Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe

63

Berichte aus dem TFZ

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

Projektpartner:

BAYERISCHE STAATSFORSTEN
Nachhaltig Wirtschaften.

DonauWald
FORSTMASCHINEN

JOHN DEERE

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

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe

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

Dr.-Ing. Peter Emberger
Sebastian Mautner
Michael Hinrichs
Dr. Klaus Thuneke
Dr. Edgar Remmele

Projektpartner:

BAYERISCHE STAATSFORSTEN
Nachhaltig Wirtschaften.

DonauWald
FORSTMASCHINEN

JOHN DEERE

Berichte aus dem TFZ 63

Straubing, Juli 2019

Titel:	Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)
Autoren:	Dr.-Ing. Peter Emberger, Sebastian Mautner, Michael Hinrichs (John Deere ETIC), Dr. Klaus Thuneke, Dr. Edgar Remmele
Projektleiter:	Dr. Edgar Remmele
Bearbeiter:	Sebastian Mautner, Roland Fleischmann
in Kooperation mit:	Bayerische Staatsforsten (Dr. Michael Kutscher, Dr. Johannes Windisch, Christoph Schelhaas, Gerhard Redenböck, Gregor Friedl) DonauWald Forstmaschinen (Andreas Gabler) John Deere European Technology and Innovation Center (Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel, Michael Hinrichs) John Deere Forestry Oy (Günter Satzinger)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie unter dem Förderkennzeichen BE/16/07 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

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

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

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

ISSN:	1614-1008
Hrsg.:	Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail:	poststelle@tfz.bayern.de
Internet:	www.tfz.bayern.de
Redaktion:	Dr.-Ing. Peter Emberger, Sebastian Mautner, Ulrike Ammer
Verlag:	Eigenverlag
Erscheinungsort:	Straubing
Erscheinungsjahr:	2019
Gestaltung:	Dr.-Ing. Peter Emberger, Sebastian Mautner
Fotonachweis:	Sebastian Mautner, Georg Huber, Dr.-Ing. Peter Emberger, John Deere (Abbildung 3)

Danksagung

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

Großer Dank gebührt den Bayerischen Staatsforsten, insbesondere Herrn Dr. Michael Kutscher, Herrn Dr. Johannes Windisch und Herrn Christoph Schelhaas, für die Bereitstellung des Harvesters und die hervorragende Zusammenarbeit. Ein ganz besonderer Dank gilt den Fahrern des Harvesters, Herrn Gerhard Redenböck und Herrn Gregor Friedl, die tatkräftig zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben.

Ein herzlicher Dank gilt DonauWald Forstmaschinen, insbesondere Herrn Andreas Gabler und Herrn Björn Rosengart, für die zuverlässige Betreuung des Harvesters im Feldversuch.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 9

Tabellenverzeichnis 13

1 Einleitung und Problemstellung 15

2 Zielsetzung 17

3 Stand des Wissens 19

3.1 Forstmaschinenbestand in Bayern 19

3.2 Pflanzenöltechnik in Harvestern und Traktoren 19

3.3 Abgasgesetzgebung und Prüfmethoden 21

4 Material und Methoden 23

4.1 Versuchsmaschine 23

4.2 Adaption des Harvesters 24

4.3 Leistungs- und Emissionsmessungen 25

4.4 Feldtest 26

4.4.1 Kraftstofflogistik und -qualität 27
4.4.2 Betriebsdaten 27
4.4.3 Elektronische Datenaufzeichnung 29
4.4.4 Motorenölqualität 30

4.5 Emissionsverhalten im realen Betrieb 30

5 Ergebnisse und Diskussion 33

5.1 Konzeption und Adaption des Kraftstoffsystems 33

5.1.1 Konstruktion und Implementierung des externen Tanks 33
5.1.2 Konstruktion und Implementierung der Heizung des Rapsölkraftstofftanks 34
5.1.3 Anpassung des Niederdruckkraftstoffsystems 36
5.1.4 Entwicklung der Softwareapplikation 38
5.1.5 Adaption des Abgasnachbehandlungssystems 38
5.1.6 Vorversuche mit einem Testtraktor 39
5.1.7 Einbau des Kraftstoffsystems in den Harvester 39
5.1.8 Zukünftige Optimierungspotenziale 39

5.2 Leistungs- und Emissionsmessungen 40

5.2.1 Leistung und Kraftstoffverbrauch bei Volllast 41
5.2.2 Emissionsverhalten 43

5.3 Feldtest 46

5.3.1 Kraftstofflogistik und -qualität 46
5.3.2 Betriebsverhalten 52
5.3.3 Motorenölqualität 56
5.3.4 Störungen und Optimierungsmaßnahmen 59
5.3.5 Umweltwirkung 61

5.4 Emissionsverhalten im realen Betrieb 62

5.5 Begutachtung des Gesamtsystems 65

5.5.1 Externer Tank und Kraftstoffpumpe für die Regeneration der AGN 66

5.5.2 Niederdruckkraftstoffsystem 66

5.5.3 Motor 67

5.5.4 Abgasnachbehandlungssystem 69

5.6 Fazit 70

Zusammenfassung 73

Abstract 75

Quellenverzeichnis 77

Anhang... 81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die in Deutschland verkauften Forstmaschinen in den Jahren 2008 bis 2017 nach HARBAUER (2018) [27] 19

Abbildung 2: Forstwirtschaftlicher Vollernter (Harvester) John Deere 1470G der Bayerischen Staatsforsten 23

Abbildung 3: Testtraktor John Deere 8370R mit gegenüber dem Harvester 1470G baugleichem Motor John Deere PowerTech Plus 6090 25

Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstands mit Wirbelstrombremse (1), Gasanalysatoren (2), Kraftstoffverbrauchsmessung (3) und Partikelprobenahme (4) 26

Abbildung 5: Abbildung Betriebstagebuch des John-Deere-1470G-Harvesters der Bayerischen Staatsforsten 28

Abbildung 6: PEMS-Aufbau am Heck des Harvesters im Praxiseinsatz 31

Abbildung 7: Analysatoren des portablen Emissionsmesssystems (PEMS) Semtech Ecostar in der Schutzbox 32

Abbildung 8: Positionierung des Zusatztanks für die Standheizung (links) und Detailansicht des Tanks (rechts) 34

Abbildung 9: Modifizierter DEF-Tankgeber für die Beheizung des Rapsölkraftstofftanks 34

Abbildung 10: 3D-Ansicht der Position des zusätzlich installierten modifizierten Tankgebers 35

Abbildung 11: Modifizierter Tankgeber der 2. Generation im ausgebauten Zustand (rechts) sowie im eingebauten Zustand mit Datenlogger für die Erfassung von Kühlmittel- und Kraftstofftemperaturen (links) 36

Abbildung 12: Schematische Darstellung des optimierten Niederdruckkraftstoffsystems 38

Abbildung 13: Aufbau des John Deere 8370R am Traktorenprüfstand des TFZ 41

Abbildung 14: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch, spezifischer Harnstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle des Traktors mit einem baugleichen Motor wie im Harvester John Deere 1470G und einer ECU-Konfiguration für Harvester im Betrieb mit Rapsölkraftstoff 42

Abbildung 15: Mittelwert und Spannweite der spezifischen Emissionen von NO_X, CO, HC und PM vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) bezogen auf die Zapfwellenleistung des Traktors mit einem baugleichen Motor wie im Harvester John Deere 1470G und einer ECU-Konfiguration für Harvester im Betrieb mit Rapsölkraftstoff im NRSC 44

Abbildung 16: Mittelwerte und Spannweiten der spezifischen Emissionen von NO_X, CO, HC und PM nach der Abgasnachbehandlung (AGN) des Traktors mit einem baugleichen Motor wie im Harvester John Deere

1470G und einer ECU-Konfiguration für Harvester im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei verschiedenen Prüfzyklen 45

Abbildung 17: Schematischer Überblick zur Rapsölkraftstoffversorgung des Harvesters 46

Abbildung 18: Isolierter Kofferanhänger als mobile Tankstelle für Rapsölkraftstoff 48

Abbildung 19: Häufigkeit der wöchentlichen Zeitanteile an der Gesamtarbeitszeit der Maschinenführer für Maschinenarbeit, Umsetzen, Reparaturen und Sonstiges in Halbjahreszeiträumen..... 53

Abbildung 20: Bewertung des Kaltstartverhaltens des Harvestermotors durch die Maschinenführer (Mittelwert und Spannweite) 54

Abbildung 21: Relative Abweichung der wöchentlichen Produktivität im Vergleich zum Mittelwert der Produktivität über den gesamten Feldtest..... 55

Abbildung 22: Spezifischer volumetrischer und energetischer Kraftstoffverbrauch des Harvesters im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff bei ähnlichen Einsatzbedingungen (Fahranteil 10 % bis 15 % und Produktivität 20 fm/h bis 30 fm/h; Tagesmittelwerte) 55

Abbildung 23: Pflanzenöl- und Rußgehalt im Motorenöl über die Betriebszeit des Harvesters 57

Abbildung 24: Gehalt der Verschleißmetalle Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei im Motorenöl über die Betriebszeit des Harvesters 58

Abbildung 25: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motorenöls des 1470G-Harvesters über den Versuchszeitraum..... 59

Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Konformitätsfaktoren für Stickstoffoxide der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster) 62

Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Konformitätsfaktoren für Kohlenstoffmonoxid der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster) 63

Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Konformitätsfaktoren für Kohlenwasserstoffe der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster) 64

Abbildung 29: Spezifische CO_2-Emissionen (Tank-to-Wheel) und spezifischer Kraftstoffverbrauch während der Emissionsmessungen im realen Betrieb (Mittelwerte und Spannweiten) 65

Abbildung 30: Elektroschaltkasten mit Mikrocontroller zur Steuerung der beheizten Bauteile und Kraftstoffförderpumpen 67

Abbildung 31: Injektor aus dem Harvester nach 3.500 h Einsatzzeit (davon 2.100 h mit Rapsölkraftstoff)..... 68

Abbildung 32: Turbolader des Harvestermotors mit üblichen Abnutzungsspuren nach 3.500 h Betrieb 69

Abbildung 33: Endoskopische Aufnahme des Dieselpartikelfilters (links) und des Mischelements für AdBlue® (rechts) 70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Literaturübersicht über Flottenversuche mit Pflanzenöltraktoren 20

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte nach EU-Richtlinien 97/68/EG [21] und 2016/1628 [23] für Dieselmotoren in Arbeitsmaschinen (Abgasstufen I bis V) 22

Tabelle 3: Technische Daten des Harvesters John Deere 1470G 24

Tabelle 4: Parameter im Betriebstagebuch zur Dokumentation des Praxiseinsatzes 29

Tabelle 5: Ausgewählte Untersuchungsparameter zur Beurteilung der Motorenölqualität und verwendete Analyseverfahren 30

Tabelle 6: Technische Daten der Abgasanalysatoren des Semtech Ecostar der Firma Sensors 31

Tabelle 7: Qualität der untersuchten Rapsölkraftstoffchargen und Grenzwerte nach DIN 51605 50

Tabelle 8: Qualitätsparameter von Kraftstoffproben aus der mobilen Tankstelle 51

Tabelle 9: Qualitätsparameter von Kraftstoffproben aus dem Harvestertank 51

Tabelle 10: Kennwerte des hydrierten Pflanzenöls C.A.R.E. Diesel® 52

1 Einleitung und Problemstellung

Nach einem Vorschlag der EU-Kommission sollen verbindliche nationale Treibhausgaseinsparziele auch in nicht unter das Emissionshandelssystem der EU (EU-EHS) fallenden Wirtschaftssektoren, wie z. B. der Forstwirtschaft, eingeführt werden [18]. In Deutschland sollen in diesen Sektoren bis 2030 die THG-Emissionen um 38 % im Vergleich zum Jahr 2005 reduziert werden. Eine mögliche Maßnahme zum Erreichen der Vorgaben ist der Einsatz regional erzeugter Biokraftstoffe mit dem Zusatznutzen regionaler Energie- und Stoffkreisläufe. Derzeit verfügbare Biokraftstoffe sind primär Biodiesel, Pflanzenölkraftstoff, hydriertes Pflanzenöl (HVO), Bioethanol und Biomethan.

In Deutschland werden jährlich ca. 1,7 Mio. Tonnen Diesel in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt [26]. Diese Menge wird überwiegend durch Rohölimporte aus dem Ausland gedeckt, was zum Abfluss von Geldmitteln aus dem ländlichen Raum und zu hohen Abhängigkeiten von den Lieferstaaten führt.

Durch die Verwendung von Rapsölkraftstoff anstelle von Dieselkraftstoff kann die Forstwirtschaft einen wichtigen Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz, aber auch – aufgrund der besonderen Betankungssituation im Wald – zum Boden- und Gewässerschutz leisten. In Bayern unterliegen etwa 64 % der Waldflächen einem besonderen Schutz durch Naturschutz-, Wald- oder Wasserrecht [4]. Insgesamt 141.000 ha Wald liegen in Wasserschutzgebieten und davon werden knapp 87.000 ha von den Bayerischen Staatsforsten bewirtschaftet [4] [11]. Von den Bayerischen Staatsforsten werden daher bei der Waldarbeit nur Maschinen mit biologisch schnell abbaubaren Hydraulik- und Sägekettenhaftölen eingesetzt [24]. Insbesondere beim Maschineneinsatz in Wasserschutzgebieten empfiehlt darüber hinaus das Bayerische Landesamt für Umwelt, Kraftstoffe mit möglichst geringer Wassergefährdung zu verwenden, wie beispielsweise Rapsölkraftstoff [3]. Zudem kann durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff der *Product Carbon Footprint* (PCF) von Holzpartien gesenkt werden, da der PCF zum überwiegenden Teil durch den verwendeten Kraftstoff verursacht wird. Dezentral in Bayern hergestellter Rapsölkraftstoff verfügt über ein Treibhausgasminderungspotenzial gegenüber Dieselkraftstoff von rund 87,5 % [10].

Der erfolgreiche Einsatz von Rapsölkraftstoff in mobilen landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen wurde in der Vergangenheit mehrfach demonstriert [28] [33] [12] [16]. Die meisten Erfahrungen liegen hier für Motoren bis Abgasstufe IIIB vor. Für mobile forstwirtschaftliche Arbeitsmaschinen, die spezifische Anforderungen hinsichtlich Leistung, Robustheit und klimatischer Bedingungen stellen, liegen keine Erkenntnisse vor.

2 Zielsetzung

Ein forstwirtschaftlicher Vollernter (Harvester), der werkseitig für Dieselkraftstoff freigegeben ist, soll für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff adaptiert werden. Hierzu sollen zunächst das Motor- und das Abgasnachbehandlungssystem am Prüfstand für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff neu appliziert und optimiert werden. Ziel ist die Einhaltung der Grenzwerte für gasförmige und Partikel-Emissionen der aktuellen Abgasstufe IV. Anschließend erfolgt der Einbau des Motors und der Abgasnachbehandlungskomponenten in den Harvester. Weitere Arbeiten zur Anpassung des Kraftstoffsystems und der Peripherie schließen sich an.

Im darauffolgenden Feldtest soll die Praxistauglichkeit des Harvesters im Rapsölbetrieb untersucht und weitere Optimierungen anhand in der Praxis auftretender Anforderungen durchgeführt werden. Dabei werden wichtige Kenngrößen zum Betriebsverhalten aufgezeichnet und analysiert.

Während des Feldtests erfolgen Untersuchungen zum Emissionsverhalten im realen Betrieb, um den schadstoffarmen Betrieb des Motors mit Abgasnachbehandlungssystem zu prüfen und gegebenenfalls Optimierungen vorzunehmen.

Abschließend soll der Harvester einer Begutachtung unterzogen werden, um Informationen zur Funktion des Motors mit den speziell angepassten Komponenten zu gewinnen. Diese Informationen dienen der Evaluation der Anpassungsmaßnahmen und für zukünftige Optimierungsmaßnahmen.

3 Stand des Wissens

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick zum Forstmaschinenbestand in Bayern gegeben sowie der Stand des Wissens zur Nutzung von Pflanzenöl in mobilen Arbeitsmaschinen und zu den gesetzlichen Emissionsvorgaben beschrieben.

3.1 Forstmaschinenbestand in Bayern

Nach STÖLZNER und BORCHERT (2014) [34] besitzen die bis Mai 2014 in der forstlichen Unternehmerdatenbank registrierten bayerischen Forstunternehmen insgesamt 285 Harvester mit einem Durchschnittsalter von 8,9 Jahren und 332 Forwarder mit einem Durchschnittsalter von 9,5 Jahren. Sowohl bei den Harvestern als auch bei den Forwardern besitzt die Firma John Deere den größten Marktanteil. In Deutschland werden jährlich etwa 400 Forstmaschinen verkauft, davon ist etwa je ein Drittel Schlepper, Forwarder und Harvester [27] (siehe Abbildung 1).

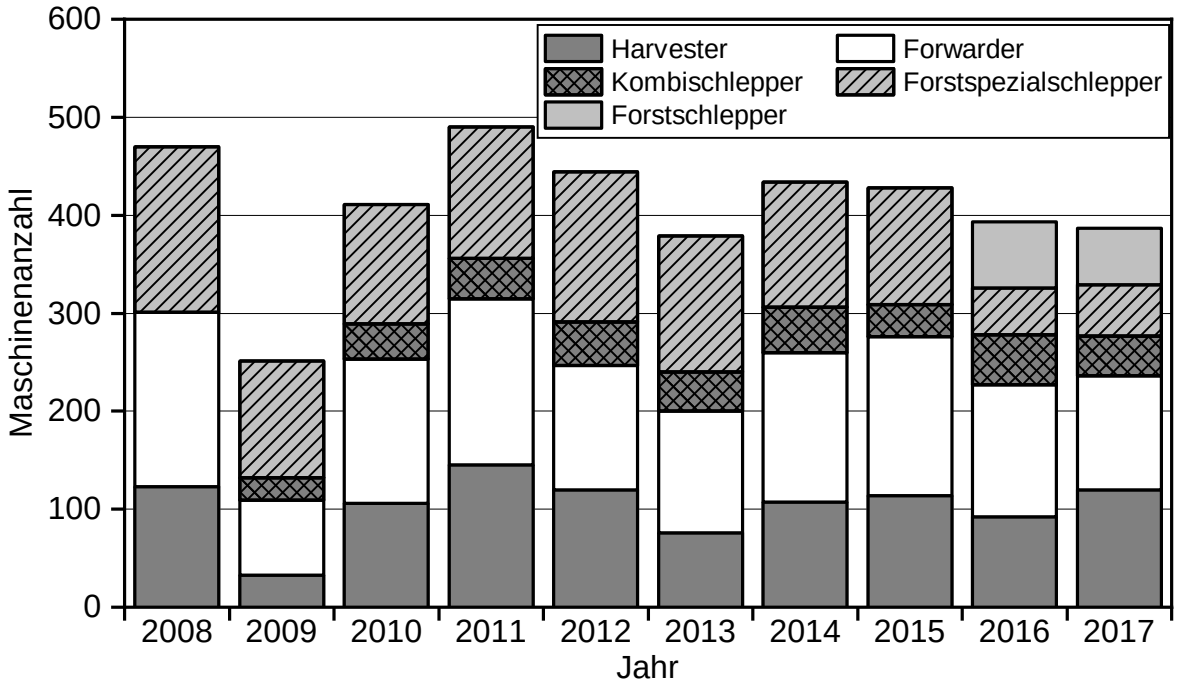


Abbildung 1: Überblick über die in Deutschland verkauften Forstmaschinen in den Jahren 2008 bis 2017 nach HARBAUER (2018) [27]

3.2 Pflanzenöltechnik in Harvestern und Traktoren

Untersuchungen zu Pflanzenöl als Kraftstoff in Harvestern sind nach aktuellem Stand nicht bekannt. In Harvestern werden Non-Road-Motoren verwendet, die in ähnlicher Form auch in Landmaschinen wie Traktoren, Feldhäckslern oder Mähdreschern verbaut werden. Das Betriebsverhalten von Pflanzenöltraktoren wurde bisher primär für die Abgasstufen I, II, IIIA und IIIB untersucht. Eine Übersicht der Vorhaben, die sich mit For-

schung und Demonstration von Pflanzenöl als Kraftstoff in Traktoren beschäftigen, ist in Tabelle 1 dargestellt, eine ausführliche Beschreibung des Stand des Wissens findet sich in ETTL et al. (2016) [15] und ETTL et al. (2019) [16].

Tabelle 1: Literaturübersicht über Flottenversuche mit Pflanzenöltraktoren

Quelle	Titel der Vorhaben
APFELBECK und GESSNER (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 mit Dieselkraftstoff
HÖCK und WIDMANN (1994) [29]	Betriebserfahrungen mit pflanzenölbetriebenen Dieselmotoren (Natur- und Biodiesel)
HASSEL et al. (2005) [28]	Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöltauglichen Traktoren
DÖNGES et al. (2006) [9]	Felderprobung Rapsöl pur
RATHBAUER et al. (2008) [33]	Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft
SY et al. (2009) [35]	Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz
THUNEKE et al. (2009) [37]	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
THE 2nd VEGOIL CONSORTIUM (2011) [36]	Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines
EMBERGER et al. (2013) [12]	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
EMBERGER et al. (2013) [13]	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA
HUBER et al. (2015) [30]	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe Tier 4/EU Stufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
ETTL et al. (2016) [15]	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöltauglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern
ETTL et al. (2019) [16]	Langzeitmonitoring pflanzenöltauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV. Abgasemissionen, Effizienz und Betriebssicherheit pflanzenöltauglicher Traktoren auf den bayerischen staatlichen Versuchsbetrieben

3.3 Abgasgesetzgebung und Prüfmethoden

Einen wesentlichen Antrieb in der Entwicklung der Motortechnik stellen die über die letzten Jahre stetig gestiegenen gesetzlichen Vorgaben zu Schadstoffemissionen dar. Für forstwirtschaftliche Zugmaschinen gilt die EU-Verordnung 167/2013 [22]. In ihr wurde bis Ende 2016 auf die Grenzwerte der EU-Verordnung 97/68/EG [21] verwiesen, die jedoch durch EU-Verordnung 2016/1628 [23] abgelöst wurde. Gesetzlich limitiert sind die Komponenten Stickstoffoxide (NO_X), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Partikelmasse (PM) und, mit Einführung der EU-Verordnung 2016/1628 [23], die Partikelanzahl (PN). Die Grenzwerte für die limitierten Emissionskomponenten für Motoren in forstwirtschaftlichen Zugmaschinen sind mit dem Jahr ihres Inkrafttretens in Tabelle 2 dargestellt.

In der Richtlinie 2016/1628 [23] sind auch die anzuwendenden Prüfzyklen zur Bestimmung der Abgasemissionen im stationären und transienten Betrieb beschrieben. Der stationäre 8-Phasen-Zyklus NRSC (*Non-Road Steady-State Cycle*) ist für alle Abgasstufen gültig. Ab der Abgasstufe IIIB ist zusätzlich zum 8-Phasen-Zyklus der transiente Zyklus NRTC (*Non-Road Transient Cycle*) mit sekündlich wechselnden Drehzahl- und Drehmomentvorgaben im Kalt- und Warmstart vorgeschrieben.

Die im tatsächlichen Betrieb auftretenden Emissionen (engl. *Real Driving Emissions*, kurz RDE) eines Motors können in der Praxis von den am Prüfstand ermittelten abweichen [25]. Dies kann zum Beispiel an unterschiedlichen Umweltbedingungen, dem Fahrerverhalten, Verschleißerscheinungen an der Maschine und vielen weiteren Einflüssen liegen. In einem Pilotprogramm wurden Methoden zur Bestimmung der realen Emissionen von Non-Road-Fahrzeugen durch portable Emissionsmesstechnik (engl. *Portable Emissions Measurement System*, kurz PEMS) geprüft [5]. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde für Verbrennungsmotoren in nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten in der EU-Verordnung 2016/1628 sowie den delegierten Verordnungen 2017/655 und 2017/654 auch eine Prüfung des Emissionsverhaltens im realen Betrieb verankert. In diesen Richtlinien ist eine Prüfmethodik zur Überwachung der Einhaltung der Emissionsanforderungen (In-Service Monitoring) beschrieben. Die Hersteller von Motoren müssen ab der Abgasstufe V diese Messungen durchführen und die Ergebnisse berichten. Es ist jedoch kein Grenzwert bzw. einzuhaltender Konformitätsfaktor festgelegt. Verpflichtende Grenzwerte, die für eine Typengenehmigung eingehalten werden müssen, sind derzeit nur für den NRTC und den NRSC am Motorenprüfstand definiert. Eine ausführliche Zusammenfassung zum aktuellen Stand der Gesetzgebung ist in HUBER et al. (2019) [31] zu finden.

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte nach EU-Richtlinien 97/68/EG [21] und 2016/1628 [23] für Dieselmotoren in Arbeitsmaschinen (Abgasstufen I bis V)

Nennleistung P_N in kW	NO_X in g/kWh[1)]	HC in g/kWh[1)]	CO in g/kWh[1)]	Partikel-masse in g/kWh[1)]	Partikel-anzahl in #/kWh[1)]	Datum[2)]
			Stufe I			
$37 \leq P_N < 75$	9,2	1,3	6,5	0,85	–	Apr 1999
$75 \leq P_N < 130$	9,2	1,3	5,0	0,70	–	1999
$130 \leq P_N \leq 560$	9,2	1,3	5,0	0,54	–	1999
			Stufe II			
$18 \leq P_N < 37$	8,0	1,5	5,5	0,8	–	2001
$37 \leq P_N < 75$	7,0	1,3	5,0	0,4	–	2004
$75 \leq P_N < 130$	6,0	1,0	5,0	0,3	–	2003
$130 \leq P_N \leq 560$	6,0	1,0	3,5	0,2	–	2002
			Stufe IIIA			
$19 \leq P_N < 37$	7,5 (NO_X + HC)		5,5	0,6	–	2007
$37 \leq P_N < 75$	4,7 (NO_X + HC)		5,0	0,4	–	2008
$75 \leq P_N < 130$	4,0 (NO_X + HC)		5,0	0,3	–	2007
$130 \leq P_N \leq 560$	4,0 (NO_X + HC)		3,5	0,2	–	2006
			Stufe IIIB			
$37 \leq P_N < 56$	4,7 (NO_X + HC)		5,0	0,025	–	2013
$56 \leq P_N < 75$	3,3	0,19	5,0	0,025	–	2012
$75 \leq P_N < 130$	3,3	0,19	5,0	0,025	–	2012
$130 \leq P_N \leq 560$	2,0	0,19	3,5	0,025	–	2011
			Stufe IV			
$56 \leq P_N < 130$	0,4	0,19	5,0	0,025	–	Okt 2014
$130 \leq P_N \leq 560$	0,4	0,19	3,5	0,025	–	2014
			Stufe V			
$0 < P_N < 8$	7,5 (NO_X + HC)		8,0	0,4	–	2019
$8 \leq P_N < 19$	7,5 (NO_X + HC)		6,6	0,4	–	2019
$19 \leq P_N < 37$	4,7 (NO_X + HC)		5,0	0,015	$1x10^{12}$	2019
$37 \leq P_N < 56$	4,7 (NO_X + HC)		5,0	0,015	$1x10^{12}$	2019
$56 \leq P_N < 130$	0,4	0,19	5,0	0,015	$1x10^{12}$	2020
$130 \leq P_N \leq 560$	0,4	0,19	3,5	0,015	$1x10^{12}$	2019
$P_N > 560$	3,5	0,19	3,5	0,045	–	2019

[1)] kWh = Kilowattstunde bezogen auf die geleistete Arbeit an der Kurbelwelle

[2)] Datum für das Inverkehrbringen, Typengenehmigung ein Jahr vorher (außer für 130 ≤ PN ≤ 560)

4 Material und Methoden

Im Folgenden werden die Versuchsmaschine, das Vorgehen bei deren Adaption und der Feldtest beschrieben.

4.1 Versuchsmaschine

Im Rahmen des Projekts wird ein forstwirtschaftlicher Vollernter (Harvester) John Deere 1470G mit der Seriennummer 1WJ1470GKGF002047 der Bayerischen Staatsforsten auf Rapsölbetrieb umgerüstet. Das John-Deere-Harvestermodell 1470 war im Jahr 2014 mit einem Marktanteil von 9 % bei den bayerischen Forstunternehmen die dritthäufigste Maschine [34]. Die Maschine ist mit einem aufgeladenen 9-l-Dieselmotor der Abgasstufe IV ausgestattet. Das maximale Drehmoment liegt bei 1315 Nm (1.400 min^{-1}). Bei Nenndrehzahl (2.000 min^{-1}) leistet das Aggregat 200 kW, weitere technische Daten der Versuchsmaschine sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Abbildung 2: Forstwirtschaftlicher Vollernter (Harvester) John Deere 1470G der Bayerischen Staatsforsten

Tabelle 3: 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/ Emissionsminderung	gekühlte, externe Abgasrückführung (AGR) Oxidationskatalysator Dieselpartikelfilter SCR-System

4.2 Adaption des Harvesters

Das John Deere European Technology Innovation Center erarbeitet ein Konzept für die Umrüstung des Harvestermotors auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605. Hierzu werden Erfahrungen zur Entwicklung rapsöltauglicher John-Deere-Traktoren herangezogen. Es wird eine Softwareapplikation für das Motorsteuergerät entwickelt und implementiert, um den Motor mit Rapsölkraftstoff betreiben zu können. Im Anschluss wird das Abgasnachbehandlungssystem auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff abgestimmt und eine Regenerierungsstrategie für Partikelfilter und SCR-Komponenten entwickelt.

Für die Entwicklung und Optimierung der Umrüststrategie dient ein Testtraktor 8370R mit gleichem verbauten Motortyp wie im Harvester (siehe Abbildung 3). Diese anwendungsorientierte Vorgehensweise bietet den Vorteil, bereits frühzeitig aussagekräftige Praxiserfahrungen mit dem Harvestermotor im Rapsölbetrieb zu sammeln, um Ausfallzeiten des Harvesters zu minimieren. Die entwickelte Softwareapplikation für den Motorbetrieb mit Rapsölkraftstoff wird darüber hinaus am Motorenprüfstand evaluiert.

Neben der Anpassung des Motor- und Abgasnachbehandlungssystems sind am Harvester selbst weitere Adaptionen notwendig, um den Betrieb und vor allem den Kaltstart mit Rapsölkraftstoff unter harten Winterbedingungen zu ermöglichen. Hierzu werden Lösungsprinzipien systematisch analysiert, bevorzugte Lösungsansätze ausgewählt und diese dann konstruktiv in die Praxis umgesetzt.

Quelle: John Deere

Abbildung 3: Testtraktor John Deere 8370R mit gegenüber dem Harvester 1470G baugleichem Motor John Deere PowerTech Plus 6090

4.3 Leistungs- und Emissionsmessungen

Für das Forschungsvorhaben sind Messungen zum Leistungs- und Emissionsverhalten des Harvestermotors erforderlich. Da die Einbindung des Harvesters in den Traktorenprüfstand nur unter großem Aufwand möglich wäre, werden die Messungen zum Leistungs- und Emissionsverhalten an einem John-Deere-8370R-Traktor durchgeführt, der mit dem baugleichen Motor ausgestattet ist. Diese Messungen werden am Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) durchgeführt. Eine detaillierte Übersicht über den Aufbau und die Funktionsweise des Prüfstands ist in ETTL et al. (2016) [15] zu finden. Der Prüfstand ist konzipiert für die Messung von gasförmigen Abgaskomponenten und Partikelemissionen von Traktormotoren im eingebauten Zustand. Die Emissionsmessungen am Prüfstand erfolgen in Anlehnung an ISO 8178-1 [32], die weitestgehend mit den Anforderungen nach EU-Verordnung 2017/654 [20] und Global Technical Regulation Nr. 11 [39] übereinstimmt. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht des Prüfstands.

Der 8370R-Traktor wird mit den am Harvester eingestellten Motorsteuergerätesoftwareparametern am Traktorenprüfstand betrieben, um Rückschlüsse auf das Leistungs- und Emissionsverhalten des Harvestermotors zu erzielen. Die technischen Daten des Motors entsprechen den in Tabelle 3 aufgeführten Werten.

Bei der Emissionsmessung werden die für Motoren der Abgasstufe IV gültigen Prüfzyklen verwendet. Ein Prüfzyklus, der Anwendung findet, ist der *Non-Road Transient Cycle* (NRTC). Dieser wird im Kalt- und Warmstart durchgeführt und gemäß den Vorgaben nach EU-Verordnung 2016/1628 [23] gewichtet. Da der NRTC für den Motorenprüfstand konzipiert ist, kann dieser Prüfzyklus mit seiner hohen geforderten Dynamik häufig nicht

bei Messungen an Traktoren mit eingebauten Motoren Anwendung finden [14]. Abweichend davon ist bei diesem 8370R-Traktor in Verbindung mit der auf Rapsölkraftstoff optimierten Motorsteuergerätesoftware des Harvesters eine Anwendung des NRTC möglich. Neben dem NRTC wird das Emissionsverhalten im *Non-Road Steady-State Cycle* (NRSC) untersucht. In diesem werden acht stationäre Punkte angefahren und das Emissionsverhalten ermittelt. Alle Messungen werden mindestens mit dreifacher Wiederholung durchgeführt. Ergänzend zu den Messungen am Traktorenprüfstand wird wiederkehrend das Emissionsverhalten im realen Betrieb mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) erfasst (siehe Unterkapitel 4.5).

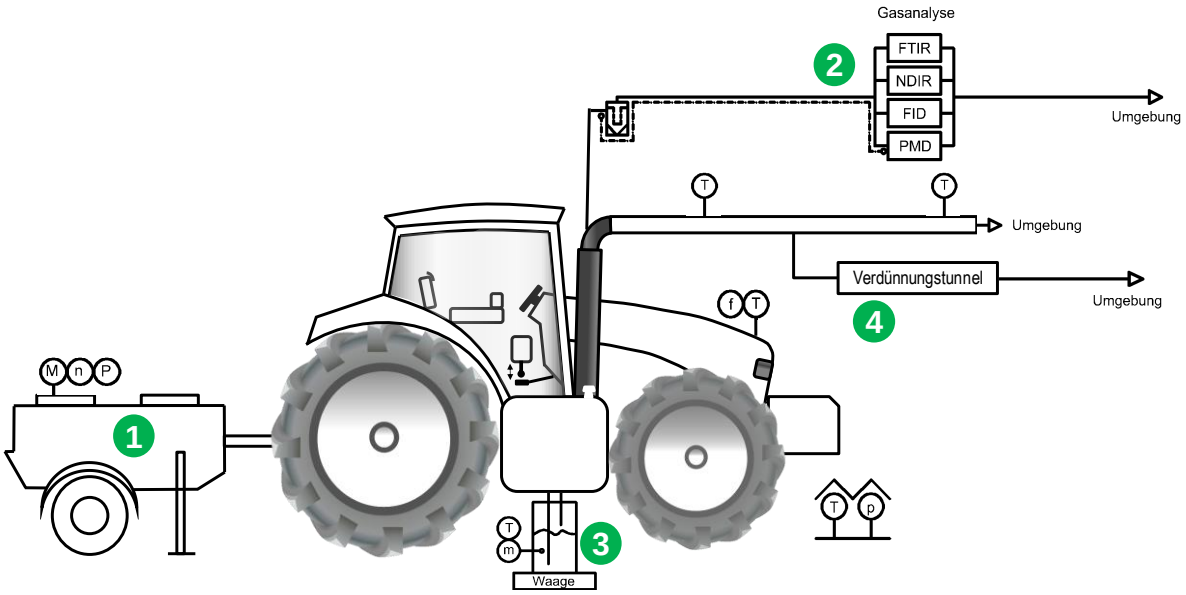


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstands mit Wirbelstrombremse (1), Gasanalysatoren (2), Kraftstoffverbrauchsmessung (3) und Partikelprobenahme (4)

4.4 Feldtest

Im Rahmen des Feldtests werden wichtige Betriebsdaten sowie die Motorenöl- und Kraftstoffqualität erfasst, um die Funktionalität des Harvesters im Betrieb mit Rapsölkraftstoff nachzuweisen. Eventuell auftretende Störungen sollen analysiert und behoben werden, um die Maschine weiter zu optimieren. In den nachfolgenden Kapiteln werden die während des Feldtests bei den Bayerischen Staatsforsten überwachten Parameter näher beschrieben.

Erste Daten werden schon vor der Umrüstung im Betrieb mit Dieselkraftstoff erfasst, um bessere Aussagen zum Betriebsverhalten im Vergleich zu Rapsölkraftstoff treffen zu können.

4.4.1 Kraftstofflogistik und -qualität

Vor der Umrüstung auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff wird handelsüblicher Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 verwendet. Dieser Kraftstoff wird von einem Mineralölhändler in die Nähe des Einsatzorts des Harvesters geliefert. Je nach Witterung und örtlichen Gegebenheiten (Zustand der Forstwege bzw. Zufahrtswege) erfolgt dann die Befüllung einer mobilen Tankvorrichtung, die sich in einem Begleitfahrzeug zum Harvester befindet und aus der der Harvester betankt wird. Falls möglich wird der Harvester auch direkt bei der Kraftstoffanlieferung mitbetankt.

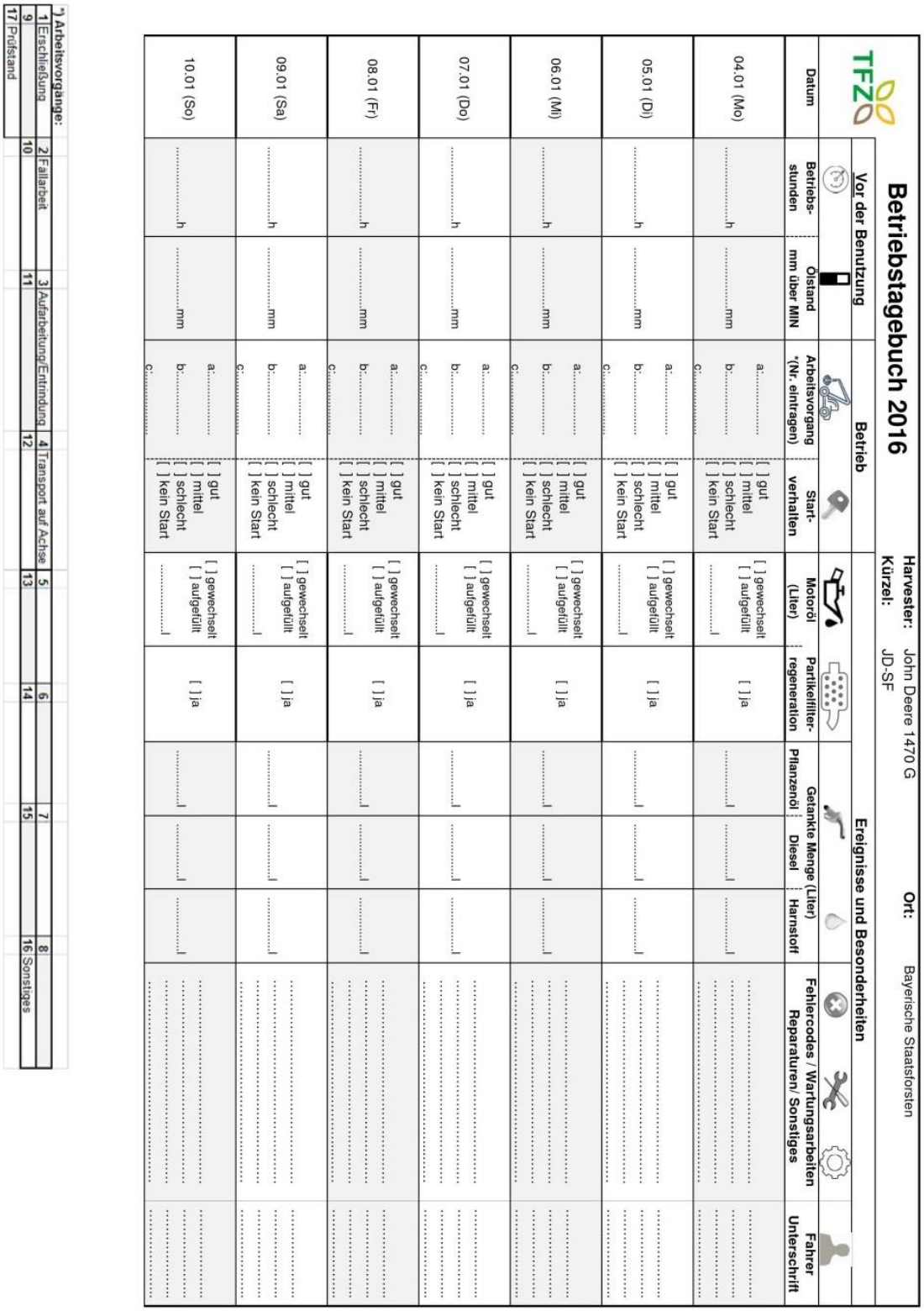
Nach der Umrüstung wird Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 [6] eingesetzt. Die gelieferten Rapsölkraftstoffchargen werden stichprobenhaft hinsichtlich der Parameter Gesamtverschmutzung, Säurezahl, Oxidationsstabilität, Wasser-, Schwefel-, Phosphor-, Calcium- und Magnesiumgehalt untersucht. Die Proben werden nach der Anlieferung aus den Lagertanks entnommen. Zusätzlich werden stichprobenartig Proben aus dem Harvestertank und der mobilen Tankvorrichtung analysiert, um die Kraftstoffqualität an diesen Stellen beurteilen und mögliche Anreicherung von Verschmutzungen feststellen zu können.

In Anlehnung an die Kraftstofflogistik mit Dieselkraftstoff werden Möglichkeiten zur Belieferung und Lagerung von Rapsölkraftstoff erarbeitet. Hierzu werden zunächst mögliche Lieferanten angefragt und mit diesen Logistikvarianten diskutiert.

Zudem sind Änderungen an der Tankvorrichtung nötig, um diese an die spezifischen Eigenschaften von Rapsölkraftstoff, wie zum Beispiel die höhere Viskosität und die höheren Erstarrungstemperaturen, anzupassen.

4.4.2 Betriebsdaten

Zur Erfassung der Einsatzbedingungen, der Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie der auftretenden Störungen wird ein Maschinentagebuch geführt. Abbildung 5 zeigt einen Auszug aus dem Maschinentagebuch und in Tabelle 4 werden die darin aufgeführten Parameter näher erläutert. Ergänzend dazu erfolgt ein regelmäßiger Informationsaustausch zwischen dem Betreiber und dem TFZ mit dem Ziel, die Praxiserfahrungen sowie mögliche Schwachstellen und Störungen zu dokumentieren.



Betriebstagebuch 2016

Harvester: John Deere 1470 G
Kürzel: JD-SF
Ort: Bayerische Staatsforsten

Datum	Vor der Benutzung: Betriebsstunden	Vor der Benutzung: Ölstand mm über MIN	Betrieb: Arbeitsvorgang *(Nr. eintragen)	Betrieb: Startverhalten	Ereignisse und Besonderheiten: Motoröl (Liter)	Partikelfilterregeneration	Getankte Menge (Liter): Pflanzenöl	Getankte Menge (Liter): Diesel	Harnstoff	Fehlercodes / Wartungsarbeiten Reparaturen/ Sonstiges	Fahrer Unterschrift
04.01 (Mo)	……h	……mm	a:…… b:…… c:……	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] gewechselt [ ] aufgefüllt ……l	[ ] ja	……l	……l	……l	……	……
05.01 (Di)	……h	……mm	a:…… b:…… c:……	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] gewechselt [ ] aufgefüllt ……l	[ ] ja	……l	……l	……l	……	……
06.01 (Mi)	……h	……mm	a:…… b:…… c:……	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] gewechselt [ ] aufgefüllt ……l	[ ] ja	……l	……l	……l	……	……
07.01 (Do)	……h	……mm	a:…… b:…… c:……	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] gewechselt [ ] aufgefüllt ……l	[ ] ja	……l	……l	……l	……	……
08.01 (Fr)	……h	……mm	a:…… b:…… c:……	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] gewechselt [ ] aufgefüllt ……l	[ ] ja	……l	……l	……l	……	……
09.01 (Sa)	……h	……mm	a:…… b:…… c:……	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] gewechselt [ ] aufgefüllt ……l	[ ] ja	……l	……l	……l	……	……
10.01 (So)	……h	……mm	a:…… b:…… c:……	[ ] gut [ ] mittel [ ] schlecht [ ] kein Start	[ ] gewechselt [ ] aufgefüllt ……l	[ ] ja	……l	……l	……l	……	……

*) Arbeitsvorgänge:

1	Erschließung	2	Fällarbeit	3	Aufarbeitung/Entrindung	4	Transport auf Achse
9		10		11		12	
17	Prüfstand						

5		6		7		8	
13		14		15		16	Sonstiges

Abbildung 5: Abbildung Betriebstagebuch des John-Deere-1470G-Harvesters der Bayerischen Staatsforsten

Für das Datenmanagement wird eine Datenbank, basierend auf Microsoft Excel mit VBA, verwendet. In der Datenbank werden die gesamten Informationen des Feldtests eingegeben und verwaltet. Monatlich werden die Eintragungen der Betriebstagebücher sowie die Ergebnisse der Motorenölanalysen eingepflegt. Außerdem werden die Betriebserfahrungen aus den Gesprächen mit den Maschinennutzern erfasst.

Von den Bayerischen Staatsforsten werden die Produktivitätsdaten, die wöchentlichen Maschinenarbeitsstunden und die Zeiten für Reparaturen, Umsetzen des Harvesters sowie Sonstiges erfasst.

Tabelle 4: Parameter im Betriebstagebuch zur Dokumentation des Praxiseinsatzes

Parameter	Beschreibung
Betriebsstunden	Zu Beginn eines Arbeitstags wird der Stand des Betriebsstundenzählers eingetragen, um die Verteilung der Arbeitszeit zu ermitteln.
Motorenölstand	Der Motorenölstand wird bei der täglichen Inbetriebnahme von der unteren Einkerbung des Ölmessstabs bis zum Ölstand ermittelt.
Arbeitsvorgänge	Insgesamt vier Arbeitsvorgänge können über Nummerncodes eingetragen werden. Zudem können sonstige Arbeitsvorgänge ergänzt werden. Bei unterschiedlichen Arbeitsvorgängen an einem Tag werden die drei überwiegenden Tätigkeiten eingetragen und zu gleichen Teilen auf die Arbeitszeit angerechnet.
Startverhalten	Das Startverhalten des Motors wird vom Fahrer vier Bewertungsklassen zugeordnet: Gut = der Start erfolgte zügig mit einem Versuch. Mittel = stark verzögerter Start oder zwei Versuche erforderlich. Schlecht = es wurden mehr als zwei Versuche benötigt. Kein Start = es war kein Start möglich.
Partikelfilterregeneration	Erfassung des Zeitpunkts, bei dem eine Regenerierung des Partikelfilters erfolgt.
Betriebsstoffe	Erfassung der getankten Mengen an Kraftstoffen, AdBlue®, nachgefülltem Motorenöl und des Zeitpunkts des Ölwechsels.
Fehlermeldungen, Wartungsarbeiten, Reparaturen, Sonstiges	Auffälligkeiten, Reparaturen, Fehlermeldungen und Wartungsarbeiten werden dokumentiert und dienen primär zur Beurteilung der Störanfälligkeit.

4.4.3 Elektronische Datenaufzeichnung

Die elektronische Datenerfassung besteht aus einem Datenlogger Vector GL 2000, der in der Fahrerkabine installiert wurde. Durch den Datenlogger werden kontinuierlich Betriebsdaten aus dem CAN-Bus erfasst. Für die Erfassung der Daten wurde vom Hersteller eine Datenbankdatei (dbc-File) zur Verfügung gestellt, mit der Zustandsdaten wie zum Beispiel Drehzahl, Drehmoment und Geschwindigkeit dokumentiert werden können.

Neben dem nachträglich integrierten Datenlogger werden für die Auswertung des Kraftstoffverbrauchs und weiterer Zustandsdaten die von der herstellerseitig installierten TimberMatic-Steuerung gespeicherten Daten verwendet.

4.4.4 Motorenölqualität

Für den Versuchstraktor wird das vom Hersteller empfohlene Motorenöl John Deere Plus-50™ II verwendet. Während des Rapsölbetriebs wird die Motorenölqualität wiederkehrend alle 50 Bh untersucht, um Aussagen zum Motorenölzustand treffen zu können. Darüber hinaus können anhand der Analysen Rückschlüsse auf übermäßigen Verschleiß gezogen werden. Motorenölproben werden auch schon während des Dieselbetriebs analysiert, um einen besseren Vergleich zum Betrieb mit Rapsölkraftstoff zu ermöglichen.

Ein Motorenölwechsel wird durchgeführt, wenn das Motorenöl laut Analyse nicht mehr in einem betriebstauglichen Zustand ist oder die Laufzeit des Motorenöls 500 Bh überschreitet. Das vom Maschinenhersteller vorgeschriebene Motorenölwechselintervall für Dieselkraftstoff beträgt ebenfalls 500 Bh. Abweichend davon wird zur Risikominimierung während der ersten 500 Stunden nach der Umrüstung das Motorenöl bereits nach 250 Bh gewechselt. Dies ist aufgrund des zeitlichen Verzugs zwischen Probennahme und Bewertung der Motorenölanalyse nötig.

Eine Auswahl der untersuchten Parameter und der dabei verwendeten Analysemethoden ist in Tabelle 5 dargestellt. Die Probenentnahme erfolgt über den Motorenöleinfüllstutzen mit einer Pumpe und einem Schlauch.

Tabelle 5: Ausgewählte Untersuchungsparameter zur Beurteilung der Motorenölqualität und verwendete Analyseverfahren

Untersuchungsparameter	Prüfverfahren
Rußgehalt	DIN 51452
Verschleißmetalle (z. B. Kupfer, Eisen, Aluminium)	DIN 51363-1
Pflanzenölgehalt	DIN 51639-4
Additive (z. B. Phosphor, Magnesium)	DIN 51363-1
Total Acid Number (TAN)	ASTM D 664
Total Base Number (TBN)	DIN ISO 3771
Kinematische Viskosität (40 °C und 100 °C)	ASTM 7279

4.5 Emissionsverhalten im realen Betrieb

Das Emissionsverhalten des Harvesters im realen Betrieb wird mit Dieselkraftstoff vor der Umrüstung und mit Rapsölkraftstoff nach der Umrüstung sowie gegen Projektende in vierfacher Wiederholung untersucht. Alle Messungen fanden im Ebersberger Forst statt. Dabei führte der Harvester Fällarbeiten sowie die Aufarbeitung von Stämmen durch.

Zur Durchführung der Messungen sind Anpassungen am Aufbau des PEMS, wie beispielsweise eine fahrzeugspezifische Aufnahmevorrichtung und Schutzvorrichtungen gegen herabfallende Äste, notwendig. Der Harvester mit dem vollständigen PEMS-Aufbau ist in Abbildung 6 zu sehen.

Abbildung 6: PEMS-Aufbau am Heck des Harvesters im Praxiseinsatz

In Abbildung 7 sind die wesentlichen Komponenten des portablen Emissionsmesssystems (PEMS) Semtech Ecostar der Firma Sensors Inc. dargestellt. Die Analysatoren zur Messung der gasförmigen Abgasemissionen erfüllen die Vorgaben der Richtlinie UN-ECE.R-49 [38] und der Commission Regulation EU 582/2011 [17]. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Analysatoren ist in HUBER et al. (2019) [31] zu finden. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Messprinzipien der Abgasanalysatoren.

Tabelle 6: Technische Daten der Abgasanalysatoren des Semtech Ecostar der Firma Sensors

Messgröße	Messverfahren
Kohlenstoffdioxid und -monoxid	Nicht Dispersives Infrarot-Spektroskop (NDIR)
Stickstoffdioxid und -monoxid	Nicht Dispersiver Ultra-Violett-Analysator (NDUV)
Kohlenwasserstoffe und Methan	Dual-Flammen-Ionisations-Detektor (DualFID)

Abbildung 7: Analysatoren des portablen Emissionsmesssystems (PEMS) Semtech Ecostar in der Schutzbox

Die Auswertung der Messdaten wird mithilfe des Excel-Add-Ins EMROAD 5.96 B3 des *Joint Research Centre* (JRC) nach den aktuellen gesetzlichen Vorgaben der EU-Verordnung 2017/655 [19] ausgewertet. Dabei werden gemäß der Richtlinie Nicht-Betriebsereignisse identifiziert und für die Berechnung der Emissionen ausgeschlossen. Die für die Auswertung notwendigen Vollastkurven zur Bestimmung der NRTC-Zyklusarbeit werden von John Deere ETIC an einem Motorenprüfstand ermittelt. Die Referenzarbeit eines NRTC beträgt für den Harvestermotor 24 kWh an der Kurbelwelle. Übereinstimmend mit den Vorgaben der EU-Verordnung 2017/655 [19] werden bei den Einzelmessungen die gemessenen Daten bis zum Erreichen der sechsfachen NRTC-Arbeit (144 kWh) berücksichtigt. Nähere Informationen zum Ablauf einer PEMS-Messung und Auswertung sind in HUBER et al. (2019) [31] dokumentiert.

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen werden in Form von Konformitätsfaktoren der gültigen Mittelungsfenster dargestellt, wie in der EU-Verordnung 2017/655 [19] definiert. Der Konformitätsfaktor *CF* errechnet sich nach Formel (4.1) aus der spezifischen Emission der gasförmigen Schadstoffkomponente eines Mittelungsfensters *e* in g/kWh und dem geltenden Grenzwert *L* in g/kWh.

$$CF = \frac{e}{L} \qquad (4.1)$$

5 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Vorhabens zusammenfassend dargestellt. Die Umrüstung des Harvesters fand im Juli 2017 statt und der Feldversuch mit Rapsölkraftstoff lief bis Dezember 2018.

5.1 Konzeption und Adaption des Kraftstoffsystems

Es wurden verschiedene Lösungsvarianten zur Realisierung des Umbaus, vor allem in Bezug auf die Kaltstartfähigkeit, gegenübergestellt und bewertet. Im Folgenden wird das ausgewählte Konzept näher vorgestellt.

Der ausgewählte Lösungsansatz sieht zunächst einen möglichst störungsfreien Betrieb der Standheizung vor, die nicht für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff geeignet ist. Hierzu muss diese mit einem geeigneten Kraftstoff (z. B. Diesel, Biodiesel oder hydriertes Pflanzenöl) betrieben werden, der in einem zusätzlichen Tank gelagert wird. Mit der Standheizung soll bei niedrigen Außentemperaturen Wärme bereitgestellt werden, um das Hydrauliksystem, den Motorblock, den Rapsölkraftstofftank und die Fahrerkabine zu beheizen. Für die Beheizung des Rapsölkraftstofftanks wird ein Wärmetauscher neu in den Kraftstofftank integriert. Durch dieses Vorwärmsystem soll der Motor des Harvesters auch bei niedrigen Temperaturen mit Rapsölkraftstoff gestartet und betrieben werden können. Zusätzlich wird das Niederdruckkraftstoffsystem auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst und eine Softwareapplikation für das Motorsteuergerät entwickelt, um den Motor ausschließlich mit Rapsölkraftstoff zu betreiben.

5.1.1 Konstruktion und Implementierung des externen Tanks

Der externe Tank für den Betrieb der Standheizung wird rechts hinten am Harvester, symmetrisch zum DEF-Tank (*Diesel Exhaust Fluid*; Handelsname: AdBlue®), montiert. Der Tank wird aus 3 mm starkem Blech gefertigt. Zum Schutz befindet sich zusätzlich eine 5 mm starke Schutzhülle aus Stahl um den Tank. Durch eine Wartungsklappe kann der Füllstand des Tanks abgelesen werden. Zudem kann der Tankgeber ohne das Entfernen der Schutzhülle für eventuelle Wartungsarbeiten erreicht werden. Je nach Schräglage der Maschine beträgt das nutzbare Tankvolumen maximal 44 Liter und minimal 35 Liter. In Abbildung 8 sind die Positionierung des externen Tanks am Heck des Harvesters und dessen Detailansicht dargestellt.

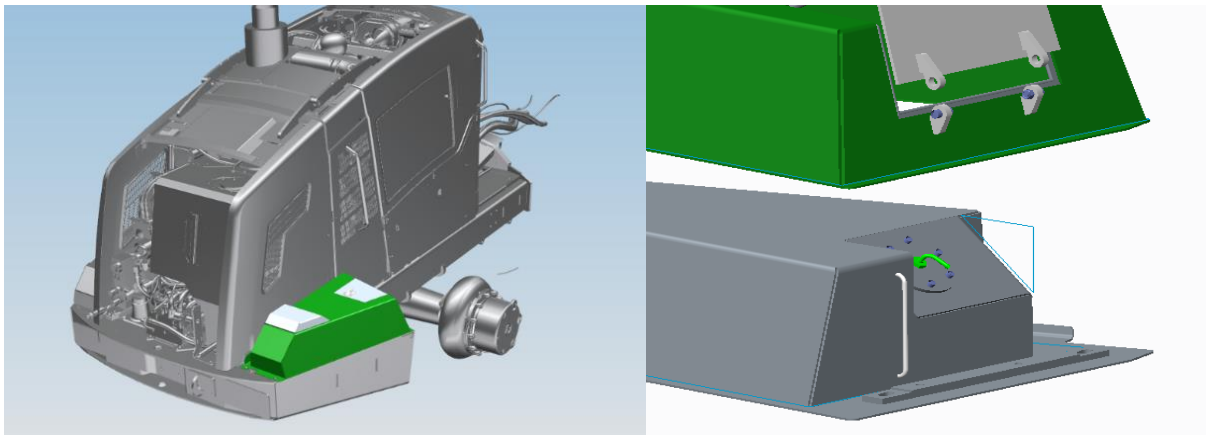


Abbildung 8: Positionierung des Zusatztanks für die Standheizung (links) und Detailansicht des Tanks (rechts)

5.1.2 Konstruktion und Implementierung der Heizung des Rapsölkraftstofftanks

Zur Beheizung des Rapsölkraftstofftanks wird ein Wärmetauscher mit Ansaugstutzen auf Basis eines modifizierten Tankgebers für einen DEF-Tank verwendet. Dieser Tankgeber besteht in der modifizierten Version aus zwei Leitungen für den Kraftstoff und einer Heizspirale, durch die vorgewärmtes Kühlwasser strömt (Abbildung 9).

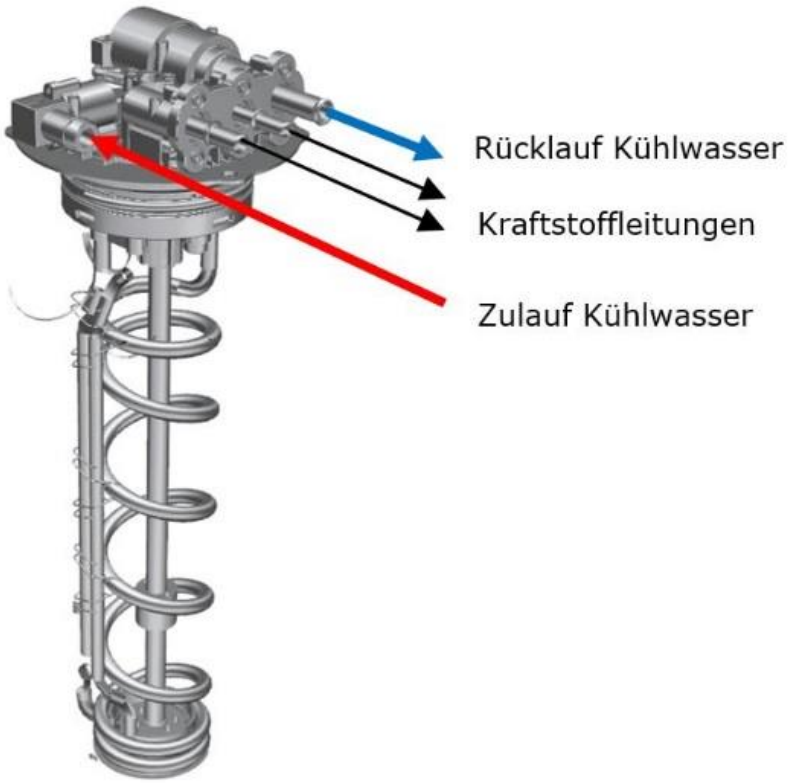


Abbildung 9: Modifizierter DEF-Tankgeber für die Beheizung des Rapsölkraftstofftanks

Um eine gute Wartungsmöglichkeit des modifizierten Tankgebers zu gewährleisten, wurde dieser an einer gut zugänglichen Position des Kraftstofftanks am seitlichen Heck des Harvesters unter einer Wartungsklappe integriert (siehe Abbildung 10). Durch diese Einbauposition konnte der Aufwand für den Umbau reduziert werden, da für die Montage an der ursprünglich geplanten Position der Kraftstofftank ausgebaut und dafür große Teile des Hydrauliksystems demontiert hätten werden müssen. Durch diese Maßnahme konnte die notwendige Stillstandzeit des Harvesters auf zwei Wochen reduziert werden. Bei dieser Einbauposition war jedoch der Nachteil in Kauf zu nehmen, dass der beheizte Tankgeber nicht am tiefsten Punkt des Tanks Kraftstoff ansaugt und somit bei teilentleertem Tank das Ansaugen von Luft möglich ist. Um dies zu verhindern, wurde zunächst ein 2-Wege-Hahn eingebaut, damit nach einer gewissen Betriebszeit des Harvesters auf die Serienansaugleitungen, die bis zum Boden des Tanks reichen, umgeschaltet werden kann. Im Oktober 2017 wurde der 2-Wege-Hahn durch einen Absperrhahn ersetzt, damit beim Motorenstart der DEF-Tankgeber zusätzlich zum Serientankgeber für das Ansaugen des Kraftstoffs verwendet werden kann.

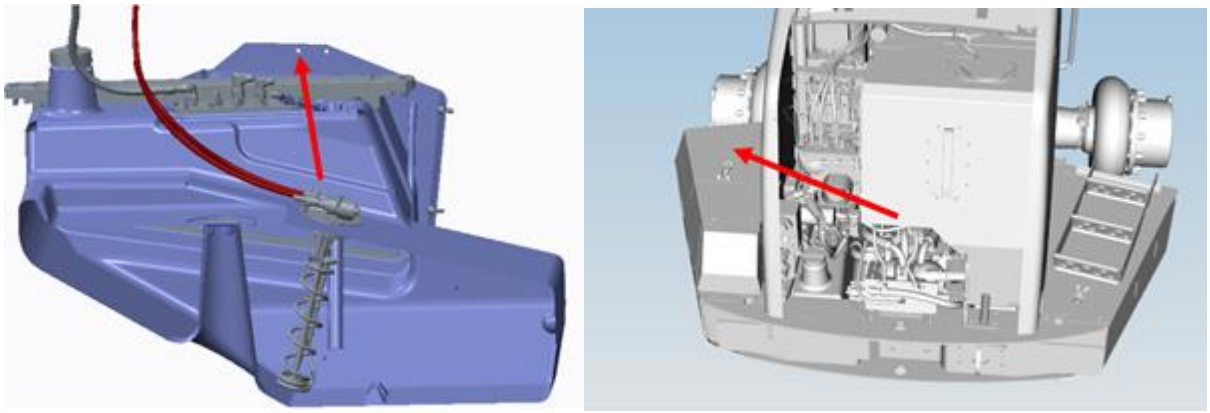


Abbildung 10: 3D-Ansicht der Position des zusätzlich installierten modifizierten Tankgebers

Erste Betriebserfahrungen im Feldtest zeigten jedoch, dass insbesondere bei tiefen Temperaturen und damit zunehmender Viskosität des Kraftstoffs der zulässige minimale Kraftstoffdruck teilweise unterschritten wurde. Dies wurde unter anderem durch vergleichsweise kleine Ansaugleitungen des modifizierten DEF-Tankgebers verursacht, sodass im November 2017 ein nochmals modifizierter Tankgeber mit deutlich größerer Ansaugleitung und besseren Anschlussmöglichkeiten in die beheizte Kraftstoffleitung im Tank integriert wurde. Dadurch werden Strömungsverluste im Kraftstoffkreislauf minimiert, vor allem während des Motorstarts.

Abbildung 11: Modifizierter Tankgeber der 2. Generation im ausgebauten Zustand (rechts) sowie im eingebauten Zustand mit Datenlogger für die Erfassung von Kühlmittel- und Kraftstofftemperaturen (links)

Der Kühlwasserfluss durch den Tankgeber wird durch ein elektrisches Ventil in Abhängigkeit von der Temperatur des abgepumpten Rapsöls geregelt. So kann bei tiefen Temperaturen der Rapsölkraftstoff permanent beheizt und damit ein Auskühlen des Kraftstoffs während des Betriebs ausgeschlossen werden. Zudem wird durch das Regelventil ein Überhitzen des Rapsöls vermieden.

Im Verlauf der Voruntersuchungen war festzustellen, dass das Regelventil zu starke Druckschwankungen im Kühlwasserkreislauf der Standheizung verursacht. Aus diesem Grund wurde die Schaltstellung durchgehend auf „Offen“ eingestellt. Da ein Überhitzen des Kraftstoffs durch die Einbauposition des modifizierten DEF-Tankgebers ausgeschlossen ist, wurde dieses Regelventil bei den Optimierungsmaßnahmen im Oktober 2017 wieder entfernt.

5.1.3 Anpassung des Niederdruckkraftstoffsystems

Im Niederdruckkraftstoffsystem wurde die originale Kraftstoffvorförderpumpe entfernt und stattdessen zwei leistungsstärkere Pumpen vor dem Kraftstoffvorfilter installiert. Jede Pumpe hat eine eigene Ansaugleitung, die an den neu installierten, modifizierten Tankgeber angeschlossen wird. Beide Pumpen haben einen Bypass mit einem eingebauten Druckbegrenzungsventil, welches das Niederdruckkraftstoffsystem vor Überlastung schützt. An der Filterbaugruppe wurden kleine Veränderungen vorgenommen. In den Filterkopf wurde eine Heizung integriert, an dem Filterverteiler das originale Rückschlagventil der Entlüftung durch ein neues ersetzt und die Öffnung vergrößert. Im Rapsölbetrieb werden spezielle Kraftstofffilter verwendet, die einen geringeren Druckverlust aufgrund der höheren Viskosität des Kraftstoffs verursachen.

Über den Kraftstoffkühler wurde ein Bypass mit integriertem Druckbegrenzungsventil installiert, um den Druck vor dem Kühler zu regulieren. Durch zwei weitere Druckbegrenzungsventile wurde die Rücklaufleitung mit den Ansaugleitungen der Pumpe verbunden. Dadurch wird verhindert, dass zu hohe Drücke in der Rücklaufleitung und zu niedrige Drücke in den Ansaugleitungen entstehen.

Der vom Motor zurückfließende Kraftstoff wird über den originalen Tankgeber in den Tank geleitet. Die originalen Kraftstoffleitungen wurden durch neue Leitungen mit größerem Innendurchmesser ersetzt. Zudem werden die Kraftstoffleitungen elektrisch beheizt. Dadurch soll ein Zufrieren dieser Leitungen bei sehr kalten Temperaturen verhindert sowie eine Verflüssigung des Kraftstoffs vor dem Motorstart ermöglicht werden.

Das Niederdruckkraftstoffsystem wurde in einer Kältekammer aufgebaut und bei niedrigen Temperaturen getestet. Ziel war primär die Entwicklung einer möglichst effizienten Heizstrategie für die elektrisch betriebenen Heizleitungen. Als problematisch stellte sich hierbei heraus, dass bei der Kristallisation des Rapsöls Luft in das Kraftstoffsystem gezogen wurde. Durch die Verringerung des Volumens beim Wechsel des Aggregatzustands wird Umgebungsluft angesaugt, die isolierend wirkt. Dadurch kann die Wärme der Heizleitungen nur schlecht auf den Kraftstoff übertragen werden. Durch eine geeignete Regelstrategie der Heizung mittels eines Mikrocontrollers mit alternierenden Heizphasen konnte dieses Problem gelöst und eine zu hohe Beanspruchung der Batterien verhindert werden.

Erste Betriebserfahrungen zeigten, dass beim Motorenstart mit kaltem Kraftstoff der Solldruck vor der Hochdruckpumpe vereinzelt nicht erreicht wurde und Fehlermeldungen auftraten. Daher wurden im Oktober und November 2017 Änderungen, wie z. B. die Integration eines modifizierten Tankgebers und Absperrventils (siehe Abschnitt 5.1.2), vorgenommen. Abbildung 12 gibt einen Überblick zum optimierten Kraftstoffniederdrucksystem.

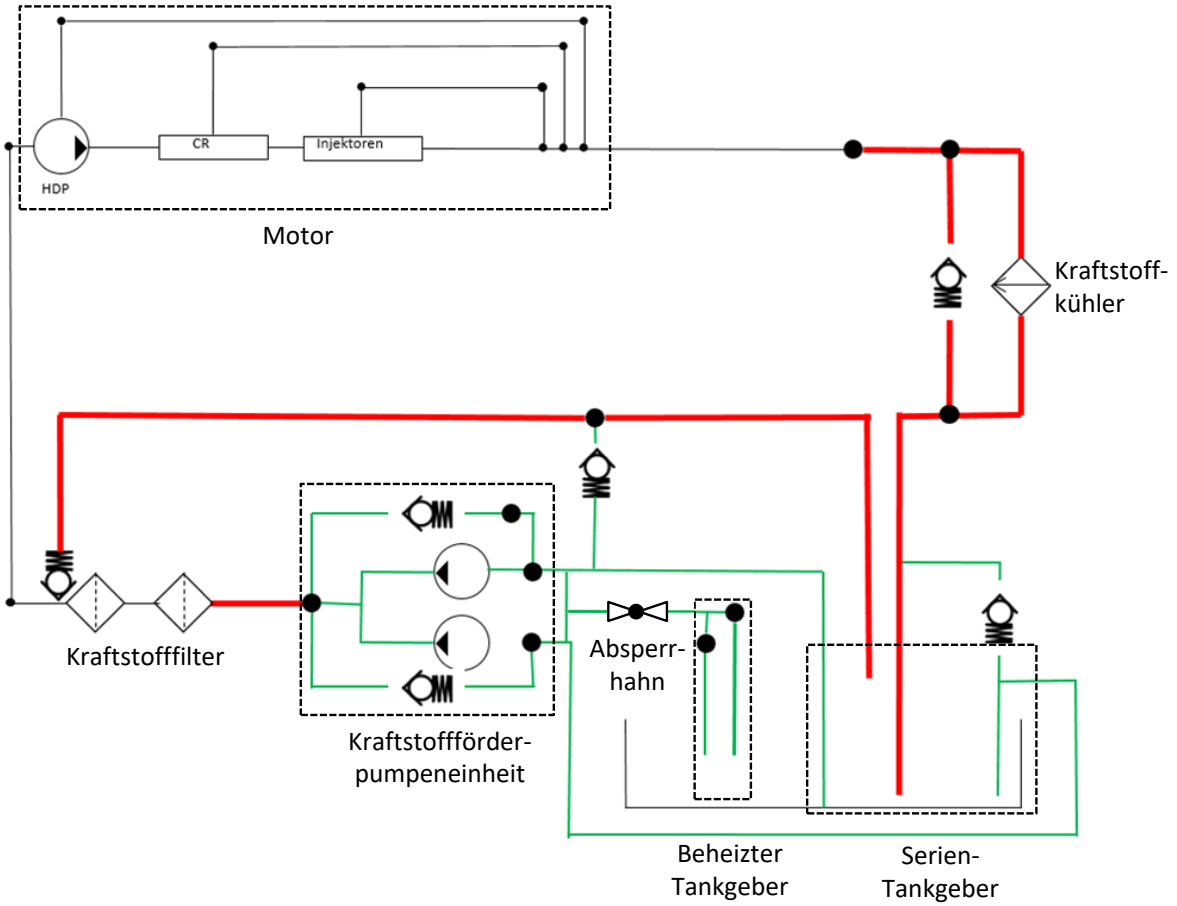


Abbildung 12: Schematische Darstellung des optimierten Niederdruckkraftstoffsystems

5.1.4 Entwicklung der Softwareapplikation

Zur Entwicklung der Softwareapplikation wurde ein John-Deere-8370R-Traktor auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umgerüstet und optimiert. Die Anpassungen bei der Motorsteuergerätesoftware erfolgten vor allem mit dem Ziel, die gleiche Leistungscharakteristik wie im Dieselbetrieb und ein gutes Kaltstartverhalten zu erreichen. Eine Messung der Leistung eines baugleichen Motors am Prüfstand der Technischen Universität Kaiserslautern im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff bestätigte, dass eine in etwa gleiche Leistungscharakteristik erreicht werden kann.

5.1.5 Adaption des Abgasnachbehandlungssystems

Adaptionen am Abgasnachbehandlungssystem sind primär im Bereich der Regenerierung notwendig. Im Serienzustand wird über eine externe Nacheinspritzung von Dieselkraftstoff in den Abgasstrang die Regenerierung durchgeführt. Dabei wird durch eine Abzweigung an der Hochdruckpumpe Dieselkraftstoff mit mittlerem Druck bereitgestellt, der mittels einer Düse in das Abgasnachbehandlungssystem hineindosiert wird.

Vorangegangene Untersuchungen von John Deere zeigten, dass diese externe Nacheinspritzung zur Regenerierung mit Rapsölkraftstoff nicht zweckdienlich ist. Die Regene-

rierung erfolgt daher beim Harvester mit dem Kraftstoff, der in einem externen Tank auch für den Betrieb der Standheizung verwendet wird (siehe Abschnitt 5.1.1). Für die Bereitstellung des Kraftstoffs auf dem für die Düse geeigneten Druckniveau wurden eine zusätzliche Kraftstoffpumpe und die entsprechend notwendigen Kraftstoffleitungen integriert.

5.1.6 Vorversuche mit einem Testtraktor

Der Testtraktor wurde im Mai 2017 umgebaut und einem Testbetrieb übergeben. Beim Umbau wurden die gleichen Bauteile, wie z. B. Kraftstoffförderpumpen und Ventile, wie später beim Harvester verwendet. Lediglich die beheizten Kraftstoffschläuche wurden aus Kostengründen durch unbeheizte Leitungen mit dem gleichen Querschnitt ersetzt.

Zunächst wurde der Motor so parametriert, dass die Leistung ungefähr der Leistung des Harvesters entsprach. Da die originale Motorleistung in der Traktorenkonfiguration mit maximal 299 kW bei 1900 min^{-1} deutlich höher ist als die des Harvesters mit 200 kW bei dieser Drehzahl, wurde nach zwei Wochen Testphase die Motorsteuerung so parametriert, dass der Traktor seine ursprüngliche Leistung im Rapsölbetrieb erreicht. Durch diese höhere Motorleistung wird in der Folge auch mehr Rapsölkraftstoff verbraucht. Somit wird das Kraftstoffsystem mehr belastet und zur sicheren Seite hin abgeschätzt, da z. B. die Anforderung an die Kraftstoffpumpen höher ist. Während der gesamten Testzeit von ca. 400 Bh konnten keine größeren Probleme festgestellt werden. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass der Test über den Sommer stattfand.

Am Traktor wurde auch das System zur aktiven Regeneration des Abgasnachbehandlungssystems integriert (siehe Abschnitt 5.1.5). Durch den Praxistest mit dem Traktor konnten einige Probleme der externen Zusatzpumpe identifiziert und im Vorfeld bereits behoben werden. Dazu gehörte die Drucküberwachung der Pumpe über das Motorsteuergerät. Die Drucküberwachung konnte nicht deaktiviert werden, sodass die externe Pumpe im Dauerbetrieb angeschlossen werden musste.

5.1.7 Einbau des Kraftstoffsystems in den Harvester

Das Kraftstoffsystem wurde weitestgehend bei John Deere ETIC aufgebaut und getestet. Anschließend wurden alle vorgefertigten Komponenten bei DonauWald Forstmaschinen in den Harvester integriert. Die Umrüstung des Harvesters fand im Juli 2017 statt, mit nachträglichen Optimierungen im Oktober 2017, November 2017, Mai 2018 und August 2018.

5.1.8 Zukünftige Optimierungspotenziale

Der kritischste Betriebspunkt des Harvesters ist der Kaltstart des Motors. Der Startergenerator muss eine Motordrehzahl von mindestens 150 min^{-1} für eine längere Zeit aufrechterhalten. Um ein zu starkes Entladen der Batterie zu verhindern, werden die Einspritzdrücke des Common-Rail-Systems in der Regel stark abgesenkt. Dies führt zu ei-

ner verringerten Leistungsaufnahme des Startergenerators beim Anlassen des Motors. Allerdings führt eine schlechte Zerstäubung von Pflanzenölkraftstoff in Verbindung mit der ohnehin niedrigen Zündwilligkeit bei niedrigen Drücken und Temperaturen im Brennraum dazu, dass der Motor schlecht anspringt. Zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens wurde daher der Einsatz eines 48-V-Startergenerators in Verbindung mit einer Lithium-Ionen-Batterie mit hoher Kapazität untersucht. Die Bauraumanalyse hat ergeben, dass ein solches System im vorliegenden Harvester 1470G nicht nachträglich konstruktiv integriert werden kann. Das liegt zum einen an der deutlich vergrößerten Gleichstrommaschine, zum anderen aber auch an einem zusätzlich erforderlichen Zwischengetriebe.

Auch wenn der Startergenerator im Harvestermodell nicht realisierbar ist, würde das Kaltstartverhalten mit Pflanzenöl durch Erhöhung des Einspritzdrucks beim Motorstart in Verbindung mit der Einführung von 48-V- bzw. 56-V-Technologie substanziell verbessert werden.

5.2 Leistungs- und Emissionsmessungen

Die Leistungs- und Emissionsmessungen wurden an einem von John Deere ETIC zur Verfügung gestellten Testtraktor John Deere 8370R mit baugleichem Motor wie im Radharvester 1470G am Traktorenprüfstand des TFZ durchgeführt (Abbildung 13). Dieser Traktor diente auch für die Entwicklung der Umrüstmaßnahmen (siehe Abschnitte 5.1.4 und 5.1.6). Der Traktor wurde mit einer für den Rapsölkraftstoffbetrieb optimierten Motorsoftwareapplikation betrieben, die auch am Harvester eingesetzt wird. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse sind daher auf den Harvestermotor übertragbar, entsprechen aber nicht einer Motorsoftwareapplikation für Traktoren.

Abbildung 13: Aufbau des John Deere 8370R am Traktorenprüfstand des TFZ

5.2.1 Leistung und Kraftstoffverbrauch bei Volllast

In Abbildung 14 sind das äquivalente Motordrehmoment, die Zapfwellenleistung, der spezifische Verbrauch von Rapsölkraftstoff und wässriger Harnstofflösung sowie der Wirkungsgrad an der Zapfwelle dargestellt. Die an der Zapfwelle gemessene Leistung bewegt sich im Drehzahlbereich von 1.600 min^{-1} bis 1.900 min^{-1} zwischen 158 kW und 165 kW. Unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Unterschieds von 25 % zwischen Zapfwellen- und Kurbelwellenleistung, lässt sich die Motorleistung auf etwa 200 kW bis 210 kW abschätzen. Damit liegt die Motorleistung auf dem Niveau der im Datenblatt für diesen Drehzahlbereich angegebenen Motorleistung von 200 kW. Das äquivalente Motordrehmoment zwischen 1.200 min^{-1} und 1.400 min^{-1} liegt an der Zapfwelle bei etwa 1.110 Nm und kann, unter Berücksichtigung der auftretenden Verluste, am Motor auf ca. 1.390 Nm geschätzt werden, was ebenfalls im Bereich des im Datenblatt angegebenen Werts liegt. Die Zielvorgabe, dass hinsichtlich Leistung und Drehmoment mit der für den Harvestermotor entwickelten rapsölspezifischen Steuergerätesoftware in etwa die gleichen Werte erreicht werden wie bei einer dieselkraftstoffoptimierten Serienapplikation, konnte somit realisiert werden.

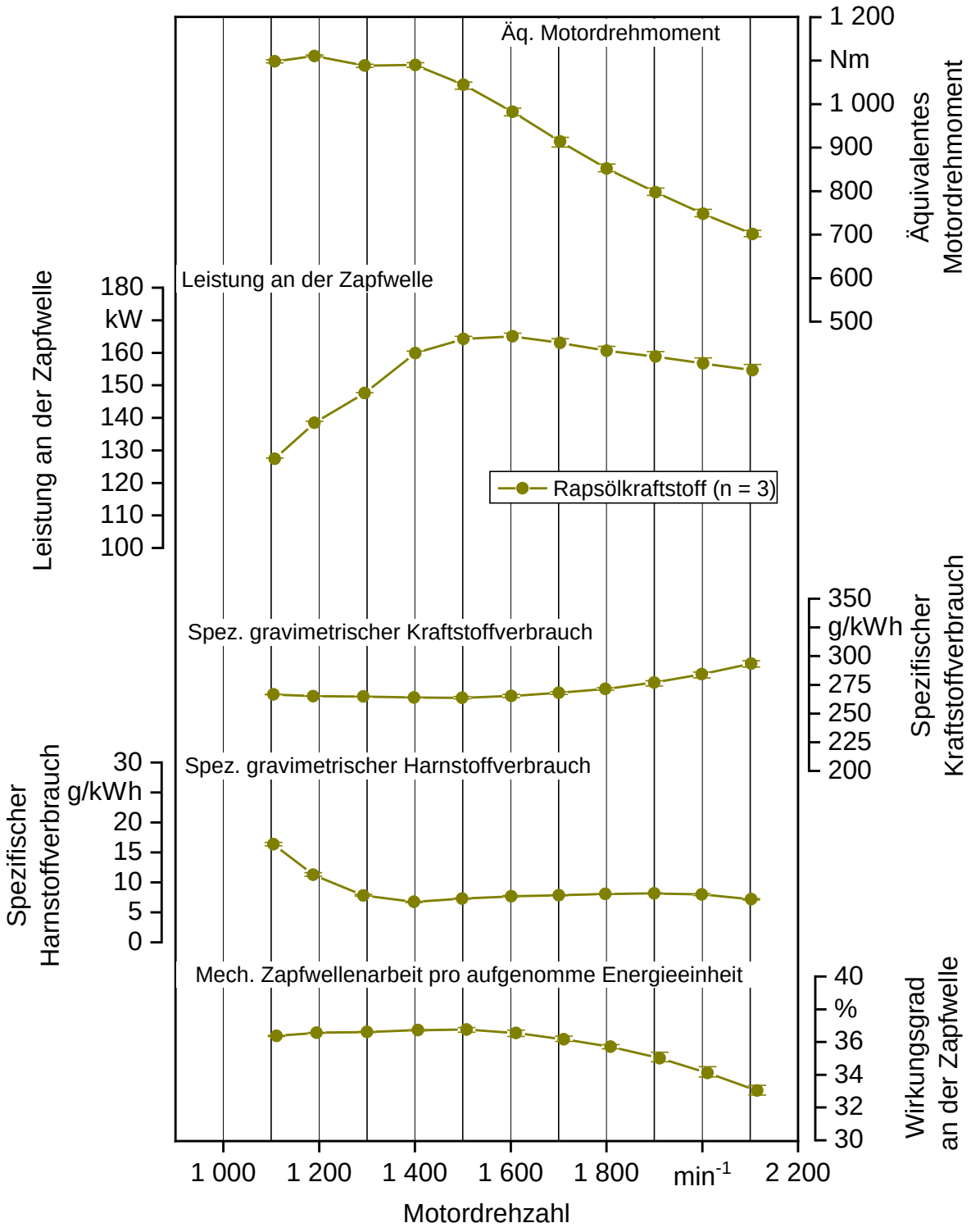


Abbildung 14: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch, spezifischer Harnstoffverbrauch und Wirkungsgrad an der Zapfwelle des Traktors mit einem baugleichen Motor wie im Harvester John Deere 1470G und einer ECU-Konfiguration für Harvester im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Der spezifische Rapsölkraftstoffverbrauch liegt im Drehzahlbereich von 1.600 min^{-1} bis 1.900 min^{-1} bei etwa 270 g/kWh und der Wirkungsgrad an der Zapfwelle (Verhältnis mechanischer Zapfwellenarbeit zu zugeführter Kraftstoffenergie) liegt im Bereich von 35 % bis 37 %. Vergleichswerte zum Wirkungsgrad an der Zapfwelle von Traktoren, die mit Dieselkraftstoff und Rapsölkraftstoff betrieben werden, liegen in der gleichen Größenordnung.

Der Harnstoffverbrauch bezogen auf den Rapsölkraftstoffverbrauch liegt für Drehzahlen über 1.400 min^{-1} im Bereich von 0,021 l/l und 0,025 l/l. Diese Werte sind vergleichbar mit denen der bisher am Traktorenprüfstand des TFZ gemessenen Pflanzenöltraktoren der Abgasstufe IV.

5.2.2 Emissionsverhalten

Die Emissionsmessungen am Testtraktor John Deere 8370R fanden zeitgleich zu den Leistungsmessungen statt. Für die Emissionsmessungen am Testtraktor mit dem baugleichen Motor und der gleichen auf Rapsölbetrieb optimierten Harvester-Motorsteuergeräte-Software wie im Harvester 1470G wurden die für die Abgasstufe IV gesetzlich relevanten Zyklen *Non-Road Steady-State Cycle* (NRSC) und *Non-Road Transient Cycle* (NRTC) angewandt. Alle Emissionsmessungen wurden mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 durchgeführt.

Non-Road Steady Cycle

Die Ergebnisse der spezifischen Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_X), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC) und Partikelmasse (PM) sind in Abbildung 15 dargestellt. Die spezifischen NO_X-Emissionen bezogen auf die Zapfwellenarbeit vor der Abgasnachbehandlung betragen 3,91 g/kWh. Durch das Abgasnachbehandlungssystem werden die NO_X-Emissionen um mehr als 97 % auf ein Niveau deutlich unter dem Grenzwert der Abgasstufe IV reduziert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die Grenzwerte der Abgasstufe IV auf die Kurbelwellenarbeit beziehen, während die angegebenen spezifischen Emissionen des Harvestermotors im Traktor auf die Zapfwellenarbeit bezogen werden. Die Zapfwellenarbeit ist, aufgrund von Getriebeverlusten und nicht abschaltbaren Nebenaggregaten des Traktors, etwa 20 % bis 30 % geringer als die Kurbelwellenarbeit. Würden die Messwerte auf die Kurbelwellenarbeit bezogen, wären nochmals geringere spezifische Emissionen festzustellen. Da die Differenz zwischen Kurbelwellen- und Zapfwellenarbeit bei der Messung nicht quantifiziert werden kann, erfolgt die Einordnung des Emissionsverhaltens des Motors auf der eher konservativen Bezugsbasis der Zapfwellenarbeit. Die spezifischen Emissionen von CO und HC werden durch das Abgasnachbehandlungssystem ebenfalls deutlich verringert auf ein Niveau, das sich unter bzw. an der Nachweisgrenze der Messgeräte bewegt. Die geringen CO- und HC-Emissionen vor der Abgasnachbehandlung im Rohabgas deuten darauf hin, dass die für Rapsölkraftstoff optimierte Motorsteuergerätesoftware funktioniert und der Kraftstoff effizient und schadstoffarm im Motor verbrannt wird. Auch die PM-Emissionen, die nur nach der Abgasnachbehandlung bestimmt wurden, liegen auf einem geringen Niveau deutlich unter dem Grenzwert der Abgasstufe IV.

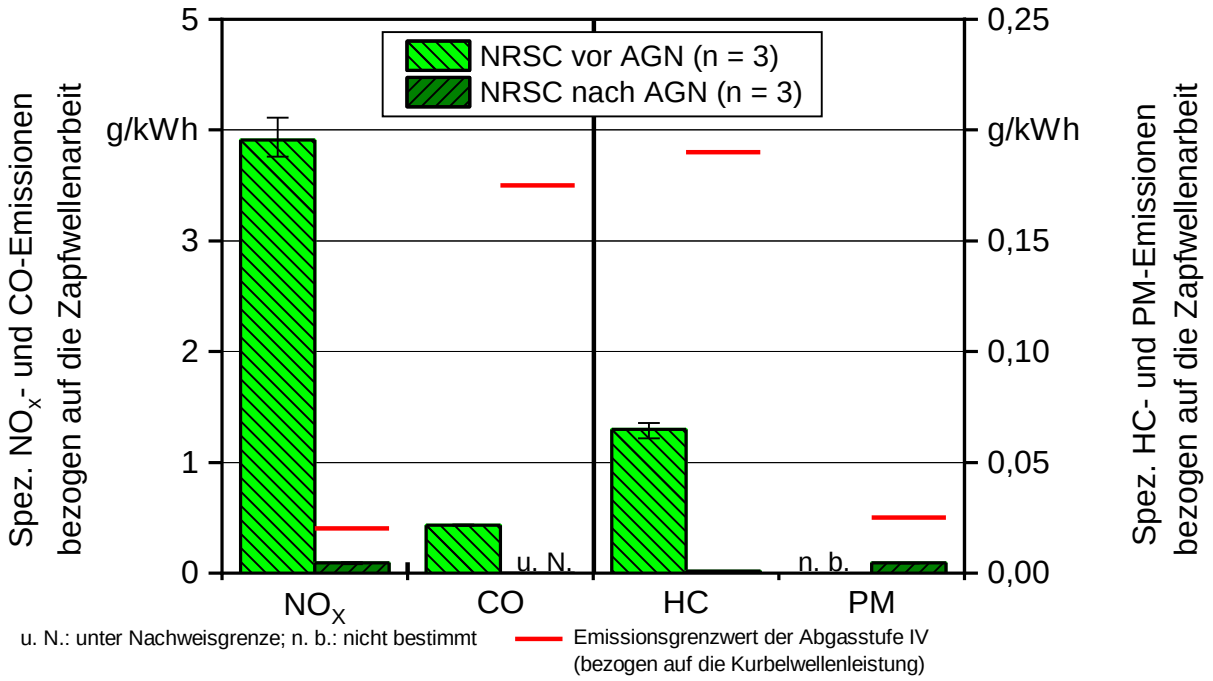


Abbildung 15: Mittelwert und Spannweite der spezifischen Emissionen von NO_X, CO, HC und PM vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) bezogen auf die Zapfwellenleistung des Traktors mit einem baugleichen Motor wie im Harvester John Deere 1470G und einer ECU-Konfiguration für Harvester im Betrieb mit Rapsölkraftstoff im NRSC

Der spezifische Rapsölkraftstoffverbrauch im Prüfzyklus liegt bei 318 g/kWh und der spezifische Harnstoffverbrauch bei 8,28 g/kWh. Bezogen auf den Kraftstoffverbrauch beträgt der spezifische Harnstoffverbrauch 0,031 l/l und entspricht damit praxisüblichen Werten.

Non-Road Transient Cycle

In Abbildung 16 sind die im NRTC ermittelten spezifischen Emissionen von NO_X, CO, HC und PM dargestellt. Beim NRTC wird unterschieden in den NRTC mit Kaltstart und mit Warmstart. Die spezifischen Emissionen aus diesen beiden NRTC-Messungen werden nach Richtlinie 2017/654 gewichtet (0,1 × NRTC (Kaltstart) + 0,9 × NRTC (Warmstart)) und daraus die spezifischen Emissionen im NRTC errechnet, die für eine Bewertung der Emissionen in Bezug auf die Grenzwerte dienen. Die gewichteten spezifischen NO_X-Emissionen im NRTC liegen deutlich unter dem Grenzwert der Abgasstufe IV und über den im NRSC ermittelten Werten. Die höhere Dynamik in Verbindung mit der geringeren mittleren Leistung des NRTC im Vergleich zum NRSC-Prüfzyklus führen zu diesen Unterschieden. Darüber hinaus werden im NRTC auch die Emissionen beim Motorstart bewertet, während dies beim NRSC nicht der Fall ist. Auch bei den spezifischen Emissionen von CO, HC und PM sind im NRTC höhere Emissionen als im NRSC zu beobachten, jedoch ebenfalls auf einem Niveau weit unter den Grenzwerten der Abgasstufe IV.

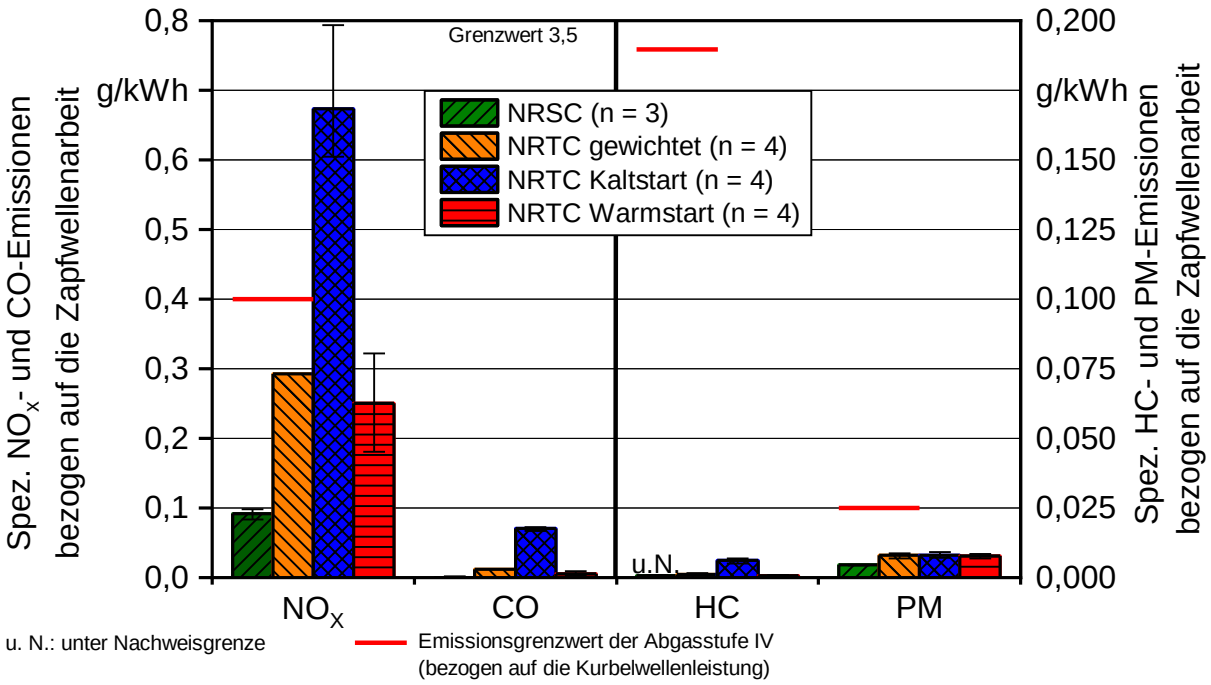


Abbildung 16: Mittelwerte und Spannweiten der spezifischen Emissionen von NO_X, CO, HC und PM nach der Abgasnachbehandlung (AGN) des Traktors mit einem baugleichen Motor wie im Harvester John Deere 1470G und einer ECU-Konfiguration für Harvester im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei verschiedenen Prüfzyklen

Die spezifischen Emissionen von NO_X, CO und HC sind im NRTC mit Kaltstart höher als im NRTC mit Warmstart. Aus dem Kaltstart benötigt der Harvestermotor etwas mehr Zeit als aus dem Warmstart, um die für eine gute Funktion des Abgasnachbehandlungssystems notwendigen Betriebstemperaturen zu erreichen. Bei den PM-Emissionen ist kein Unterschied zwischen den Ergebnissen aus dem NRTC mit Kaltstart und mit Warmstart zu erkennen, da die Abscheideleistung des Partikelfilters weniger abhängig von der Abgastemperatur des Motors ist.

Der spezifische Rapsölkraftstoffverbrauch im gewichteten NRTC liegt bei 393 g/kWh und der spezifische Harnstoffverbrauch bei 11,5 g/kWh. Auf den Kraftstoffverbrauch bezogen bewegt sich der spezifische Harnstoffverbrauch mit 0,025 l/l auf dem Niveau praxisüblicher Werte.

Insgesamt zeigen die Emissionsmessungen, dass der Harvestermotor mit der auf Rapsölkraftstoff optimierten Motorsteuergerätesoftware ein gutes, der Abgasstufe entsprechendes Emissionsverhalten aufweist.

5.3 Feldtest

Der Harvester befand sich von September 2016 bis Juni 2017 im Praxiseinsatz im Betrieb mit Dieselkraftstoff. Im Juli 2017 erfolgte die Umrüstung des Motors auf Rapsölkraftstoff und der Harvester wird seitdem mit Rapsölkraftstoff betrieben.

5.3.1 Kraftstofflogistik und -qualität

Die Belieferung der Bayerischen Staatsforsten mit Rapsölkraftstoff erfolgte durch die Ölmühle Mara GmbH & Co. KG in Untersiemau. Zu Projektbeginn wurde geplant, dass von der dezentralen Ölmühle in Chargen von etwa 5.000 l ein dezentrales Zwischenlager im Bereich des Forstbetriebs Wasserburg beliefert wird. Die wöchentliche Versorgung der mobilen Tankstelle des Harvesters mit ca. 1.000 l erfolgte vom Zwischenlager aus in Dienstleistung durch einen Landwirt. Je nach Einsatzort des Harvesters und Befahrbarkeit der Forstwege erfolgte der Umschlag von Rapsölkraftstoff an wechselnden Orten im Wald oder am Waldrand. Einen schematischen Überblick über die Kraftstofflogistik gibt Abbildung 17.

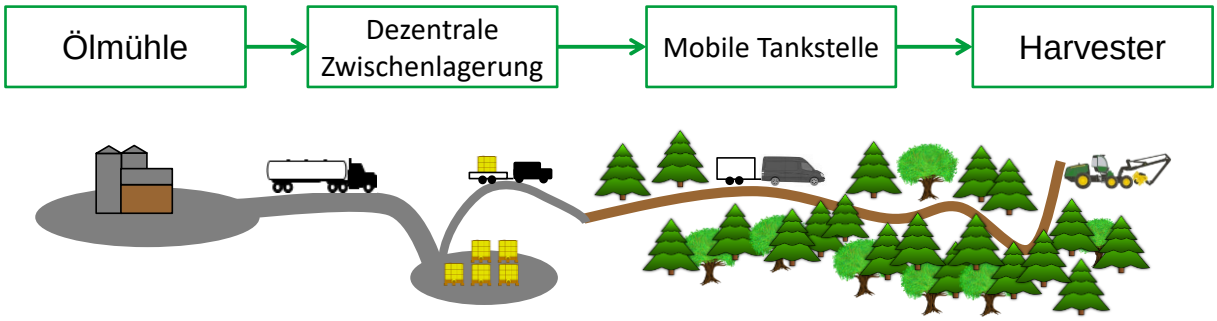


Abbildung 17: Schematischer Überblick zur Rapsölkraftstoffversorgung des Harvesters

Im Verlauf des Projekts kam es zu mehreren Standortwechseln des Harvesters, die eine logistische Umorganisation mit variierendem Aufwand erforderlich machten. Zur Aufarbeitung von Sturmschäden war der Harvester von Oktober 2017 bis Dezember 2017 im Forstbetrieb Neureichenau im Bayerischen Wald im Einsatz. Auch an diesem Einsatzort erfolgte die Kraftstoffversorgung über ein dezentrales Zwischenlager, jedoch mussten die Maschinenführer des Harvesters die Betankung der mobilen Tankstelle selbst am Zwischenlager vornehmen. Mitte Dezember 2017 war der Harvester wieder im Ebersberger Forst im Forstbetrieb Wasserburg im Einsatz. Mitte Januar 2018 bis Ende April 2018 wurde der Harvester im Forstbetrieb Zusmarshausen eingesetzt. Hier erfolgte die Kraftstoffversorgung ebenfalls über ein dezentrales Zwischenlager. Nach anfänglichen Lieferschwierigkeiten mit dem Auslieferer vor Ort und einem Wechsel des Auslieferers konnte eine zuverlässige Kraftstoffversorgung gewährleistet werden. Von Ende April 2018 bis Dezember 2018 war der Harvester wieder im Forstbetrieb Wasserburg im Einsatz und es konnte wieder auf den bereits bewährten Landwirt zur Kraftstofflieferung zurückgegriffen werden.

Die vom Ölmühlenbetreiber organisierte Versorgung mit Rapsölkraftstoff hat letztlich sehr gut funktioniert. Eine zentrale Rolle spielt dabei der in der entsprechenden Region ansässige Auslieferer mit Zwischenlager, der zuverlässig zum vereinbarten Zeitpunkt den Transport zum Umschlagort durchführen muss. Bei größeren Standortwechseln muss jeweils ein neuer Zulieferer mit Zwischenlager gefunden werden, was einen organisatorischen Aufwand beim Ölmühlenbetreiber verursacht. Um die Organisation der Kraftstofflogistik zu ermöglichen, muss der Ölmühlenbetreiber mit genügend zeitlichem Vorlauf über die nächsten geplanten Einsatzorte informiert sein. Zudem muss der Betreiber des Harvesters abschätzen, welche Mengen an den Einsatzorten benötigt werden, um unnötige Transporte von Rapsölkraftstoff und damit Kosten zu vermeiden.

Im Vergleich zur Versorgung mit Dieselkraftstoff, für den in Deutschland auf ein dichtes Mineralölhändlernetz zurückgegriffen werden kann, war für die Versorgung des Harvesters mit Rapsölkraftstoff ein höherer Planungsaufwand verbunden, da während des Projektzeitraums kein flächendeckend ausgebautes Rapsölkraftstoffhändlernetz bestand. Dies ist auf den Rückgang der Nachfrage nach Rapsölkraftstoff in Deutschland zurückzuführen. Bei steigender Nachfrage nach Rapsölkraftstoff, z. B. im Bereich der Land- und Forstwirtschaft, würde wieder eine entsprechende Infrastruktur für die flächendeckende Versorgung mit Rapsölkraftstoff entstehen und dieses Hemmnis für den Marktzugang abgebaut werden.

Mobile Tankstelle

Da bei sinkenden Temperaturen die Viskosität von Rapsölkraftstoff stark ansteigt und im Bereich von etwa −2 °C bis −10 °C Rapsöl in den festen Aggregatzustand übergeht, ist in den Wintermonaten die frostfreie Lagerung des Kraftstoffs in der mobilen Tankstelle wichtig. Aufgrund dessen wurde am Technologie- und Förderzentrum eine mobile Tankstelle in einem isolierten Anhänger konzeptioniert und aufgebaut. Die Anforderungen an die Tankstelle lauteten wie folgt:

- dauerhafte Lagerung von Rapsölkraftstoff über 5 °C im Forst,
- Fassungsvermögen von etwa 1.000 l Rapsölkraftstoff für den Bedarf einer Woche,
- Betankung des Harvesters mit Zählwerk zur Erfassung der Tankmengen,
- Befüllen der Tankstelle aus 1.000-l-IBC-Gebinden.

In Abstimmung mit den Projektpartnern und aufgrund der ersten Erfahrungen im Feldtest sollten zudem Lagerkapazität und Lademöglichkeiten für einen Satz Starterbatterien für den Harvester vorgehalten werden, um bei eventuellen Problemen über Ersatzbatterien vor Ort zu verfügen.

Aufgrund des abgeschätzten notwendigen Wärmebedarfs zur Temperierung des Rapsölkraftstoffs bei sehr niedrigen Außentemperaturen musste eine rein batteriegestützte Wärmebereitstellung ausgeschlossen werden. Zudem sollten nicht nur der Tank, sondern auch die Pumpe, das Zählwerk, die Schläuche und die Zapfpistole temperiert sein, um eine reibungslose Betankung zu gewährleisten. Daher wurde für die Beheizung eine

Standheizung aus dem Nutzfahrzeugbereich vorgesehen, die den gesamten Innenraum des Kofferanhängers temperiert.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurde die mobile Tankstelle, dargestellt in Abbildung 18, mit folgenden wesentlichen Komponenten aufgebaut:

- Kofferanhänger mit isoliertem Boden,
- Rapsölkraftstofftank für 980 l (doppelwandiger Stahltank mit Leckanzeige) mit Belüftungstrockner zur Kondensatvermeidung beim Betanken,
- Betankungs- und Umfüllpumpe (Imprellerpumpe Unistar 2000-B ZUWA) mit Zählwerk und automatisch abschaltender Zapfpistole (ZP-80-Pöl Pumpen Peters),
- Standheizung (Webasto Air Top 2000; 2,0 kW Heizleistung) mit Kraftstofftank im geschützten Gehäuse auf der Deichsel des Anhängers; zugehörige AGM-Batterie befindet sich im Anhänger,
- Ladegeräte für die Batterie der Standheizung (AGM-Batterie) und Starterbatterien für den Harvester,
- Stromaggregat (Honda EU30i; 2,4 kW Nennleistung) auf der Vorderseite des Anhängers für die Stromversorgung der Pumpe und der Ladegeräte,
- Elektroinstallation mit Isolationsüberwachung zum Personenschutz,
- Ersatzrad.

Abbildung 18: Isolierter Kofferanhänger als mobile Tankstelle für Rapsölkraftstoff

Die mobile Tankanlage konnte die gestellten Anforderungen erfüllen und es war eine zuverlässige Betankung des Harvesters möglich. Durch Praxiserfahrungen mit der mobilen Tankstelle konnte jedoch auch weiteres Optimierungspotenzial der Tankanlage fest-

gestellt werden. Durch die Verwendung einer Luftstandheizung kann der Innenraum des Tankanhängers sehr schnell auf die eingestellte Temperatur beheizt werden und die Standheizung schaltet sich aus. Bei der Anlieferung kalten Rapsölkraftstoffs (< 5 °C) führt dies jedoch dazu, dass sich die Standheizung häufig ein- und ausschaltet, bis die große Masse an Kraftstoff mittels Konvektion auf eine Zieltemperatur von mehr als 10 °C erwärmt ist. Dies führt zu einem hohen elektrischen Energiebedarf der Standheizung, aufgrund dessen es notwendig war, die Batterie der Standheizung zweimal pro Woche über den Generator aufzuladen. Aufgrund der Einbausituation im warmen Innenraum des Kofferanhängers, was Vorteile hinsichtlich der verfügbaren Kapazität der Batterie aufweist, mussten die Türen des Anhängers beim Laden der Batterie geöffnet sein, um die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch bei der Aufladung entstehenden Wasserstoff im Innenraum zu vermeiden. Um die Laufzeiten der Standheizung zu verkürzen, wurde daher mit dem Auslieferer vereinbart, dass im Winter der Rapsölkraftstoff im warmen Zustand (> 15 °C) angeliefert wird, damit die Standheizung lediglich die Aufgabe hat, die Temperatur im Innenraum zu halten. Um schneller Wärme in den Rapsölkraftstofflagertank zu überführen, wäre die Verwendung einer Wasserheizung in Verbindung mit einem Wärmetauscher im Rapsölkraftstofflagertank voraussichtlich vorteilhafter. Die restlichen Bauteile im Anhänger würden dann indirekt durch die abgestrahlte Wärme des Rapsölkraftstofftanks temperiert. Außerdem sollten die Batterien in einem gut belüfteten Bereich untergebracht werden, der sich außerhalb des isolierten Bereichs des Tanks und der Pumpe befindet.

Die automatische Abschaltung der Zapfpistole, die laut Herstellerangabe für Rapsölkraftstoff geeignet ist, funktionierte vor allem bei niedrigen Temperaturen von < 10 °C nicht mehr zuverlässig. Der Fahrer des Harvesters musste daher den Betankungsvorgang überwachen. Um dies zu vermeiden, wäre der Einbau eines Grenzwertgebers am Harvestertank vorteilhaft, der die Betankungspumpe automatisch abschaltet.

Kraftstoffqualität

Im Projektzeitraum wurden fünf Kraftstoffchargen hinsichtlich ihrer Qualitätsparameter untersucht. Lediglich bei der zweiten Charge war eine geringfügige Überschreitung des Grenzwerts der Säurezahl festzustellen, alle anderen Chargen konnten sämtliche Anforderungen der DIN 51605 erfüllen. Trotz der Überschreitung bei der zweiten Charge ist die Kraftstoffqualität, vor allem hinsichtlich der für die Dauerhaltbarkeit des Abgasnachbehandlungssystems wichtigen Parameter Schwefel, Phosphor, Calcium und Magnesium, als sehr gut zu bezeichnen. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Analysen aufgeführt.

Dem Rapsölkraftstoff wurde zur Vermeidung von Ablagerungen im Einspritzsystem das Additiv John Deere Fuel-Protect Diesel Conditioner Winter in einer Konzentration von 0,1 % zugesetzt.

Tabelle 7: Qualität der untersuchten Rapsölkraftstoffchargen und Grenzwerte nach DIN 51605

Kenngröße	Einheit	Grenz-wert	Rapsölkraftstoffcharge				
			Jul 17	Okt 17	Jan 18	Apr 18	Juni 18
Chargengröße	l		10.358	7.064	7.163	5.173	6.728
Gesamt-verschmutzung	mg/kg	max. 24	4	3	7	6	4
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	1,1	2,3	1,0	1,0	1,7
Oxidations-stabilität	h	min. 6,0	7,3	7,7	10,2	7,3	9,3
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	554	735	523	697	668
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 10	1,4	5,3	< 5	< 5	< 5
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 3	< 0,1	0,3	< 0,1	0,3	< 0,1
Calciumgehalt	mg/kg	max. 1	< 0,1	0,6	0,1	0,1	0,2
Magnesiumgehalt	mg/kg	max. 1	< 0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Bei der Anlieferung zur mobilen Tankstelle wurden in einzelnen Kraftstoffcontainern Verschmutzungen im Bodenbereich festgestellt. Der Grenzwert der Gesamtverschmutzung wurde dennoch auch bei diesen Chargen eingehalten. Es konnte nicht eindeutig festgestellt werden, wann es zu dem Eintrag der Verschmutzungen kam. Der Kraftstofflieferant und der regionale Auslieferer wurden informiert und darauf hingewiesen, dem Eintrag von Verschmutzungen vorzubeugen.

Neben Proben des angelieferten Kraftstoffs wurden auch Proben aus der mobilen Tankstelle und aus dem Harvestertank gezogen. Die Proben wurden hinsichtlich Gesamtverschmutzung, Säurezahl, Oxidationsstabilität und Wassergehalt untersucht, da hier die größten Veränderungen zu erwarten sind.

Die Analyseergebnisse der Proben aus dem Tankanhänger sind in Tabelle 8 aufgelistet. Die Anforderungen der DIN 51605 werden von zwei der drei Proben aus dem Tankanhänger nicht eingehalten. Bei einer Probe wurde eine etwas zu geringe Oxidationsstabilität und bei einer Probe eine etwas zu hohe Gesamtverschmutzung festgestellt. Da der Rapsölkraftstoff aus der mobilen Tankstelle innerhalb von etwa einer Woche verbraucht wird, ist die Unterschreitung der Oxidationsstabilität nicht als kritisch zu bewerten. Außerdem erfüllte die im September 2018 gezogene Probe die Anforderungen der DIN 51605 an die Oxidationsstabilität. Hinsichtlich der Gesamtverschmutzung weisen die Proben im Tankanhänger mit zunehmender Einsatzdauer höhere Werte auf. Dies könnte ein Hinweis auf eine Anreicherung von Verschmutzungen im Kraftstofftank im Tankanhänger sein. Die weiteren analysierten Parameter der Säurezahl und des Wassergehalts liegen innerhalb der Anforderungen der Rapsölkraftstoffnorm.

Tabelle 8: Qualitätsparameter von Kraftstoffproben aus der mobilen Tankstelle

Kenngröße	Einheit	Grenzwert	Feb 18	Apr 18	Sept 18
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	6	21	55
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	n. b.	1,7	1,5
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	6,7	4,8	7,1
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	680	596	666

n. b: nicht bestimmt

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Proben aus dem Harvestertank dokumentiert. Die im Januar 2018 gezogene Probe weist eine etwas zu hohe Säurezahl auf. Die Tankfüllung stammt aus der im Oktober 2017 angelieferten Kraftstoffcharge, die ebenfalls eine geringfügige Überschreitung der Säurezahl aufwies. Mit dieser einen Ausnahme erfüllen alle anderen Proben die Anforderungen der DIN 51605. Der im Tankanhänger mit zunehmender Einsatzdauer festgestellte Anstieg der Gesamtverschmutzung ist auch bei den Proben aus dem Harvestertank ersichtlich. Dennoch erfüllen alle Proben aus dem Harvestertank die an die Gesamtverschmutzung gestellten Anforderungen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass das Analyseverfahren der Gesamtverschmutzung eine schlechte Wiederhol- und Vergleichbarkeit aufweist und daher diese Analysewerte nicht überbewertet werden dürfen.

Tabelle 9: Qualitätsparameter von Kraftstoffproben aus dem Harvestertank

Kenngröße	Einheit	Grenzwert	Jan 18	Apr 18	Sept 18
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 24	6	4	19
Säurezahl	mg KOH/g	max. 2,0	2,4	1,6	1,2
Oxidationsstabilität	h	min. 6,0	n. b.	8,7	6,4
Wassergehalt	mg/kg	max. 750	590	556	647

n. b.: nicht bestimmt

Neben Rapsölkraftstoff wird im Rahmen des Projekts für den Betrieb der Standheizung des Harvesters und der mobilen Tankstelle C.A.R.E. Diesel® (hydriertes Pflanzenöl; HVO) als Dieselkraftstoff verwendet. Tabelle 10 zeigt einige wichtige analysierte Kraftstoffkennwerte dieses Kraftstoffs. Die sehr gute Kältebeständigkeit dieses HVO wird anhand des sehr niedrigen *Pourpoint, Cloudpoint* und *Cold Filter Plugging Point* deutlich. Die Dichte ist geringer als die von Dieselkraftstoff nach DIN EN 590. Der C.A.R.E. Diesel® erfüllt die Anforderungen nach DIN EN 15940 [7] für paraffinischen Dieselkraftstoff.

Tabelle 10: Kennwerte des hydrierten Pflanzenöls C.A.R.E. Diesel®

Kenngröße	Prüfverfahren	Einheit	Wert
Dichte	DIN EN ISO 12185	kg/m³	779,4
Kinematische Viskosität	DIN EN ISO 3104	mm²/s	2,91
Flammpunkt	DIN EN ISO 2719	°C	74,0
Pourpoint	DIN EN ISO 3016	°C	< −45,9
Cloudpoint	DIN EN 23015	°C	−33
CFPP	DIN EN 116	°C	−39
Heizwert	DIN 51900-1	kJ/kg	43.867

5.3.2 Betriebsverhalten

Die Zuverlässigkeit des Harvesters wird anhand der von den Maschinenführern aufgezeichneten Daten bewertet. Abbildung 19 gibt in Halbjahresabschnitten eine Übersicht zur Häufigkeit der wöchentlichen Zeitanteile an der wöchentlichen Gesamtarbeitszeit, welche die Fahrer für die Maschinenarbeit, das Umsetzen des Harvesters, Reparaturen und Sonstiges aufwendeten. Während der ersten beiden Halbjahresabschnitte wurde der Harvester mit Dieselkraftstoff betrieben und während der letzten drei Halbjahresabschnitte mit Rapsölkraftstoff. Der wöchentliche Zeitanteil, in dem Maschinenarbeit mit dem Harvester verrichtet wurde, liegt über den gesamten Beobachtungszeitraum bei durchschnittlich 73 %. Zwischen den einzelnen Halbjahreszeiträumen ist kein signifikanter Unterschied festzustellen (ANOVA, t-test bei $p < 0,05$). Gleiches gilt für den wöchentlichen Zeitanteil für Reparaturen, auch hier liegt kein signifikanter Unterschied zwischen den Halbjahreszeiträumen vor. Die Daten zeigen, dass der Harvester im Betrieb mit Rapsölkraftstoff die gleiche Verfügbarkeit wie im Dieselbetrieb vor der Umrüstung aufweist.

Zur Bewertung des Kaltstartverhaltens des Harvestermotors durch die Maschinenführer gibt Abbildung 20 einen Überblick. Im Dieselbetrieb wurde das Kaltstartverhalten ausnahmslos gut und im Betrieb mit Rapsölkraftstoff insgesamt als mittel bewertet. An drei Arbeitstagen war kein Kaltstart möglich. Direkt nach der Umrüstung führte im Juli 2017 eine fehlerhafte Verkabelung dazu, dass die Starterbatterien des Harvesters während des Betriebs nicht vollständig geladen wurden. In der Folge war an einem Tag ein Kaltstart erst nach dem Wechsel der Batterien möglich. Im Februar 2018 war ein Kälteeinbruch zu verzeichnen, während dessen über einen Zeitraum von etwa einer Woche Temperaturen von −13 °C bis −17 °C zu verzeichnen waren. In diesem Zeitraum fiel am 26.02.2018 die Standheizung aus, die zwei Stunden vor Schichtbeginn hätte anlaufen sollen. Sowohl der Rapsölkraftstoff- als auch der Hydrauliköltank des Harvesters waren kalt. In diesem Zustand war kein Motorstart möglich und sinnvoll, da auch das Hydrauliköl vorgewärmt sein sollte, um übermäßigen Verschleiß an der Maschine zu vermeiden. Der Maschinenführer musste die Standheizung manuell aktivieren und nach knapp zwei Stunden Laufzeit der Standheizung war ein Motorstart möglich. An den beiden folgenden

Arbeitstagen waren ähnlich niedrige Temperaturen zu verzeichnen. Hier lief die Standheizung wie einprogrammiert an und es war ein Motorkaltstart möglich. Die Maschinenführer bewerteten dabei einen Kaltstart als gut und einen als schlecht. Am 19.03.2018 fiel die Standheizung vollständig aus und musste ausgetauscht werden. Auch an diesem Tag waren weder Motorstart noch Vorwärmen des Hydrauliköls möglich. Die durch den Ausfall der Standheizung bedingten Standzeiten sind unabhängig vom Rapsölbetrieb, da die Standheizung mit paraffinischem Dieselkraftstoff (HVO) betrieben wurde (siehe hierzu auch Abschnitt 5.3.4).

Insgesamt bleibt festzustellen, dass ein Motorkaltstart des Harvesters mit Rapsölkraftstoff bei niedrigen Außentemperaturen von bis zu −17 °C möglich war.

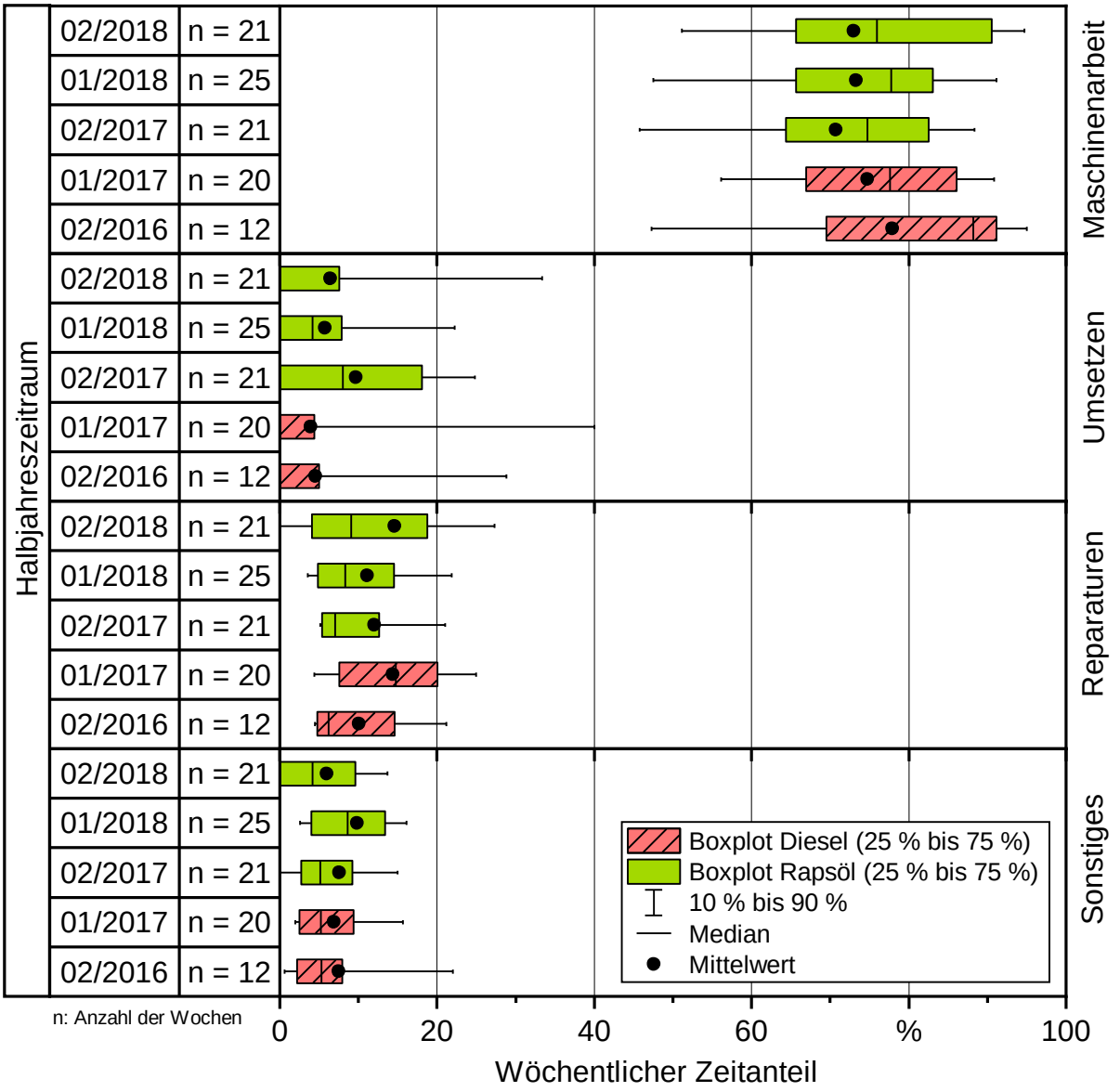


Abbildung 19: Häufigkeit der wöchentlichen Zeitanteile an der Gesamtarbeitszeit der Maschinenführer für Maschinenarbeit, Umsetzen, Reparaturen und Sonstiges in Halbjahreszeiträumen

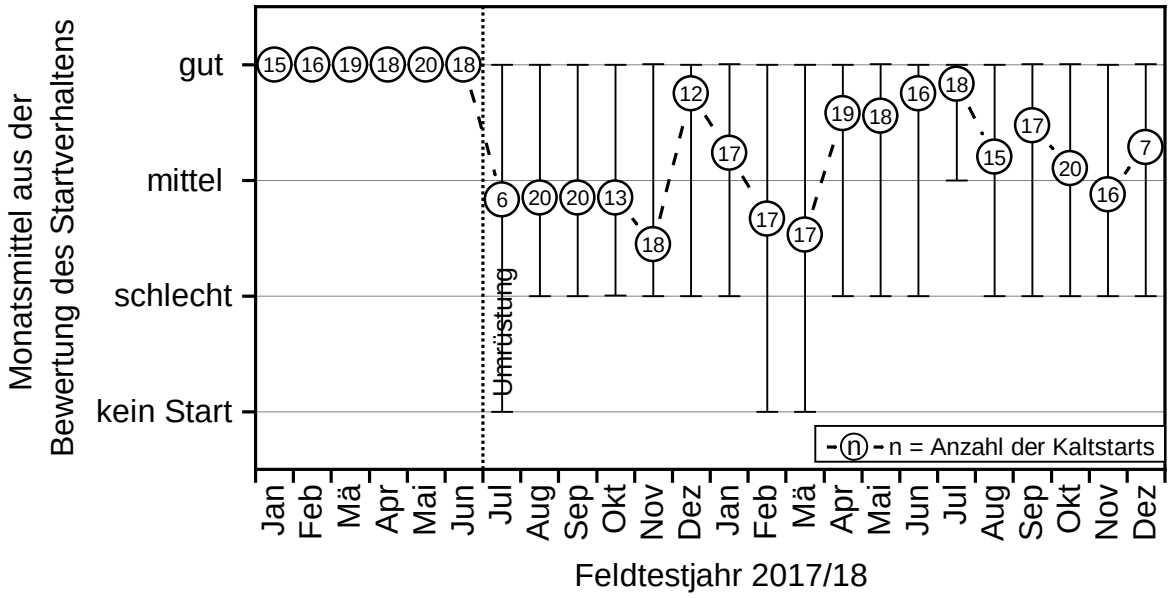


Abbildung 20: Bewertung des Kaltstartverhaltens des Harvestermotors durch die Maschinenführer (Mittelwert und Spannweite)

Während des Feldtests verarbeitete der Harvester im Betrieb mit Dieselkraftstoff etwa 26.000 Festmeter (fm) und mit Rapsölkraftstoff etwa 40.000 fm Holz. Um einen möglichen Einfluss des Kraftstoffs auf die Produktivität des Harvesters festzustellen, wird die relative Abweichung der wöchentlichen Produktivität vom Gesamtmittelwert der wöchentlichen Produktivität über den Feldtest herangezogen. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 21, aufgeteilt in Halbjahreszeiträume, dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die wöchentliche Produktivität einer großen Schwankungsbreite unterworfen ist. Dies ist vor allem auf variierende Einschlagsbedingungen zurückzuführen, da der Harvester beispielsweise in drei unterschiedlichen Einsatzgebieten arbeitete und dabei neben geplantem Einschlag auch zur Borkenkäferbekämpfung und zur Aufarbeitung von Windwurf herangezogen wurde. Aus den Daten lässt sich kein signifikanter Einfluss des Kraftstoffs auf die Produktivität ableiten. Da der Harvestermotor im Rapsölbetrieb auf das gleiche Leistungsverhalten wie im Dieselbetrieb eingestellt wurde, ist auch kein Einfluss auf die Produktivität des Harvesters zu erwarten.

Der spezifische Kraftstoffverbrauch des Harvesters konnte mithilfe der in TimberMatic aufgezeichneten Daten bestimmt werden. Aufgrund der variierenden Einschlagsbedingungen des Harvesters unterliegt der spezifische Kraftstoffverbrauch einer großen Schwankungsbreite. Um dennoch näherungsweise einen Vergleich zwischen den Kraftstoffen ziehen zu können, wurden die für 289 Tage zur Verfügung stehenden Daten selektiert nach Tagen, an denen der zeitliche Fahranteil 10 % bis 15 % betrug und die Produktivität im Bereich zwischen 20 fm/h und 30 fm/h lag. Diese Rahmenbedingungen wurden an 29 Tagen erfüllt. Abbildung 22 sind spezifischer, volumetrischer und energetischer Kraftstoffverbrauch des Harvesters im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff für diese selektierten Tage zu entnehmen.

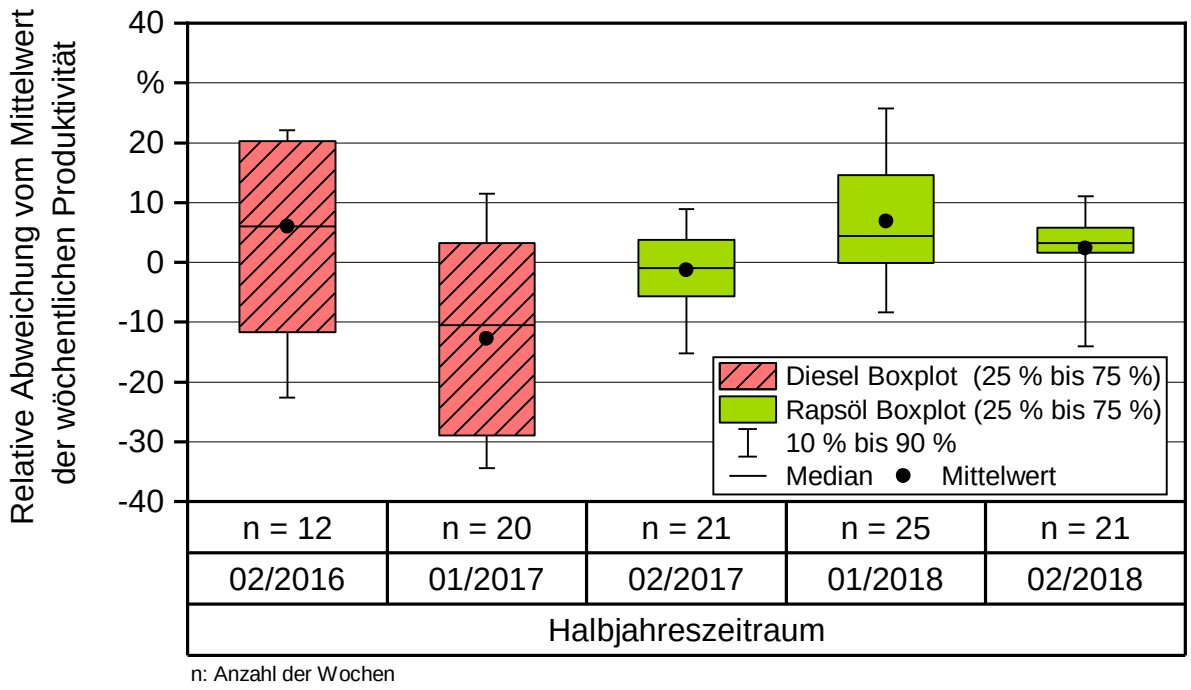


Abbildung 21: Relative Abweichung der wöchentlichen Produktivität im Vergleich zum Mittelwert der Produktivität über den gesamten Feldtest

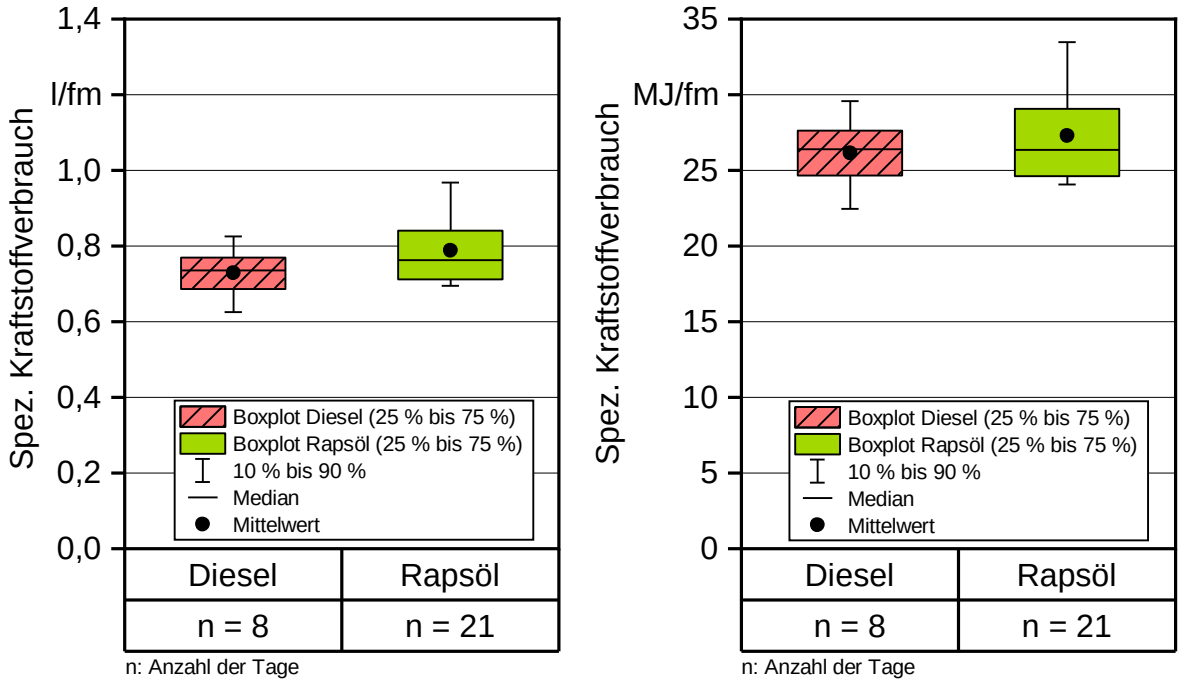


Abbildung 22: Spezifischer volumetrischer und energetischer Kraftstoffverbrauch des Harvesters im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff bei ähnlichen Einsatzbedingungen (Fahranteil 10 % bis 15 % und Produktivität 20 fm/h bis 30 fm/h; Tagesmittelwerte)

Spezifischer, volumetrischer und energetischer Kraftstoffverbrauch des Harvesters unterscheiden sich im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff nicht signifikant. Es wäre zu erwarten, dass der volumetrische Kraftstoffverbrauch mit Rapsölkraftstoff aufgrund des Heizwertunterschieds ca. 3,5 % höher ist als mit Dieselkraftstoff. Diese geringe Differenz lässt sich aus den im Feldtest erhobenen Daten nicht signifikant ableiten. Es kann jedoch festgehalten werden, dass die im Feldtest erhobenen Daten zum Kraftstoffverbrauch keine Hinweise auf eine unterschiedliche Motoreneffizienz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff geben.

Insgesamt leistete der Harvester im Zeitraum von August 2017 bis Mitte Dezember 2018 rund 2.100 Bh und verbrauchte dabei etwa 42.500 l Rapsölkraftstoff, 375 l Dieselkraftstoff beziehungsweise HVO für den Betrieb der Standheizung und die Regeneration des Abgasnachbehandlungssystems sowie 1.200 l wässrige Harnstofflösung (AdBlue®). Der spezifische Harnstoffverbrauch lag in diesem Zeitraum bei durchschnittlich 0,028 l/l Rapsölkraftstoff und damit im Bereich der am Prüfstand ermittelten Werte des 8370R-Traktors mit einem Motor in Harvesterkonfiguration (siehe Unterkapitel 5.2). Vergleichswerte zum Harnstoffverbrauch eines John-Deere-8400R-e23-Traktors im Betrieb mit Dieselkraftstoff liegen je nach Motorbelastung im Bereich von 0,015 l/l bis 0,037 l/l Dieselkraftstoff [8]. Dieser Traktor ist mit einem Motor aus der gleichen Familie wie der Harvestermotor ausgestattet, was zeigt, dass die für den Harvester ermittelten Werte in einem üblichen Bereich liegen.

5.3.3 Motorenölqualität

Im Projektzeitraum wurden 45 Motorenölproben analysiert, davon die letzten 37 nach der Umrüstung des Harvesters auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff. Anfänglich wurde ein Motorenöl-Wechselintervall von 250 h vorgesehen, um mögliche Störungen durch den Betrieb mit Pflanzenöl zu vermeiden. Im Verlauf des Projekts wurde aufgrund der guten Ergebnisse das Wechselintervall auf 500 h erhöht. Es konnte ein 500-h-Intervall komplett und ein zweites bis zu 400 h überwacht werden.

In Abbildung 23 ist der Gehalt an Pflanzenöl und Ruß im Motorenöl über die Betriebszeit dargestellt. Der höchste gemessene Pflanzenölgehalt beim Ölwechsel nach 250 h lag bei etwa 1,5 % und damit auf einem sehr niedrigen Niveau. Bei einem Wechselintervall von 500 h lag der höchste Pflanzenölgehalt bei 2,6 %, was nach den bisherigen Erfahrungen mit Pflanzenöltraktoren in einem unbedenklichen Rahmen liegt. Auch der Rußgehalt im Motorenöl ist über alle Wechselintervalle im Bereich der Nachweisgrenze.

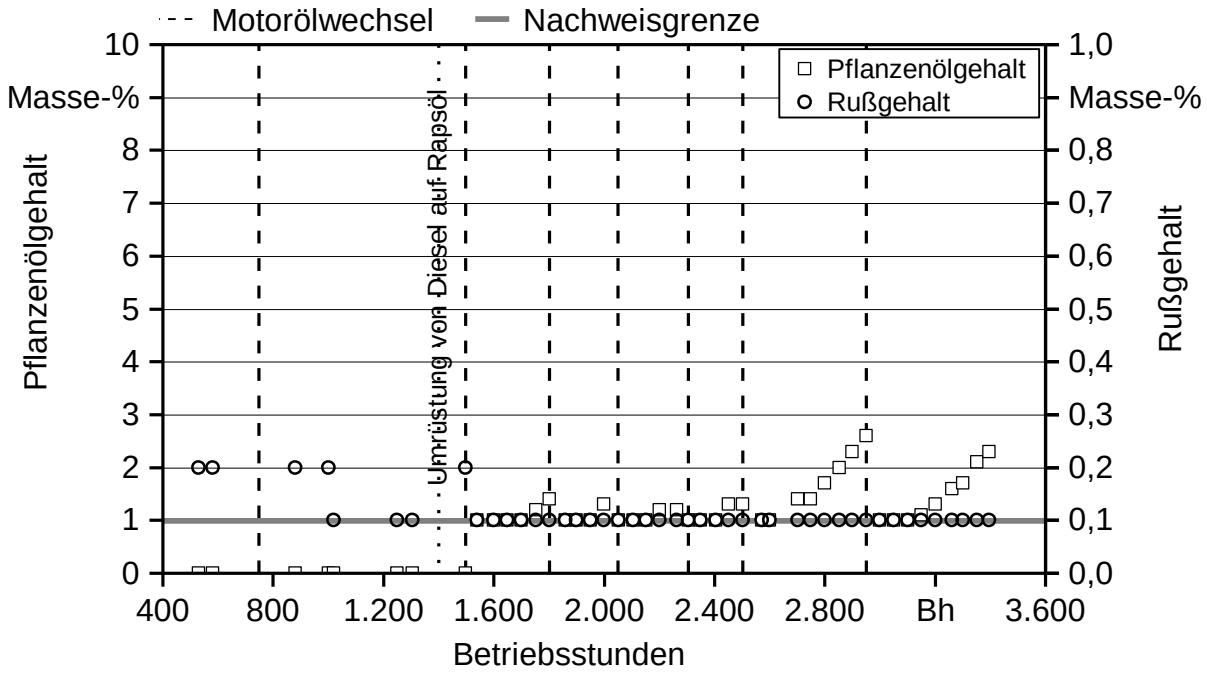


Abbildung 23: Pflanzenöl- und Rußgehalt im Motorenöl über die Betriebszeit des Harvesters

Abbildung 24 zeigt die Entwicklung des Gehalts an Verschleißmetallen im Motorenöl über die Betriebszeit. Auffällig sind dabei vergleichsweise hohe Kupferanteile vor der Umrüstung auf Rapsölkraftstoff, die im weiteren Verlauf innerhalb des Motorenölwechselintervalls abfallen. Eine Klärung der Ursachen war nicht möglich. Im Betrieb mit Rapsölkraftstoff lagen die Gehalte an Eisen auch nach 500 h Einsatzzeit des Motorenöls unter 13 mg/kg und damit auf einem sehr niedrigen Niveau. Die Gehalte aller weiteren nach der Umrüstung untersuchten Verschleißmetalle im Motorenöl lagen unter 4 mg/kg und sind ebenfalls als unauffällig zu bewerten.

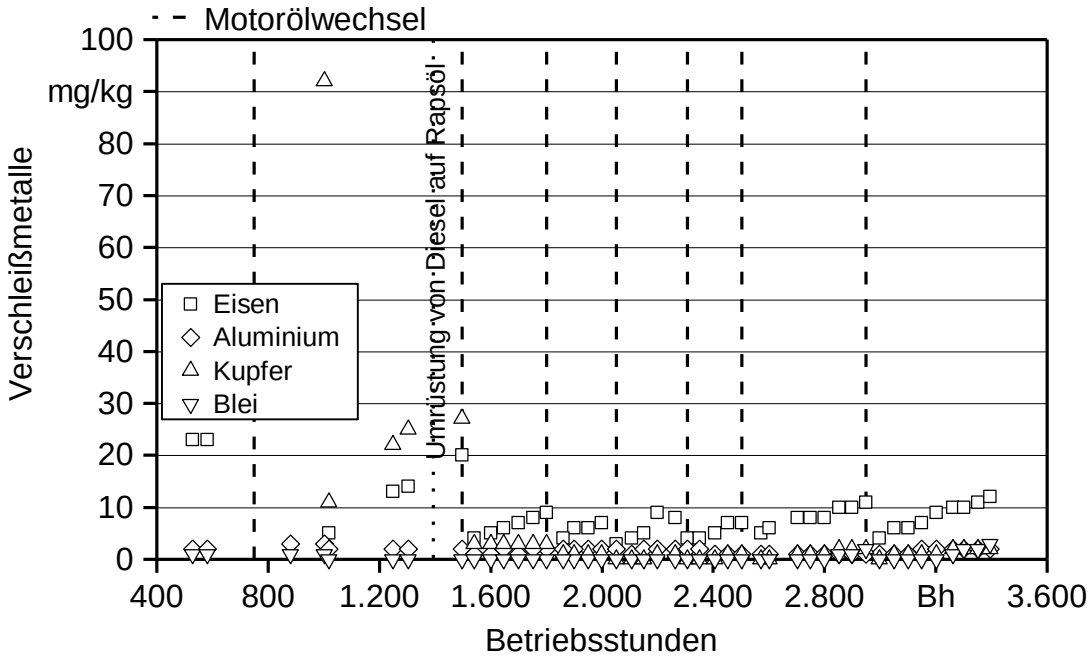


Abbildung 24: Gehalt der Verschleißmetalle Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei im Motorenöl über die Betriebszeit des Harvesters

In Abbildung 25 sind die *Total Acid Number* (TAN) und *Total Base Number* (TBN) dargestellt. Die TAN ist ein Maß für den Gehalt an Säuren im Motorenöl, die beispielsweise aus Oxidationsprodukten entstehen können. Mit zunehmender Alterung und Oxidation des Motorenöls steigt die TAN an. Durch die TBN kann die alkalische Reserve des Motorenöls bewertet werden, die zur Neutralisation von Säuren notwendig ist. Die TBN sinkt mit zunehmender Einsatzdauer. Nach BARTZ (2010) [2] sollte ein Ölwechsel durchgeführt werden, wenn die TBN um mehr als 50 % ihres Ausgangswerts gesunken ist. Dies war lediglich beim ersten Ölwechsel nach der Umrüstung der Fall. Bei den weiteren fünf Motorenölfüllungen, die zum Teil bis zu 500 h Einsatzzeit absolvierten, wurde diese Anforderung immer erfüllt. Darüber hinaus lag die TBN bei allen untersuchten Motorenölproben zuverlässig über der TAN. Gründe für die niedrigen TBN der beiden Ölanalysen innerhalb des ersten Ölwechselintervalls nach der Umrüstung konnten nicht gefunden werden. Die TAN Werte dieser beiden Proben sind vergleichsweise niedrig und lassen auf keine übermäßige Versäuerung schließen. Insgesamt zeigen auch die Analysen der TBN und TAN, dass ein Ölwechselintervall von 500 h ausreichend ist.

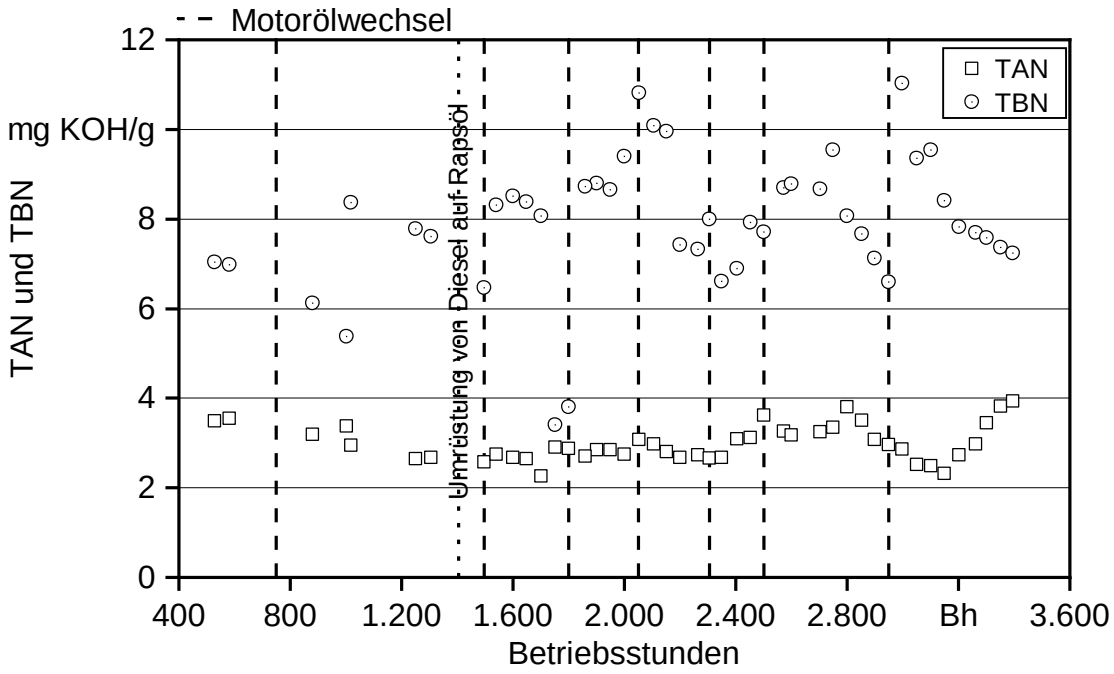


Abbildung 25: Total Acid Number (TAN) und Total Base Number (TBN) des Motorenöls des 1470G-Harvesters über den Versuchszeitraum

Auch die weiteren untersuchten Parameter, wie Additivgehalt, Viskosität und Oxidation, waren im Betrieb mit Rapsölkraftstoff unauffällig und das Motorenöl wies nach 500 h Betriebszeit einen der Einsatzzeit entsprechenden Zustand auf. Die Ergebnisse zu Additivgehalt und Viskosität sind in Anhang 1 und Anhang 2 dokumentiert. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich ein Motorenölwechselintervall von 500 h bewährt hat. Untersuchungen an modernen John-Deere-Rapsöltraktoren bestätigen, dass Motorenölwechselintervalle von 500 h für John-Deere-Pflanzenölmotoren ausreichend sind [16].

5.3.4 Störungen und Optimierungsmaßnahmen

Im Folgenden werden aufgetretene Störungen und daraus abgeleitete Optimierungsmaßnahmen dokumentiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass viele der nachträglich eingebauten Komponenten einen Prototypenstatus aufweisen und beispielsweise die Komponenten nicht hinsichtlich Dauerhaltbarkeit und Störungsanfälligkeit im Voraus untersucht werden konnten, wie dies vor einer Serieneinführung notwendig wäre.

Die Umrüstung des Harvesters auf den Pflanzenölbetrieb erfolgte von 3. bis 14. Juli 2017. Im Anschluss wurde der Harvester in den Ebersberger Forst verlegt. Während der ersten vier Wochen Betriebszeit waren häufiger Störungen im Bereich des Niederdruckkraftstoffsystems und der elektrischen Stromversorgung des Harvesters zu verzeichnen. Hauptprobleme waren primär Undichtigkeiten im Niederdruckkraftstoffsystem, die schwierig zu lokalisieren waren und zum Teil unregelmäßig auftraten, sowie ungenügen-

de Standzeiten der Batterien. Diese Probleme konnten sukzessive gelöst werden, sodass ab ca. Mitte August 2017 ein stabiler Betrieb des Harvesters möglich war.

Die ersten Betriebserfahrungen im August und September 2017 lieferten wichtige Hinweise zur Optimierung der Umrüstmaßnahmen. Diese Optimierung konnte nicht vor Ort erfolgen, sondern wurde Mitte Oktober 2017 in Kirchroth durch John Deere ETIC und DonauWald Forstmaschinen durchgeführt. Im Anschluss war der Harvester zur Aufarbeitung von Sturmschäden im Forstbetrieb Neureichenau im Einsatz. Während dieses Einsatzes, bei dem erstmals tiefere Außentemperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt zu verzeichnen waren, kamen von den Maschinenführern vermehrte Rückmeldungen über ein eingeschränktes Leistungsverhalten des Harvesters und Fehlermeldungen eines zu geringen Kraftstoffdrucks, zu geringen Drucks des Dieselkraftstoffs für die Regenerierung des Abgasnachbehandlungssystems und Notlaufbetrieb. Dies äußerte sich durch eine reduzierte Motordrehzahl, reduzierte maximale Fahrgeschwindigkeit, häufigeres Absterben des Motors während der Arbeiten und eine subjektiv wahrgenommene Leistungsminderung. Der zu geringe Dieselkraftstoffdruck an der Regenerierdüse wurde durch Verschmutzungen im Dieseltank ausgelöst, die vermutlich beim Werkstattaufenthalt eingebracht und von der Pumpe angesaugt worden waren. Durch eine Reinigung der Kraftstoffschläuche und des Filters konnte dieses Problem behoben werden. Der zu geringe Rapsölkraftstoffdruck konnte durch einen Tausch des Kraftstofffilters gegen einen mit etwas größerer Porenweite behoben werden. Weitere Fernwartungsmaßnahmen und Vor-Ort Einsätze in Neureichenau führten zu kaum einer Besserung. Nach dem Umsetzen des Harvesters in den Ebersberger Forst wurden Einstellungen an den Hydraulikpumpen, am Fahrantrieb und an der TimberMatic-Steuerung des Harvesters vorgenommen. Durch diese Maßnahmen, die nicht mit dem Rapsölbetrieb in Verbindung stehen, konnten die Einschränkungen beim Fahrbetrieb abgestellt und die Bedienung der Maschine deutlich verbessert werden. Außerdem wurde der Tankgeber im Niederdruckkraftstoffsystem getauscht (siehe Abschnitt 5.1.2) und die Motorsteuergerätesoftware aktualisiert. Nach diesem Reparaturtermin lief die Maschine wieder zur vollen Zufriedenheit der Maschinenführer.

Im Januar 2018 traten vereinzelt Fehlermeldungen aus dem Niederdruckkraftstoffsystem auf. Ursache war ein abgescheuertes Kabel im beheizten Kraftstoffförderpumpenkasten, das zum zeitweisen Ausfall der Kraftstoffförderpumpen führte. Resultierend aus diesen Erfahrungen wurde ein neuer, hinsichtlich seiner Robustheit und Wartungszugänglichkeit verbesserter Kraftstoffförderpumpenkasten aufgebaut. Dieser Pumpenkasten wurde im Mai 2018 verbaut, abschließend im August 2018 hinsichtlich der Verkabelung optimiert und funktionierte bis zum Ende des Projekts störungsfrei.

Ab Februar 2018 waren Störungen der mit HVO betriebenen Standheizung zu verzeichnen und im März 2018 fiel diese vollständig aus und musste getauscht werden. Eine eindeutige Ursache für den Ausfall der Standheizung konnte nicht abschließend festgestellt werden. Fehlende Anlassfarben an einem von zwei Glühstiften deuten darauf hin, dass die Zündung der Standheizung möglicherweise bereits bei der Auslieferung des Harvesters nicht ordnungsgemäß funktionierte.

Fehlermeldungen aus dem Hochdruckkraftstoffsystem waren vereinzelt ab April 2018 zu verzeichnen. Eine genaue Analyse der aufgezeichneten CAN-Daten ergab, dass es in unregelmäßigen Abständen für einen Bruchteil einer Sekunde zu einer Abweichung zwischen dem Soll-Druck und dem Ist-Druck im Hochdruckkraftstoffsystem kommt und eine Fehlermeldung ausgegeben wird. Der Motorbetrieb wurde jedoch nicht beeinträchtigt und der Fahrer bemerkte keinen Leistungsabfall oder Ähnliches, wurde jedoch durch die akustische Fehlermeldung beim Arbeiten gestört. Nach längerer Beobachtungsphase bis August 2018 und dem Wechsel einzelner Sensoren, um einen Sensordefekt auszuschließen, wurde im September 2018 die Hochdruckpumpe ausgetauscht, um diese einer Fehler- und Verschleißprüfung zu unterziehen. Bei der Prüfung konnte keine Ursache für die beobachtete kurzzeitige Regelabweichung ermittelt werden. Die Pumpe wies weder auffälligen Verschleiß noch Verschmutzung auf. Es ist jedoch nicht vollständig auszuschließen, dass durch die Verwendung der Kraftstofffilter mit größerer Maschenweite ein geringfügig höherer Verschleiß in der Hochdruckpumpe entsteht. Um diese mögliche Fehlerquelle auszuschließen, sollten bei zukünftigen Umrüstmaßnahmen Kraftstofffilter mit der gleichen Maschenweite wie für Dieselbetrieb vorgesehen werden. Möglicherweise führten aber auch die Störungen im Niederdruckkraftstoffsystem mit Ausfall der Kraftstofffförderpumpen zu einer Überbelastung der Hochdruckpumpe. Die Fehlermeldungen traten nach dem Tausch der Hochdruckpumpe nicht mehr auf und es waren während der restlichen Projektlaufzeit keine Störungen mehr festzustellen.

5.3.5 Umweltwirkung

Während des Feldtests wurden mit dem Harvester etwa 42.500 l Rapsölkraftstoff verbraucht und damit der Umschlag von rund 41.000 l Dieselkraftstoff auf nicht versiegelten Flächen im Forst vermieden. Da Rapsölkraftstoff gut biologisch abbaubar und toxikologisch unbedenklich ist, kann das Risiko einer gefährlichen Verunreinigung von Boden und Gewässern minimiert werden. Rapsölkraftstoff ist weder als Gefahrgut noch in Wassergefährdungsklassen nach der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) eingestuft. Mit Einführung der AwSV wird Rapsölkraftstoff jedoch nicht mehr als „nicht wassergefährdend“ sondern als „allgemein wassergefährdend“ bezeichnet, da flüssige Pflanzenöle den aufschwimmenden Flüssigkeiten zugeordnet werden. Herkömmlicher Dieselkraftstoff ist als Gefahrgut eingestuft und nach AwSV der Wassergefährdungsklasse 2 zuzuordnen. Mit dem rapsölkraftstoffbetriebenen Harvester wurde somit bereits während des Feldtests ein Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz geleistet, der insbesondere in den Wasserschutzgebieten von Vorteil ist. Für die Holzernte im Wasserschutzgebiet wird der Einsatz von Betriebsstoffen mit möglichst geringen Wassergefährdungsmerkmalen empfohlen [3].

Rapsölkraftstoff aus dezentralen Ölmühlen in Bayern weist nach DRESSLER et al. (2018) [10] ein Treibhausgasminderungspotenzial von 87,5 % im Vergleich zu Dieselkraftstoff auf. Durch die Substitution von 41.000 l Dieselkraftstoff wurden während des Feldtests rund 120.000 kg CO_2-Äquivalente an Treibhausgasemissionen vermieden.

5.4 Emissionsverhalten im realen Betrieb

Das Emissionsverhalten des Harvesters im realen Betrieb wurde mit Dieselkraftstoff vom 19. bis 23. Juni 2017 (Betriebsstunden: 1.300 h), mit Rapsölkraftstoff vom 28. August bis 1. September 2017 (Betriebsstunden: 1.525 h) und nochmals mit Rapsölkraftstoff vom 24. bis 28. September 2018 (Betriebsstunden: 3.250 h) ermittelt. Die Betriebszeit des Harvesters betrug dabei etwa 1,5 h bis 2,5 h, um die Vorgaben zur Prüfdauer nach EU-Verordnung 2017/655 [19] zu erfüllen. Die Ergebnisse werden im Folgenden in Form von Konformitätsfaktoren der gültigen Mittelungsfenster dargestellt, wie es in der EU-Verordnung 2017/655 [19] definiert ist (siehe hierzu auch Unterkapitel 4.5). 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 26 sind die Häufigkeitsverteilungen der Stickstoffoxidkonformitätsfaktoren der Mittelungsfenster für jede Einzelmessung dargestellt. Unabhängig vom Kraftstoff und vom Betriebsstundenstand des Harvestermotors liegen alle Konformitätsfaktoren der Einzelmessungen deutlich unter 1,0. Eine Varianzanalyse des 90. Perzentils der Stickstoffoxidkonformitätsfaktoren lässt keinen signifikanten Einfluss des Kraftstoffs erkennen. Vielmehr zeigt sich, dass das Abgasnachbehandlungssystem zur Reduktion der Stickstoffoxidemissionen unabhängig vom Kraftstoff und der bisher absolvierten Betriebsdauer zuverlässig funktioniert.

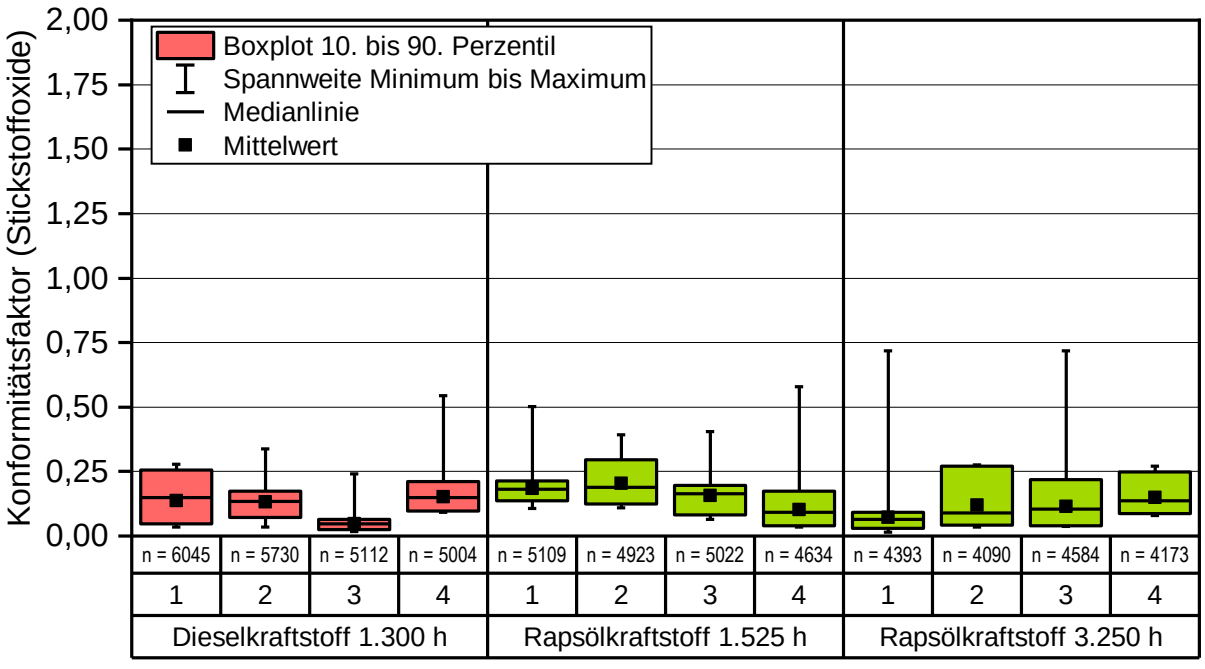


Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Konformitätsfaktoren für Stickstoffoxide der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster)

Die Häufigkeitsverteilungen der Konformitätsfaktoren für Kohlenstoffmonoxid sind in Abbildung 27 dargestellt. Alle ermittelten Konformitätsfaktoren der Mittelungsfenster liegen unter 0,25 und damit deutlich unter den Anforderungen der Abgasstufe IV am Motorenprüfstand. Die 90. Perzentile der Konformitätsfaktoren für Kohlenstoffmonoxid der Messung mit Diesel- und Rapsölkraftstoff bei 1.525 h unterscheiden sich nicht signifikant, während bei 3.250 h bei der Messung mit Rapsölkraftstoff signifikant höhere Faktoren festzustellen sind. Gründe hierfür können nicht eindeutig identifiziert werden, sind aber vermutlich im Bereich der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen bei den Messungen zu suchen. Bei der Messung bei 3.250 h führte der Harvester deutlich mehr Zufallsseinschlag als bei den anderen beiden Messungen durch. Dies wird beispielsweise aus der während der Messung gefahrenen Distanz ersichtlich. Während bei den Messungen bei 1.300 h und 1.525 h zumeist eine Strecke von 0,8 km bis 1,4 km zurückgelegt wurde, waren es bei der Messung bei 3.250 h zwischen 3,7 km und 4,5 km. Außerdem lagen die Außentemperaturen bei den Messungen bei 3.250 h um durchschnittlich 12 K bis 15 K niedriger als bei den anderen beiden Messungen.

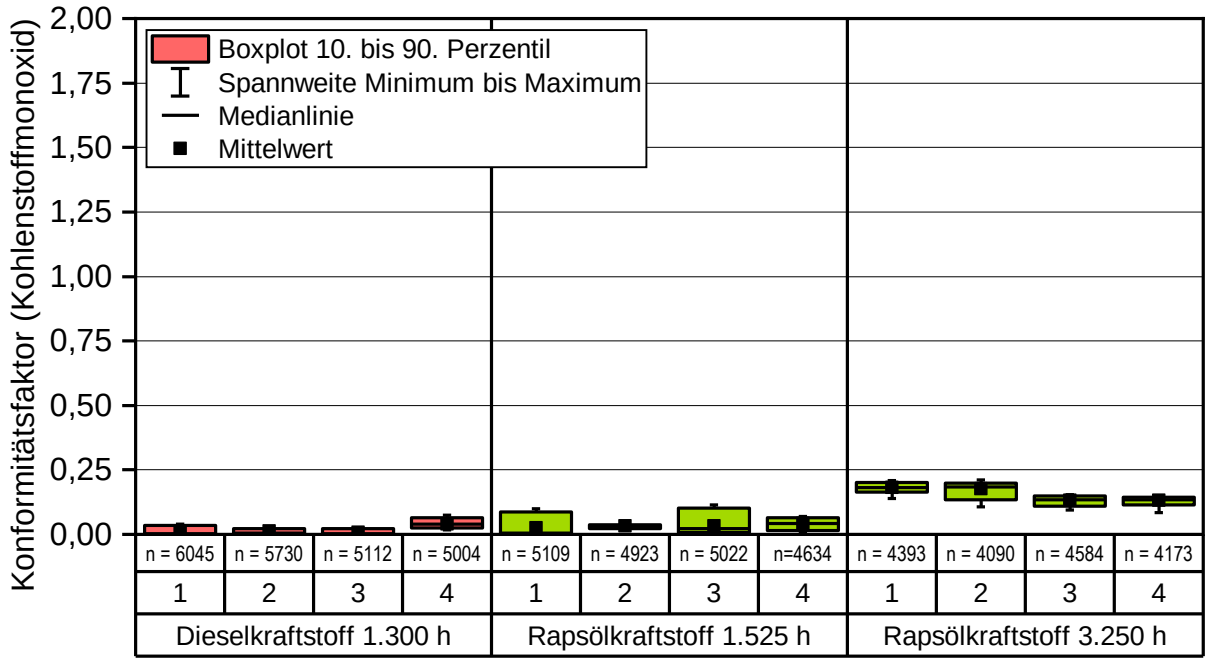


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Konformitätsfaktoren für Kohlenstoffmonoxid der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster)

Die Konformitätsfaktoren der Kohlenwasserstoffemissionen sind in Abbildung 28 aufgeführt. Mit Ausnahme einer Wiederholungsmessung mit Rapsölkraftstoff bei 1.525 h liegen auch hier alle Konformitätsfaktoren 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 Faktoren unter 0,15

festzustellen und 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 Konformitätsfaktoren der Mittelungsfenster deutlich. Eine Analyse des Verlaufs der Kohlenwasserstoffemissionen ergab, dass bei allen zwölf Einzelmessungen die Konzentration im Abgas zumeist bei unter 10 ppm lag, aber in regelmäßigen Abständen kurze Peaks von wenigen Sekunden mit höheren Konzentrationen zu beobachten waren. Diese resultieren nicht aus der motorischen Verbrennung sondern 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 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 für dieses Verhalten waren nicht auf das geänderte Kraftstoffniederdrucksystem eingestellte Spülzeiten. Durch eine Optimierung wurden die Spülzeiten wieder denen vor der Umrüstung angepasst, so dass ähnlich niedrige Kohlenwasserstoffemissionen resultieren. Die Unterschiede bei den Konformitätsfaktoren der Kohlenwasserstoffemissionen sind somit nicht auf den Kraftstoff, die motorische Verbrennung oder die Funktion des Abgasnachbehandlungssystems selbst zurückzuführen, sondern vielmehr auf dessen Regenerationseinrichtung.

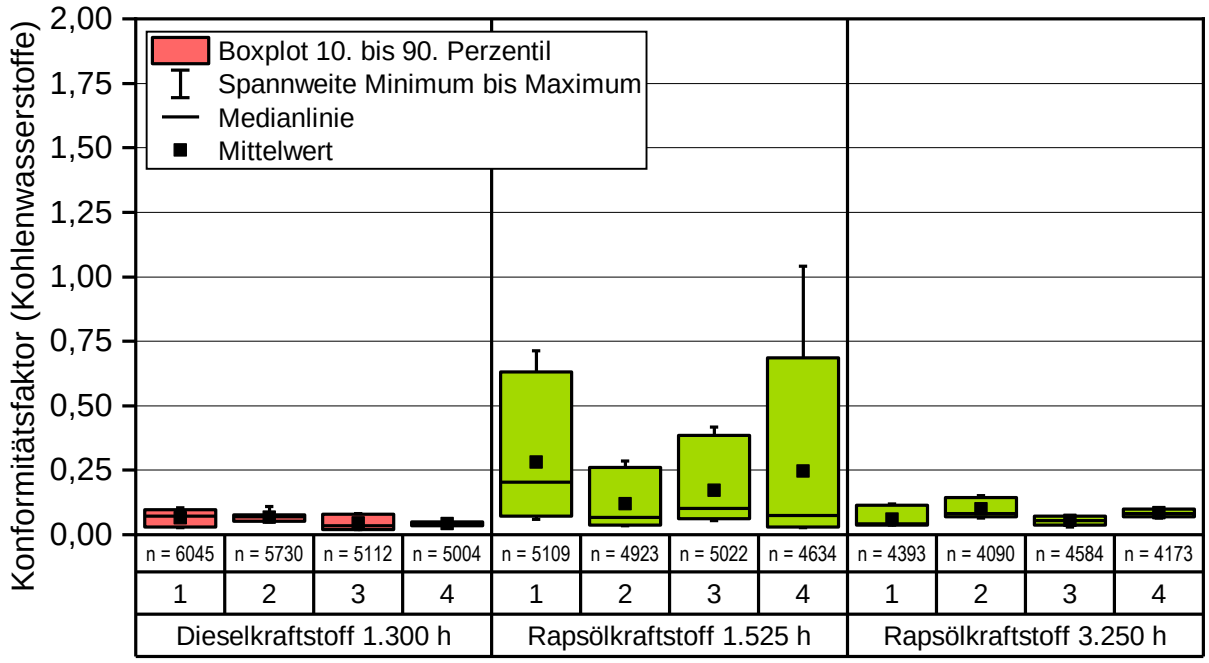


Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der resultierenden Konformitätsfaktoren für Kohlenwasserstoffe der Mittelungsfenster aus den Emissionsmessungen im realen Einsatz im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff (n: Anzahl der Mittelungsfenster)

Insgesamt bleibt festzustellen, dass der Harvester auch im realen Betrieb die Anforderungen der Abgasstufe IV für die gasförmigen Emissionen im Betrieb mit Diesel- und Rapsölkraftstoff einhält, auch nach einer Betriebszeit von 3.250 h, wovon 1.850 h im Rapsölkraftstoffbetrieb absolviert wurden.

Auf Basis der aufgezeichneten Messdaten können auch die spezifischen CO_2-Emissionen und der spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch bestimmt werden (siehe Abbildung 29). Die spezifischen CO_2-Emissionen (*Tank-to-Wheel*) liegen bei allen Messungen bei etwa 600 g/kWh. Der spezifische Kraftstoffverbrauch ist mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff 11 % höher. Es ist jedoch zu beachten, dass der gravimetrische Heizwert von Rapsölkraftstoff um etwa 12 % geringer ist als derjenige von Dieselkraftstoff. Der Kraftstoffmehrverbrauch mit Rapsölkraftstoff entspricht somit dem Heizwertunterschied. Das bedeutet, dass die Motoreneffizienz im Betrieb mit beiden Kraftstoffen gleich ist.

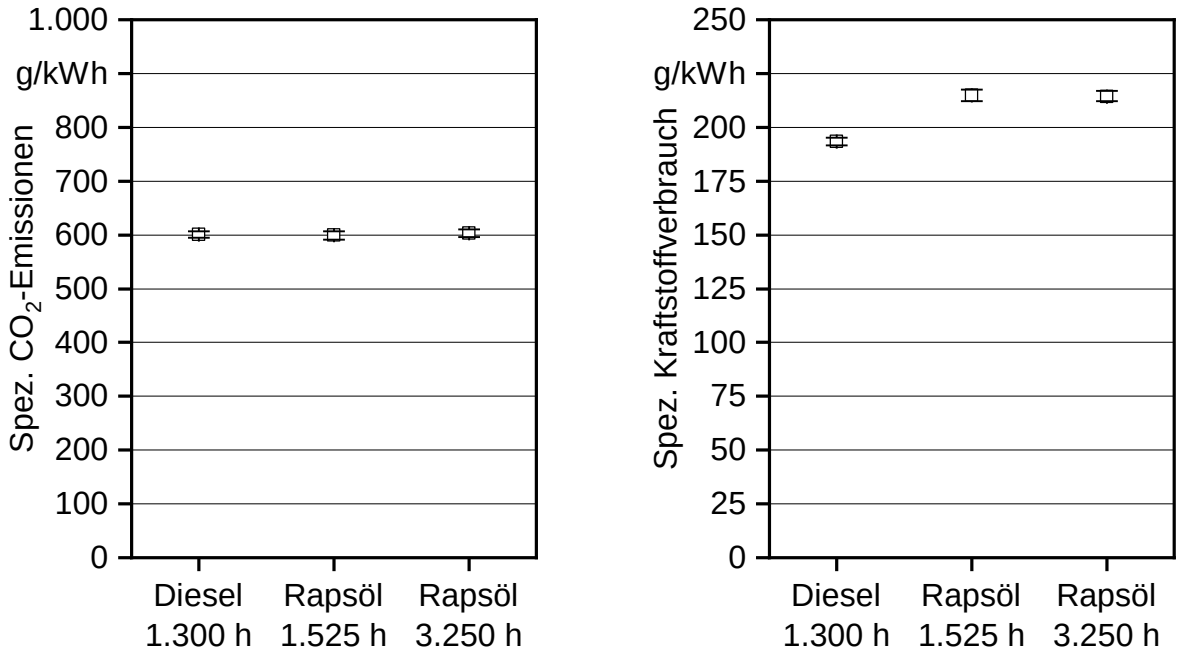


Abbildung 29: Spezifische CO_2-Emissionen (Tank-to-Wheel) und spezifischer Kraftstoffverbrauch während der Emissionsmessungen im realen Betrieb (Mittelwerte und Spannweiten)

5.5 Begutachtung des Gesamtsystems

Die Begutachtung des Harvesters wurde im November 2018 gegen Ende des Feldversuchs durchgeführt. Im Zeitraum von August 2018 bis zur Befundung waren keine Störungen an der Maschine zu verzeichnen und die Prüfung des Fehlerspeichers des Motorsteuergeräts ergab keinen Hinweis auf Meldungen, die auf etwaige Probleme hindeuten. Lediglich ein Hinweis, dass Kühlmittel aufgefüllt werden sollte, war als Meldung abgelegt. Da keine Hinweise auf mögliche kraftstoffbedingte Schäden vorhanden waren,

wurden bei der Begutachtung primär die nicht serienmäßigen, nachträglich eingebauten Komponenten, der Zustand des Abgasnachbehandlungssystems und ein Zylinder optisch geprüft. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Befundung, aufgeteilt in die Funktionsgruppen, aufgeführt.

5.5.1 Externer Tank und Kraftstoffpumpe für die Regeneration der AGN

Eine optische Prüfung des externen Kraftstofftanks zur Mitnahme von Dieselkraftstoff beziehungsweise HVO ergab keine Mängel. Der in der Ansaugleitung aus diesem Tank integrierte Kraftstofffilter wies leichte Verschmutzungen auf und wurde ersetzt. Im Anschluss an den Kraftstofffilter ist eine zusätzliche Kraftstoffpumpe verbaut, deren Aufgabe es ist, den im Abgasstrang integrierten Injektor für die Regeneration des Abgasnachbehandlungssystems zu versorgen. Die Prüfung dieser Pumpe ergab keine Auffälligkeiten und der eingestellte Solldruck konnte zuverlässig erreicht werden. Während des Feldtests war die Regeneration des Abgasnachbehandlungssystems immer möglich und es waren während einer Regeneration keine Fehlermeldungen zu verzeichnen.

5.5.2 Niederdruckkraftstoffsystem

Im Niederdruckkraftstoffsystem waren über den Projektverlauf die häufigsten Störungen zu verzeichnen. Die höhere Viskosität von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff, die bei niedrigen Temperaturen zunimmt, bedingt höhere Anforderungen an die Ausführung des Niederdruckkraftstoffsystems. Die durchgeführten Anpassungen des Niederdruckkraftstoffsystems sind in Abschnitt 5.1.3 und die Störungen sowie Optimierungsmaßnahmen in Abschnitt 5.3.4 dokumentiert. Die Begutachtung bezieht sich daher auf das optimierte Niederdruckkraftstoffsystem.

Der im August 2018 abschließend optimierte Kraftstoffförderpumpenkasten wies einen ordnungsgemäßen Zustand auf. Die beiden Pumpen lieferten den gewünschten Betriebsdruck und es waren dabei keine auffälligen Geräusche wahrnehmbar, die auf eine mögliche Schädigung hingewiesen hätten. Das Zu- und Wegschalten der zweiten Pumpe durch den manuellen Schalter am Pumpenkasten funktionierte fehlerfrei. Die im Kasten angebrachten Heizfolien wiesen ebenfalls eine ordnungsgemäße Funktion auf. An den im Kraftstoffförderpumpenkasten verbauten Kraftstoffschläuchen und Verschraubungen waren keine sichtbaren Undichtigkeiten festzustellen. Auch die im Kasten verlegten Kabel und elektrischen Bauteile waren unbeschädigt und funktionierten fehlerfrei.

Alle elektrisch beheizten Kraftstoffleitungen und der im Kraftstofffiltergehäuse integrierte Heizstab arbeiteten ordnungsgemäß und ließen sich sowohl manuell als auch über den Mikrocontroller ansteuern.

Der Mikrocontroller und die manuellen Schalter zur Ansteuerung der beheizten Bauteile sind in einem separaten Schaltkasten untergebracht. Eine Funktionsprüfung des Mikrocontrollers wies keine Auffälligkeiten auf und das erstellte Softwareprogramm arbeitete ordnungsgemäß. Alle Bauteile waren sauber und trocken. Es wurde jedoch festgestellt,

dass ein Knopfzellenakku defekt und dadurch das Uhrmodul am Mikrocontroller bei fehlender Bordspannung nicht verfügbar war. Das Fehlen dieser Uhrzeit führt nicht zum Ausfall der Maschine, allerdings werden unter bestimmten Umständen die elektrisch beheizten Bauteile nicht energieeffizient angesteuert. Dies kann im Extremfall dazu führen, dass beim Anlassen des Motors nicht mehr genügend elektrische Energie zur Verfügung steht, was jedoch während des Feldeinsatzes nicht der Fall war. An einer Stelle der Platine war eine leichte mechanische Beschädigung festzustellen, die jedoch die Funktion nicht einschränkte. Insbesondere beim Elektroschaltkasten mit Mikrocontroller ist zu berücksichtigen, dass dieser als Prototyp aufgebaut und hinsichtlich Vibrationen und Erschütterungen nicht optimiert ist. Für eine Serieneinführung müsste ein entsprechendes Steuergerät entwickelt werden, das für diese Einsatzbedingungen dauerhaft geeignet ist. Abbildung 30 zeigt den Elektroschaltkasten mit Mikrocontroller nach dem Öffnen.

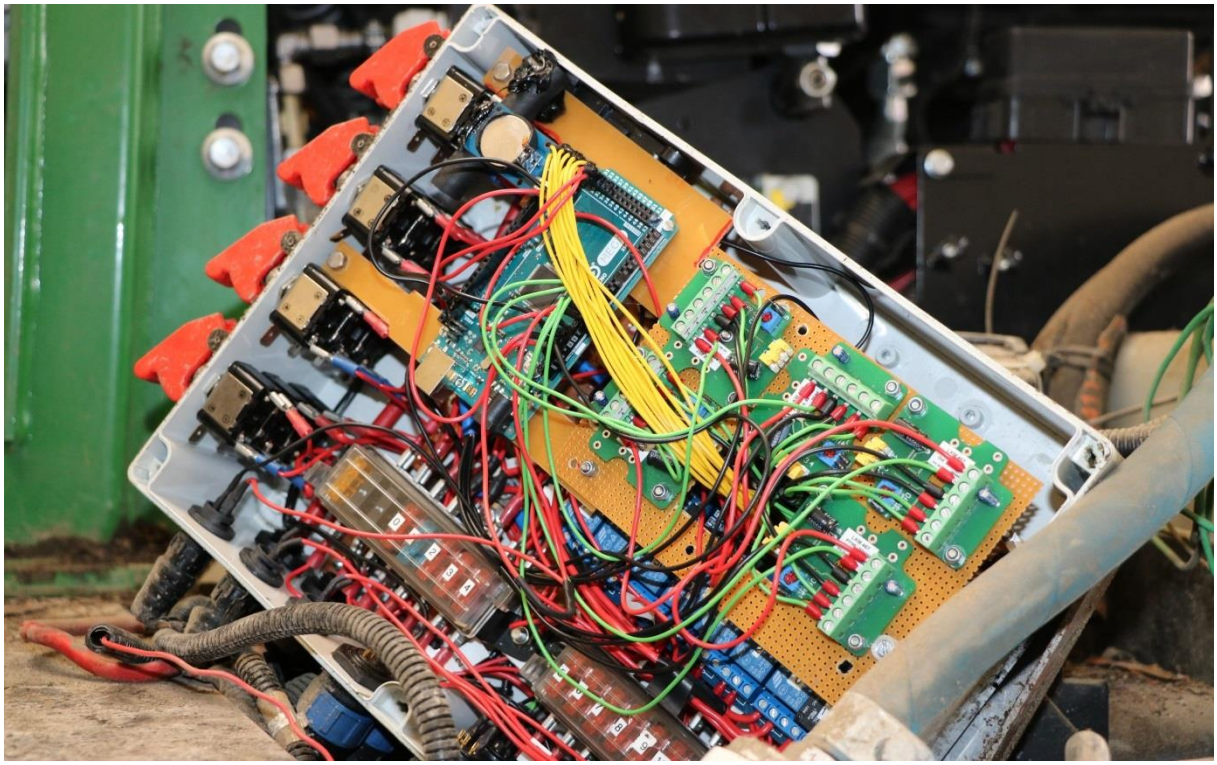


Abbildung 30: Elektroschaltkasten mit Mikrocontroller zur Steuerung der beheizten Bauteile und Kraftstoffförderpumpen

5.5.3 Motor

Die Analysen der Motorenölqualität lieferten keine Hinweise auf übermäßigen Verschleiß und daher wurde die optische Begutachtung nur eines Zylinders als ausreichend befunden. Um den Brennraum des Zylinders optisch untersuchen zu können, wurden der Ventildeckel sowie ein Injektor ausgebaut. Der Injektor selbst wurde ebenfalls optisch begutachtet und ist in Abbildung 31 dargestellt. Am Injektor sind geringe äußerliche Ablagerungen festzustellen, die tendenziell etwas höher als im Dieselbetrieb erscheinen. Es sind deutlich und scharf abgegrenzt die Einspritzlöcher zu erkennen. Die Einspritzlöcher

sind frei und um die Einspritzlöcher sind keine auffälligen Ablagerungen festzustellen, sodass das Spraybild nicht beeinflusst wird.

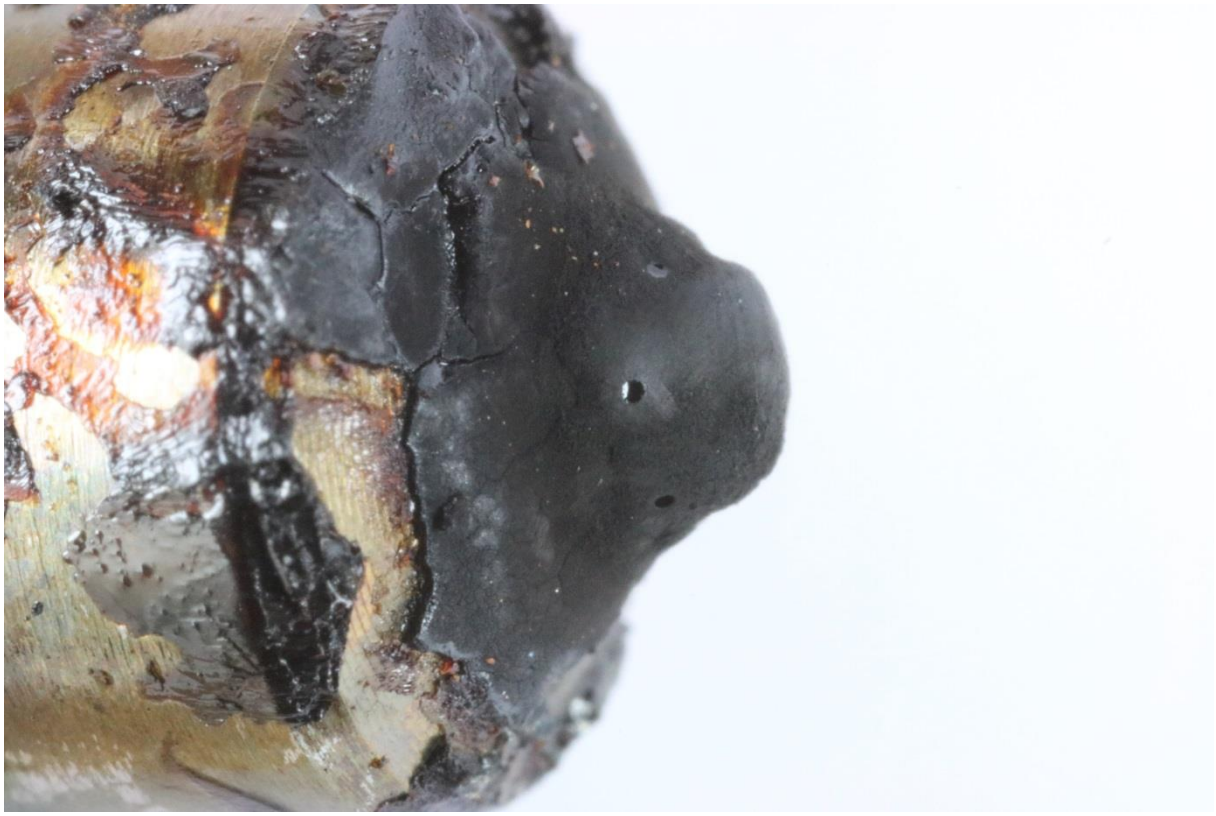


Abbildung 31: Injektor aus dem Harvester nach 3.500 h Einsatzzeit (davon 2.100 h mit Rapsölkraftstoff)

Die Untersuchung des Brennraums erfolgte mittels eines Endoskops durch die Injektorbohrung. Die Ventilsitze der geöffneten Einlassventile waren sauber und es ist von keiner Beeinträchtigung der Funktion auszugehen. Am Ventilschaft waren leichte Ablagerungen zu erkennen, wie dies auch beim Betrieb mit Dieselkraftstoff üblich ist. Auch am Kolben waren leichte, unkritische Ablagerungen sichtbar. An der Zylinderwand war der Kreuzschliff gut erkennbar und es konnten keine auf übermäßigen Verschleiß hindeutenden Riefen oder Schleifspuren festgestellt werden.

Die beiden Turbolader wurden auf Beschädigungen und genauen Sitz überprüft. Das Lagerspiel war im zulässigen Toleranzbereich. An den Schaufelrädern des stationären Turbinenrads sind leichte Abnutzungsspuren zu erkennen, die jedoch für eine Laufzeit von ca. 3.500 h als üblich zu bewerten sind. In Abbildung 32 ist einer der Turbolader dargestellt.

Abbildung 32: Turbolader des Harvestermotors mit üblichen Abnutzungsspuren nach 3.500 h Betrieb

5.5.4 Abgasnachbehandlungssystem

Die gesamte Abgasnachbehandlung war sehr sauber und wenig verrußt. Laut Datenstand des Motorsteuergeräts erfolgte die letzte Regeneration 3 h vor der Endbefundung. Da während des Betriebs in einem Abstand von 100 h die Regeneration mit einem Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 [7] durchgeführt wird, war in diesem Bereich keine Beeinflussung des Ablagerungsverhaltens durch den Betrieb des Motors mit Rapsölkraftstoff zu erwarten. Der SCR-Katalysator sowie Bauteile des Mischungsrohrs waren sehr sauber und es waren keine AdBlue®-Ablagerungen zu erkennen. In Abbildung 33 sind endoskopische Aufnahmen des Dieselpartikelfilters und des Mischelements für AdBlue® zu sehen.

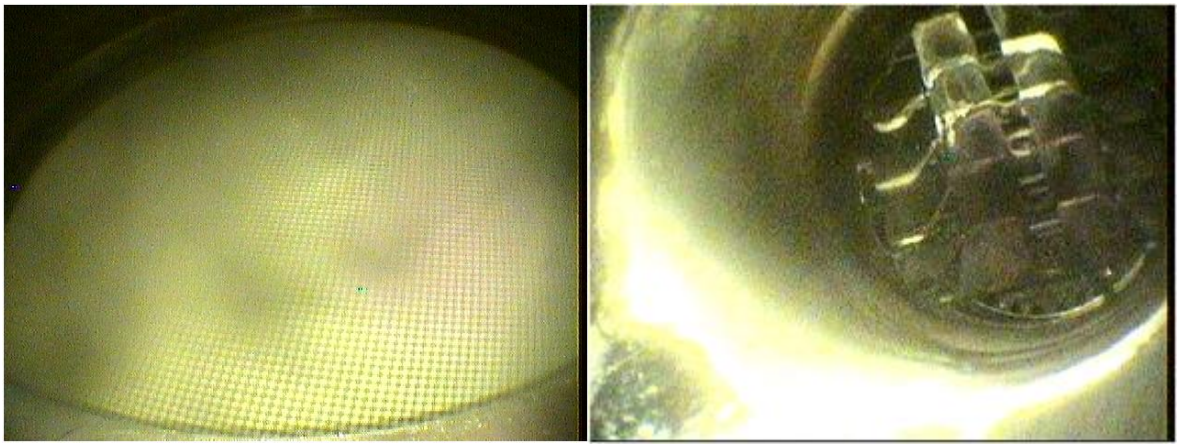


Abbildung 33: Endoskopische Aufnahme des Dieselpartikelfilters (links) und des Mischelements für AdBlue® (rechts)

5.6 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass der zuverlässige Betrieb eines modernen Harvesters mit Rapsölkraftstoff technisch möglich ist. Es konnte demonstriert werden, dass die Herausforderungen im Bereich der Kraftstoffversorgung und der notwendigen Anpassungsmaßnahmen am Motor gelöst werden können.

Im Feldversuch war eine zuverlässige Versorgung mit hochwertigem Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 aus einer bayerischen dezentralen Ölmühle möglich. Für die sichere Versorgung mit Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff ist derzeit jedoch ein etwas höherer Abstimmungsaufwand zwischen dem Rapsölproduzenten, einem eventuell notwendigen Zwischenhändler und dem Maschinenbetreiber erforderlich. Grund hierfür ist das momentan nicht flächendeckend ausgebaute Rapsölkraftstoffhändlernetz aufgrund der geringen Nachfrage nach diesem Kraftstoff. Bei steigender Nachfrage könnte sich jedoch wieder eine entsprechende Infrastruktur etablieren.

Die während des Feldversuchs dokumentierten Daten zeigen, dass die getroffenen Anpassungsmaßnahmen am Harvester für den zuverlässigen Betrieb mit Rapsölkraftstoff erfolgreich waren. Ein Kaltstart des Harvesters war auch bei niedrigen Außentemperaturen von bis zu −17 °C möglich. Die Produktivität des Harvesters und die Motoreffizienz liegen auf dem gleichen Niveau wie vor der Umrüstung im Betrieb mit Dieselkraftstoff. Emissionsmessungen im realen Betrieb belegen einen schadstoffarmen Betrieb des Harvesters mit Rapsölkraftstoff und die Grenzwerte der Abgasstufe IV werden auch nach 1.850 h Betrieb mit Rapsölkraftstoff zuverlässig erfüllt. Die Begutachtung des Harvesters zum Projektende belegt eine ordnungsgemäße Funktion der zusätzlich installierten Bauteile und weist auf einen üblichen, der Laufzeit entsprechenden Zustand des Motors und des Abgasnachbehandlungssystems hin. Auf Basis der zu verzeichnenden Störungen konnten weitere Ideen zur Optimierung gesammelt werden, die zu einer Serieneinführung gegebenenfalls geprüft werden sollten. Beispielsweise sollten die zusätzlich instal-

lierten Bauteile hinsichtlich ihrer Dauerhaltbarkeit unter den rauen Einsatzbedingungen im Forst optimiert und geprüft werden.

Insgesamt leistete der Harvester bis Mitte Dezember 2018 etwa 2.100 Betriebsstunden mit Rapsölkraftstoff und benötigte dabei rund 42.500 l. Damit wurde der Umschlag von etwa 41.000 l Dieselkraftstoff der Wassergefährdungsklasse 2 und Treibhausgasemissionen von ca. 120.000 kg CO_2-Äquivalenten im Forst vermieden. Durch die Nutzung von Rapsölkraftstoff in Forstmaschinen kann somit ein wichtiger Beitrag zum Klima-, Boden- und Gewässerschutz geleistet werden.

Zusammenfassung

Durch die Verwendung von Rapsölkraftstoff anstelle von Dieselkraftstoff kann die Forstwirtschaft einen wichtigen Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz, aber auch – aufgrund der besonderen Betankungssituation im Wald – zum vorbeugenden Boden- und Gewässerschutz leisten. Bisher lagen jedoch keine Erfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in modernen Forstmaschinen vor.

Ziel des Vorhabens war daher, einen forstwirtschaftlichen Vollernter (Harvester) für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff zu adaptieren. Als Versuchsmaschine diente ein Harvester John Deere 1470G der Bayerischen Staatsforsten.

Die Konzeption und Entwicklung der technischen Maßnahmen zur Anpassung des Harvesters an Rapsölkraftstoff erfolgten am John Deere European Technology Innovation Center. Das entwickelte Umrüstkonzept beinhaltet einen Zusatztank für einen kältestabilen Kraftstoff, der für den Betrieb einer Standheizung und die Regeneration der Abgasnachbehandlung dient. Über die Standheizung werden der Rapsölkraftstofftank, der Motorblock und die Fahrerkabine beheizt. Um die Wärme der Standheizung über das Kühlmittel in den Rapsölkraftstofftank zu übertragen, wurde dort ein zusätzlicher Wärmetauscher integriert. Daneben wurde das Niederdruckkraftstoffsystem für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff modifiziert.

Für die Anpassung des Harvestermotors wurde eine neue Motorapplikation für Rapsölkraftstoff entwickelt und an einem Versuchstraktor mit baugleichem Motor getestet und optimiert. Ziel war dabei, ein gleiches Leistungsverhalten wie im Dieselbetrieb und ein möglichst gutes Kaltstartverhalten zu erreichen. Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand des TFZ zeigen, dass mit der entwickelten Motorapplikation ein in etwa gleiches Leistungsverhalten erzielt werden konnte und auch die Schadstoffemissionen von Stickstoffoxiden, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Partikelmasse unter den Grenzwerten der Abgasstufe IV bei Anwendung des *Non-Road Transient Cycle* und des *Non-Road Steady*-State *Cycle* liegen.

Die Belieferung der Bayerischen Staatsforsten mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 erfolgte durch eine dezentrale Ölmühle in Verbindung mit einem regionalen Zwischenlager auf einem landwirtschaftlichen Betrieb, der in Dienstleistung die bedarfsgerechte Anlieferung übernahm. Analysen der angelieferten Rapsölkraftstoffchargen belegen eine insgesamt gute Kraftstoffqualität. Für die Betankung des Harvesters wurde eine mobile Tankstelle in einem isolierten Anhänger aufgebaut, die auch bei tiefen Temperaturen eine Betankung gewährleistete. Für die sichere Versorgung mit Rapsölkraftstoff war im Vergleich zu Dieselkraftstoff ein etwas höherer Abstimmungsaufwand zwischen dem Rapsölkraftstoffproduzenten, dem Dienstleister für die Anlieferung und dem Maschinenbetreiber erforderlich. Grund hierfür ist, dass während der Projektlaufzeit nicht auf ein flächendeckendes Rapsölkraftstoffhändlernetz zurückgegriffen werden konnte, da dies aufgrund der geringen Nachfrage nach diesem Kraftstoff zurückgegangen ist. Bei steigender Nachfrage würde jedoch voraussichtlich wieder eine entsprechende Infrastruktur geschaffen werden.

Die Umrüstung des Harvesters auf Rapsölkraftstoff erfolgte im Juli 2017. Im Anschluss begann der Feldtest mit Rapsölkraftstoff bei den Bayerischen Staatsforsten, der im Dezember 2018 abgeschlossen wurde. Während des Feldversuchs traten verschiedene Störungen auf, die Ausgangspunkt für weitere Optimierungen der Umrüstmaßnahmen waren. Ab August 2018 lief der Harvester im Betrieb mit Rapsölkraftstoff störungsfrei bis zum Projektende. Die Produktivität und die Motoreffizienz des Harvesters lagen dabei auf dem gleichen Niveau wie vor der Umrüstung im Betrieb mit Dieselkraftstoff. Ein Kaltstart des Harvesters war auch bei Temperaturen von bis zu −17 °C möglich. Analysen der Motorenölqualität lassen aufgrund des geringen Gehalts an Verschleißmetallen auf eine ordnungsgemäße Funktion der ölgeschmierten Bauteile schließen. Das Motorenölwechselintervall konnte im Betrieb mit Rapsölkraftstoff bei 500 h belassen werden, wie dies auch im Dieselbetrieb üblich ist. Aus den mit dem Harvester gewonnenen Erkenntnissen lassen sich weitere mögliche technische Optimierungsmaßnahmen ableiten.

Während des Feldtests mit Rapsölkraftstoff absolvierte der Harvester 2.100 Betriebsstunden und verbrauchte dabei rund 42.500 l Rapsölkraftstoff. Dadurch konnten der Umschlag von 41.000 l Dieselkraftstoff der Wassergefährdungsklasse 2 auf nicht versiegelten Flächen im Forst und Treibhausgasemissionen in Höhe von rund 120.000 kg CO_2-Äquivalenten vermieden werden.

Mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) wurden die Abgasemissionen im realen Betrieb mit Dieselkraftstoff vor der Umrüstung und mit Rapsölkraftstoff sowohl nach der Umrüstung als auch gegen Projektende bestimmt. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Harvester bei allen Messungen die Anforderungen der Abgasstufe IV hinsichtlich der Emissionen von Stickstoffoxiden, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffen erfüllt – auch nach 3.250 Betriebsstunden und davon 1.850 h mit Rapsölkraftstoff.

Eine Begutachtung des Harvesters gegen Projektende ergab, dass alle zusätzlich installierten Bauteile funktionierten und der Motor sowie das Abgasnachbehandlungssystem einen der Laufzeit entsprechenden Zustand aufweisen.

Die Projektergebnisse zeigen am Beispiel eines Harvesters, dass der Betrieb forstwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen mit Rapsölkraftstoff technisch möglich ist und somit ein Beitrag zum Klima-, Boden- und Gewässerschutz geleistet werden kann.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Erarbeitung von Maßnahmen, um den Motorenbetrieb mit Rapsölkraftstoff weiter zu optimieren, insbesondere im Niederdruckkraftstoffsystem bei den niedrigen im Forst auftretenden Temperaturen im Winter. Es sollte untersucht werden, inwiefern auch der Betrieb der Standheizung mit Rapsölkraftstoff möglich ist und die Regeneration des Abgasnachbehandlungssystems ohne Dieselkraftstoff durchgeführt werden kann. Damit könnte auf einen zweiten Tank, in dem eine geringe Menge Dieselkraftstoff mitgeführt wird, verzichtet werden. Außerdem wären Erkenntnisse zum Langzeitbetriebs- und Langzeitemissionsverhalten mit Rapsölkraftstoff betriebener forstwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen wichtig, um Hemmnisse für den Marktzugang solcher Maschinen abzubauen.

Abstract

In forestry, the substitution of diesel fuel by rapeseed oil fuel can be an important contribution to climate, soil and water protection. But for modern forestry machinery no experiences with the usage of rapeseed oil exist. Target of the research was to adapt a forestry harvester for rapeseed oil operation. Therefore, a John Deere 1470G harvester of the Bavarian State Forestry was used.

The conception and development of the technical measures to adapt the harvester for rapeseed oil operation were made by the John Deere European Technology and Innovation Center. The harvester was equipped with an additional tank for a low temperature resistant fuel. This fuel was used to operate the park heating and to regenerate the exhaust gas aftertreatment system. The rapeseed oil fuel tank, the engine block and the operators cap were tempered by the park heating. An additional heat exchanger was integrated into the main tank to transfer the heat of the coolant to the rapeseed oil fuel. Furthermore, the low-pressure fuel system was modified for rapeseed oil operation.

For the harvester engine a new engine application software was developed, tested and optimised using an agricultural tractor equipped with the same engine type. Target was to reach the same power performance as for diesel fuel operation and best possible cold start behaviour. Power and emission measurements at the tractor test bench proved that about the same power performance was reached and the emissions of nitrogen oxides, carbon monoxide, hydrocarbons and particle mass were below the limit values of European exhaust gas stage IV using the non-road-transient and the non-road-stationary-cycle.

The supply of rapeseed oil fuel according to DIN 51605 was done by a decentralised oil mill in cooperation with a regional intermediate storage on a farm. The farmer delivered the fuel for the harvester on demand. Analysis of the fuel proved a good rapeseed oil fuel quality. For fuelling of the harvester, a portable fuelling station was built within an insulated trailer to ensure that the machine can be refuelled even at low temperatures. Compared to the supply of diesel fuel more communication efforts were necessary between the fuel producer, fuel supplier and the machine operator. Reason was that during the project time no comprehensive network of rapeseed oil fuel suppliers was available. The rapeseed oil fuel supplier network declined because of the missing demand for rapeseed oil fuel. But with increasing demand an appropriate infrastructure would be created again.

The adaptation of the harvester to rapeseed oil fuel operation was done in July 2017. Following, the field test with rapeseed oil was starting at the Bavarian State Forestry, which was finished in December 2018. During the field test some technical malfunctions were recognized that were starting point for further optimization of the engine modifications. Since August 2018 the harvester was operated with rapeseed oil fuel without malfunctions until the end of the project. The productivity and engine efficiency of the harvester were at the same level as before the adaptation to rapeseed oil operation. A cold start of the harvester engine was possible even at temperatures down to −17 °C. Analy-

sis of engine lubricant samples resulting in low levels of wear metal content suggests a regular operation of the lubricated components. It was possible to keep the engine oil change interval during rapeseed oil operation at 500 h as for diesel fuel operation. Further technical measures for optimization were identified within the project.

During the field test the harvester worked for 2 100 h and consumed about 42 500 l rapeseed oil fuel. Thereby, the turnover of 41 000 l diesel fuel of water hazard class 2 at non-sealed grounds in the forest and greenhouse gas emissions of around 120 000 kg CO_2-equivalents were avoided.

The real driving emissions of the harvester in diesel and rapeseed oil operation were measured using a portable emission measurement system (PEMS). The measurements showed that the harvester fulfilled the requirements of exhaust gas stage IV concerning the emissions of nitrogen oxides, carbon monoxide and hydrocarbons, even after 3 250 operation hours and of that 1 850 h with rapeseed oil fuel.

A functional diagnosis of the harvester at the end of the project indicated that all additionally installed components were functioning and the engine as well as the exhaust gas aftertreatment system were in an appropriate condition.

Using a harvester as example, the project results show that the operation of forestry machinery with rapeseed oil is technically possible and can contribute to climate, soil and water protection.

Additional research is needed concerning the development of measures to further optimize engine operation with rapeseed oil fuel, in particular in the low-pressure fuel system at low ambient temperature conditions in forestry at winter time. It should be researched how the park heating can be operated with rapeseed oil and how the regeneration of the exhaust gas aftertreatment system can be realized without using diesel fuel. Thereby, a second fuel tank for a low quantity of diesel fuel would be obsolete. Further experiences concerning the long-term operation and long-term emission behaviour of forestry machinery operated with rapeseed oil would be valuable to reduce market barriers of such machines.

Quellenverzeichnis

[1] APFELBECK, R.; GESSNER, B. H. (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht – Teil II: Untersuchung der Abgaszusammensetzung von Dieselmotoren beim Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester sowie deren Mischungen mit Dieselkraftstoff. Endbericht. Freising: Technische Universität München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan, 315 Seiten

[2] BARTZ, W. J. (2010): Einführung in die Tribologie und Schmierungstechnik. Tribologie Schmierstoffe Anwendungen. Renningen: Expert-Verlag, 372 Seiten, ISBN 978-3-8169-2830-0

[3] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU) (2014): Forstwegebau und Holzernte im Wasserschutzgebiet. Stand: Juni 2014. LfU-Merkblatt, Nr. 1.2/10. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 12 Seiten

[4] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2018): Schutzgebiete im Wald. URL: http://www.stmelf.bayern.de/wald/forstpolitik/wald-in-zahlen/005186/index.php (Stand: 13.06.2019)

[5] BONNEL, P.; PERUJO, A.; PROVENZA, A.; VILLAFUERTE, M. (2013): Non Road Engines Conformity Testing Based on PEMS. Lessons Learned from the European Pilot Program. European Commission (EC) (Hrsg.). Mitarbeiter: Stein, J.; Stark, A.; Marchetti, M.; Holmberg, J.; Ahlberg, J.; Williams, P.; Walker, E.; Knuth, H.-W.; Feisel, K.; Taylor, T.; Pease, N.; Woeldgen, J.-J.; Savakis, D. Spar: Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (IET). JRC Scientific and Policy Reports, Nor. EUR 26438 EN, 45 Seiten, ISSN 1018-5593, ISBN 978-92-79-35091-7

[6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2016): DIN 51605 – Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren – Rapsölkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren. Januar 2016. Berlin: Beuth, 15 Seiten

[7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2018): DIN EN 15940: Kraftstoffe – Paraffinischer Dieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 15940:2016+A1:2018; August 2018. Berlin: Beuth, 28 Seiten

[8] DLG E. V. (2016): Datenblatt DLG-PowerMix John Deere 8400R e23. URL: http://www.dlg-test.de/tests/JD_8400R-e23_de.pdf (Stand: 13.06.2019)

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

[10] DRESSLER, D.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2018): GHG Emissions of Rapeseed Oil Fuel – Impact of Specific Data and Balance Methods. In: PERSSON, M.; SCARLAT, N.; GRASSI, A.; HELM, M. (Hrsg.): Setting the course for a biobased economy. Papers of the 26th European Biomass Conference – Extracted from the Proceedings of the International Conference. Copenhagen, Denmark, 14–17 May. Florence, Munich: ETA-Florence Renewable Energies; WIP – Renewable Energies, S. 1639-1643

[11] EGGERT, M.; BAHNMÜLLER, P. (2018): Bayerische Staatsforsten Statistikband 2018. Regensburg: Bayerische Staatsforsten, 30 Seiten

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

[13] 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

[14] ETTL, J.; BERNHARDT, H.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2016): Dynamische Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessung an pflanzenöltauglichen Traktoren. Landtechnik, Jg. 71, Nr. 2, S. 44-54

[15] ETTL, J.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2016): Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöltauglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern. Berichte aus dem TFZ, Nr. 47. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 179 Seiten

[16] 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 staatlichen Versuchsbetrieben. Berichte aus dem TFZ, Nr. 60. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 210 Seiten

[17] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011): Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission vom 25. Mai 2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 54, Nr. L 167, S. 1-168

[18] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2016): Factsheet zu dem Vorschlag der Kommission zur Festlegung verbindlicher nationaler Ziele für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen (2021–2030). Stand: 20. Juli 2016. MEMO/16/2499. Brüssel, 5 Seiten

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

[20] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Delegierte Verordnung (EU) 2017/654 der Kommission vom 19. Dezember 2016 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich technischer und allgemeiner Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung von Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 60, Nr. L 102, S. 1-333

[21] EUROPÄISCHE UNION (2009): Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmaschinen für mobile Maschinen und Geräte (ABl. L 59 vom 27.02.1997, S. 1). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Jg. 52, Nr. L 68, S. 1-249

[22] EUROPÄISCHE UNION (2013): Verordnung (EU) Nr. 167/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Februar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen, zuletzt geändert durch Verordnung (EU) Nr. 2018/985. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 56, Nr. L 60, S. 1-52

[23] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2016): Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. September über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der EU-Richtlinie 97/68/EG. In: Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 59, Nr. L 252, S. 53–117

[24] FALTL, W. (2016): Grundsätze für den Boden- und Wasserschutz im Rahmen der Waldbewirtschaftung bei den bayerischen Staatsforsten. Regensburg: Bayerische Staatsforsten, 16 Seiten

[25] FRANCO, V.; POSADA SÁNCHEZ, F.; GERMAN, J.; MOCK, P. (2014): Real-world exhaust emissions from modern Diesel cars. A meta-analysis of PEMS emissions data from EU (Euro 6) and US (Tier 2 Bin 5/ULEV II) Diesel passenger cars. Part 1: Aggregated results. International Council on Clean Transportation Europe (ICCT) (Hrsg.). Beijing, Berlin, Brussels, San Francisco, Washington, D. C. ICCT White Paper, Nr. October 2014, 53 Seiten

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

[27] HARBAUER (P.) (2018): KWF-Forstmaschinenstatistik zeigt stark gestiegene Absatzzahlen für Österreich und die Schweiz. URL: https://www.kwf-online.de/index.php/aktuelles/presse/508-kwf-forstmaschinenstatistik-zeigt-stark-gestiegene-absatzzahlen-fuer-oesterreich-und-die-schweiz?highlight=WyJmb3JzdG1hc2NoaW5lbnN0YXRpc3RpayJd (Stand: 13.06.2019)

[28] 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

[29] 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

[30] 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, Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 46, 86 Seiten

[31] HUBER, G.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2019): Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS). Berichte aus dem TFZ, Nr. 62. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 129 Seiten

[32] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2017): ISO 8178-1: Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions; Third edition 2017-04. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 151 Seiten

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

[34] STÖLZNER, H.; BORCHERT, H. (2014): Größer, stärker, älter. Maschinen bayerischer Forstunternehmen. Forst & Technik, Nr. 12, S. 26-29

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

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

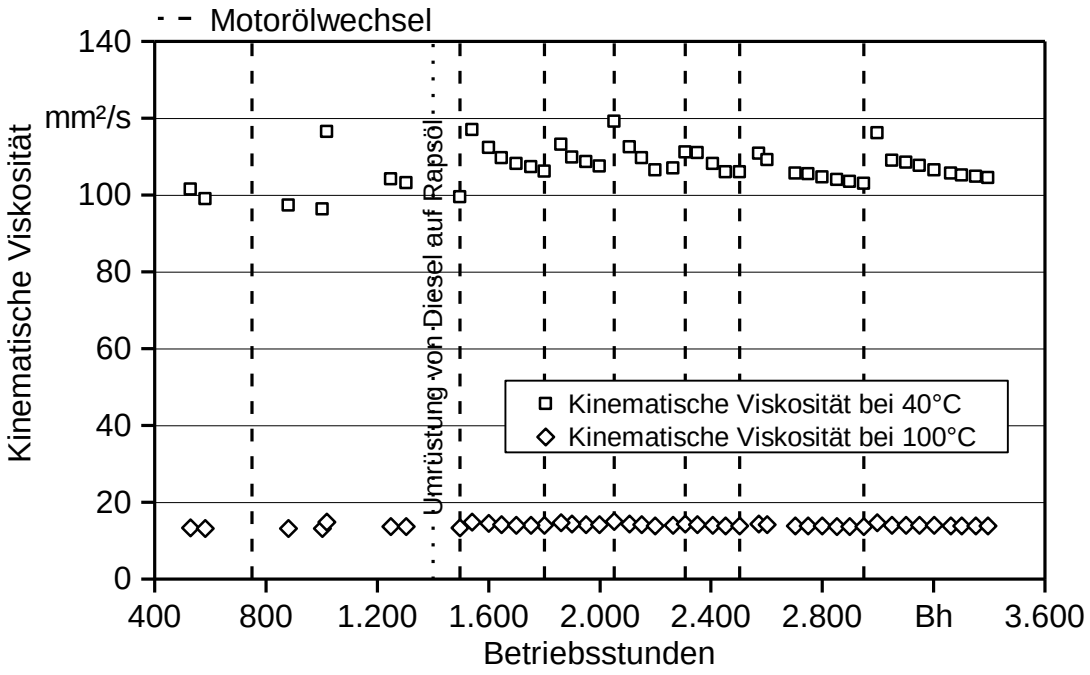
[37] THUNEKE, K.; GASSNER, T.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2009): Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell. Berichte aus dem TFZ, Nr. 17. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum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

[38] UNITED NATIONS, ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UN / ECE) (2013): Regulation No. 49 – Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression-ignition engines and positive ignition engines for use in vehicles. E/ECE/324/Rev.1/Add.48/Rev.6-−E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.48/Rev.6, 390 Seiten

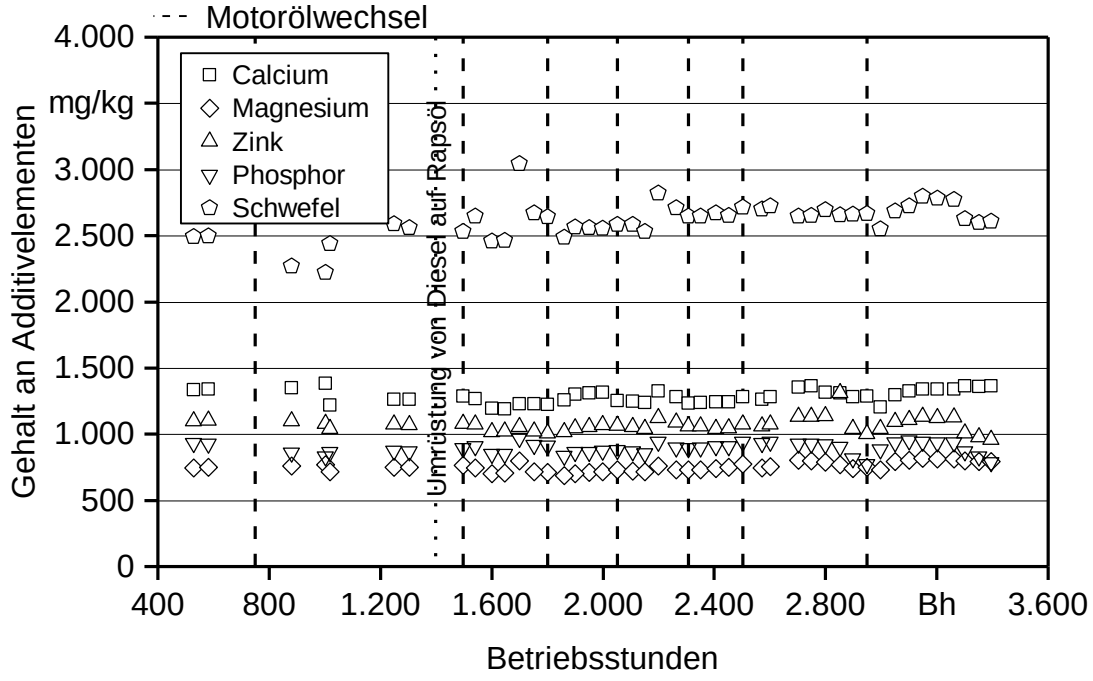
[39] UNITED NATIONS, ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UN / ECE) (2010): Global technical regulation No. 11. Engine emissions from agricultural and forestry tractors and from non-road mobile machinery (established in the Global Registry on 12 November 2009), 254 Seiten

Anhang

Anhang 1: Kinematische Viskosität des Motorenöls über die Betriebszeit des Harvesters



Anhang 2: Gehalt der Additivelemente Calcium, Magnesium, Zink, Phosphor und Schwefel im Motorenöl über die Betriebszeit des Harvesters



Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

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

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

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 Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets
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	Optimierungspotentiale bei Kaminöfen - Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
58	Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
59	Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern
60	Langzeitmonitoring 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)

ISSN 1614-1008