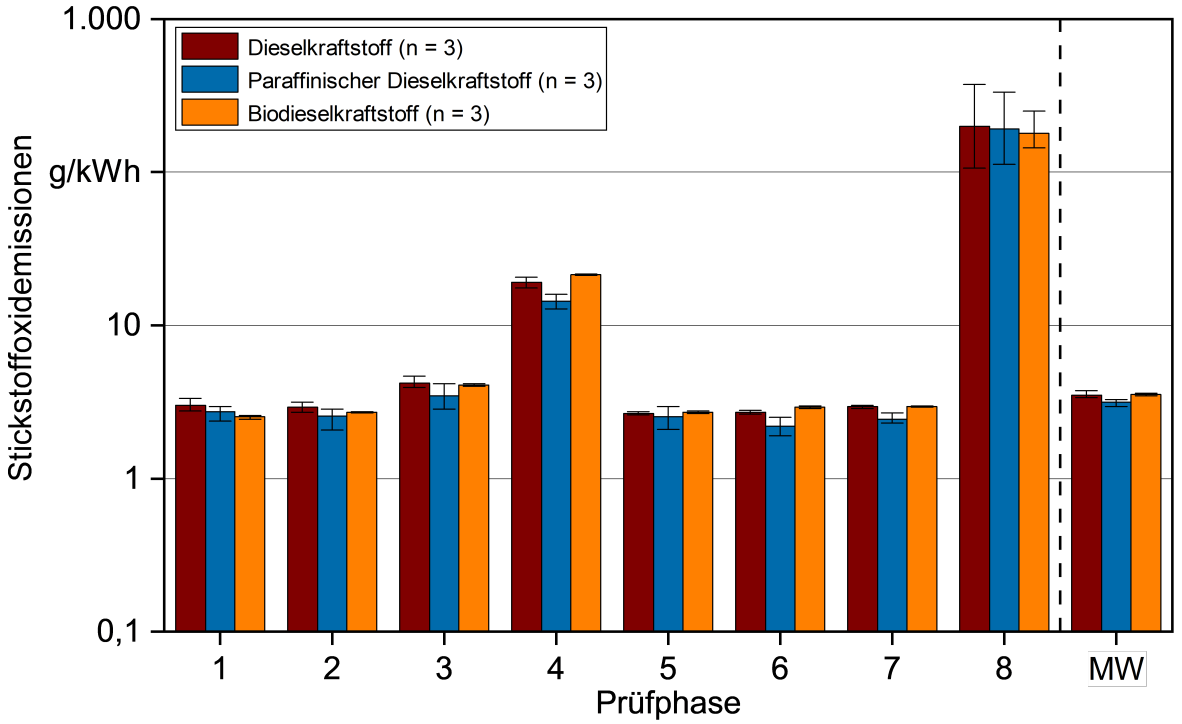


Abbildung 33: Stickstoffoxidemissionen (Rohemissionen vor Abgasnachbehandlung) des Steyr-Traktors (ST-S) im Betrieb mit Dieselkraftstoff (DK), paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel (B100) bei den NRSC-Prüfphasen und als gewichteter Mittelwert (MW)

Die Partikelanzahl vor Partikelfilter ist in Abbildung 34 dargestellt. Es wird deutlich, dass im Rohabgas (vor Abgasreinigung) mit fossilem Dieselkraftstoff die höchsten und mit Biodiesel die geringsten Werte auftreten. Dies entspricht auch den Erwartungen, da Aromaten im Kraftstoff die Partikelemissionen erhöhen können und Sauerstoff im Kraftstoff diese verringern kann. Fossiler Dieselkraftstoff enthält Aromaten und ist bis auf den Sauerstoff, der aus dem Biodiesel-Blendanteil stammt, weitgehend frei davon. Paraffinischer Dieselkraftstoff ist frei von Aromaten und Sauerstoff. Auch Biodiesel ist aromatenfrei, enthält aber mit über 10 % einen vergleichsweise hohen Anteil an Sauerstoff. In den Prüfphasen 4 und 8 ist die Partikelanzahl mit Diesel um den Faktor 10 bzw. 100 höher als mit den Biokraftstoffen.

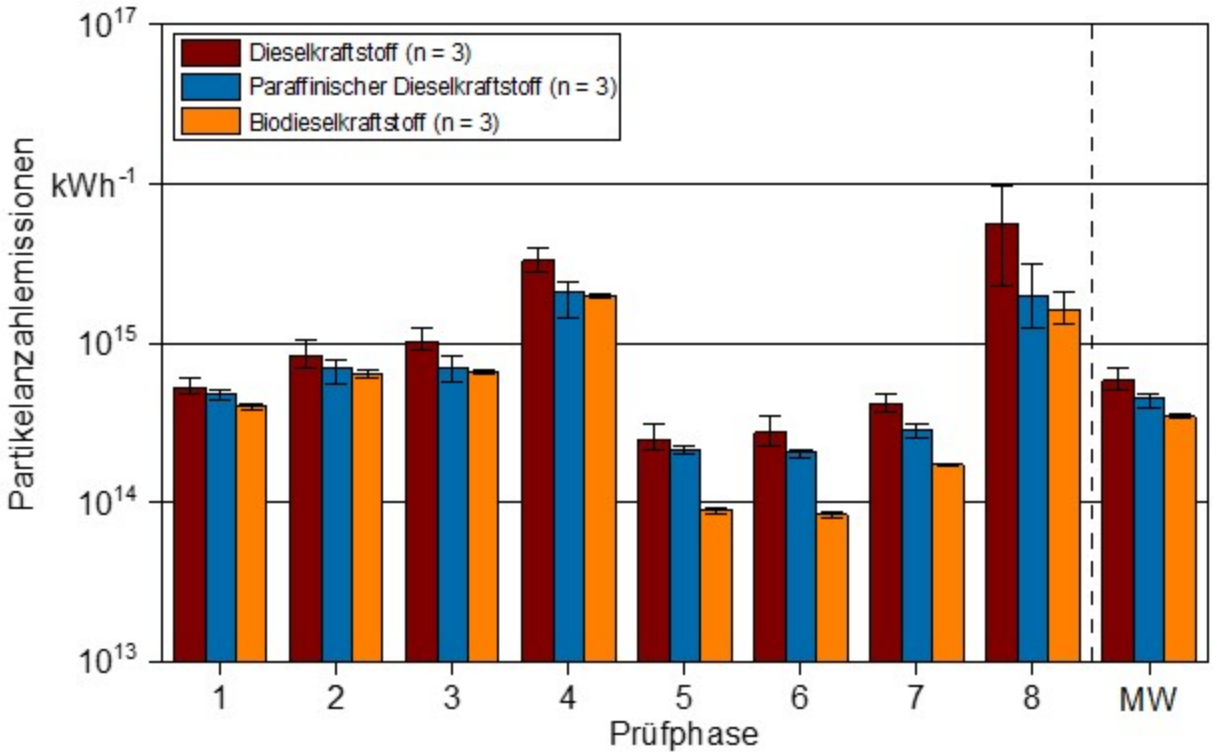


Abbildung 34: Partikelanzahl (Rohemissionen vor Abgasnachbehandlung) des Steyr-Traktors (ST-S) im Betrieb mit Dieselkraftstoff, paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel bei den NRSC-Prüfphasen und als gewichteter Mittelwert (MW)

Neben der Emissionsmessung bei stationären Lastpunkten wurde auch ein transienter Lastzyklus angewendet, der an den Non-Road Transient Cycle (NRTC) angelehnt ist. Eine detaillierte Beschreibung dieses Zyklus findet sich in ETTL et al. (2019) [32]. Das Ergebnis für die Stickstoffoxid- und Partikelanzahlemissionen im Rohabgas vor AGN ist in Abbildung 35 dargestellt. Die NO_X-Emissionen im NRTC variieren im Mittel zwischen 4,1 g/kWh und 4,6 g/kWh. Auch hier zeigt sich, dass mit paraffinischem Dieselkraftstoff die geringsten Stickstoffoxidemissionen und mit Biodiesel die geringsten Partikelanzahlemissionen auftreten, wenngleich die Unterschiede zwischen den Kraftstoffen nicht sehr groß sind.

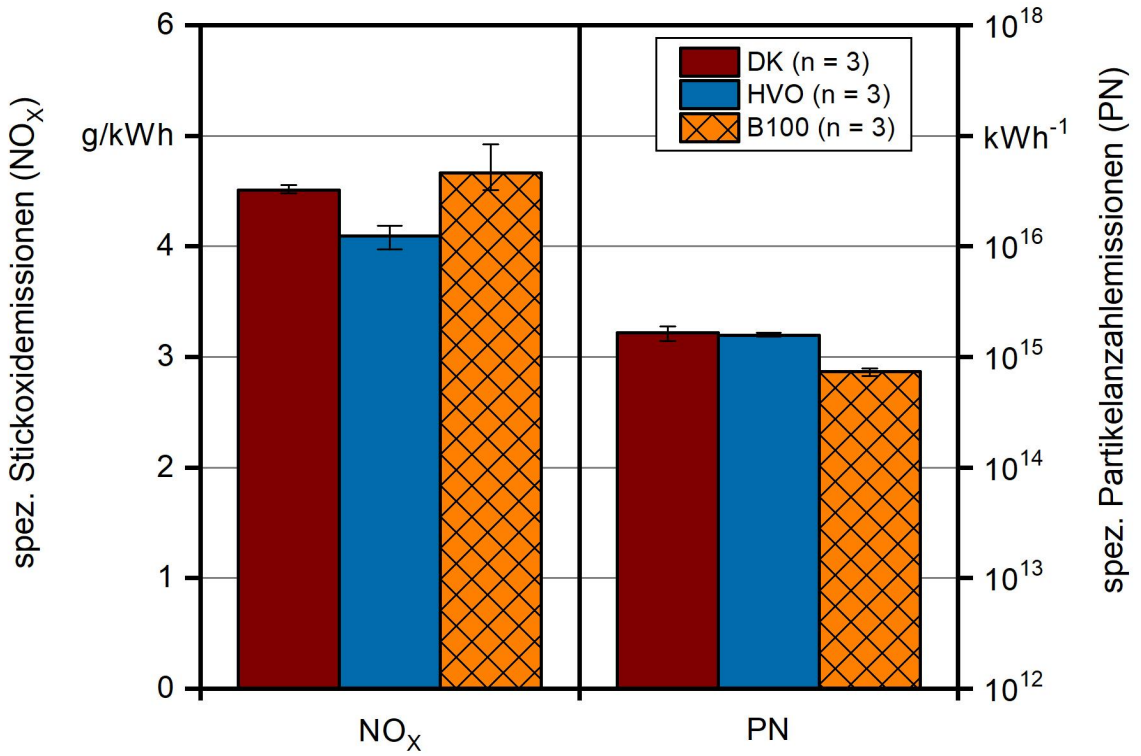


Abbildung 35: Stickstoffoxid- und Partikelanzahlemissionen des Steyr-Traktors (ST-S) im Betrieb mit Dieselkraftstoff (DK), paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel (B100) im NRTC-Zyklus

Emissionen nach der Abgasnachbehandlung am Traktorenprüfstand

Der Steyr-Traktor (ST-S) der Abgasstufe IIIB besitzt kein SCR-System, wodurch die Stickstoffoxidemissionen an der Messstelle nach und vor der Abgasnachbehandlung unverändert bleiben. Oxidationskatalysator und Partikelfilter reduzieren jedoch die HC-, CO- und PM-Emissionen. Im Mittel der jeweils drei Wiederholungsmessungen wurden bei allen Kraftstoffvarianten die Abgasemissionsgrenzwerte von 4,7 g/kWh für die Summe aus NO_X + HC, von 5,0 g/kWh für CO sowie von 0,025 g/kWh für Partikelmasse (PM) unterschritten.

Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb

Die Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb wurden bei Straßenfahrten über eine Distanz von ca. 44 km zwischen Betriebsstundenstand 440 und 460 Bh des Traktors ermittelt. Die Datenaufzeichnung dauerte je Einzelfahrt ca. 1,2 h. Bei allen Messungen mit DK und HVO waren 100 % der Messfenster gültig, die Auswertung erfolgte mit der Software EMROAD 6.03 Build 3. Die Umgebungstemperaturen waren bei jeder Messung im Gültigkeitsbereich, der zwischen −7 und 37 °C liegt (bei 1004 hPa). Die Umgebungstemperaturen waren im Mittel bei der DK-Messreihe mit 4,6 ± 0,6 °C etwas geringer als bei den Messreichen mit B100 (9,4 ± 2,2 °C) und HVO (10,7 ± 2,0 °C).

Die NO_X- und HC-Emissionen während der Straßenfahrten bei jeweils drei Wiederholungen sind in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt.

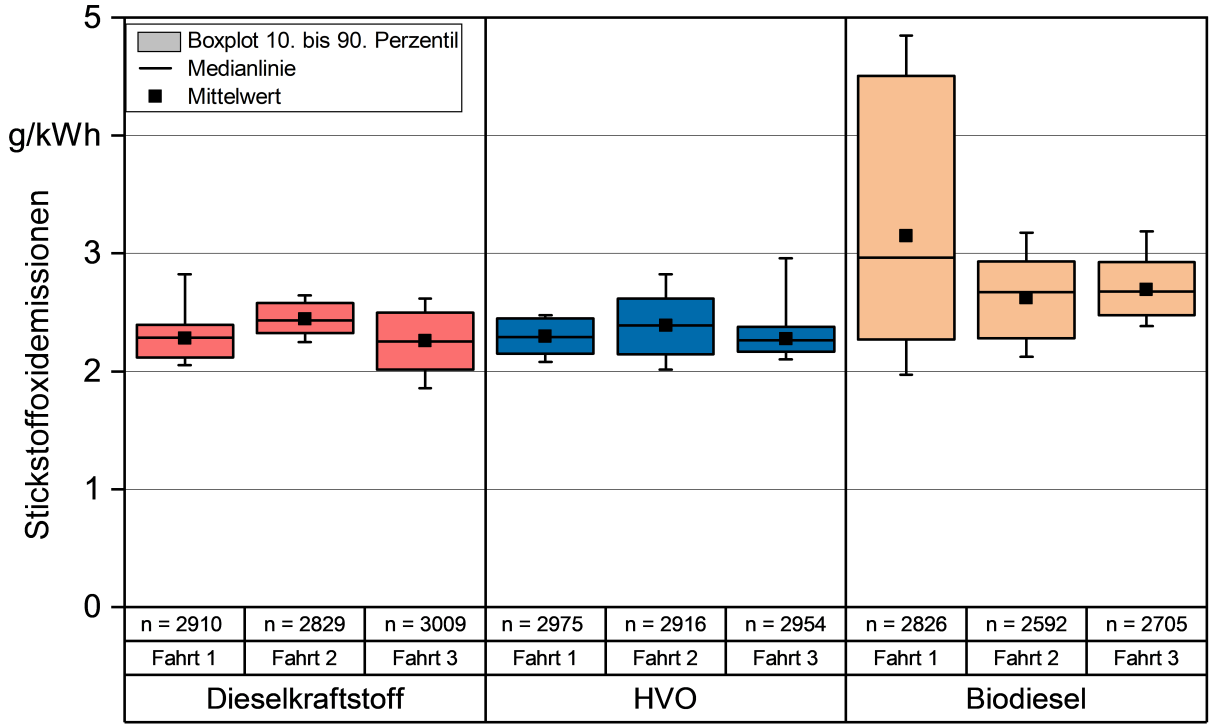


Abbildung 36: Verteilung der spezifischen NO_X-Emissionen bei Straßenfahrten des Traktors ST-S im Betrieb mit Dieselkraftstoff, paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel

Die mittleren NO_X-Emissionen bei den Straßenfahrten liegen über alle Kraftstoffvarianten im Bereich zwischen 2,3 g/kWh und 3,2 g/kWh und damit unterhalb der Emissionen im NRTC (4,1 g/kWh bis 4,6 g/kWh) am Traktorenprüfstand (Abbildung 35). Auch der für den Motorprüfstand gültige Grenzwert von 4,7 g/kWh, der sich aus der Summe der NO_X- und HC-Emissionswerte errechnet, wird mit Ausnahme weniger Messfenster, die alle im Betrieb mit Biodiesel bei einer Fahrt aufgetreten sind, unterschritten.

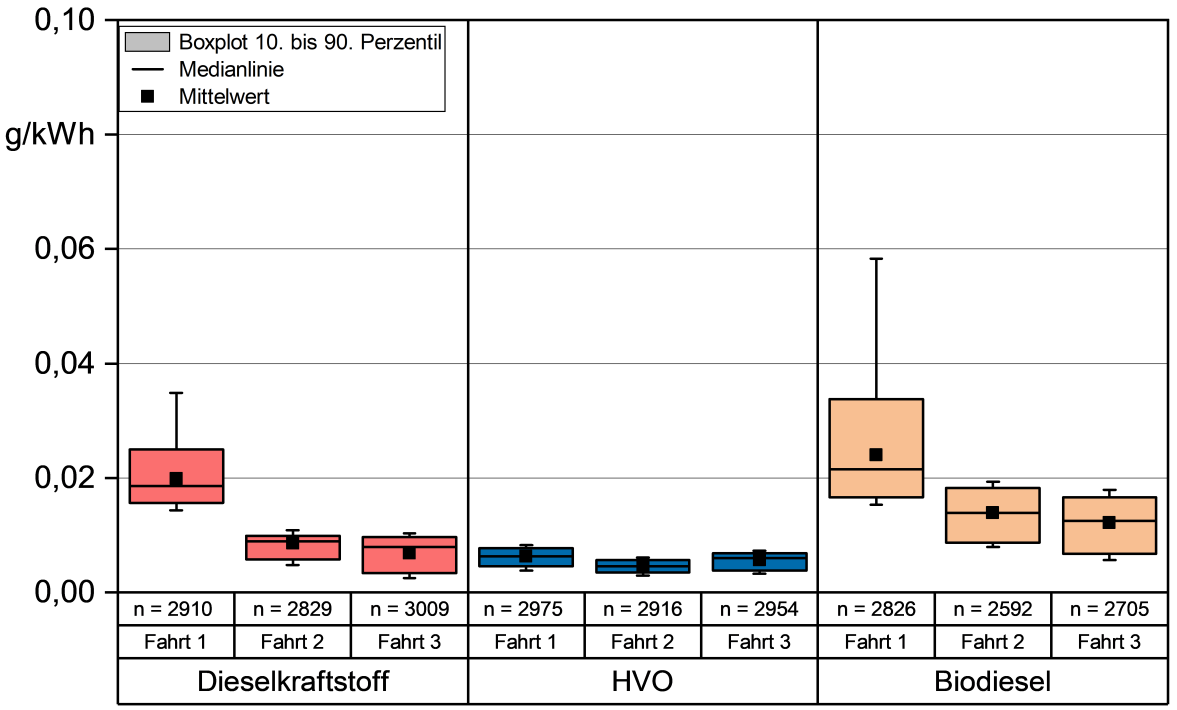


Abbildung 37: Verteilung der spezifischen HC-Emissionen bei Straßenfahrten des Traktors ST-S im Betrieb mit Dieselkraftstoff, paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) und Biodiesel

Die mittleren NO_X- und HC-Emissionen mit B100 fallen geringfügig höher aus als die Emissionen im DK- und HVO-Betrieb. Die Unterschiede in den NO_X- und HC-Emissionen können sich z. B. durch eine spätere Einspritzung des B100 in den Brennraum oder eine niedrigere Abgasrückführungsrate als im Betrieb mit DK und HVO ergeben. Eine Emissionserhöhung aufgrund einer DPF-Regeneration kann aufgrund der vergleichsweise geringen Abgastemperaturen der Messungen von 237 ± 1 °C für B100, 248 ± 5 °C für DK sowie 252 ± 1 °C für HVO ausgeschlossen werden. Die Ursache für die größere Bandbreite der NO_X- und HC-Emissionen bei den B100-Messungen unter realen Bedingungen kann nicht eindeutig bestimmt werden. Trotz der Variabilität bei den Abgasemissionen liegt das Emissionsniveau des Traktors in realen Betrieb bei allen Kraftstoffen im Bereich der für die Abgasstufe IIIB zu erwartenden Werte.

6.2.2 Kubota M8560 (KU-S)

Im Zuge des Klimaschutzprogramms wurde der Kubota M8560 im April 2021 bei ca. 820 Bh auf den Betrieb mit Biodieselkraftstoff (B100) umgestellt. Der Traktor ist ab Werk nur für den Dieselkraftstoffbetrieb freigegeben. Die Kraftstoffumstellung wurde daher mit Leistungs- und Verbrauchsmessungen begleitet, um Erfahrungen mit B100-Einsatz bei diesem nicht freigegebenen Motor zu sammeln. Abbildung 38 zeigt die Leistungs- und Verbrauchsmesswerte mit Dieselkraftstoff (DK) und Biodieselkraftstoff (B100) über der Motordrehzahl.

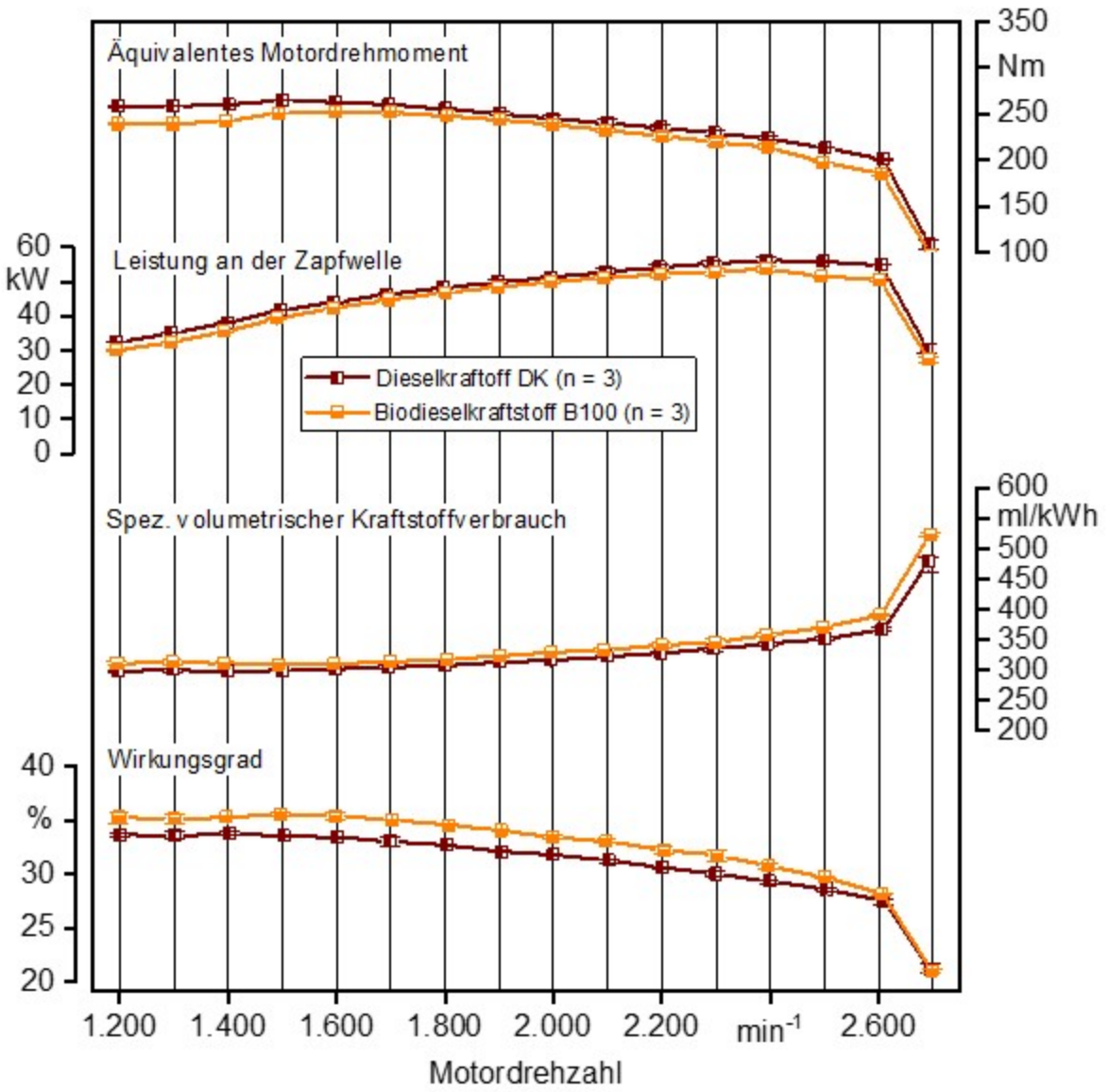


Abbildung 38: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs und des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Traktors Kubota M8560 (KU-S) beim Betrieb mit Diesel- und Biodieselkraftstoff

Die maximale Leistung an der Zapfwelle liegt beim Kubota mit Dieselkraftstoff bei 56 kW (76 PS) und mit Biodiesel bei 54 kW (73 PS). Das Leistungsniveau ist mit beiden Kraftstoffen somit annähernd gleich.

Die hier angegebene Leistung an der Zapfwelle fällt bei Traktoren üblicherweise rund 15 bis 20 % geringer aus als die vom Hersteller mit 67 kW (91 PS) angegebene Motornennleistung an der Kurbelwelle (Prospektangabe), da bei der Messmethode am Traktorenprüfstand (Leistung an der Zapfwelle) Leistungsverluste durch Nebenaggregate und Getriebekomponenten hinzukommen.

Der geringere Heizwert von Biodiesel im Vergleich zum fossilen Diesel wird bei dieser Messung durch einen höheren Wirkungsgrad im Biodieselbetrieb ausgeglichen. Der mittlere Wirkungsgrad an der Zapfwelle (Zapfwellenleistung/Brennstoffleistung) ist unter Volllast mit B100 (32,5 %) etwas höher als mit DK (31,0 %). Dadurch ergeben sich trotz des um ca. 5 % geringeren volumetrischen Heizwerts von B100 im Vergleich zum Diesel nur geringe Verbrauchsunterschiede im Bereich von −1 bis +4 Vol.-%. Die Messwerte sind durchweg praxisüblich und deuten auf eine saubere und effektive motorische Verbrennung hin.

Der Abgasgegendruck vor der Abgasnachbehandlung beträgt max. 100 mbar. Dies signalisiert einen geringen Beladungszustand des Partikelfilters. Während der Messungen mit B100 traten keine Fehlermeldungen oder Undichtigkeiten am Kraftstoffsystem auf.

6.2.3 John Deere 6210R (JD-P)

An einem John Deere 6210R (JD-P) der Abgasstufe IIIB, der im Jahr 2013 im Rahmen des Projekts PraxTrak [42] als Prototyp zur Verfügung gestellt worden war, wurden im Februar 2019 Emissions- und Leistungsmessungen am Traktorenprüfstand durchgeführt. Der Traktor war bis zu diesem Zeitpunkt ca. 3500 Betriebsstunden mit Rapsölkraftstoff auf den Bayerischen Staatsgütern (BaySG) an den Standorten Achselschwang und Grub im Praxiseinsatz. Das Abgasnachbehandlungssystem des Motors besteht aus Oxidationskatalysator und Partikelfilter. Zur Reduktion der Stickstoffoxide verfügt der Motor des Weiteren über eine gekühlte externe Abgasrückführung.

Nach einer ersten Messreihe zeigte sich, dass die Stickstoffoxidemissionen gegenüber dem Jahr 2013 stark angestiegen waren. Als Ursache konnte eine deutlich geringere Abgasrückführrate festgestellt werden. Daraufhin wurde der AGR-Kühler ausgebaut und untersucht. In Abbildung 39 sind erhebliche Ablagerungen in den Kühlrippen des Bauteils sichtbar, die zu einer verminderten Strömung des rückgeführten Abgases führten. Zudem wurden auch die Verrohrung, die Stellklappe und die Venturi-Düse demontiert, an denen auch deutliche Verschmutzungen festgestellt wurden. Je nach eingestellter AGR-Rate, Betriebsweise und Nutzungsdauer sind Ablagerung am AGR-Kühler auch im Dieselbetrieb üblich [5] [41] [4]. Dieses „Fouling“ verursacht durch Akkumulation von Ruß- und Kohlenwasserstoffrückständen einen schlechteren Wärmeübergang zwischen dem heißen Abgas und dem Kühlwasser. Der übliche Effizienzrückgang wird mit 20 bis 30 % angegeben [4]. Die Ablagerungsbildung hängt weniger von der Gastemperatur ab. Jedoch erhöhen unverbrannte Kohlenwasserstoffe im Abgas (z. B. im Teillastbereich) bei geringen Kühlwassertemperaturen (z. B. kurz nach dem Start) die Ablagerungsmenge im Kühler. Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit hingegen sinkt die Verweildauer und die Wahrscheinlichkeit der HC- und Partikelanhaftung [5][41]. Das Fouling über die Betriebsdauer wird in der Dimensionierung des AGR-Kühlers berücksichtigt. Der schlechtere thermische Wirkungsgrad und der Druckabfall führen in der Regel zu höheren NO_X-Emissionen. Nach einer Reinigung sämtlicher Komponenten wurde das System wieder eingebaut und eine weitere Messreihe durchgeführt.

In Abbildung 40 sind die Werte der Stickstoffoxid- und Partikelmasseemissionen aus den Jahren 2013 und 2019 vor und nach der beschriebenen Reinigung der AGR dargestellt. Vor der Säuberung waren die NO_x-Emissionen um ca. 76 %, danach nur noch um ca. 21 % gegenüber dem im Jahr 2013 gemessenen Wert erhöht. Als Hauptursache für die angestiegenen Stickstoffoxidemissionen kann demnach die zunehmende Verschmutzung des AGR-Systems angenommen werden. Bei den Partikelemissionen ist, wie zu erwarten, keine wesentliche Veränderung über die Betriebszeit zu erkennen, die Abscheideleistung des Partikelfilters ist nach wie vor sehr gut. Bei den Abgaskomponenten Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe liegen die Messwerte weiterhin deutlich unterhalb der gültigen Grenzwerte.



Abbildung 39: Ablagerungen im AGR-Kühler des John Deere 6210R (JD-P)

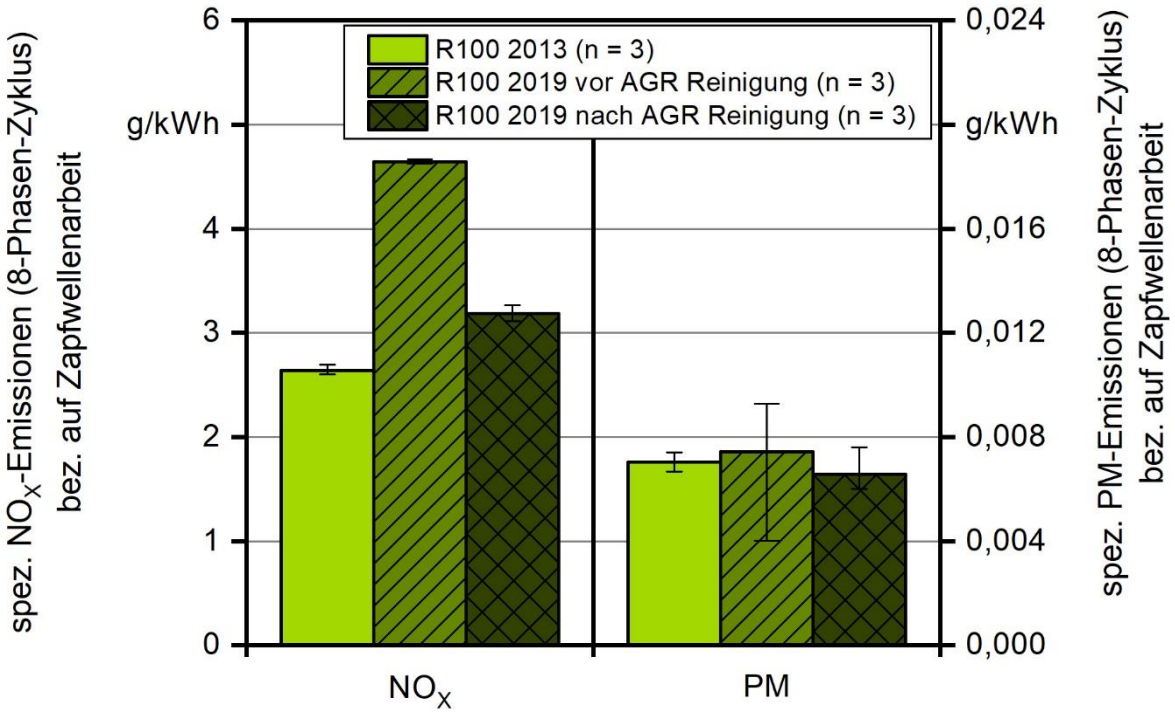


Abbildung 40: Spezifische Stickstoffoxid- (NO_x) und Partikelmasseemissionen (PM) des Traktors John Deere 6210R (JD-P) mit Rapsölkraftstoff (R100) nach der Umrüstung auf Pflanzenölbetrieb im Jahr 2013 sowie vor und nach Reinigung des Abgasrückführsystems (AGR) im März 2019 (Mittelwerte und Schwankungsbreite von je drei Wiederholungsmessungen)

Der Partikelfilter wird bei diesem Traktor nicht aktiv durch temporäre Spät- oder Nacheinspritzung von Kraftstoff und daraus resultierende starke Erhöhung der Abgastemperatur regeneriert, sondern rein passiv und kontinuierlich während des normalen Betriebs. Es wurde auch der Abgasgegendruck, der im Wesentlichen durch die Beladung des Partikelfilters und den Abgasmassenstrom beeinflusst wird, untersucht. In Abbildung 41 sind die Werte über der Drehzahl während der Prüfung der Volllastkurve dargestellt. Das Ergebnis der wiederkehrenden Messungen zwischen 2013 und 2019 weist auf einen moderaten Anstieg des maximalen Gegendrucks von ca. 160 auf 190 mbar über die Betriebszeit hin. Der gemäß Herstellerangabe kritische Wert von 200 mbar wurde demnach nicht erreicht.

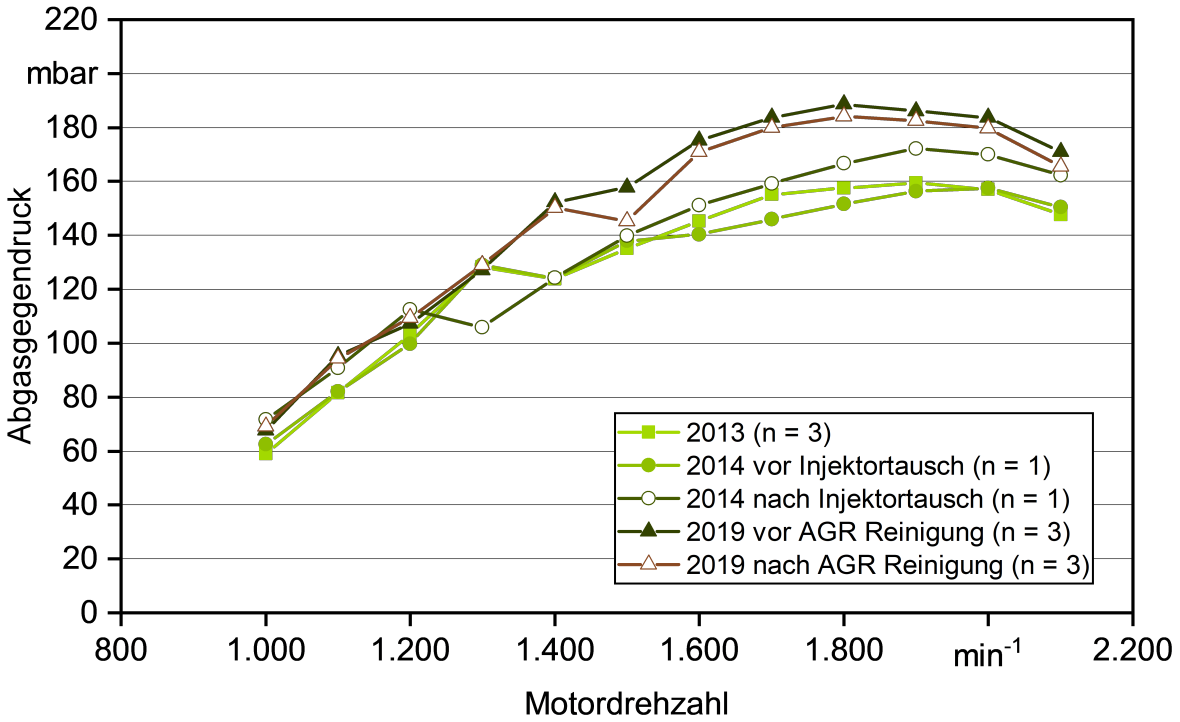


Abbildung 41: Abgasgegendruck des Traktors John Deere 6210R (JD-P) im Volllastbetrieb bei Verwendung von Rapsölkraftstoff und eines passiv regenerierenden Partikelfilters im Beobachtungszeitraum

In Abbildung 42 sind die Volllastkennlinien des Traktors zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Untersuchungszeitraums dargestellt. Im Jahr 2014 bei ca. 1.260 Bh wurden aufgrund von Leistungsschwankungen die Injektoren gegen neue eines neuen Serien-Typs ausgetauscht [42]. Mit diesem zweiten Injektorensatz wurde die ursprüngliche Leistung trotz gleicher Motoreinstellungen deutlich übertroffen und es lassen sich auch nach über 2200 absolvierten Einsatzstunden im Jahr 2019 keine Alterungseffekte erkennen. Die Reinigung des AGR-Systems hatte keinen wesentlichen Einfluss auf Leistung und Kraftstoffverbrauch des Motors.

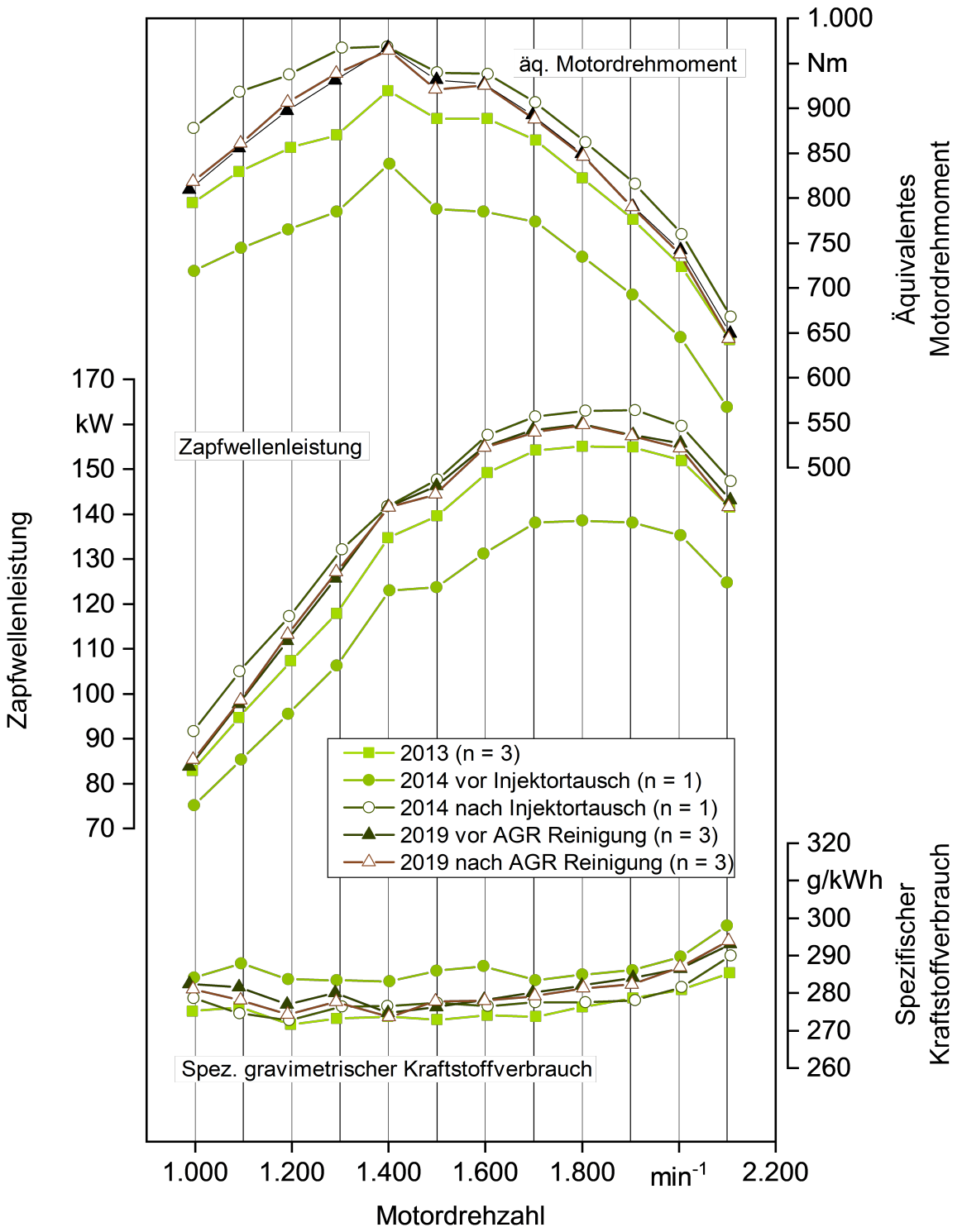


Abbildung 42: Volllastkennlinien des Traktors (JD-P) beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Untersuchungszeitraumes

6.2.4 Fendt 724 S4 Vario (FE-S)

Am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) fanden im Berichtszeitraum Messungen mit Rapsölkraftstoff bei 2480 Bh sowie mit Biodiesel bei 1.860 Bh am Traktorenprüfstand statt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 dargestellt und werden mit Messreihen aus früheren Untersuchungen des Traktors FE-S bei 236 Bh mit DK bzw. 247 Bh mit R100 verglichen [35] [32].

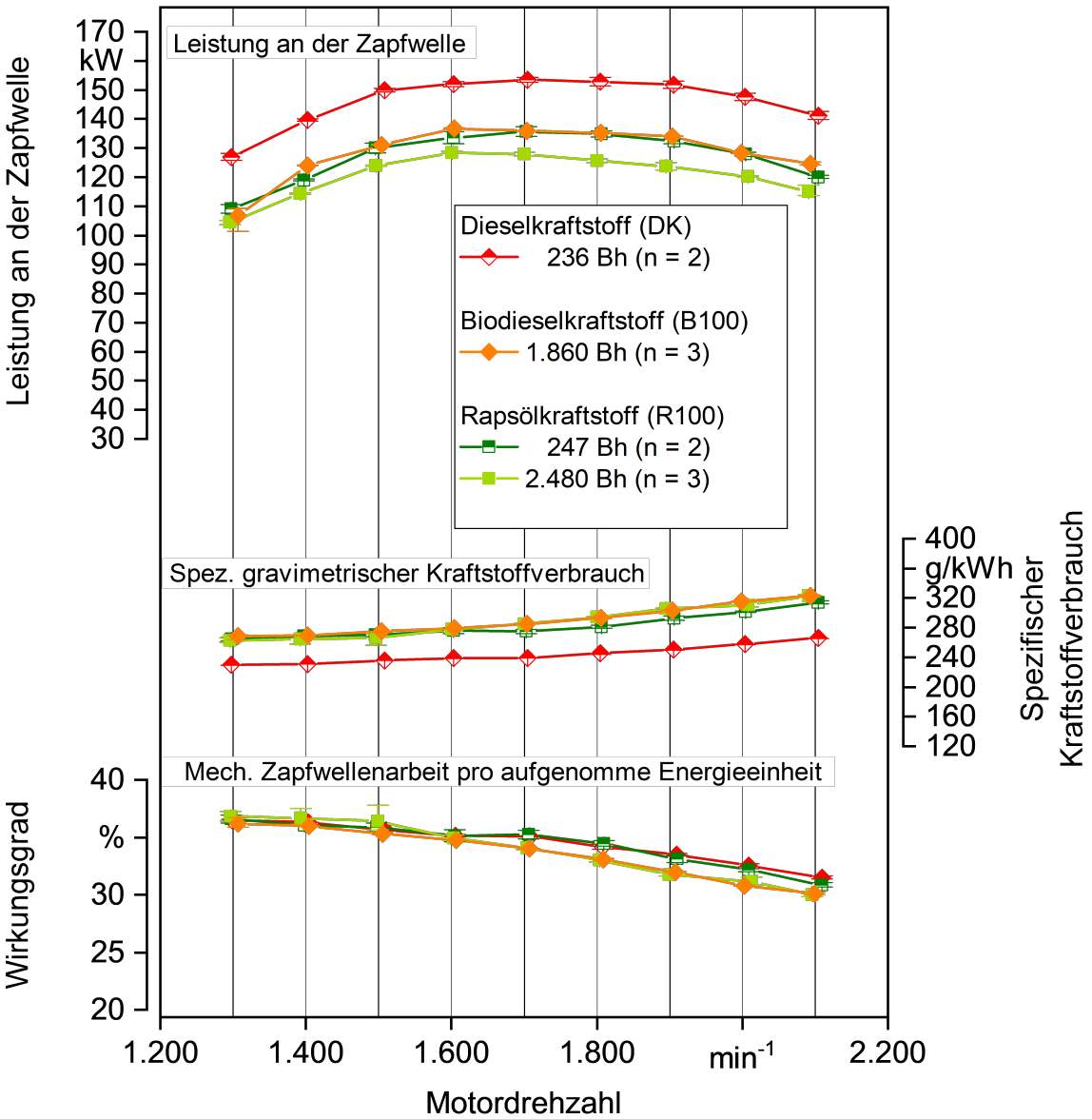


Abbildung 43: Leistung an der Zapfwelle, spezifischer gravimetrischer Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle des Fendt 724 S4 (FE-S) mit Rapsöl-, Biodiesel- und Dieselkraftstoff

Die Leistung bei Nenndrehzahl von 2100 min^{-1} ist im Dieselbetrieb mit 141 kW an der Zapfwelle bei 236 Bh (Ausgangszustand) um ca. 19 % geringer als die vom Hersteller mit 174 kW angegebene Motornennleistung nach der Typgenehmigungsprüfung. Die geringere Leistung (gemessen an der Zapfwelle) im Vergleich zur angegebenen Nennleistung am Motorenprüfstand (gemessen an der Kurbelwelle) ergibt sich durch Leistungsverluste an den Nebenaggregaten bzw. Getriebekomponenten.

Wie bereits in anderen Untersuchungen festgestellt wurde, ist die Leistung im Rapsölbetrieb ohne Anpassung der Motorparameter moderner Common-Rail-Motoren geringer als im Dieselbetrieb. Im Mittel beträgt der Leistungsunterschied bei Volllast zwischen der Dieselmessung bei 236 Bh und der Rapsölmessung bei 247 Bh ca. 15 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass über den gesamten untersuchten Drehzahlbereich im Rapsölbetrieb im Mittel etwa 10 Vol.-% weniger Kraftstoff pro Hub in den Brennraum eingespritzt werden als beim Betrieb mit Dieselkraftstoff. Hinzu kommt, dass Rapsölkraftstoff einen ca. 5 % geringeren volumetrischen Heizwert aufweist.

Der Wirkungsgrad unter Volllast unterscheidet sich im Diesel- und Rapsölbetrieb kaum. Die Messreihe bei 2.480 Bh zeigt einen leichten Rückgang der Leistungskennwerte im Diesel- und Rapsölbetrieb. Im Rapsölbetrieb sank die maximale Leistung an der Zapfwelle von 134 kW (bei 247 Bh) auf 128 kW (bei 2.480 Bh). Der beobachtete Leistungsrückgang während des Betriebs kann möglicherweise auf die Bildung von Ablagerungen zurückzuführen sein, wodurch die maximale Einspritzmenge im Vergleich zum Ausgangszustand abnahm. Ergebnisse aus der Literatur [35] [32] zeigen, dass Ablagerungen an Kraftstoffinjektoren auch im Dieselbetrieb auftreten. Die Nutzung des Traktors für landwirtschaftliche Arbeiten im Feld im Vergleich zum Neuzustand ist jedoch nicht signifikant eingeschränkt. Es traten weder schwerwiegende Störungen noch längere Ausfallzeiten auf, die im Zusammenhang mit dem Kraftstoffeinspritzsystem bzw. den -injektoren gestanden hätten.

Im Fahrzeugbestand der Landwirtschaftsverwaltung befinden sich viele Fahrzeuge mit dem Motortyp DEUTZ TCD 6.1, der auch im Traktor FE-S verbaut ist und nachträglich vom Hersteller für den B100-Betrieb freigeben wurde [61]. Neben der Umrüstung auf den Rapsölkraftstoffbetrieb ist der Biodieseleinsatz eine weitere Option, den Anteil regenerativer Antriebe auf den Staatsbetrieben zu erhöhen. Da die Betreiber an den Auswirkungen einer B100-Umstellung auf Leistung und Verbrauch interessiert sind, wurde der Traktor FE-S bei 1.860 Bh mit B100 geprüft. Biodieselkraftstoff besitzt, ebenso wie Rapsölkraftstoff, einen um ca. 5 % geringeren volumetrischen Heizwert im Vergleich zum Dieselkraftstoff. Der B100-Betrieb war am Traktorenprüfstand ohne Störung möglich.

Insgesamt bestätigen die Messungen eine sehr gute Kompatibilität des Motors DEUTZ TCD 6.1 mit der Verwendung von Rapsöl- sowie Biodieselkraftstoff.

6.2.5 Valtra T214 Direct (VA-K) und Valtra T215 (VA-K2)

Am Valtra T214 Direct (VA-K) fanden in den ersten knapp 1.000 Bh mehrere Messreihen mit fossilem und paraffinischem Diesel am Traktorenprüfstand sowie mit portabler Emissionsmesstechnik PEMS bei Straßenfahrten statt.

Leistung, Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad des Traktors VA-K

In Abbildung 44 ist der Verlauf der Parameter Leistung an der Zapfwelle, spezifischer Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle bei Messungen mit DK und HVO zu sehen.

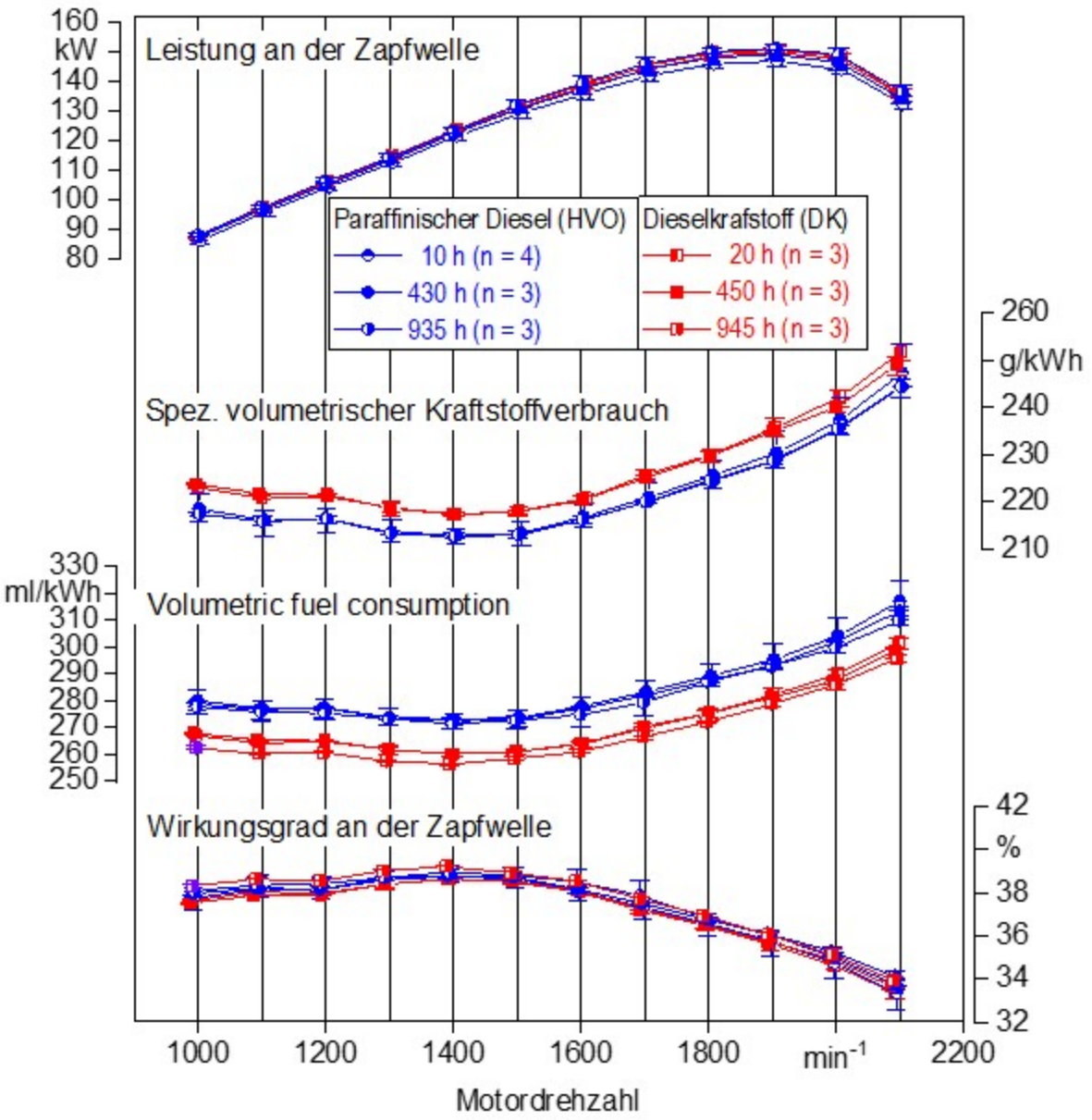


Abbildung 44: Mittelwerte und Spannweiten der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Traktors Valtra T214 Direct (VA-K) beim Betrieb mit DK und HVO

Die maximale Leistung an der Zapfwelle von 150 kW wird im Dieselbetrieb (DK) bei der Motordrehzahl von 1.900 min^{-1} erreicht. Die Leistung im Betrieb mit HVO ist bei Volllast im Mittel um 2,1 % geringer als mit Diesel. Diese Differenz bewegt sich in Abhängigkeit von der Motordrehzahl zwischen 3,0 % (bei 1.900 min^{-1}) und 1,6 % (bei 1.100 min^{-1}). Über den gesamten untersuchten Drehzahlbereich der Leistungsmessung werden im HVO-Betrieb im Mittel 2,4 % weniger Kraftstoffvolumen pro Hub in den Brennraum eingetragen als beim Betrieb mit Dieselkraftstoff. In Verbindung mit dem ca. 4 % geringeren volumetrischen Heizwert von HVO lässt sich diese Leistungsminderung erklären. Der Wirkungsgrad hingegen unterscheidet sich bei Volllast im HVO- und DK-Betrieb nicht signifikant. Der massebezogene Heizwert von HVO ist höher im Vergleich zum DK, woraus der geringere gravimetrische Kraftstoffverbrauch mit HVO resultiert. Der spezifische gravimetrische Harnstoffverbrauch ist im DK-Betrieb im Mittel um ca. 5 % höher als mit HVO. Aufgrund der um 2,1 % höheren mittleren Leistung sowie um 10 K höheren Abgastemperaturen mit DK sind auch höhere NO_X-Emissionen vor der AGN im Vergleich zum HVO-Betrieb zu erwarten. Höhere NO_X-Emissionen im Rohabgas werden durch Sensorsignale von der Steuerungssoftware des Abgasnachbehandlungssystems detektiert und führen zu höheren Dosierraten von Harnstofflösung für eine verstärkte NO_X-Reduktion im SCR-Katalysator.

Die Messungen bei 430 Bh bzw. 935 Bh mit HVO am BaySG-Standort Kringell ergaben ähnliche Leistungs- und Verbrauchsmesswerte wie bei den Messungen im Ausganszustand bei 10 Bh. Im gleichen Zeitraum ist der max. Abgasgegendruck vor der Abgasnachbehandlung von 144 mbar auf 202 mbar angestiegen. Bei weiterem Anstieg des Abgasgegendrucks durch Rußablagerungen im Partikelfilter wird eine routinemäßige aktive Regeneration des DPF durch den Fahrer erfolgen müssen.

Prüfzyklus-Emissionen des Traktors VA-K

Die spezifischen Emissionen im NRSC und NRTC sind in Abbildung 45 im Rohabgas vor der AGN und in Abbildung 46 im Reinabgas nach der AGN dargestellt. Die Emissionsmessungen erfolgten bei 10 bzw. 20 Bh, bei 430 bzw. 450 Bh sowie 935 bzw. 945 Bh.

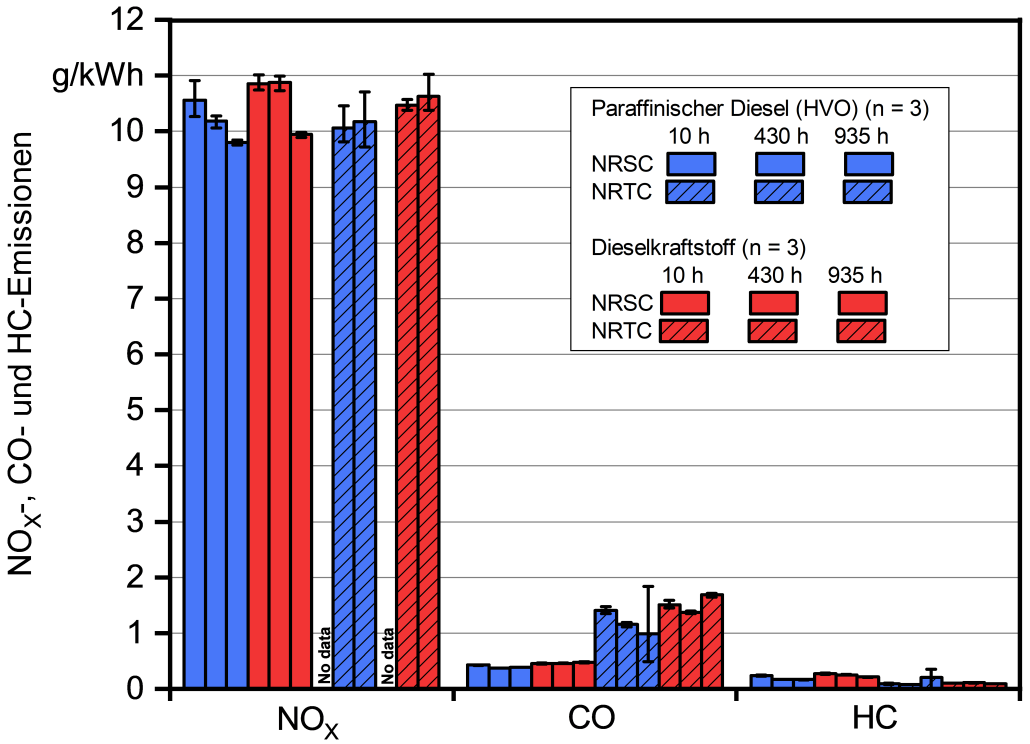


Abbildung 45: NO_X-, CO- und HC-Emissionen des Traktors VA-K beim NRSC und NRTC vor der AGN im Rohabgas mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO)

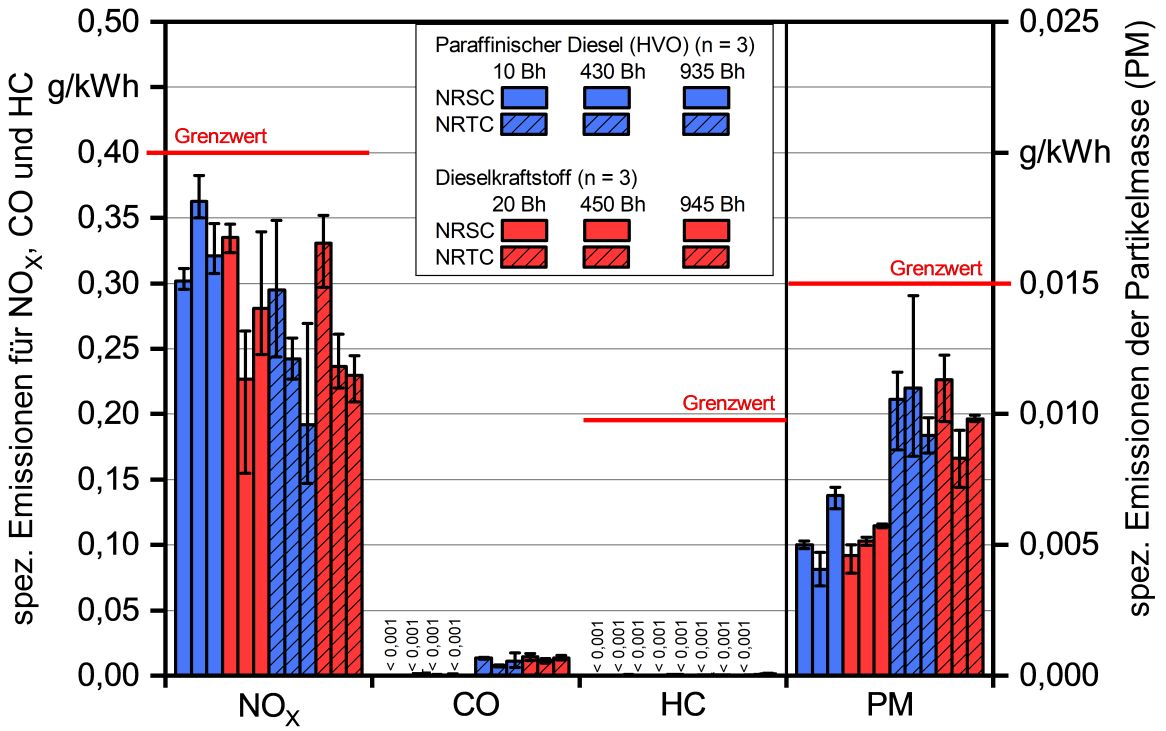


Abbildung 46: NO_X-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Traktors VA-K beim NRSC und NRTC nach der AGN im Reinabgas mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff

Sowohl im Roh- als auch im Reinabgas unterscheidet sich das Emissionsverhalten zwischen dem Betrieb mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff kaum. Die Wahl des Prüfzyklus beeinflusst das Emissionsverhalten meist stärker als die Wahl der Kraftstoffsorte.

Im NRTC fallen aufgrund des transienten Drehzahl- und Drehmomentverlaufs, des höheren Kaltstartanteils sowie der geringeren mittleren Motorauslastung die CO-Emissionen vor der AGN höher aus als im NRSC. Im NRSC hingegen begünstigt die hohe mittlere Motorauslastung höhere Verbrennungstemperaturen und damit tendenziell die Entstehung von NO_X-Emissionen.

Die NO_X-, CO-, HC- und PM-Emissionen im Reinabgas nach AGN wurden in allen Messreihen durch das SCR-System, den Oxidationskatalysator und den Partikelfilter auf ein geringes Niveau reduziert. Die CO- und HC-Emissionen sind überwiegend nahe der Nachweisgrenze.

Die Emissionen beim Kaltstart des NRTC werden exemplarisch anhand der PN-Messungen aufgezeigt, die mit einem Kondensationspartikelzähler CPN durchgeführt wurden. Die Anzahl der ausgestoßenen Partikel bei einer Betriebsstundenanzahl von über 935 Bh vor und nach der Abgasnachbehandlung werden gesondert in der Abbildung 47 betrachtet. Insgesamt wird nach der AGN beim NRTC im Motorbetrieb mit HVO eine um 80 % bzw. mit Diesel um 84 % höhere Anzahl an Partikeln ausgestoßen als beim NRSC.

Die Partikelanzahl (PN) vor der AGN wurde mit dem Messgerät DMS500 gemessen und ist sowohl mit fossilem als auch mit paraffinischem Dieselkraftstoff auf einem ähnlichen Niveau. Der Anteil an Aromaten im fossilen Kraftstoff zeigte hier also keinen Einfluss auf die PN.

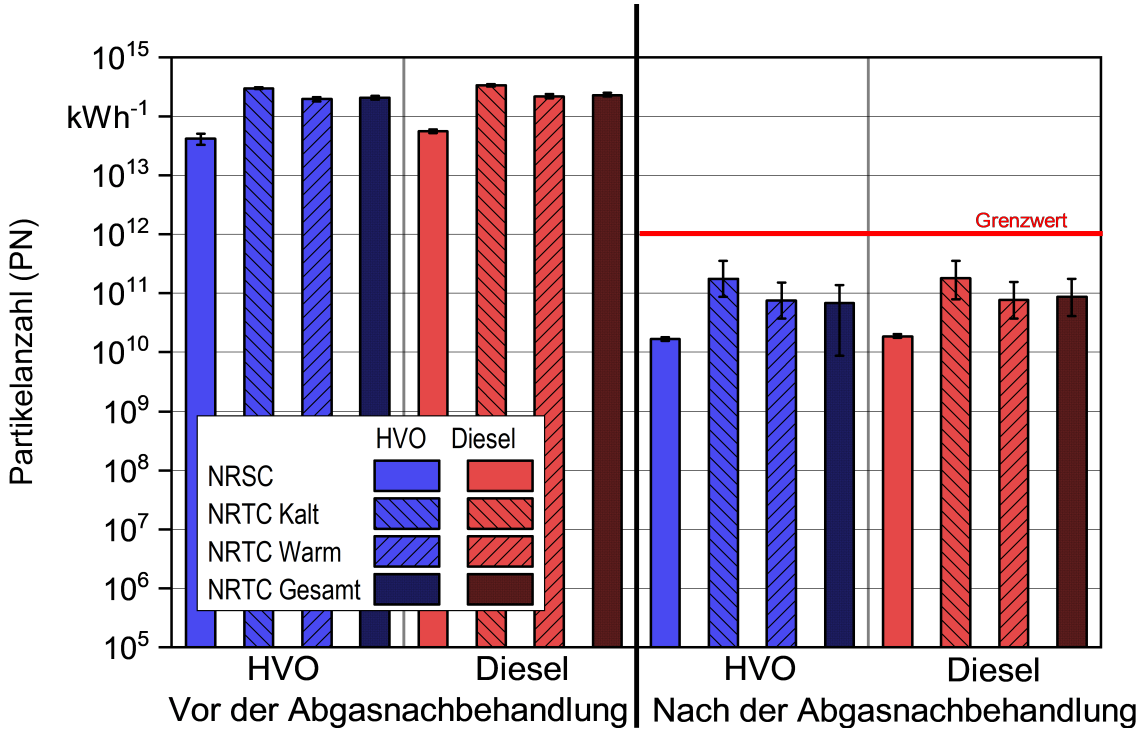


Abbildung 47: PN-Emissionen des Traktors VA-K beim NRSC und NRTC vor und nach der AGN, aufgeteilt in Warm- und Kaltstartbedingungen im Betrieb mit DK und HVO

Die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe V für PN von 10^{12} kWh^{-1}, PM von 0,015 g/kWh, NO_X von 0,40 g/kWh, CO von 3,5 g/kWh und HC von 0,19 g/kWh werden bei allen Messungen deutlich unterschritten. Eine Alterung der Motorkomponenten und der Abgasnachbehandlung ist anhand der vorliegenden Messdaten nicht erkennbar.

Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktor VA-K2

Nach dem Feldtest des Traktors VA-K wurde dieser durch den Traktor der neuesten Generation Valtra T215 (VA-K2) ersetzt und Letzterer ebenso am Traktorenprüfstand im Neuzustand bei 15 Bh auf die Betriebstauglichkeit mit HVO-Kraftstoff untersucht. Der Traktor VA-K2 besitzt mit Ausnahme des Fahrgetriebes vergleichbare technische Daten wie das Vorgängermodell VA-K.

Der Verlauf der Parameter Motordrehmoment, Leistung an der Zapfwelle, spezifischer Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle mit HVO in Abbildung 48 ist vergleichbar mit dem Betriebsverhalten des Traktors VA-K. Es traten während der Messungen keine Fehlermeldung oder Undichtigkeiten im HVO-Betrieb auf.

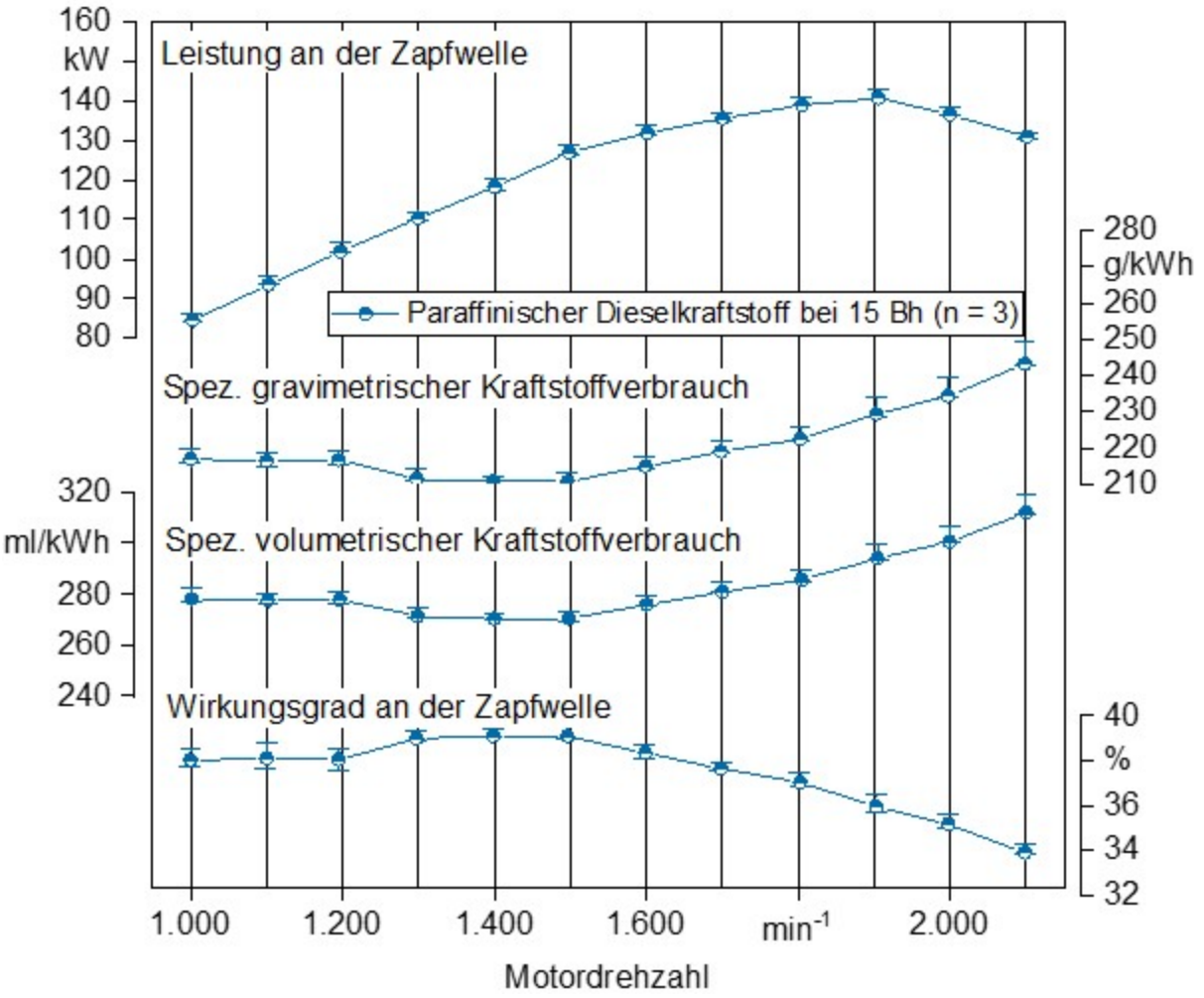


Abbildung 48: Mittelwerte und Spannweiten der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle des Traktors Valtra T215 (VA-K2) beim Betrieb mit HVO

Auch das Emissionsverhalten nach der Abgasnachbehandlung der Traktoren VA-K und VA-K2 ist vergleichbar. Abbildung 49 zeigt, dass die Emissionsgrenzwerte auch beim Traktor VA-K2 deutlich unterschritten werden. Damit kann von einem ordnungsmäßen Betrieb des Motors und der Abgasnachbehandlung mit HVO-Kraftstoff im Neuzustand geschlossen werden. Der Traktor wird seither auf dem Versuchsbetrieb Kringell im Feldtest eingesetzt.

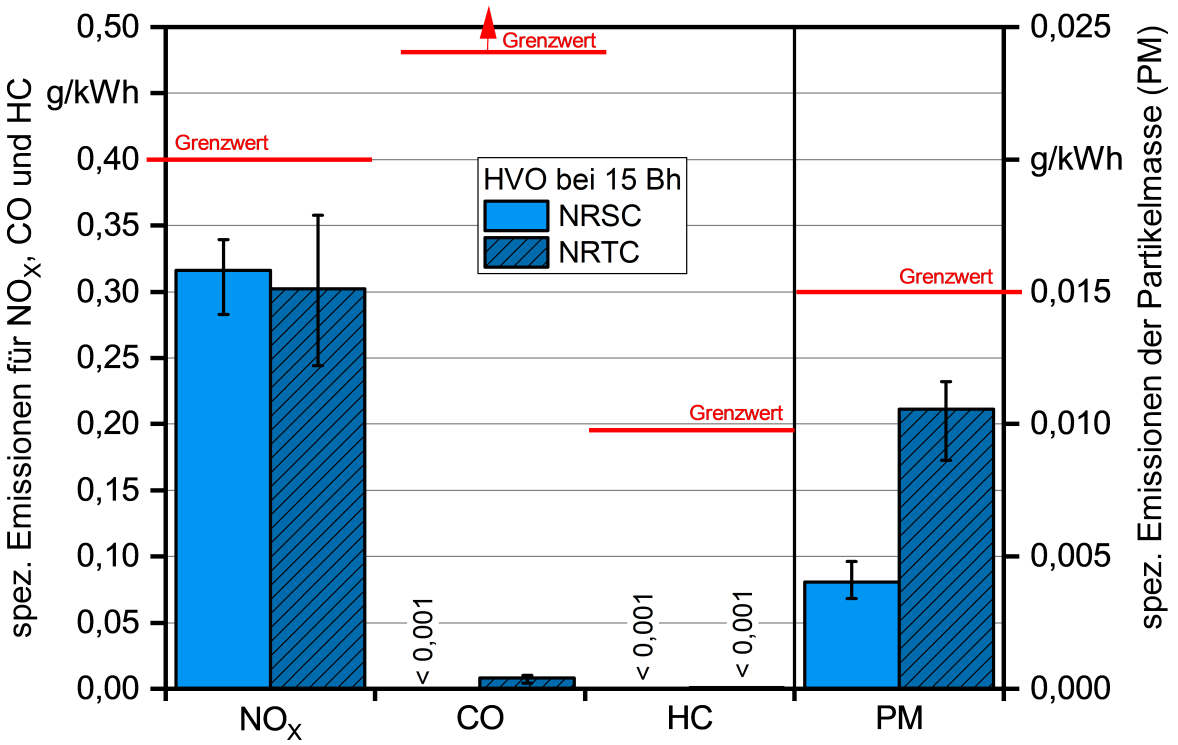


Abbildung 49: NO_X-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Traktors VA-K2 beim NRSC und NRTC nach der AGN im Reinabgas mit paraffinischem Dieselkraftstoff

Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb des Traktors VA-K

Die Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb wurden im weitgehenden Neuzustand (Betriebsstundenzählerstand unter 50 Bh) während Straßenfahrten über eine Distanz von insgesamt ca. 70 km gemessen. Die Einzelmessungen mit DK und HVO dauerten jeweils ca. 1,7 h. Das PEMS wurde dabei am Heckkraftheber des Traktors angebaut, wie die Abbildung 50 (links) zeigt. Eine zweite Messreihe erfolgte mit HVO bei 355 Bh bei der Aussaat von Wintergerste am BaySG-Standort Kringell (Abbildung 50, rechts).

Bei allen Messungen mit DK und HVO waren 100 % der berechneten Messfenster gültig. Für jedes Fenster wird ein Übereinstimmungsfaktor (Conformity Factor, CF) gebildet, der sich aus dem Verhältnis der mittleren Emissionen jedes Fensters (in g/kWh) zu den gültigen Emissionsgrenzwerten für die Messungen im NRSC bzw. NRTC am Prüfstand errechnet. Die Verteilung der Übereinstimmungsfaktoren (CF) für die NO_X-Emissionen ist in Abbildung 51 dargestellt.



Abbildung 50: Messungen der tatsächlichen Abgasemissionen am Traktor VA-K beim Straßentransport (links) und Säen (rechts)

Der Anteil an Fenstern mit geringeren NO_X-Emissionen als der Prüfstandgrenzwert von 0,4 g/kWh (CF = 1) lag beim Straßentransport zwischen 52 und 75 % sowie beim Säen bei 100 %. Bereits bei früheren Untersuchungen an anderen Traktoren wurden überwiegend geringere NO_X-Emissionen bei der Anwendung von Drehzahl- und Drehmomentverläufen aus realen Traktorarbeiten im Vergleich zum Prüfstandgrenzwert festgestellt [32] [30]. Auch der Vergleichsgrenzwert aus der Gesetzgebung schwerer Nutzfahrzeuge, in der 90 % der Emissionswerte unter dem Übereinstimmungsfaktor von 1,5 liegen müssen, wird bei allen Messungen unterschritten.

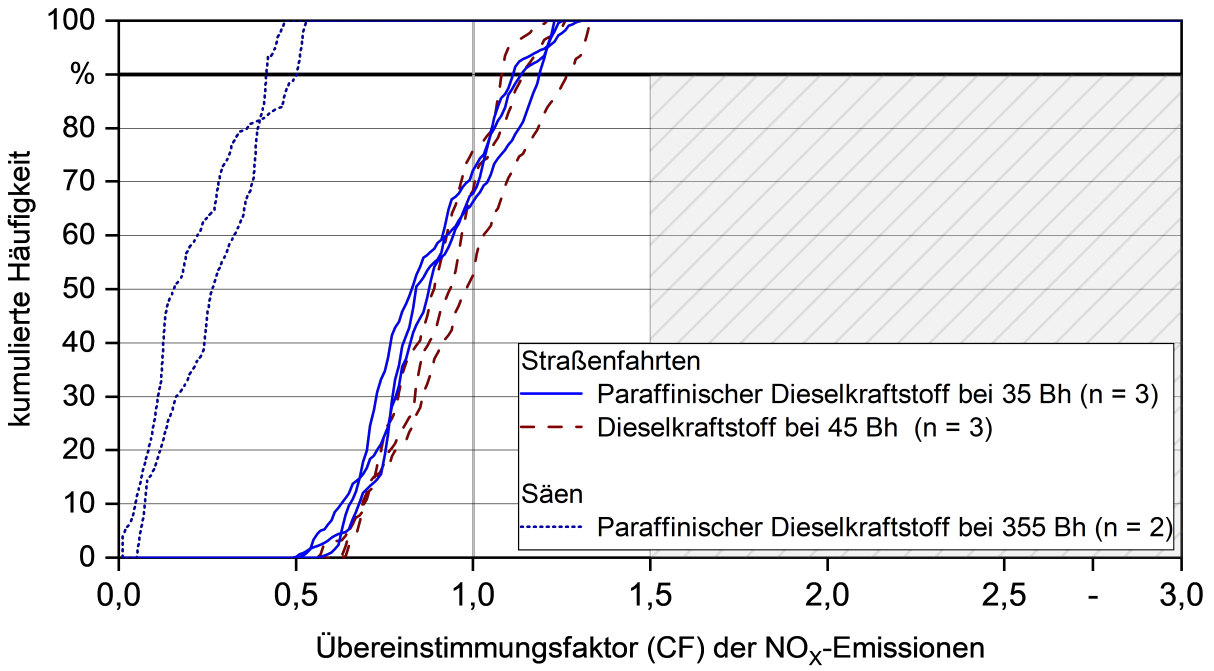


Abbildung 51: Kumulierte Häufigkeit der NO_X-Emissionen im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors VA-K mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff

Die CO- und HC-Emissionen, die in Abbildung 52 und Abbildung 53 dargestellt sind, lagen in allen Messfenstern weit unterhalb der NRMM-Prüfstandgrenzwerte (CF = 1) und belegen somit auch die hohe Wirksamkeit der katalytischen Abgasnachbehandlung im realen Fahrbetrieb. Die Partikelmasse (PM) lag mit einem maximalen CF < 0,01 nahe der Nachweisgrenze, sodass von einer effizienten Partikelabscheidung durch den Partikelfilter ausgegangen werden kann.

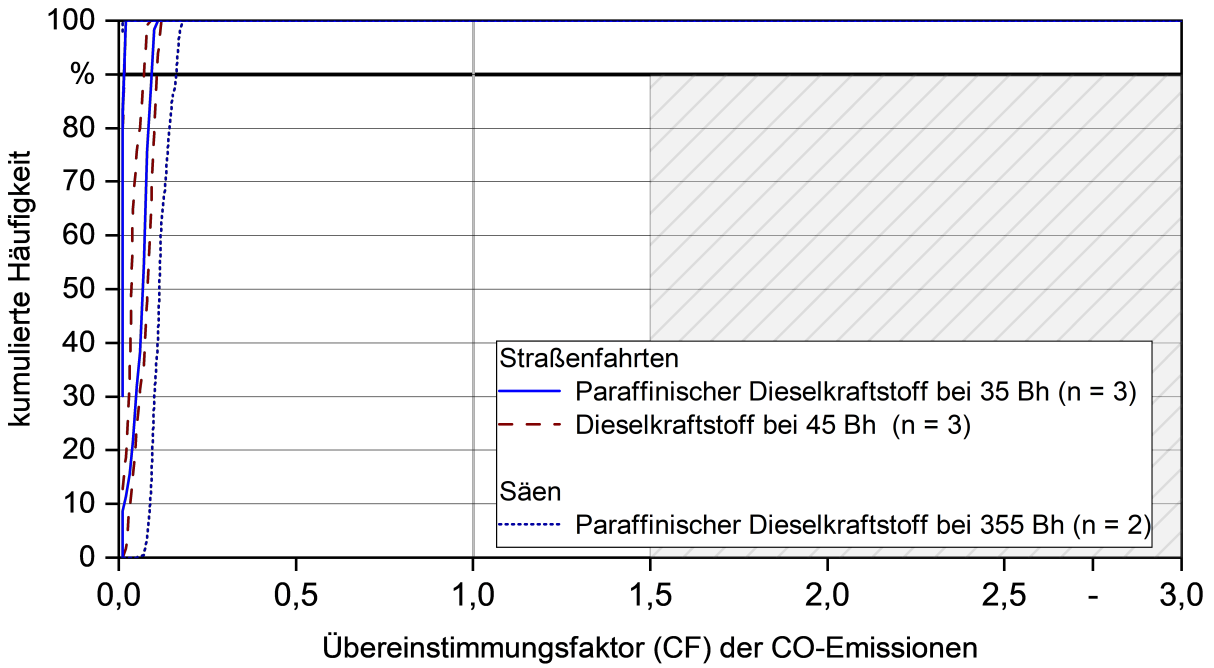


Abbildung 52: Kumulierte Häufigkeit der CO-Emissionen im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors VA-K mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff

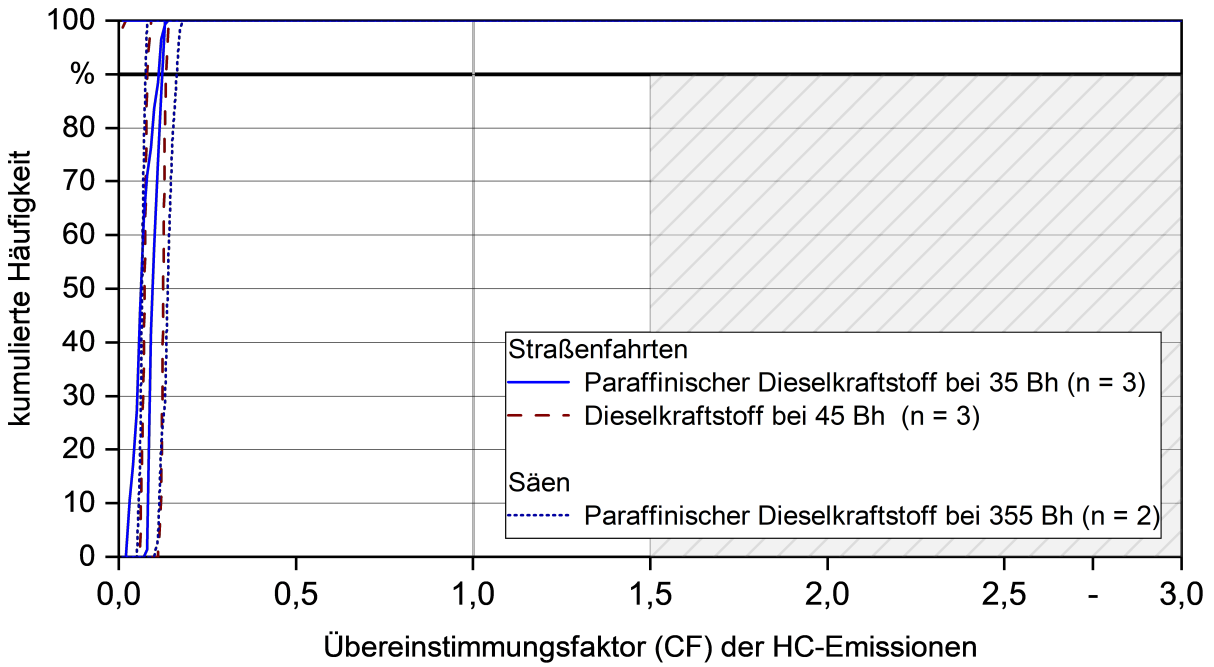


Abbildung 53: Kumulierte Häufigkeit der HC-Emissionen im Verhältnis zum Prüfstandgrenzwert für die einzelnen Messfahrten des Traktors VA-K mit Dieselkraftstoff und paraffinischem Dieselkraftstoff

Insgesamt wirken sich die Kraftstoffstoffunterschiede zwischen DK und HVO bei diesen Straßenfahrten kaum auf das Emissionsverhalten aus und es war bei allen Messungen eine ordnungsgemäße Funktion des Motors sowie der Abgasnachbehandlung gegeben.

6.2.6 John Deere 6250R (JD-M6)

Der John Deere 6250R (JD-M6) wurde im Projekt „Entwicklung und Feldtest eines Abgasstufe V Multi-Fuel-Traktors“ [52] auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff optimiert. Im Projekt KlimaTrak sollte in Abstimmung mit dem Hersteller die Forschungsfrage geklärt werden, ob dieser aktuelle Traktorentyp der Abgasstufe V im Rapsölbetrieb auch ohne aktive Regeneration dauerhaft funktionstüchtig bleibt. Am Traktor wurde daher die aktive Regeneration des Partikelfilters deaktiviert. Stattdessen soll allein durch die passive Regeneration ein Fließgleichgewicht von abgeschiedener und oxidierender Pflanzenölrußmenge im Partikelfilter erreicht werden. Die Aufzeichnung des Abgasgegendrucks am Partikelfilter bei den Leistungsmessungen am Traktorenprüfstand soll Aufschluss über den Beladungszustand des Partikelfilters geben. Die Abbildung 54 zeigt die Messwerte mit Rapsölkraftstoff.

Der Traktor JD-M6 zeigte über 865 Bh im Feld in Kombination mit der passiven Regeneration des Partikelfilters und dem Betrieb mit Rapsölkraftstoff bisher keine Beeinträchtigung des Motorbetriebs. Beim Traktor war ein konstantes Leistungsverhalten bei gleichbleibendem Wirkungsgrad festzustellen.

Der Abgasgegendruck bewegt sich bei den Messungen in einem Bereich von ca. 75 bis 175 mbar. Erst ein Abgasgegendruck über 200 bis 300 mbar wird als problematisch für die Verbrennung im Motor erachtet. Dies bedeutet, dass in diesem Versuch die reine passive Partikelfilterregeneration, die bisher nur bei Rapsöltraktoren der Abgasstufen IIIB und IV (JD-N, JD6R-B, JD-Pu, JD-Ka, JD-P und JD-P4) erfolgreich im Feld praktiziert wird, auch bei einem Traktor der Abgasstufe V funktioniert.

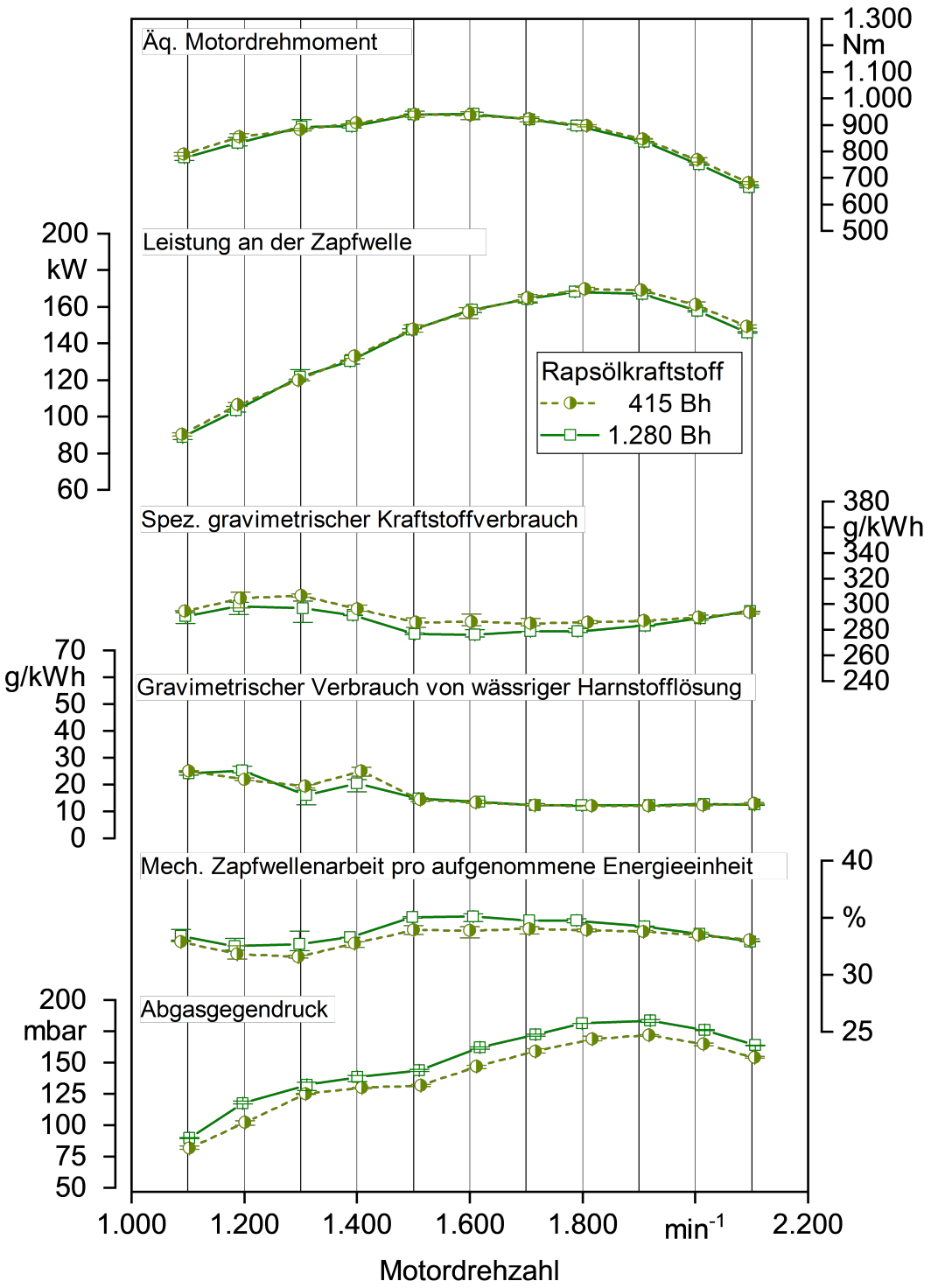


Abbildung 54: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Verbrauchs an Harnstofflösung, des Wirkungsgrads an der Zapfwelle sowie des Abgasgegendrucks des Traktors John Deere 6250R (JD-M6) beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Abbildung 55 zeigt, dass die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe V im Betrieb mit Rapsölkraftstoff im stationären Betrieb immer und im transienten Betrieb überwiegend unterschritten werden. Der NO_X-Messwert im NRTC liegt auf Höhe des Grenzwerts für die Typgenehmigung am Motorenprüfstand. Wird richtigerweise der Unterschied zwischen der Kurbelwellenarbeit am Motorprüfstand und der Zapfwellenarbeit am Traktorenprüfstand in Höhe von 10 bis 20 % berücksichtigt, erfüllen alle Messwerte (inkl. der NO_X-Emissionen im NRTC) die Emissionsanforderungen der Abgasstufe V.

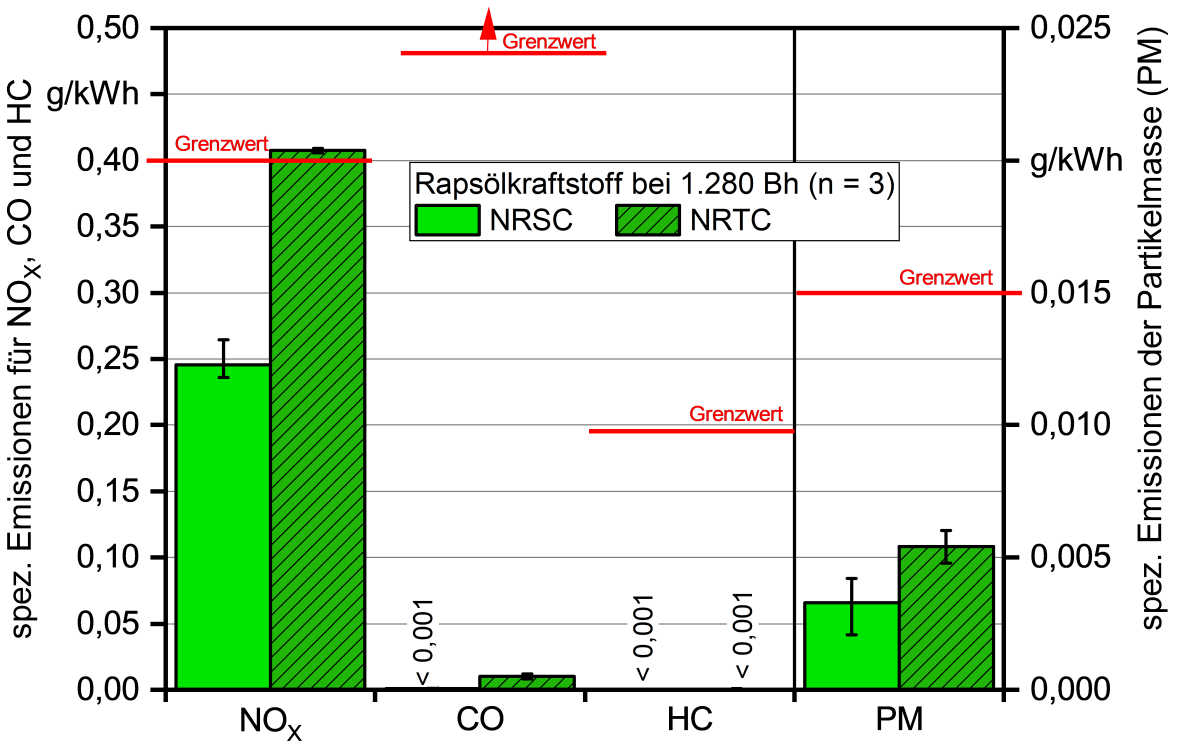


Abbildung 55: NO_X-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Traktors JD-M6 beim NRSC und NRTC nach der AGN im Reinabgas mit Rapsölkraftstoff

6.2.7 John Deere 1470 Harvester (JD-SF)

Im November 2021 wurde die Funktionstüchtigkeit der Abgasgasnachbehandlung des Harvesters bei einem Betriebsstundenzählerstand von 7.745 Bh im realen Betrieb durch portable Emissionsmessungen überprüft. Die Vergleichsdaten früherer Messreihen stammen aus dem Projekt im Rapster [44], in dessen Rahmen das Emissionsverhalten des Harvesters mit Dieselkraftstoff im Juni 2017 bei 1.300 Bh, mit Rapsölkraftstoff im September 2017 bei 1525 Bh und mit Rapsölkraftstoff im September 2018 bei 3.250 Bh ermittelt wurde.

Die Ergebnisse werden im Folgenden in Form von Übereinstimmungsfaktoren der gültigen Mittelungsfenster dargestellt, wie in der EU-Verordnung 2017/655 definiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Harvester mit einem Motor der Abgasstufe IV ausgestattet ist,

aber die Prüfung der gasförmigen Emissionen im realen Betrieb erst ab Abgasstufe V vorgeschrieben ist.

In Abbildung 56 sind die Häufigkeitsverteilungen der NO_X-Übereinstimmungsfaktoren (CF) für jede Einzelmessung dargestellt. Unabhängig vom Kraftstoff und vom Betriebsstundenstand des Harvestermotors liegen alle Übereinstimmungsfaktoren der Einzelmessungen deutlich unter 1,0. Es zeigt sich, dass das Abgasnachbehandlungssystem zur Reduktion der Stickstoffoxidemissionen unabhängig vom Kraftstoff und der bisher absolvierten Betriebsdauer von 7.745 Bh zuverlässig funktioniert.

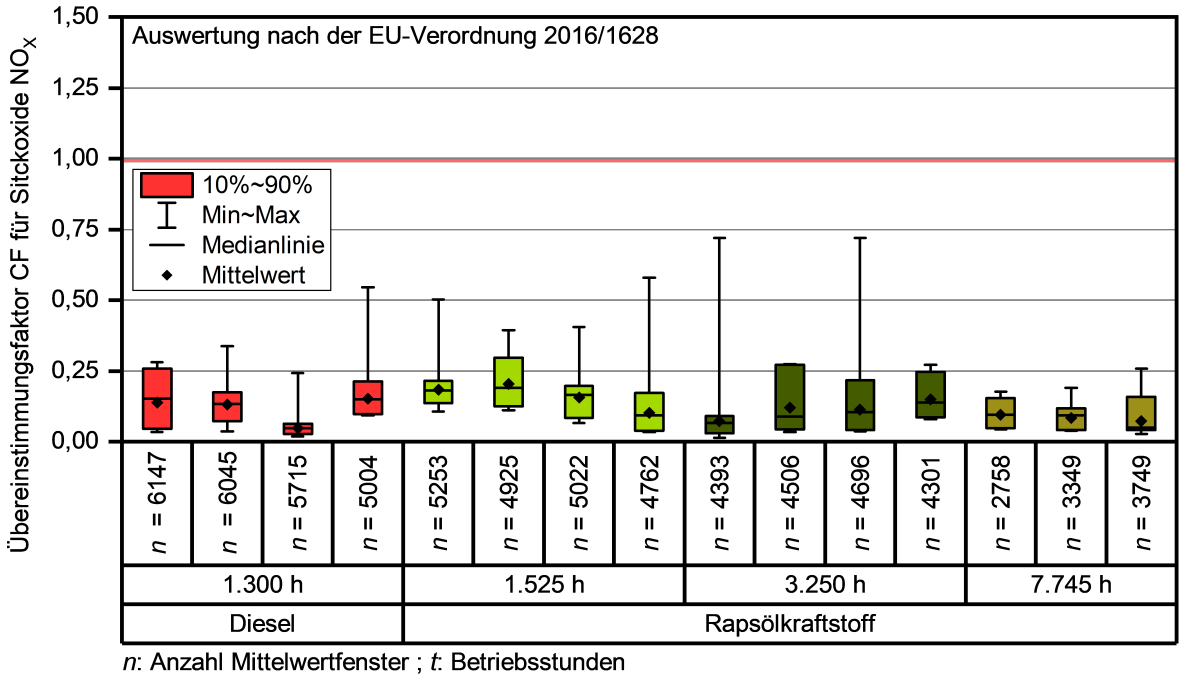


Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Übereinstimmungsfaktoren für Stickstoffoxide der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz des Harvesters John Deere 1470 (JD-SF) im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster)

Die Häufigkeitsverteilungen der Übereinstimmungsfaktoren für Kohlenstoffmonoxid sind in Abbildung 57 dargestellt. Die 90. Perzentile der Übereinstimmungsfaktoren für Kohlenstoffmonoxid der Messung mit Diesel- und Rapsölkraftstoff bei 1525 h unterscheiden sich nicht signifikant. Bei der Messung bei 3.250 h und 7.750 Bh ist ein Anstieg der CO-Emissionen bei zunehmender Betriebsstundenanzahl erkennbar. Dies kann neben den schwankenden Umgebungsbedingungen möglicherweise auf eine Alterung des Oxidationskatalysators zurückgeführt werden. Alle ermittelten Übereinstimmungsfaktoren der Mittelungsfenster liegen auch nach ca. 75 % der Lebenszeit der Abgasnachbehandlung unter 0,5 und damit deutlich unter den Anforderungen der Abgasstufe IV am Motorenprüfstand.

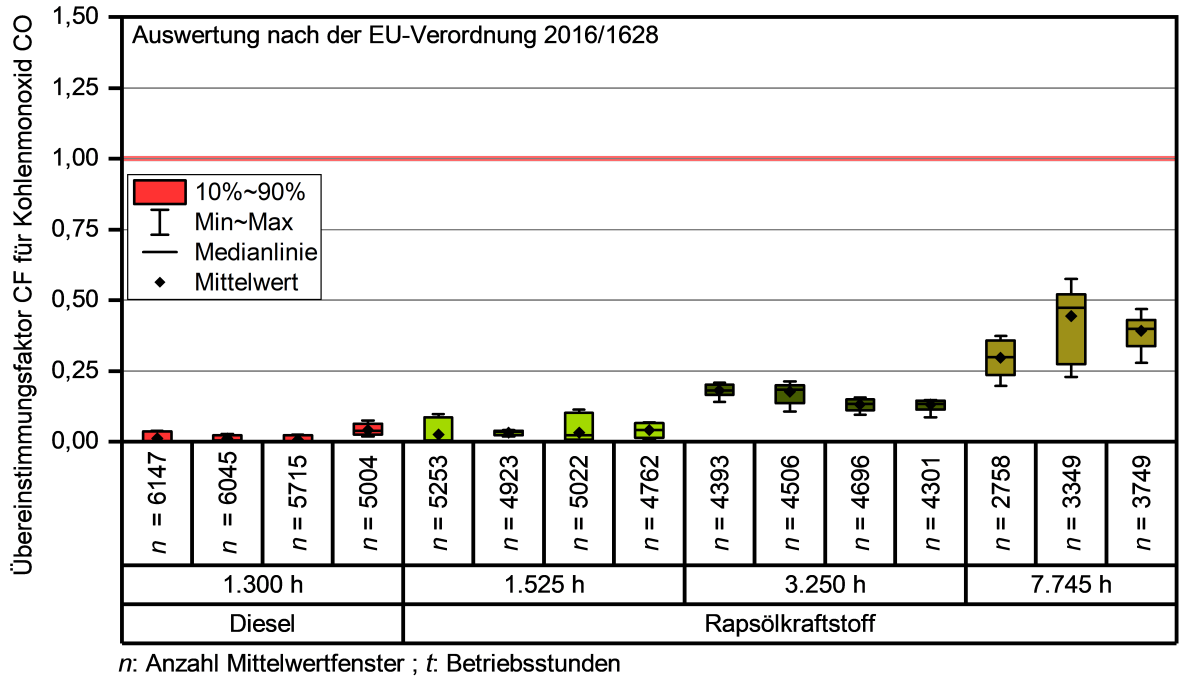


Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Übereinstimmungsfaktoren für Kohlenstoffmonoxid der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz des Harvesters John Deere 1470 (JD-SF) im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster)

Die Übereinstimmungsfaktoren der Kohlenwasserstoffemissionen sind in Abbildung 58 aufgeführt. Mit Ausnahme einer Wiederholungsmessung mit Rapsölkraftstoff bei 1.525 h liegen auch hier alle Übereinstimmungsfaktoren der Mittelungsfenster unter 1,0 und das 90. Perzentil aller Messungen unter 0,75. Bei der Messung mit Dieselkraftstoff bei 1.300 h und der Messung mit Rapsölkraftstoff bei 3.250 h sind sehr niedrige CF unter 0,15 festzustellen und auch die Mittelwerte der 90. Perzentile dieser Messungen unterscheiden sich nicht signifikant. Auffällig ist die Messung bei 1.525 h. Hier unterscheiden sich Median und Mittelwert der Übereinstimmungsfaktoren der Mittelungsfenster deutlich. Eine Analyse des Verlaufs der Kohlenwasserstoffemissionen ergab, dass in regelmäßigen Abständen kurze Peaks von wenigen Sekunden mit höheren Konzentrationen zu beobachten waren. Diese resultieren aus einem Kraftstoffeintrag durch die separate Einspritzdüse im Abgasstrang zur Regenerierung des Abgasnachbehandlungssystems, die in regelmäßigen Abständen geöffnet wird, um ein Verkleben zu verhindern. Bei den Messungen bei 1.300 h und 3.250 h lagen dabei die Spitzenkonzentrationen bei etwa 20 ppm bis 100 ppm, während bei den Messungen bei 1.525 h für kurze Zeit Spitzenkonzentrationen bis zu 1.000 ppm festzustellen waren. Ursache war eine Fehlprogrammierung des Motorsteuergeräts, wodurch die Spülzeiten bei 1.525 h verlängert waren. Dies wurde korrigiert, nachdem der Fehler gefunden wurde. Die Unterschiede bei den Übereinstimmungsfaktoren der Kohlenwasserstoffemissionen sind somit nicht auf den Kraftstoff, die motorische Verbrennung oder die Funktion des Abgasnachbehandlungssystems an sich zurückzuführen, sondern vielmehr auf die fehlerhafte Einstellung der Regenerationseinrichtung des Abgasnachbehandlungssystems.

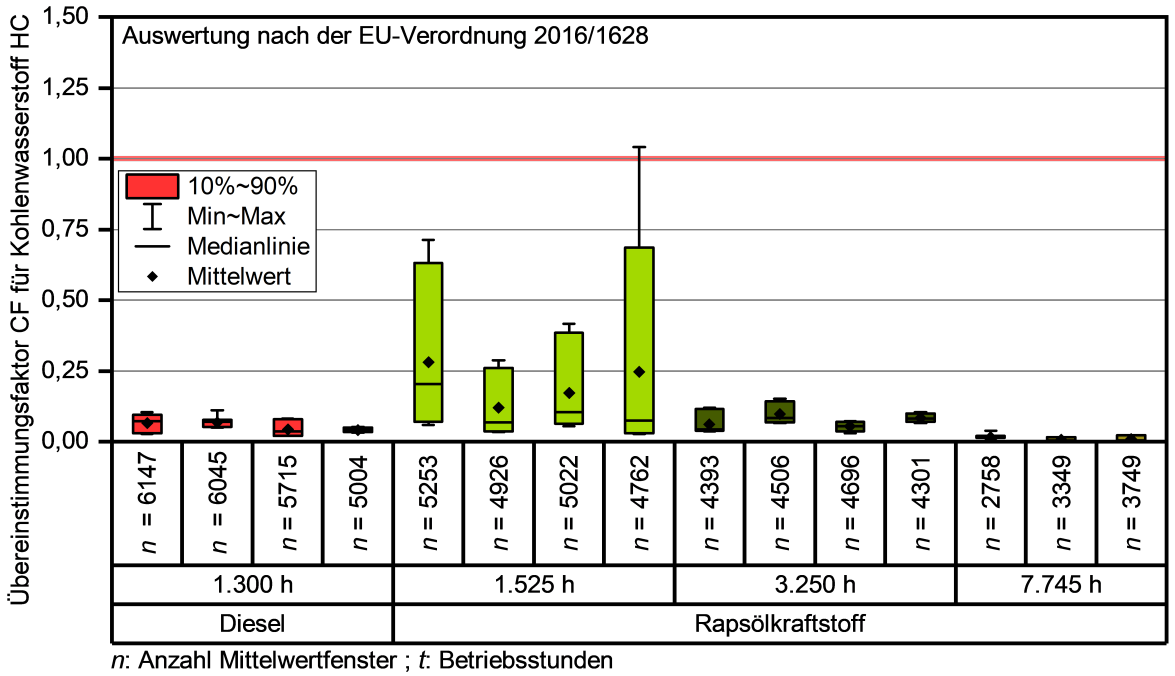


Abbildung 58: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Übereinstimmungsfaktoren für Kohlenwasserstoffe der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz des Harvesters John Deere 1470 (JD-SF) im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster)

Bei der Typgenehmigung am Motorenprüfstand für die Abgasstufe V wurde ein Partikelanzahlgrenzwert von 10^{12} Partikel pro kWh eingeführt. Die Datenbasis zu Partikelanzahlemissionen im realen Fahrbetrieb ist folglich noch gering. Der Harvester wurde bei 7.745 Bh beim Holzeinschlag hinsichtlich der Partikelanzahlemissionen untersucht. Die Häufigkeitsverteilungen der Übereinstimmungsfaktoren für Partikelanzahlemissionen sind in Abbildung 59 dargestellt. Alle Übereinstimmungsfaktoren der Messfenster liegen im Rapsölkraftstoffbetrieb auf einem sehr niedrigen Niveau unter 0,1 und damit deutlich unter dem Prüfstandgrenzwert. Dies zeigt, dass der Partikelfilter des rapsöltauglichen Harvesters noch einwandfrei funktioniert und keine Schäden über die Betriebszeit aufgetreten sind.

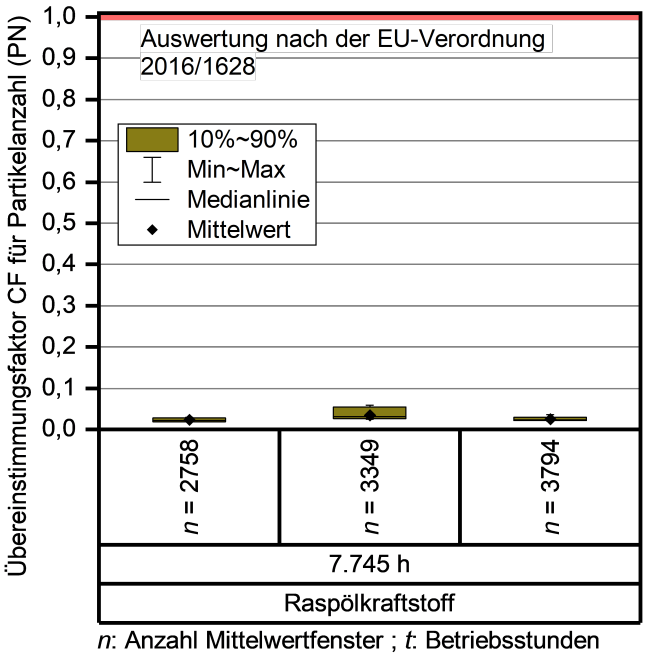


Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Übereinstimmungsfaktoren für Partikelanzahl (PN) der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen des Harvesters John Deere 1470 (JD-SF) im realen Einsatz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster)

Insgesamt bleibt festzustellen, dass der Harvester im realen Betrieb auch nach einer Betriebszeit von 7.745 h die Anforderungen der Abgasstufen IV und V für die gasförmigen Emissionen im Betrieb mit Rapsölkraftstoff einhält.

6.2.8 Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F)

Im Jahr 2021 wurde der Pflanzenöltraktor Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F) im Zuge des Klimaschutzprogramms von den Bayerischen Staatsgütern für den Standort Freising beschafft. Der Traktor wurde vor der Auslieferung mit einem Zwei-Tank-Kraftstoffsystem der Fa. bioltec ausgestattet. Das bioltec-System sorgt vollautomatisch dafür, dass dem Motor je Betriebszustand der optimale Kraftstoff bzw. das optimale Kraftstoffgemisch zugeführt wird. Dabei wird der Motor überwiegend mit Rapsölkraftstoff angetrieben, nur in Leerlauf- und Teillastzuständen wird Dieselkraftstoff zugemischt. Der Traktor wird nach dem ersten Feldeinsatz bei ca. 150 Bh am TFZ auf das Leistungs- und Emissionsverhalten geprüft.

Leistung, Kraftstoffverbrauch sowie Wirkungsgrad. In Abbildung 44 ist der Verlauf der Parameter Motordrehmoment, Leistung an der Zapfwelle, spezifischer Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle mit Diesel- und Rapsölkraftstoff zu sehen.

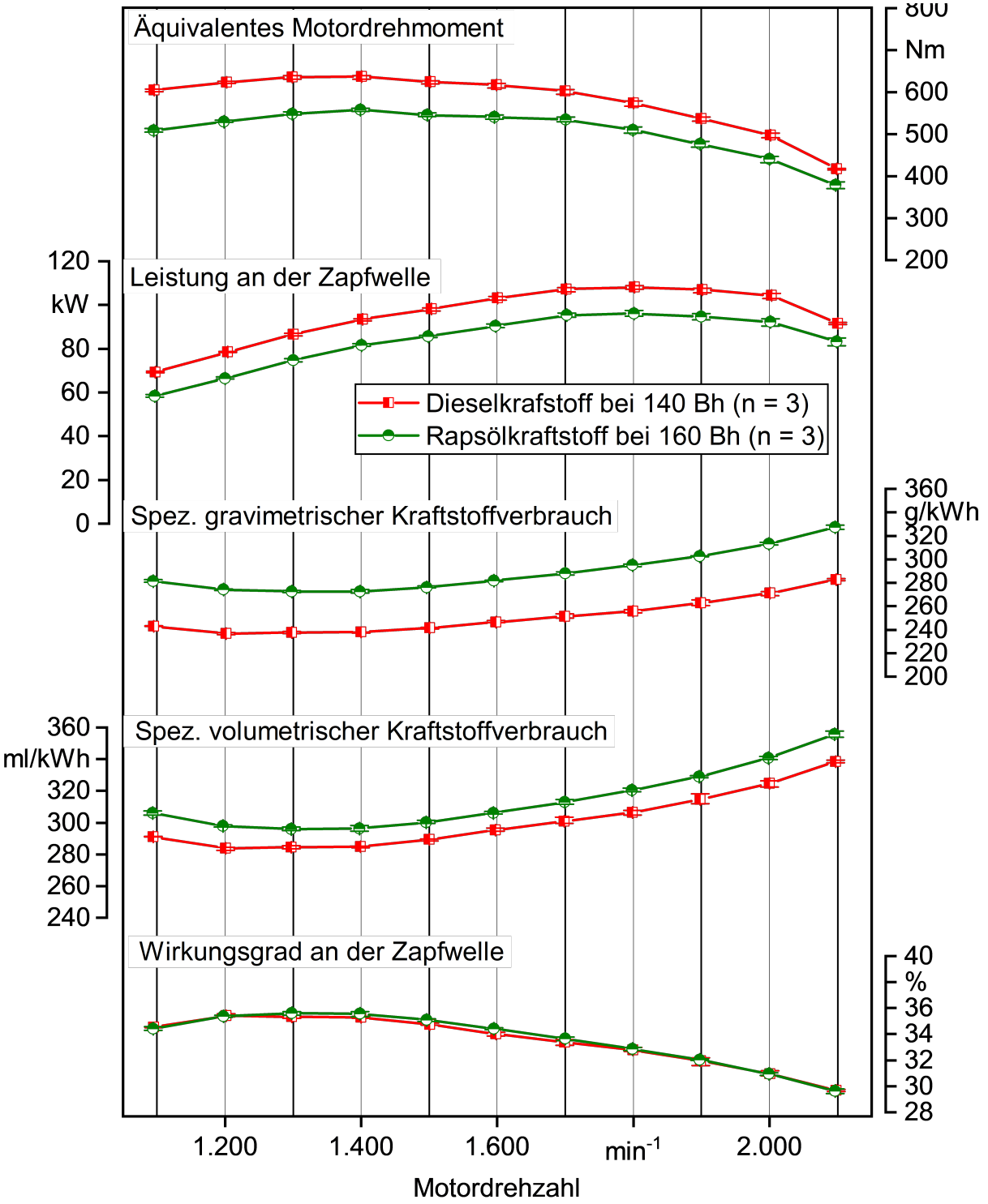


Abbildung 60: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs sowie des Wirkungsgrads an der Zapfwelle am Traktor DE-F mit Diesel- und Rapsölkraftstoff

Mit R100 ist das äquivalente Motordrehmoment des Traktors über den gesamten Drehzahlbereich um ca. 14 % geringer als mit DK. Daraus resultiert auch die geringere Leistung des Traktors mit R100 im Vergleich zu DK.

Die Variationen im Leistungsverhalten sind auf die zugeführten unterschiedlichen Brennstoffenergiemengen zurückzuführen, die neben der Dichte und dem Heizwert auch auf das unterschiedliche Verhalten von R100 und DK im Einspritzsystem des Motors zurückgeführt werden können.

Der spezifische volumetrische Kraftstoffverbrauch ist mit R100 um ca. 4 % größer als mit DK. Ein Vergleich des Verhältnisses von abgegebener Zapfwellenleistung zu zugeführter Brennstoffleistung ergibt, dass der mittlere Wirkungsgrad unter Volllast mit Rapsöl (33,6 %) und mit Diesel (33,5 %) annähernd gleich ist.

Prüfzyklus-Emissionen

Die spezifischen Emissionen im NRSC und NRTC sind in Abbildung 61 im Reinabgas (nach AGN) dargestellt. Der eingezeichnete Grenzwert bezieht sich auf die EU-Verordnung 2016/1628.

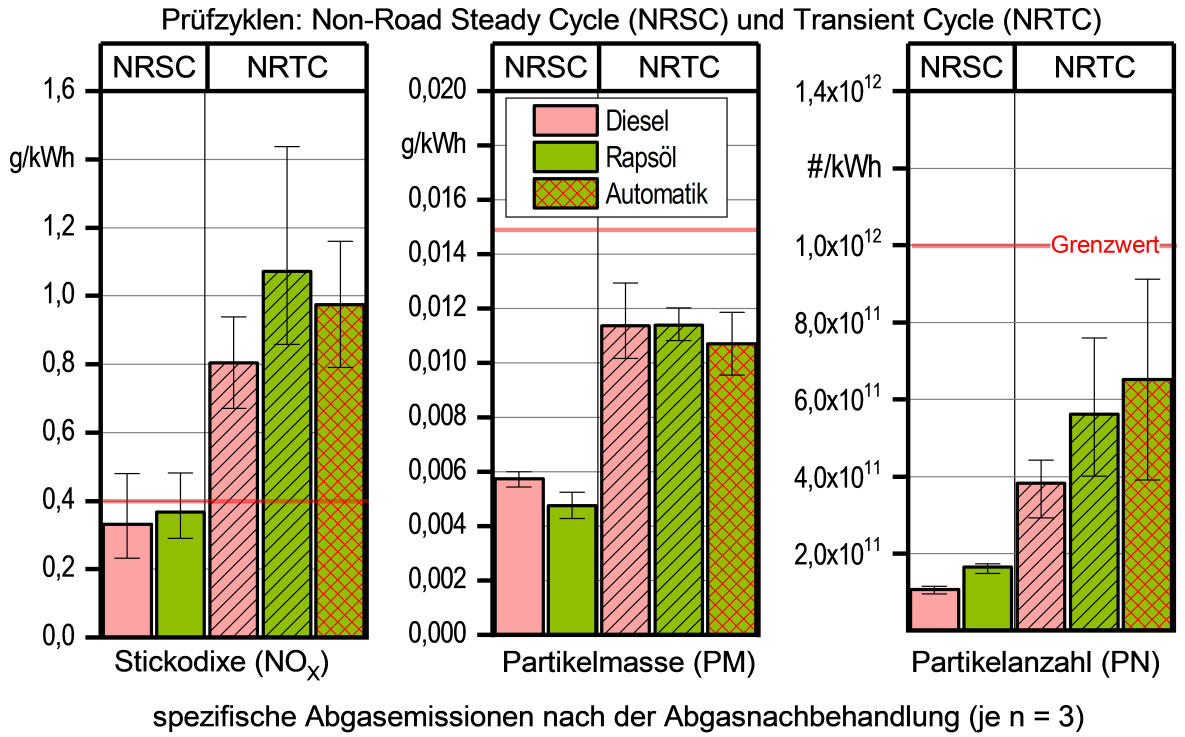


Abbildung 61: NO_X-, PM- und PN-Emissionen des Traktors DE-F beim NRSC und NRTC nach der AGN mit Diesel- und Rapsölkraftstoff

Die Emissionen wurden in den Messreihen des NRSC bedingt durch das SCR-System, den Oxidationskatalysator und den Partikelfilter auf ein geringes Niveau reduziert. Die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe V für PM von 0,015 g/kWh, CO von 3,5 g/kWh und HC von 0,19 g/kWh werden deutlich unterschritten. Die CO- und HC-Emissionen sind bei allen Messungen nahe der Nachweisgrenze (daher nicht abgebildet). Auch der NO_X-Emissionsgrenzwert von 0,40 g/kWh wurde im NRSC mit 0,33 ± 0,13 g/kWh (R100) und 0,36 ± 0,08 g/kWh (DK) im Mittel unterschritten.

Generell fallen im NRTC aufgrund des transienten Drehzahl- und Drehmomentverlaufs, des höheren Kaltstartanteils sowie der geringeren mittleren Motorauslastung die Emissionen höher aus als im NRSC. Im NRSC hingegen begünstigt die hohe mittlere Motorauslastung höhere Verbrennungstemperaturen und damit die Entstehung von NO_X-Emissionen. Auch im NRTC konnten die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe V für PM, PN, CO und HC deutlich unterschritten werden. Einzig die NO_X-Emissionen im NRTC lagen bei 1,07 ± 0,26 g/kWh mit Rapsölkraftstoff und bei 0,80 ± 0,11 g/kWh mit Dieselkraftstoff deutlich über dem Grenzwert von 0,40 g/kWh. Die Daten wurden dem Motor- und Traktorenhersteller zur Fehlersuche übermittelt.

Insgesamt beeinflusste die Art des Prüfzyklus das Emissionsverhalten meist stärker als die Wahl der Kraftstoffsorte. Der Einsatz von Rapsöl- anstelle von Dieselkraftstoff bewirkte keine signifikanten Änderungen im Emissionsverhalten.

Fazit

Motor, Abgasnachbehandlung und Kraftstoffsystem funktionierten bei den Leistungs- und Emissionsmessungen des Pflanzenöltraktors Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F) am Traktorenprüfstand störungsfrei. Im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff ist der Wirkungsgrad des Traktormotors gleich hoch. Aufgrund abweichender Kraftstoffeigenschaften (Heizwert, Dichte, Viskosität) von Rapsöl- im Vergleich zum Dieselkraftstoff ergibt sich unter Volllast im Mittel eine niedrigere Leistung an der Zapfwelle von ca. 14 % und ein höherer spezifischer volumenbezogener Verbrauch von ca. 4 %. Der Einsatz von Rapsöl- anstelle von Dieselkraftstoff zeigte keine signifikanten Änderungen im Emissionsverhalten. Die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe V werden mit Diesel- und Rapsölkraftstoff gemittelt aus drei Wiederholungen im stationären Betrieb immer und im transienten Betrieb überwiegend (mit Ausnahme von NO_X) eingehalten.

6.2.9 Fendt 211 V Vario (FE-V)

Der Schmalspurtraktor Fendt 211 V Vario wurde von der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) im Jahr 2021 neu beschafft. Für diesen Abgasstufe-V-Motor liegen laut Hersteller und Händler noch keine Erfahrungen im Biokraftstoffbetrieb vor. In einer Versuchsreihe am Traktorenprüfstand mit den Kraftstoffen Dieselkraftstoff (DK), Biodieselkraftstoff (B100) und paraffinischer Dieselkraftstoff (HVO) sollte untersucht werden, ob Motor und Abgasnachbehandlung mit allen Kraftstoffoptionen ordnungsgemäß funktionieren.

In Abbildung 62 sind die Ergebnisse der Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktor Fendt 211 V Vario mit den Kraftstoffen Diesel, HVO und Biodiesel nach „OECD Standard Code 2“ am Traktorenprüfstand dargestellt.

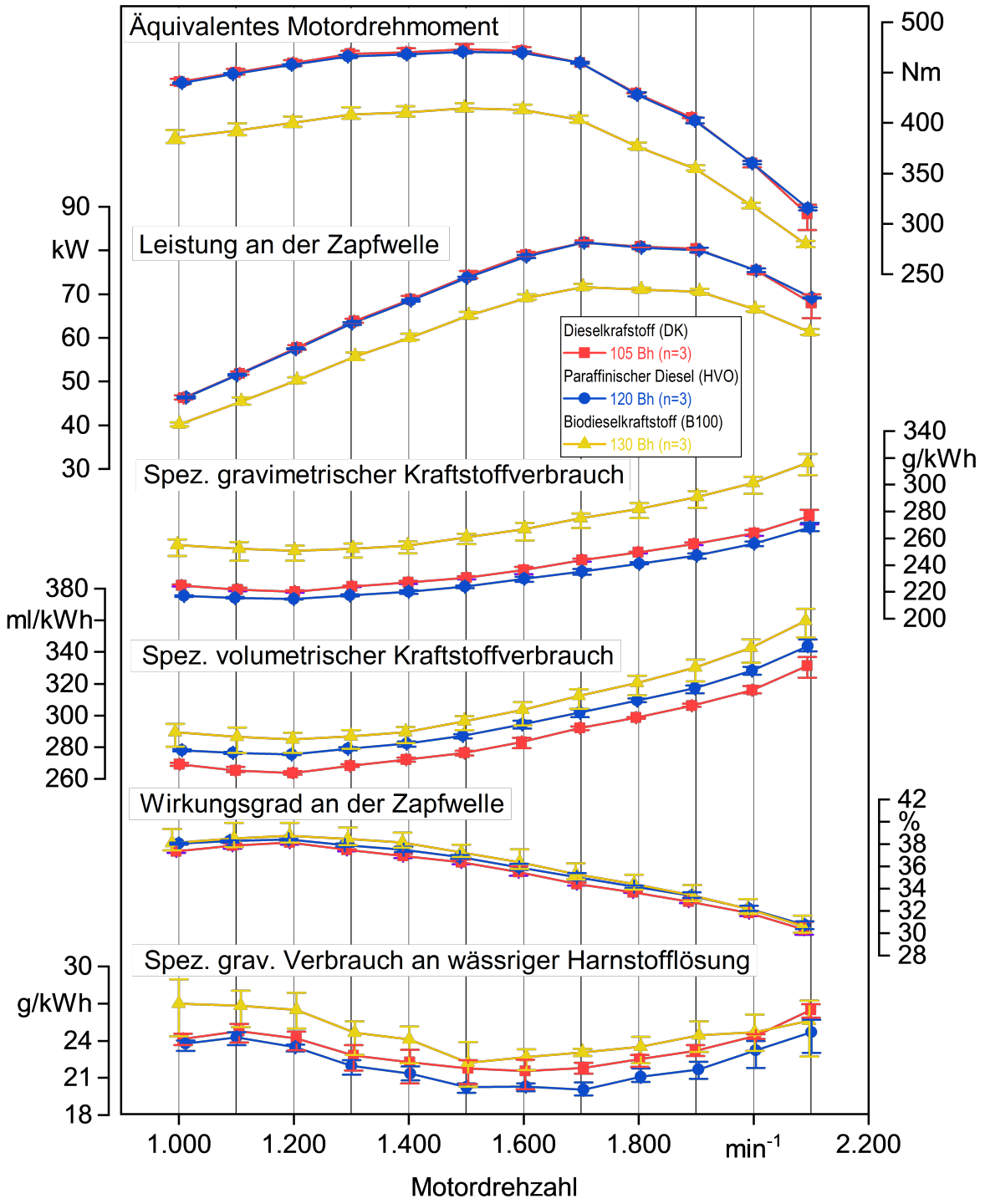


Abbildung 62: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Wirkungsgrads an der Zapfwelle sowie des Verbrauchs an Harnstofflösung des Traktors Fendt 211 Vario im Betrieb mit DK, HVO und B100

Die Drehmomente weichen an der Zapfwelle bei einem Betrieb mit Diesel und HVO um maximal ± 0,5 % voneinander ab. Bei den Messungen am Fendt 211 V Vario zeigt sich im Durchschnitt ein um 1,3 % höherer Wirkungsgrad bei einem Motorbetrieb mit HVO gegenüber der Dieselmessung. Verglichen mit Diesel wirken beim Einsatz von Biodiesel im Mittel um 12 % geringere Drehmomente an der Zapfwelle. Diese Beobachtung lässt sich auf einen um 8,7 % geringeren volumenbezogenen Heizwert von Biodiesel im Vergleich zu Diesel zurückführen.

Im Mittel werden um 3,0 % weniger spezifische Kraftstoffmasse und um 3,8 % mehr spezifisches Kraftstoffvolumen als bei einem Betrieb mit fossilem Diesel verbraucht. Biodiesel besitzt einen um 13,9 % geringeren gravimetrischen und einen um 8,7 % niedrigeren volumetrischen Heizwert als Diesel. Dadurch wird durchschnittlich um 13,3 % mehr spezifische Kraftstoffmasse und um 7,5 % mehr spezifisches Kraftstoffvolumen als bei einem Betrieb mit fossilem Diesel verbraucht.

In Abbildung 63 werden die NO_X-, PM- und PN-Emissionen des Traktors im Non-Road Steady Cycle (NRSC) und Non-Road Transient Cycle (NRTC) näher betrachtet. Insgesamt werden die Grenzwerte mit allen Kraftstoffen unterschritten.

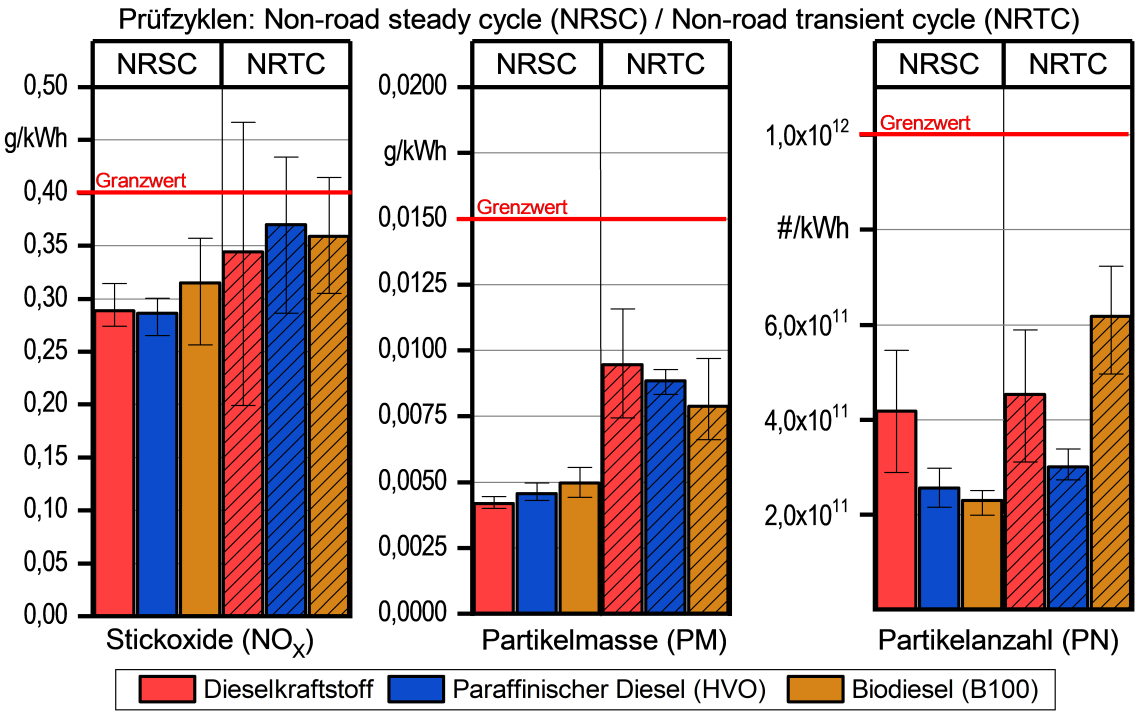


Abbildung 63: NO_X-, PM-, und PN-Emissionen des Traktors Fendt 211 V Vario beim NRSC und NRTC nach der AGN im Betrieb mit DK, HVO und B100

Die Art des Prüfzyklus beeinflusst auch bei diesem Traktor das Emissionsverhalten stärker als die Wahl der Kraftstoffsorte. Der NRTC weist bei allen gemessenen Abgaskomponenten höhere Werte gegenüber dem NRSC auf. Dies ist auf den Kaltstartanteil im NRTC und den transienten Motorbetrieb zurückzuführen.

Insgesamt zeigen die Messergebnisse, dass der Motor und die Abgasnachbehandlung des Traktors der Abgasstufe V mit den Biokraftstoffen B100 und HVO ordnungsgemäß funktionieren. Es ist daher ein Feldtest mit B100 bei diesem Traktor geplant. Nach der Umstellung von Diesel auf B100 im Feldeinsatz wird das Langzeitbetriebsverhalten des Traktors weiter untersucht.

6.3 Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien

Nachfolgend werden die wichtigsten marktverfügbaren alternativen Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen miteinander verglichen: der Verbrennungsmotor, der mit Rapsölkraftstoff (R100), Biodiesel (B100), Biomethan (CNG) oder hydriertem Pflanzenöl (HVO) befeuert wird, sowie der Elektromotor, der mit erneuerbarem Strom aus Batterien angetrieben wird. Für den Vergleich werden die Vor- und Nachteile beider Technologien betrachtet. Als Grundlage dafür dienen unter anderem der Stand der Technik (Kapitel 4), die Feldtesterfahrungen sowie die Leistungs- und Emissionsmessungen (Kapitel 6.1 und 6.2), die im Rahmen dieses Vorhabens sowie früherer Untersuchungen erhoben wurden. Die Auswahl der Antriebssysteme und der Vergleichskriterien erfolgt in Anlehnung an die KTBL-Schrift 519 „Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen“ [47], in der die unterschiedlichen Antriebstechnologien umfassend beschrieben und bewertet werden. Die Ergebnisse des Systemvergleichs sind zusammenfassend in Tabelle 16 dargestellt. Darin werden die alternativen Antriebsoptionen gegenübergestellt und anhand elf verschiedener Kriterien in fünf Abstufungen von „sehr positiv“ über „positiv“, „neutral“ und „negativ“ bis hin zu „sehr negativ“ beurteilt.

Tabelle 16: Bewertung der alternativen Antriebssysteme Verbrennungsmotor mit Rapsölkraftstoff (R100), Biodiesel (B100), Biomethan (CNG) und paraffinischem Diesel (HVO) sowie batterieelektrischer Antrieb (Elektro) im Vergleich zu Dieselkraftstoff (DK)

Kriterien	DK	HVO	B100	R100	CNG	Elektro
Kraftstoffnormung	↑	↑	↑	↑	↑	n. z.
Energiedichte und Reichweite	↑	↑	↑	↑	→	↘
Kraftstoff-/Stromverfügbarkeit und -preis	↑	→	↗	↗	↗	↑
Neumaschinen am Markt	↑	↗	↘	↘	→	→
Kompatibilität mit Bestandsmaschinen	↑	↗	↗	→	↘	↘
Einsatzsicherheit und Wartung	↗	↗	↗	↗	→	↑
Lokale Schadstoffemissionen	↗	↗	↗	↗	↗	↑
Potenzial THG-Minderung	↓	↑	↑	↑	↑	↑
Regionale Wertschöpfung/Koppelprodukte	↓	↘	↗	↑	↑	↗
Boden- und Gewässerschutz	↓	→	→	↑	↑	↑
Investitionskosten	↑	↑	↑	↗	→	→

↑ sehr positiv ↗ positiv → mittel/neutral ↘ negativ ↓ sehr negativ n. z.= nicht zutreffend

Kraftstoffnormung: Für alle hier betrachteten flüssigen und gasförmigen Kraftstoffe sind Anforderungsnormen verfügbar, die die erforderlichen Mindestqualitäten festlegen. Land- und Forstwirte können also Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 (R100), Biodiesel nach DIN EN 14214 (B100), Biomethan nach DIN 51624 (CNG) sowie paraffinischen Diesel nach DIN EN 15940 (HVO) als Reinkraftstoffe im Handel beziehen. Kraftstoffanalysen von R100, B100 und HVO, die in diesem Vorhaben durchgeführt wurden, zeigen, dass die Normparameter bei der Lieferung zuverlässig eingehalten werden (siehe Kapitel 6.1.3). Für CNG liegen keine Analysen aus der Praxis vor, da kein Versuchsträger zur Verfügung stand. Das Kriterium „Kraftstoffnormung“ trifft beim Elektroantrieb nicht zu.

Energiedichte und Reichweite: Die flüssigen Kraftstoffe Rapsöl (Heizwert: 34,6 MJ/l), Biodiesel (Heizwert: 32,7 MJ/l) und HVO (Heizwert: 34,4 MJ/l) besitzen eine annähernd so hohe Energiedichte wie Dieselkraftstoff (Heizwert: 35,8 MJ/l). Leistungs- und Verbrauchsmessungen am Traktorenprüfstand bestätigen, dass mit diesen Alternativkraftstoffen gleiche Wirkungsgrade wie im Dieselbetrieb erzielt werden (siehe Kapitel 6.2) und nur geringfügige Mehrverbräuche von meist weniger als 10 % (volumetrisch) hingenommen werden müssen. Mit auf 200 bar verdichtetem Biomethan (CNG) ist dagegen die Reichweite bei gleichem Tankvolumen aufgrund des geringen Heizwerts von 8,1 MJ/l stark reduziert [44]. Wichtig ist deshalb die Nähe zu einer Betankungsmöglichkeit. Bei batterieelektrischen An-

trieben ist die Energiedichte mit ca. 0,5 kWh/l bzw. 1,8 MJ/l [55] am geringsten. Um die gleiche Arbeit wie mit einer Dieselmaschine verrichten zu können, sind trotz des höheren Wirkungsgrads eines Elektromotors Batteriekapazitäten erforderlich, die mindestens zehnmal so viel Volumen benötigen und mehr als zwanzigmal so schwer sind wie die äquivalente Menge an Dieselkraftstoff. Die landwirtschaftlichen Elektrofahrzeuge auf den Versuchsbetrieben im Leistungsbereich von ca. 10 bis 16 kW verfügen laut Aussage der Betreiber über eine ausreichende Reichweite (siehe Kapitel 5.1 und 6.1.2). Rein elektrische Antriebe für Traktoren mit höheren Leistungen (z. B. > 100 kW) sind aktuell nicht verfügbar.

Kraftstoffverfügbarkeit und -preis: Die Pfade zur Bereitstellung von Kraftstoffen, wie R100, B100, CNG und HVO sind weit ausgereift und im kommerziellen Maßstab etabliert. Innerhalb des Untersuchungszeitraums lagen die Preisdifferenzen zwischen Diesel und R100, B100 oder HVO in etwa bei ± 20 Cent/l (ohne Berücksichtigung der Agrardieselrückvergütung). Einzig der HVO-Kraftstoff war am Anfang des Untersuchungszeitraums deutlich mehr als 20 Cent/l teurer als Dieselkraftstoff. Aufgrund der abgelaufenen beihilferechtlichen Genehmigung für Betriebe der Land- und Forstwirtschaft, die Energiesteuer auf R100 und B100 erstattet zu bekommen, ist fossiler Dieselkraftstoff meist die günstigere Kraftstoffoption für die Land- und Forstwirtschaft, da nur für Diesel eine Energiesteuerrückerstattung von 21,48 Cent/l gewährt wird. R100, B100 und HVO werden mit 47,04 Cent/l besteuert. Noch günstiger als Agrardiesel ist Biomethan bzw. CNG. Der durchschnittliche Preis an der Tankstelle in Bayern liegt bei ca. 1,06 €/kg (Quelle: clever-tanken.de, 20.10.2022), dies entspricht 0,022 €/MJ. Im Vergleich dazu liegen die Kosten für Agrar-Dieselkraftstoff bei 1,80 €/l oder 0,050 €/MJ. Allerdings wird die Energiesteuer für CNG ab dem Jahr 2024 schrittweise angehoben (EnergieStG 2018). Die Lieferzeiten für Biokraftstoffe betragen etwa zwei bis drei Wochen, dabei sind Mindestbestellmengen von 2.000 l bis 3.000 l Kraftstoff üblich. Dieselkraftstoff ist meist schneller lieferbar. Regenerativer Strom kann von mehreren Anbietern bezogen werden oder ist direkt auf den land- und forstwirtschaftlichen Betrieben verfügbar. Für HVO gibt es in Deutschland keine Produktionskapazitäten und dieser Kraftstoff muss daher importiert werden. HVO darf entsprechend der 10. BImSchV [10] zudem nicht an öffentlichen Tankstellen in Verkehr gebracht werden.

Neumaschinen am Markt/Kompatibilität mit Bestandsmaschinen: Neumaschinen der aktuellen Abgasstufe V sind außer für Diesel derzeit nur für die Kraftstoffvarianten CNG und HVO erhältlich. So bietet CNH Industrial seit dem Jahr 2021 den Traktor für CNG New Holland T6.180 Methane ab Werk an. Mehrere Motoren- und Landmaschinenhersteller, darunter AGCO Fendt und Valtra sowie John Deere, geben vor allem für neuere Modelle Freigaben für die Verwendung von paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO). Eine Anpassung des Motors ist dabei nicht erforderlich. Es ist vorstellbar, dass auch ältere Bestandsmaschinen auf HVO umgestellt werden können, allerdings bestehen dafür kaum Herstellerfreigaben. Herstellerfreigaben für Bestandsmaschinen mit Rapsöl- oder Biodieselkraftstoff existieren für ausgewählte Motoren der Abgasstufe IIIB, etwa bis Baujahr 2016. Neu- und Bestandsmaschinen können mit Nachrüstlösungen von externen Anbietern (z. B. Fa. BayWa Wiesmühl oder bioltec systems GmbH) auf Pflanzenölbetrieb umgerüstet werden.

Die Deutz AG hat B100 für alle Deutz-Motoren bis EU-Stufe IV zugelassen, was allerdings nicht automatisch bedeutet, dass auch die Traktoren, in denen diese Motoren verbaut sind, für Biodiesel freigegeben sind. Die Umrüstung von Diesel-Bestandsmaschinen auf den Elektro- oder CNG-Betrieb ist zwar technisch möglich, wird aber in der Praxis normalerweise nicht durchgeführt.

Einsatzsicherheit und Wartung: Die Erfahrungen aus dem Projekt belegen eine hohe Einsatzsicherheit von Biokraftstofftraktoren. Die Erhebung umfasst 27 Land- und Forstmaschinen, die mit Rapsölkraftstoff, Biodiesel oder paraffinischem Dieselkraftstoff aus Rest- und Abfallstoffen betrieben werden. Auch drei Arbeitsmaschinen mit elektrischem Antrieb sind Teil der Untersuchungen. In Summe wurden bislang mehr als 100.000 Betriebsstunden mit alternativen Antrieben auf den Versuchsbetrieben weitgehend problemlos absolviert. Sofern Störungen auftraten, betrafen diese meist das Kraftstoffniederdrucksystem und die Sensorik von Traktoren, die mit Rapsölkraftstoff betrieben wurden. Hinsichtlich des Wartungsaufwands moderner Traktoren beim Einsatz von R100, B100 oder HVO zeigen sich im Projekt KlimaTrak kaum Unterschiede zum konventionellen Dieseltraktor. Die Standzeiten von Motoröl, Motorölfilter und Kraftstofffilter bleiben bei allen Kraftstoffvarianten in der Regel unverändert. Bei elektrischen Antrieben ist systembedingt von einem reduzierten Wartungsintervall im Vergleich zum Verbrennungsmotor auszugehen.

Lokale Schadstoffemissionen: Die gesetzlich limitierten Abgasemissionen der Traktoren mit der neusten Abgasstufe V sind unabhängig vom verwendeten Kraftstoff (R100, B100, HVO) sehr gering und unterscheiden sich nur geringfügig vom Betrieb mit Dieselkraftstoff (DK). Dies zeigen exemplarisch die Messergebnisse am Traktorenprüfstand in Abbildung 64 (siehe auch Kapitel 6.2).

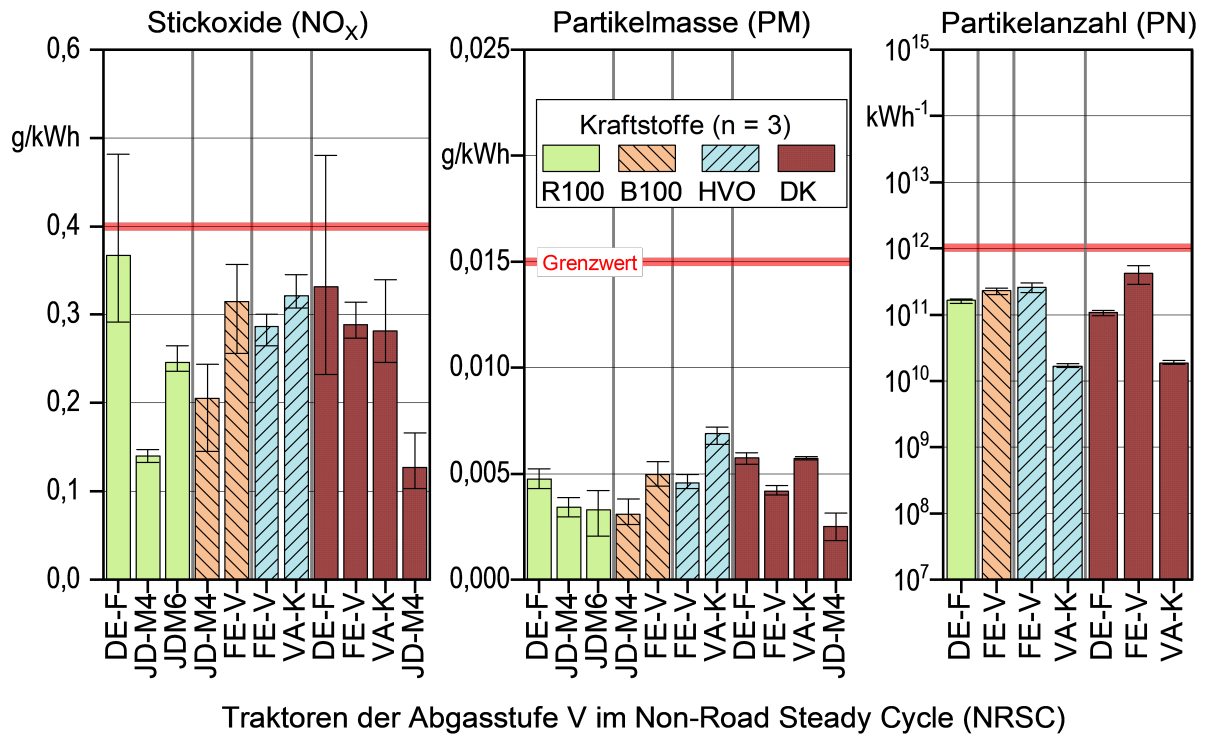


Abbildung 64: Stickoxide (NO_X), Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN) von Traktoren der Abgasstufe V mit Rapsölkraftstoff (R100), Biodiesel (B100), hydriertem Pflanzenöl (HVO) und fossilem Dieselkraftstoff (DK)

Die mittleren NO_X-, PM- und PN-Emissionen der Traktoren Deutz-Fahr 6165.4 TTV (DE-F), John Deere 6135R (JD-M4) und 6250R (JD-M6), Valtra T214 Direct (VA-K) sowie Fendt 211 V Vario (FE-V) erfüllen bei allen Messungen die Grenzwerte der bislang strengsten Abgasstufe V. Die hier nicht dargestellten CO- und HC-Emissionen liegen bei allen Messungen unter 0,01 g/kWh und somit deutlich unter den Grenzwerten von 3,5 g CO/kWh bzw. 0,19 g HC/kWh. Elektrische Antriebe ermöglichen ein lokal emissionsfreies und geräuscharmes Arbeiten, das insbesondere bei Hof- und Stallarbeiten vorteilhaft ist.

Potenzial THG-Minderung: Die ausgewiesenen THG-Emissionen alternativer Kraftstoffe hängen vom Rohstoff, vom Transport, von der Konversion sowie den Systemgrenzen der Berechnungsmethode ab. In Abbildung 64 sind Standardwerte (EU RL 2018/2001 2018) [34] für die THG-Emissionen ausgewählter Biokraftstoffe dem fossilen Referenzwert für Diesel gegenübergestellt. Darin sind die Emissionen für den Rohstoffanbau, den Transport, für die Verarbeitung und den Vertrieb berücksichtigt. Für die Variante „Biomethan (80 % Gülle, 20 % Mais)“ wird wegen der vermiedenen Methanemissionen gegenüber einer Güllenutzung ohne Biogastechnik eine Emissionsgutschrift gewährt.

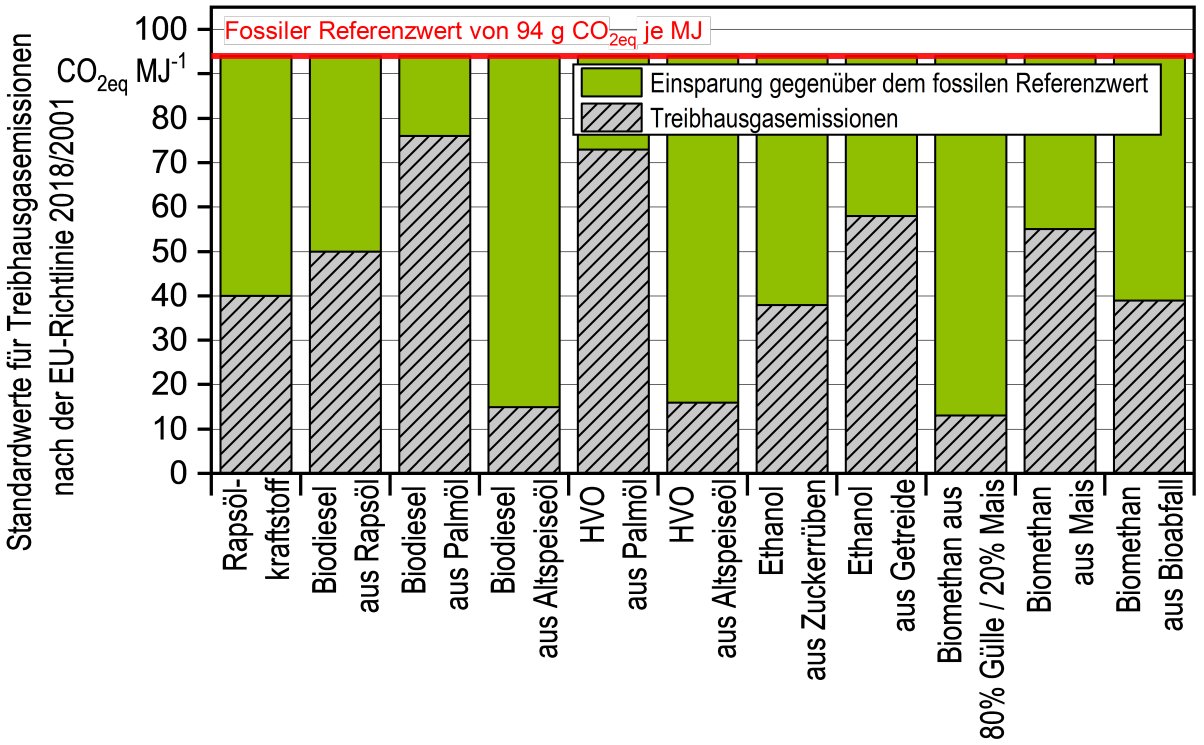


Abbildung 65: Standardwerte für Well-to-Tank-Treibhausgasemissionen ausgewählter Biokraftstoff-Produktionspfade gegenüber dem fossilen Referenzwert von 94 g CO_{2eq} je MJ nach der EU-Richtlinie 2018/2001 [34] (Quelle der Abbildung: [47])

Die THG-Emissionen von Biodiesel und HVO unterscheiden sich je nachdem, ob als Rohstoff heimisches Rapsöl, Palmöl oder Altspeiseöle verwendet werden. Die Minderungsraten gegenüber Diesel liegen zwischen 19 und 84 %. Batterieelektrische Antriebe sind aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads und fehlender Verbrennungsabgase besonders vorteilhaft hinsichtlich geringer THG-Emissionen. Der hohe Aufwand für die Akkuproduktion relativiert allerdings diesen Vorteil. Außerdem belastet der hohe fossile Anteil die THG-Bilanz des derzeitigen Strommix. Ein zügiger Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromgewinnung lässt deutliche Verbesserungen erwarten.

Regionale Wertschöpfung und Koppelprodukte: Herstellung und Nutzung fossilen Dieselkraftstoffs ist mit Ausnahme von Raffinerien und Mineralölhandel kaum mit Wertschöpfung in Deutschland verbunden. Dagegen können sowohl die Rohstoffe für Biodiesel, Rapsöl- bzw. Pflanzenölkraftstoff und regeneratives Methan als auch regenerativer Strom regional erzeugt werden. Häufig ist die Landwirtschaft beteiligt an der Herstellung der Kraftstoffe und der Verwertung von Koppelprodukten. Somit entstehen Wertschöpfung sowie geschlossene Energie- und Stoffkreisläufe im ländlichen Raum. Lediglich HVO wird ausschließlich in industriellen Anlagen außerhalb Deutschlands meist aus nicht heimischen Rohstoffen oder Altspeisefetten sowie Wasserstoff hergestellt. Daher ist hier die Teilhabe der heimischen Landwirtschaft an der Wertschöpfung eher gering.

Boden- und Gewässerschutz: Die betrachteten Kraftstoffe bzw. Energieträger bergen ein unterschiedlich großes Risiko, Böden und Gewässer, z. B. infolge einer Leckage zu verunreinigen. Ein Maß für das Gefährdungspotenzial ist die Einstufung in Wassergefährdungsklassen (WGK) nach der „Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“ (AwSV 2017). Rapsölkraftstoff und Biomethan werden in keine WGK eingestuft und dienen so dem vorbeugenden Boden- und Gewässerschutz. Auch durch batterieelektrische Antriebe ist von keiner unmittelbaren Wassergefährdung auszugehen. Biodiesel und HVO werden als schwach wassergefährdend deklariert (WGK 1), fossiler Dieselkraftstoff gilt als stark wassergefährdend (WGK 2).

Investitionskosten: Der Einsatz alternativer Antriebssysteme verursacht zum Teil höhere Investitionen für die technische Anpassung der Maschinen sowie die Errichtung von Betankungsanlagen. Marktübliche Hoftankstellen für Diesel sind in der Regel auch für R100, B100 und HVO geeignet, sodass sich bei einer Weiternutzung, eventuell abgesehen von einer Tankreinigung, keine höheren Kosten ergeben. Betankungsanlagen für CNG hingegen sind in der Errichtung und im Betrieb vergleichsweise teuer. Beim Kauf oder der nachträglichen Anpassung von Traktoren für den Rapsölbetrieb ist mit Mehrkosten von maximal ca. 10.000 € im Vergleich zur Standardmaschine zu rechnen. Beim Biomethantraktor fallen laut Aussage des Herstellers etwas 30 % Mehrkosten im Vergleich zur Dieselvariante an. Der Einsatz von Biodiesel und HVO in Traktoren ist in der Regel nicht mit höheren Investitionskosten verbunden.

Fazit

Als alternative Antriebskonzepte stehen heute bereits mehrere praxisnahe Optionen zur Verfügung: Rapsöl- bzw. Pflanzenölkraftstoff (R100), Biodiesel (FAME), hydrierte Pflanzenöle (HVO) und regeneratives Methan (CNG) als flüssige und gasförmige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren sowie batterieelektrische Antriebe mit regenerativem Strom. Während R100, B100 und HVO für nahezu jedes heute in der Landwirtschaft gebräuchliche Fahrzeug als Dieselsubstitut infrage kommen, eignet sich CNG aufgrund der geringeren Energiedichte hauptsächlich für Maschinen mit einer Leistung unter 100 kW oder für Maschinen mit kürzeren täglichen Einsatzzeiten. Außerdem muss eine nahegelegene Betankungsmöglichkeit für CNG zur Verfügung stehen. Batterieelektrische Systeme sind mit dem aktuellen Entwicklungsstand der Batteriespeicher prädestiniert für Maschinen, die nur kurze Zeit am Tag zum Einsatz kommen oder nur eine geringe Leistung vorhalten müssen. Der besondere Vorteil batterieelektrischer Antriebe liegt darin, dass am Ort ihres Einsatzes keine Schadstoffemissionen entstehen, was insbesondere in der Innenwirtschaft zum Tragen kommt.

Biodiesel, Rapsöl- bzw. Pflanzenölkraftstoff, regeneratives Methan und regenerativer Strom können regional und dezentral erzeugt werden. In der Regel ist die Landwirtschaft an der Kraftstofferzeugung beteiligt und kann davon profitieren. HVO hingegen trägt nicht zur regionalen Wertschöpfung bei. Alle land- und forstwirtschaftlichen Maschinen mit den genannten alternativen Antrieben leisten einen Beitrag zum Klimaschutz. Die besten THG-Bilanzen sind zu verzeichnen, wenn die Kraftstoffe aus Rest- und Abfallstoffen erzeugt

werden, der Herstellungsprozess einfach und wenig energieintensiv ist und nur kurze Transportwege zu überwinden sind. Vorteilhaft ist auch, wenn bei der Kraftstoffproduktion wertvolle Koppelprodukte entstehen, die selbst einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, indem sie andere Produkte ersetzen, die sonst unter Ausstoß von Klimagasen erzeugt werden müssen.

Der Einsatz von Biokraftstoffen und regenerativem Strom in Maschinen der Land- und Forstwirtschaft ist aus Gründen des Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz sowie aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Welche alternativen Antriebe jeweils am besten geeignet sind, hängt von der Leistungsanforderung, dem Einsatzprofil sowie den örtlichen Gegebenheiten ab. Derzeit werden nur sehr wenige für den Einsatz regenerativer Energieträger anstelle von Dieselkraftstoff geeignete Land- und Forstmaschinen angeboten und nachgefragt. Die Ursachen dafür liegen vor allem in den höheren Kraftstoffkosten und den höheren Investitionskosten im Vergleich zum Dieseltraktor. Die Klima- und Umweltleistungen alternativer Antriebe in der Land- und Forstwirtschaft werden bislang noch zu wenig gewürdigt.

Zusammenfassung

Um den Ausstoß an Treibhausgasen zu reduzieren und die Folgen des Klimawandels abzumildern, hat Bayern ein Klimaschutzprogramm gestartet und einen Zehn-Punkte-Plan aufgelegt. Ein wichtiger Baustein darin sind die Umstellung von Land- und Forstmaschinen der Staatsbetriebe auf alternative Antriebe. Zur Unterstützung dieser Maßnahme sollen im Rahmen eines Langzeitmonitorings die auf den Bayerischen Staatsgütern vorhandenen Rapsöltraktoren sowie neu beschaffte und umgerüstete Fahrzeuge und mobile Maschinen mit regenerativen Antrieben hinsichtlich ihres Betriebs- und Emissionsverhaltens untersucht werden.

Die Erhebung umfasst 27 Land- und Forstmaschinen, die mit Rapsölkraftstoff, Biodiesel oder paraffinischem Dieselkraftstoff aus Rest- und Abfallstoffen betrieben werden. Daneben sind seit Kurzem auch drei Arbeitsmaschinen mit elektrischem Antrieb Teil der Untersuchungen. In Summe wurden bislang mehr als 100.000 Betriebsstunden mit alternativen Antrieben auf den Versuchsbetrieben weitgehend problemlos absolviert. Sofern Störungen auftraten, betrafen diese meist das Kraftstoffniederdrucksystem und die Sensorik. Konkret wurden unter anderem folgende Erfahrungen mit den rapsöltauglichen Traktoren gemacht:

- Das Startverhalten wurde von den Betreibern überwiegend sehr positiv beurteilt. Die Probleme im Startverhalten eines John-Deere-Traktors der Abgasstufe IIIA konnten durch den Tausch der Kraftstoffpumpe sowie eines Überdruckventils im Kraftstoffsystem behoben werden.

- Am Deutz-Fahr-Traktor der Abgasstufe IIIA trat bei 3.500 Betriebsstunden beim Pflügen ein Motorschaden auf, ausgelöst durch einen defekten Injektor. Bei den beiden Rapsöltraktoren von Fendt der Abgasstufe IIIA mit baugleichem Motor gab es während der bisherigen Laufzeit von über 7.400 Bh keine vergleichbaren Schäden. Der Deutz-Fahr-Traktor wird nun mit einem Austauschmotor weiterhin mit Rapsölkraftstoff betrieben.

- Bei zwei John-Deere-Traktoren der Abgasstufe IIIB konnte durch eine defekte Steckverbindung die Kraftstoffpumpe nicht zuverlässig mit Strom versorgt werden. Durch den Tausch des Steckers und die Installation einer Zugentlastung für die Verkabelung konnte der Fehler behoben werden.

- Eine Motorbefundung an einem Fendt-Traktor der Abgasstufe IV nach über 2.000 Bh im Rapsölbetrieb ergab für die Motorbauteile wie z. B. Zylinderlaufflächen sowie Ein- und Auslasskanäle weder übermäßige Ablagerungen noch einen unüblichen Verschleißzustand. Jedoch funktionierte zwischenzeitlich das Zwei-Tank-Kraftstoffsystem des Fendt-Traktors nicht mehr zuverlässig, was auf einen Defekt im Kabelbaum zurückzuführen war. Aktuell wird der Erfolg der Reparaturmaßnahme im Feld geprüft.

Wiederkehrende Messungen von Leistung und Abgasverhalten am Traktorenprüfstand und im realen Betrieb zeigen, dass die mobilen Arbeitsmaschinen mit den erneuerbaren Kraftstoffen sparsam und schadstoffarm laufen. An ausgewählten Biokraftstofftraktoren

wurden Emissions- bzw. Leistungsmessungen durchgeführt, unter anderem mit folgenden Ergebnissen.

- Ein Steyr-Traktor der Abgasstufe IIIB mit Biodieselfreigabe wurde auf dem Traktorenprüfstand und bei Straßenfahrten hinsichtlich des Emissionsverhaltens untersucht. Dabei wurde der Betrieb mit Dieselkraftstoff, paraffinischem Dieselkraftstoff aus Rest- und Abfallstoffen (HVO) und Biodiesel getestet. Gegenüber dem Einsatz von Dieselkraftstoff wurde mit HVO eine etwas höhere und mit Biodiesel (B100) eine deutlich geringere Leistung ermittelt. Die Rohemissionen vor Abgasnachbehandlung sind mit beiden Biokraftstoffen geringer bzw. vergleichbar mit denen des fossilen Kraftstoffs. Das Emissionsniveau bei den Straßenfahrten im realen Betrieb zeigte eine höhere Variabilität, war jedoch im Mittel geringer als bei den Prüfstandmessungen.

- Die Umstellung eines Kubota-Traktors der Abgasstufe IIIB auf den Betrieb mit Biodieselkraftstoff (B100) wurde am Traktorenprüfstand begleitet und verlief störungsfrei. Die maximale Leistung an der Zapfwelle mit B100 war nur 2 kW geringer als im Dieselbetrieb. Trotz fehlender Freigabe deuten die Ergebnisse auf eine gute B100-Kompatibilität des Traktors hin.

- An einem John-Deere-Traktor der Abgasstufe IIIB wurden nach 3.500 Betriebsstunden deutlich erhöhte Stickstoffoxidemissionen festgestellt, die auf Ablagerungen im Abgasrückführsystem zurückzuführen waren. Durch eine Reinigung der Komponenten konnte die Wirksamkeit der Abgasrückführung wieder verbessert werden. Die anderen limitierten Schadstoffe waren davon nicht beeinträchtigt und lagen auf einem sehr geringen Niveau.

- Am Deutz-Fahr-Pflanzenöltraktor der Abgasstufe V funktionierten Motor, Abgasnachbehandlung und Kraftstoffsystem bei den Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand störungsfrei. Im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff ist der Wirkungsgrad des Traktormotors gleich hoch. Durch den Einsatz von Rapsöl- anstelle von Dieselkraftstoff zeigen sich auch keine signifikanten Änderungen im Emissionsverhalten. Die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe V werden mit Diesel- und Rapsölkraftstoff gemittelt aus drei Wiederholungen im stationären Betrieb immer und im transienten Betrieb überwiegend (mit Ausnahme von NO_X) eingehalten. Die Ursachenanalyse für die zu hohen NO_X-Werte ist noch nicht abgeschlossen.

- Ein Fendt-Schmalspurtraktor der Abgasstufe V wurde neu beschafft und auf Biokraftstofftauglichkeit getestet. Insgesamt zeigen die Messergebnisse, dass der Motor und die Abgasnachbehandlung des Traktors der Abgasstufe V mit den Biokraftstoffen B100 und HVO ordnungsgemäß funktionieren. Daher ist ein Feldeinsatz bei diesem Traktor mit B100 geplant.

- An einem John-Deere-Rapsöltraktor der neuesten Abgasstufe V wurde überprüft, ob ein Betrieb auch ohne aktive Regeneration des Partikelfilters möglich ist. Messungen am Traktorenprüfstand vor und nach einem zweijährigen Feldeinsatz zeigten, dass die ausschließlich passive Partikelfilterregeneration auch bei den neuesten Motoren des Herstellers über 850 Bh gut funktionierte. Zudem zeigte der Traktor ein konstantes

Leistungsverhalten und die Emissionsgrenzwerte der Abgasstufe V im Rapsölkraftstoff wurden erfüllt.

- An zwei Valtra-Traktoren der aktuellen Abgasstufe V fanden Messreihen mit fossilem und paraffinischem Diesel (HVO) am Traktorenprüfstand und im realen Betrieb statt. Die maximale Leistung an der Zapfwelle war mit HVO aufgrund des niedrigeren volumetrischen Heizwerts um 2,1 % geringer als im Dieselbetrieb. Die Dichte- und Heizwertunterschiede zwischen Diesel und HVO wirkten sich am Prüfstand und bei Straßenfahrten kaum auf das Emissionsverhalten aus. Bei allen Messungen am Prüfstand und im realen Betrieb war mit beiden Kraftstoffen eine ordnungsgemäße Funktion des Motors sowie der Abgasnachbehandlung gegeben.
- Ein rapsölbetriebener Holzvollernter (Harvester) wurde bei 77 % der theoretischen Lebensdauer auf das reale Emissionsverhalten geprüft, da kaum Daten zur Dauerhaltbarkeit solcher Motorensysteme vorliegen. Der Harvester hielt auch nach einer Einsatzzeit von 7.745 Bh im realen Betrieb die Anforderungen der Abgasstufen IV und V für die gasförmigen Emissionen und die Partikelanzahl ein.

Die Betreiber sind insgesamt mit der Praxiseignung der biokraftstofftauglichen Maschinen zufrieden. Auch die elektrisch angetriebenen Hoflader und das Transportfahrzeug werden hinsichtlich Zuverlässigkeit, Batteriereichweite und Arbeitsleistung überwiegend als sehr gut bewertet. Kaufgründe für den Elektroantrieb waren die Vermeidung von Schadstoffemissionen bei Arbeiten in Gebäuden und die Reduzierung der Lärmemissionen. Allerdings fehlt den Nutzern an Tagen mit Arbeitsspitzen eine Schnellladem̈oglichkeit der Batterie.

Quellenverzeichnis

[1] AGCO GMBH, FENDT-MARKETING (2019): Fendt e100 Vario: Der batterieelektrische Kompakttraktor. Pressemitteilung 2017-09-08, 6 Seiten. Marktoberdorf: AGCO GmbH, URL: https://www.fendt.com/de/fendt-e100-vario-pressemitteilung (Stand: 21.05.2019)

[2] ALTMANN, R.; GEBHARD, J.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; RABL, H.-P.; REMMELE, E. (2020): Zünd- und Brennverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf einen Motor der Abgasstufe V. In Kooperation mit: Osterbayerische Hochschule Regensburg (OTH), DEUTZ AG, Köln. Berichte aus dem TFZ, Nr. 69. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 179 Seiten, ISSN 1614-1008

[3] APFELBECK, R.; GESSNER, B. H. (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht – Teil II: Untersuchung der Abgaszusammensetzung von Dieselmotoren beim Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester sowie deren Mischungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben Zuwendungsbescheid Nr. Z 3/a-0734.1-5147 vom 11.04.1988 des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Freising: Technische Universität München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan, 315 Seiten

[4] BASSHUYSEN, R. V. (2010): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 5., vollst. überarb. und erw. Aufl. ATZ-MTZ Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, XLV, 1176 Seiten, ISBN 3834806994

[5] BOCKEY, D. (2021): Biodiesel & Co. 2020/2021. Sachstandsbericht und Perspektive. Auszug aus dem UFOP-Jahresbericht. Hrsg.: Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP). Berlin, 49 Seiten

[6] BRAVO, Y.; LARROSA, C.; ARNAL, C.; GARGUILO, V. (2015): Untersuchung der Ablagerungsbildung bei AGR-Kühlern. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Bd. 76, Nr. 5, S. 36–41

[7] BUCHNER, M. (2022): Einordnung und Bewertung von alternativen Antriebssystemen für Traktoren und Emissionsmessungen mit ausgewählten Kraftstoffen. Bachelorarbeit. Regensburg: Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 110 Seiten

[8] BUNDESANSTALT FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BEL) (2021): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2020. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. Stand redaktionell: Dezember 2021, Stand Datenbankauszug: September 2021. Hg. v. d. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Bonn, 100 Seiten

[9] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) (2021): Klimaschutzbericht 2021. Zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung. Stand: Oktober 2021. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Berlin, 102 Seiten

[10] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2019): Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen – 10. BIm-SchV) vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1849), zuletzt geändert durch Art. 1 VO zur Umsetzung der RL 2014/94/EU und weiterer immissionsschutzrechtl. Rechtsakte der EU vom 13.12.2019 (BGBl. I S. 2739), Bundesgesetzblatt, Bd. 2010, Teil I, Nr. 62, S. 1849-1861 und Bd. 2019, Teil I, Nr. 50, Seite 2739-2756 , ISSN 0341-1095

[11] BUNDESVERBAND BIOENERGIE E. V. (BBE) (2016): 10 Gründe für Biokraftstoffe in der Land- und Forstwirtschaft. Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE) (Hrsg.). Bonn: Branchenplattform Biokraftstoffe in der Land- und Forstwirtschaft, 10 Seiten

[12] CZERWINSKI, J.; ZIMMERLI, Y.; MAYER, A.; JAUSSI, F.; KASPER, M. (2009): ALTERNATIVE DIESEL FUELS (GTL, RME, ROR) AND (NANO) PARTICLE EMISSIONS. IN: W. J. BARTZ (HG.): FUELS 2009. MINERAL OIL BASED AND ALTERNATIVE FUELS. 7TH INTERNATIONAL COLLOQUIUM, ESSLINGEN, 14-15.01.2009. OSTFILDERN: TECHNISCHE AKADEMIE ESSLINGEN (TAE), S. 115–127

[13] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (2016): KLIMASCHUTZPLAN 2050. KLIMASCHUTZPOLITISCHE GRUNDSÄTZE UND ZIELE DER BUNDESREGIERUNG. KABINETTBESCHLUSS VOM 14. NOVEMBER 2016. DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (HRSG.), BERLIN. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB), 89 SEITEN

[14] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (2021): BUNDES-KLIMASCHUTZGESETZ (KSG) VOM 12. DEZEMBER 2019 (BGBL. I S. 2513), ZULETZT GEÄNDERT DURCH ART. 1. ERSTES ÄNDG VOM 18.8.2021 (BGBL. I S. 3905), BUNDESGESETZBLATT, BD. 2019, TEIL I, NR. 48, S. 2513-2521 UND BD. 2021, TEIL I, NR. 59, S. 3905-3907, ISSN 0341-1095

[15] DEUTSCHER BUNDESTAG (2021): GESETZ ZUR WEITERENTWICKLUNG DER TREIBHAUSGASMINDERUNGS-QUOTE, IN DER FASSUNG VOM 24. SEPTEMBER 2021. BUNDESGESETZBLATT, TEIL I, BD. 72, NR. 69, S. 4458–4464

[16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2014): DIN EN 14214 – FLÜSSIGE MINERALÖLERZEUGNISSE – FETTSÄURE-METHYLESTER (FAME) ZUR VERWENDUNG IN DIESELMOTOREN UND ALS HEIZÖL – ANFORDERUNGEN UND PRÜFVERFAHREN. JUNI 2014. BERLIN: BEUTH VERLAG, 26 SEITEN

[17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2014): DIN EN 590 – KRAFTSTOFFE FÜR KRAFTFAHRZEUGE – DIESELKRAFTSTOFF – ANFORDERUNGEN UND PRÜFVERFAHREN. APRIL 2014. BERLIN: BEUTH VERLAG, 16 SEITEN

[18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2015): DIN 51623 – Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren – Pflanzenölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. Dezember 2015. Berlin: Beuth Verlag, 25 Seiten

[19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN 51605 – KRAFTSTOFFE FÜR PFLANZENÖLTAUGLICHE MOTOREN – RAPSÖLKRAFTSTOFF. ANFORDERUNGEN UND PRÜFVERFAHREN. JANUAR 2016. BERLIN: BEUTH VERLAG, 15 SEITEN

[20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2018): DIN EN 15940 – KRAFTSTOFFE – PARAFFINISCHER DIESELKRAFTSTOFF AUS SYNTHESE ODER HYDRIERUNGSVERFAHREN – ANFORDERUNGEN UND PRÜFVERFAHREN. AUGUST 2018. BERLIN: BEUTH VERLAG, 28 SEITEN

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

[22] DRESSLER, D.; ENGELMANN, K.; SERDJUK, M.; REMMELE, E. (2016): Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern. Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpRessBio-Methode. Berichte aus dem TFZ, Nr. 50. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 163 Seiten, ISSN 1614-1008

[23] DRESSLER, D.; HAAS, R.; REMMELE, E. (2020): Die Klimaziele der Landwirtschaft. Was können Biokraftstoffe leisten. Schule und Beratung, Nr. 5-6, S. 49–53

[24] DRESSLER, D.; REMMELE, E. (2019): Greenhouse gas emissions of rapeseed oil fuel. How it is influenced by the balancing method and the data basis within the context of the amended Renewable Energy Directive. In: BUNDESVERBAND BIOENERGIE E. V. (BBE); UNION ZUR FÖRDERUNG VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN E. V. (UFOP); BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN BIOETHANOLWIRTSCHAFT E. V. (BDBE); VERBAND DER DEUTSCHEN BIOKRAFTSTOFFINDUSTRIE E. V. (VDB); FACHVERBAND BIOGAS E. V. (Hrsg.): Kraftstoffe der Zukunft 2019. 16. Internationaler Fachkongress für erneuerbare Mobilität. CityCube Berlin, 21.-22.01. Berlin: Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE), S. 1–26

[25] EMBERGER, P.; MAUTNER, S.; HINRICHS, M.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2019): Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester). Berichte aus dem TFZ, Nr. 63. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 81 Seiten, ISSN 1614-1008

[26] EMBERGER, P.; MAUTNER, S.; HINRICHS, M.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2019): Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester). Berichte aus dem TFZ, Nr. 63. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 81 Seiten, ISSN 1614-1008

[27] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II. Berichte aus dem TFZ, Nr. 31. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 56 Seiten, ISSN 1614-1008

[28] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA. Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Berichte aus dem TFZ, Nr. 32. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 125 Seiten, ISSN 1614-1008

[29] ENGMAN, A.; HARTIKKA, T.; HONKANEN, M.; KIISKI, U.; KURONEN, M.; LETHO, K.; MIKKONEN, S.; NORTIO, J.; NUOTTIMÄKI, J.; SAIKKONEN, P. (2016): Neste Renewable Diesel Handbuch. Stand: Mai 2016, Espoo: Neste Corporation, 62 Seiten

[30] ETTL, J. C. (2021): Reales Abgasemissionsverhalten von Traktoren am Prüfstand und im Feldeinsatz. Dissertation. München: Technische Universität München, TUM School of Life Sciences, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, 149 Seiten

[31] ETTL, J.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2016): Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöltauglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern. In Kooperation mit: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), John Deere – European Technology Center, BayWa AG. Berichte aus dem TFZ, Nr. 47. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 179 Seiten, ISSN 1614-1008

[32] ETTL, J.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2019): Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV. Abgasemissionen, Effizienz und Betriebssicherheit pflanzenöltauglicher Traktoren auf den bayerischen Versuchsbetrieben. Berichte aus dem TFZ, Nr. 60. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 210 Seiten, ISSN 1614-1008

[33] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Delegierte Verordnung (EU) 2017/655 der Kommission vom 19. Dezember 2016 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Überwachung der Emissionen gasförmiger Schadstoffe von in Betrieb befindlichen Verbrennungsmotoren in nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten. Amtsblatt der Europäischen Union, Bd. 60, Nr. L 102, S. 334-363

[34] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2018): Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union, Bd. 61, Nr. L 328, S. 82–209

[35] FELDHOFF, S.; BERINGER, M.; HOFFMANN, H.; LUCKA, K.; CRUSIUS, S.; MÜLLER, M.; ETTL, J.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2020): Verbundvorhaben: Strategien zur Ablagerungsvermeidung an Einspritzdüsen beim Multi-Fuel-Einsatz biogener Kraftstoffe. Schlussbericht zum Verbundvorhaben, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.). Gülzow: OWI OEL-WAERME-INSTITUT gGmbH; Regineering GmbH; TEC4FUELS GmbH; ERC Additiv GmbH; Technologie- und Förderzentrum (TFZ), 194 Seiten

[36] FREISTAAT BAYERN, BAYERISCHER LANDTAG (2020): Bayerisches Klimaschutzgesetz (BayKlimaG) vom 23. November 2020 (GVBl. S. 598, 656, BayRS 2129-5-1-U), das durch Art. 9a des Gesetzes vom 23. Dezember 2022 (GVBl. S. 704) geändert worden ist. Bayerisches Gesetz- und Verordnungsblatt, Nr. 29, Seite 598-601 und Nr. 24, Seite 704-708

[37] GASSNER, T.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöltauglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl. Berichte aus dem TFZ, Nr. 33. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 63 Seiten, ISSN 1614-1008

[38] GENERALZOLLDIREKTION (2018): Auswertung der Agrardieselentlastung für Bayern und Deutschland mit Stand 2. Juli 2018. Persönliche Mitteilung

[39] HASSEL, E.; PRESCHER, K.; BERNDT, S.; FLÜGGE, E.; GOLISCH, J.; HARKNER, W.; SCHÜMANN, U.; SY, G.; WICHMANN, V. (2005): Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöltauglichen Traktoren. Abschlussbericht über die Begleitforschung zum Demonstrationsvorhaben, Aktenzeichen: 00 NR 200, Teil 1. Rostock: Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock, 107 Seiten

[40] HÖCK, R.; WIDMANN, B. (1994): Betriebserfahrungen mit pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren (Natur- und Biodiesel). In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI), VDI-GESELLSCHAFT ENERGIETECHNIK (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; Tagung, 4. und 5. Juli 1994, Würzburg. VDI-Berichte, Nr. 1126. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 231–238, ISBN 9783180911267

[41] HÖRNIG, G. T. M. (2012): Untersuchungen zur Aerosolabscheidung in AGR-Wärmetauschern. Dissertation. München: Technische Universität München, Fakultät für Chemie, Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, Lehrstuhl für Analytische Chemie, 153 Seiten

[42] HUBER, G.; SCHOLZ, A.; DÜSSELDORF, C., FLIERL, R.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; PICKEL, P. (2015): Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe Tier 4/EU Stufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl, Berichte aus dem TFZ, Nr. 44. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 86 Seiten, ISSN 1614-1008

[43] KODER, A. (2020): Einspritz-, Zünd- und Verbrennungsverhalten von reinen Pflanzenölkraftstoffen in modernen Common-Rail-Dieselmotoren. Dissertation. Regenerative Energien – Schriftenreihe der Professur für Regenerative Energiesysteme der Technischen Universität München. München: Verlag Dr. Hut, 158 Seiten, ISBN 978-3-8439-4558-5

[44] MAUTNER, S.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2017): Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor. Berichte aus dem TFZ, Nr. 51. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 122 Seiten, ISSN 1614-1008

[45] PREHN, S.; WICHMANN, V.; KASPERA, M.; LASSAK, T. D. (2016): Entwicklung und Untersuchung eines Gasmotors für Landmaschinen – Phase 1 + 2. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen: 29980/02. Stand: September 2016. Rostock: Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, 82 Seiten

[46] RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; KRIECHBAUM, T.; PRANTL, H.; BREINESBERGER, J. (2008): Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft. BMLFUW-LE. 1.3.2/0037-II/1/2006, Forschungsprojekt 1337, Oktober 2003 bis September 2006, Projektverlängerung bis September 2008. Endbericht, Wieselburg, St. Pölten: HBLFA Francisco Josephinum, BLT Biomass, Logistics, Technology, AGRAR PLUS GesmbH, 1078 Seiten

[47] REMMELE, E.; ECKEL, H.; PICKEL, P.; RATHBAUER, J.; REINHOLD, G.; STIRNIMANN, R.; HÖRNER, R.; UPPENKAMP, N. (2020): Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen, KTBL-Schrift, Nr. 519. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), 133 Seiten, ISBN 3-945088-73-9

[48] REMMELE, E.; JAHRSTORFER, C.; ORTINGER, W. (2021): Klimaschutz durch erneuerbare Antriebe. Bewirtschaftung staatlicher land- und forstwirtschaftlicher Flächen in Bayern. Schule und Beratung, Nr. 3-4, S. 39-41

[49] SCHRÖDER, J.; NAUMANN, K.; DÖGNITZ, N.; COSTA DE PAIVA, G.; HAUSCHILD, S.; MEISEL, K.; ETZOLD, H.; NIEß, S.; KÖCHERMANN, J.; GÖRSCH, K.; CYFFKA, K.-F.; MÜLLER-LANGER, F.; REMMELE, E.; THUNEKE, K.; NEULING, U.; ZITSCHER, T.; BAUER, C.; SACCHI, R. (2022): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. Stand: 21. Januar 2022. 1. Aufl. Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) (Hrsg.). Leipzig. DBFZ-Report, Nr. 44, 342 Seiten, ISBN 978-3-946629-82-5, ISSN 2197-4632

[50] SCHÜMANN, U.; WICHMANN, V.; FLÜGGE, E.; SADLOWSKI, T.; HARNDORF, H.; BUCHHOLZ, B. (2018): Betriebsverhalten von Industrie- und Landtechnikmotoren Abgasstufe EU COM IV im Biodieselbetrieb. Schlussbericht zum Vorhaben; Förderkennzeichen 22012113. Gefördert durch: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Hrsg.: Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, 61 Seiten

[51] SHELL GLOBAL SOLUTIONS INTERNATIONAL B. V. (2016): Shell GTL Fuel Synthetic Technology for Cleaner Air. Technische Details, Version 2.0. Den Haag, Niederlande, 76 Seiten

[52] SPIEGEL, J.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2022): Teilvorhaben 2: Multifuel-Traktor - Sensortest und Untersuchung des Gesamtsystems auf dem Traktorenprüfstand und im Feldeinsatz. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Förderkennzeichen: 22408617. In: BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMEL); FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Hrsg.): Entwicklung und Feldtest eines Abgasstufe 5 Multi-Fuel-Traktors „MuSt5-Trak“. Laufzeit: 01.11.2018 bis 31.10.2021. Schlussbericht zum Verbundvorhaben, Teilvorhaben 1, Teilvorhaben 2, Teilvorhaben 3, Stand: 08/2022. Berlin, Mannheim, Straubing, Kaiserslautern: John Deere GmbH & Co. KG (JD); Technologie- und Förderzentrum (TFZ); Technische Universität Kaiserslautern (TUK), S. 54–55

[53] SY, G.; FLÜGGE, E.; WICHMANN, V.; KLAAßEN, G. (2009): Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz. Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben, Aktenzeichen: 22021107 (07NR211), Projektleiter: Prof. Horst Harndorf, Laufzeit: 1. Juni 2008 bis 28. Februar 2009, Rostock: Universität Rostock, Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, 106 Seiten

[54] THE 2ND VEGOIL CONSORTIUM (2011): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Work package 7 Dissemination. Deliverable No. 7.7. Final Results. Version 1. 79 Seiten, Oberwaltenreith, URL: https://www.2ndvegoil.eu (Stand: 30.05.2022)

[55] THIELMANN, A.; WIETSCHEL, M.; FUNKE, S.; GRIMM, A.; HETTESMEIMER, T.; LANGKAU, S. .; LOIBL, A.; MOLL, C.; NEEF, C.; PLÖTZ, P.; SIEVERS, L.; ESPINOZA, L. T.; EDLER, J. (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft? Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe, 33 Seiten

[56] THUNEKE, K.; GASSNER, T.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2009): Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell. Berichte aus dem TFZ, Nr. 17. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 177 Seiten, ISSN 1614-1008

[57] TOOL-FUEL SERVICES GMBH (2023): Freigaben für XTL-Kraftstoffe. Herstellerfreigaben. 4 Seiten, Hamburg, URL: https://toolfuel.eu/freigaben-fuer-care-diesel (Stand: 14.04.2023)

[58] UMWELTBUNDESAMT (2022): Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen. Stand: 22. März 2022. 5 Seiten, Dessau: UBA, URL: https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft (Stand: 20.06.2022)

[59] UMWELTBUNDESAMT (2022): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2020. Abschlussdatum: April 2022. Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.), Dessau-Roßlau. UBA-Texte - Für Mensch & Umwelt - Climate Change, Nr. 24/2022, 1048 Seiten, ISSN 1862-4359

[60] VERBEEK, R. (2014): Beurteilung der Schadstoffemissionen bei Verwendung von Shell GTL Fuel als Ersatzkraftstoff in mittelschweren und schweren Nutzfahrzeugen, Binnenschiffen sowie mobilen Maschinen und Geräten. Projektnummer 060.07597, Text-Nr. 2014-TM-RAP-0100154462, Stand: 16. September 2014. The Netherlands Organisation for applied scientific research (TNO). Delft, Niederlande (TNO-Report, TNO 2014 R10588), 23 Seiten

[61] WINKLER, M.; RILL, A. (2017): Technisches Rundschreiben 0199-99-01218/4 DE – Ersatz für TR0199-99-01218/3. Kraftstoffe, Allgemein, Liste freigegebener Kraftstoffe, Dieselkraftstoffe; Non-road-Kraftstoffe und leichte Heizöle, Synthetische und paraffinische Kraftstoffe (GTL, CTL, BTL und HVO), Biokraftstoffe, Pflanzenöle, Jet-Kraftstoffe, Marine-Destillatkraftstoffe; Biologische Verunreinigungen in Kraftstoffen, Kraftstoffzusätze, Kraftstofffilter. ID 002893-03, Datum: 17.11.2017. Hrsg.: DEUTZ AG. Köln, 34 Seiten

[62] ZUKUNFT GAS GMBH. (2022): Auf große Fahrt – mit ERDGAS im Tank. 8 Seiten, Berlin: Zukunft GAS GmbH, URL:https://gas.info/mobil-verkehr/erdgas-cng-mobil/erdgas-tankstellen (Stand: 07.06.2022)

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 Abgasstufen I und II

32 Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstanduntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

33 Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöltauglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl

34 Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung

35 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstanduntersuchungen

36 Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen

37 Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat

38 Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen

39 Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung

40 Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel

41 Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605

42 Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe

43 Brennstoffqualität von Holzpellets

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

45 ExpRessBio – Methoden

46 Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern

47 Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB

48 Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayerische Anbaubedingungen

49 Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe

50 Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpRessBio-Methode

51 Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor

52 Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln

53 Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge

54 Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung

55 Lagerung von Holzhackschnitzeln

56 Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb

57 Optimierungspotenziale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste

58 Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife

59 Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern

60 Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV

61 Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen

62 Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)

63 Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)

64 Amarant als Biogassubstrat – Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amarantlinien für bayerische Standorte

65 Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung

66 Einflussfaktoren auf die NO_X-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt

67 Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL

68 Hanf zur stofflichen Nutzung – Stand und Entwicklungen

69 Grundlagenorientierte Untersuchungen zum Zünd- und Verbrennungsverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf ein Motorsystem der Abgasstufe V (EVOLUM)

70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel

71 Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II

72 Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie

73 Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen

74 Erweiterte Holzpelletcharakterisierung – Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln

75 Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in Durchwachsener Silphie

76 Mineralisch verschmutzte Holzbrennstoffe – Teil 1: Auswirkung auf die Verbrennung

77 Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern – Thermische Verwertung

78 Verwertung und Anbauoptimierung von Hanf als Nachwachsender Rohstoff

80 Klimafreundliche Landmaschinen im Feldtest

81 HVO-Diesel für Traktoren – Analyse zum Einsatz des paraffinischen Dieselkraftstoffs HVO auf Staatsbetrieben

82 Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe mit einem Duplex-Schneckenhacker

TFZ

ISSN 1614-1008