Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

33

Berichte aus dem TFZ

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

TFZ

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

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

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

Thomas Gassner
Dr.-Ing. Peter Emberger
Dr. Klaus Thuneke
Dr. Edgar Remmele

Berichte aus dem TFZ 33

Straubing, September 2012

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

Autoren: Thomas Gassner, Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke, Dr. Edgar Remmele
Projektleiter: Dr. Edgar Remmele
Bearbeiter: Thomas Gassner, Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke, Sebastian Kirner, Thomas Kiesslinger, Anja Rocktäschel, Sonja Plankl, Dr. Edgar Remmele

in Kooperation mit : Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
LVFZ für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
Versuchsstation Grub

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

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

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

ISSN: 1614-1008

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

Redaktion: Thomas Gassner, Peter Emberger, Dr. Klaus Thuneke
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2013
Gestaltung: Thomas Gassner, Peter Emberger, Ulrich Eidenschink

Fotonachweis: Peter Emberger (Abbildung 1, 2, 4, 5)

Vorwort

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

Bedanken möchten wir uns weiterhin beim John Deere European Technology Innovation Center, Kaiserslautern, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel und Frau Dr. Stefanie Dieringer, sowie bei Herrn Dr.-Ing. Axel Kunz von den John Deere Werken Mannheim für die großartige Zusammenarbeit und die Bereitstellung des Traktors für die Prüfstandsversuche.

Dieser TFZ-Bericht basiert im Wesentlichen auf der Masterarbeit von Herrn Thomas Gassner, die an der Hochschule Amberg-Weiden eingereicht wurde.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **7**

Abbildungsverzeichnis **9**

Tabellenverzeichnis **11**

Abkürzungsverzeichnis **13**

1 Einleitung **15**

2 Stand des Wissens **17**

2.1 Dieselmotorische Verbrennung und Schadstoffentstehung **17**

2.2 Kraftstoffeigenschaften von Pflanzenölen **18**

2.3 Stand der Technik pflanzenöltauglicher Traktoren **20**

2.3.1 Umrüstung 20
2.3.2 Seriengefertigte pflanzenöltaugliche Traktoren 21

2.4 Abgasgesetzgebung **22**

2.5 Bisherige Untersuchungen **23**

2.5.1 Rapsölkraftstoff in pflanzenöltauglichen Traktoren 23
2.5.2 Andere Pflanzenölkraftstoffe in pflanzenöltauglichen Traktoren 25
2.5.3 Erfahrungen mit Pflanzenölkraftstoffen in anderen Anwendungen 25

3 Problemstellung und Zielstellung **29**

4 Material und Methodik **31**

4.1 Traktor **31**

4.2 Prüfstand **32**

4.2.1 Aufbau 32
4.2.2 Bestimmung von Motorleistung, Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch 33
4.2.3 Bestimmung der gasförmigen Emissionen 35
4.2.4 Bestimmung der Partikelmasseemissionen 37
4.2.5 Prüfzyklus für Emissionsmessungen 37

4.3 Versuchsablauf **38**

4.4 Kraftstoffe **39**

5 Ergebnisse und Diskussion **43**

5.1 Betriebsverhalten **43**

5.1.1 Leistung, Drehmoment und Kraftstoffverbrauch bei Volllast 43
5.1.2 Wirkungsgrad bei Volllast 45

5.2 Emissionsverhalten **45**

5.2.1 Spezifische Emissionen über alle acht Prüfphasen 45
5.2.2 Emissionen während der einzelnen Prüfphasen 46
5.2.2.1 Stickstoffoxide 47

5.2.2.2 Kohlenmonoxide 48
5.2.2.3 Kohlenwasserstoffe 49
5.2.2.4 Partikelmasse 50

5.3 Einordnung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen 51

Zusammenfassung und Ausblick 53

Quellenverzeichnis 55

Anhang... 59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: John Deere 6930 Premium (pflanzenöltauglicher Prototyp) 31

Abbildung 2: Traktorenprüfstand am Technologie- und Förderzentrum 32

Abbildung 3: Schematische Übersicht zum Aufbau des Traktorenprüfstandes am Technologie- und Förderzentrum 33

Abbildung 4: Aufbau zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs mittels Wägung 35

Abbildung 5: Gasprobenahme am Abgasrohr 36

Abbildung 6: Lage der Prüfphasen im Leistungs- / Drehmomentdiagramm 38

Abbildung 7: Schematische Darstellung des Versuchsplans für die Messungen am John Deere Traktor 39

Abbildung 8: Kinematische Viskosität der verwendeten Pflanzenöle für Temperaturen von -10 °C bis +100 °C 41

Abbildung 9: Fettsäureverteilung der verwendeten Pflanzenöle 42

Abbildung 10: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung und spezifischer gravimetrischer Kraftstoffverbrauch mit Diesel, Rapsöl, Sojaöl und Sonnen-blumenöl (n = Anzahl der Messungen).....44

Abbildung 11: Mittlerer Wirkungsgrad bei Volllast an der Zapfwelle mit Diesel, Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl (n = Anzahl der Messungen).....45

Abbildung 12: Spezifische NO_x-, CO-, HC- und Partikelmasseemissionen bezogen auf die Zapfwellenleistung (n = Anzahl der Messungen) 46

Abbildung 13: Mittelwerte und Spannweiten der Leistung während der einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen) 47

Abbildung 14: Mittelwerte und Spannweiten der Stickstoffoxidemissionen in den acht einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen) 48

Abbildung 15: Mittelwerte und Spannweiten der Kohlenmonoxidemissionen in den acht einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen) 49

Abbildung 16: Mittelwerte und Spannweiten der Kohlenwasserstoffemissionen in den acht einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen) 50

Abbildung 17: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasseemissionen in den acht einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen) 51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen und Grenzwerte der DIN 51605 und DIN SPEC 51623 19

Tabelle 2: EU–Nonroad-Richtlinie 97/68/EG (geändert durch 2004/26/EG) für mobile Maschinen und Geräte – Dieselmotoren (Quelle: VDMA [35]) 23

Tabelle 3: Technische Daten des John Deere 6930 Premium Traktors 31

Tabelle 4: Technische Daten der Messgeräte zur Analyse gasförmiger Abgasbestandteile bei den Emissionsmessungen 36

Tabelle 5: Acht Prüfphasen nach EU Richtlinie 97/68/EG bzw. C1-Zyklus nach ISO 8178 38

Tabelle 6: Analysenergebnisse der Kraftstoffkennwerte der verwendeten Pflanzenöle 40

Tabelle 7: Elementarzusammensetzung (C, H, N, O) der verwendeten Kraftstoffe 42

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
Ca	Kalzium
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
CN	Cetane number
CZ	Cetanzahl
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DK	Dieselkraftstoff
ECU	Engine Control Unit
H	Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoffe
IPM	Intelligent Power Management System
k.A.	keine Angaben
KOH	Kaliumhydroxid
kW	Kilowatt
Mg	Magnesium
N_2	Stickstoff
NO_X	Stickstoffoxide
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
NRSC	Non-Road-Steady-Cycle
PM	Partikelmasse
ppm	parts per million
RK	Rapsölkraftstoff
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
Vol.-%	Volumenprozent
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert
λ	Lambda
ρ	Dichte

1 Einleitung

Um weitreichende Folgen der Klimaerwärmung abzuwenden, sind Maßnahmen, die zur Minderung des CO_2-Ausstoßes führen, möglichst umgehend zu ergreifen. Pflanzenölkraftstoff-Technologien zeichnen sich durch einen mittlerweile hohen Entwicklungsstand bei gleichzeitig sehr geringen CO_2-Vermeidungskosten aus. Die meist gekoppelte Erzeugung von Pflanzenöl und Futtermittel dient in gleichem Maße zur Verbesserung der Versorgungssicherheit sowohl mit hochwertigen Nahrungsmitteln als auch mit Energieträgern. Im Positionspapier „Biokraftstoffe - Fragen und Antworten“ werden die vielfältigen Aspekte der Biokraftstoffnutzung umfassend diskutiert [39]. Die Verwendung von Pflanzenölkraftstoff in Traktoren fördert die regionale Landwirtschaft und kann bereits heute einen wesentlichen Beitrag zum Klima-, Boden- und Gewässerschutz leisten.

Bisher wurden herkömmliche Dieselmotoren von Umrüstfirmen an den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff angepasst [18]. In den letzten Jahren wurden aber auch von Motoren- und Landmaschinenherstellern pflanzenöltaugliche Traktoren entwickelt und sind kommerziell erhältlich. Insbesondere die Firmen Same-Deutz-Fahr und AGCO (Fendt) sowie John Deere haben für die Verwendung von Rapsölkraftstoff Lösungen erarbeitet. Fendt und Deutz-Fahr integrierten in ihre Traktoren einen Deutz-Motor, der mit einem Zwei-Tank-System ausgestattet ist, und vertreiben diese seit dem Jahr 2008. Im Schwachlastbetrieb und beim Starten des Motors wird Dieselkraftstoff verwendet, ansonsten erfolgt der Betrieb mit Rapsölkraftstoff. Abweichend davon verfolgt John Deere die Realisierung einer 1-Tank-Lösung für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff. Diese Traktoren befanden sich in einem europaweiten Feldversuch zur Demonstration der Praxistauglichkeit.

Eines der wichtigsten Kriterien für einen zuverlässigen Betrieb pflanzenöltauglicher Dieselmotoren ist eine hohe Kraftstoffqualität. Das Deutsche Institut für Normung e. V. (DIN) hat im September 2010 die Norm DIN 51605 „Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren - Rapsölkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren“ veröffentlicht [8]. Diese löst die bisherige Vornorm DIN V 51605 ab. Bei der Weiterentwicklung der Vornorm zur Norm wurden die gestiegenen Anforderungen von Dieselmotoren an den Kraftstoff berücksichtigt, um der aktuellen und zukünftigen Abgasgesetzgebung genügen zu können. Normungsgegenstand der DIN 51605 ist ausschließlich Rapsöl. Zur Erweiterung der Rohstoffbasis wird aber auch die Verwendung anderer Pflanzenöle als sinnvoll erachtet. Weltweit ist Soja die zweitwichtigste Ölpflanze, Palmöl steht an erster, die Sonnenblume nach Raps an vierter Stelle [36]. Aber auch andere Pflanzenöle wie z. B. Jatropha- oder Leindotteröl werden diskutiert. In diesem Zusammenhang beschäftigt sich seit Herbst 2007 eine Arbeitsgruppe des Normungsausschusses NA 062-06-32-02 mit der Erarbeitung einer Vornorm für Pflanzenölkraftstoff, die DIN SPEC 51623 wurde im Juni 2012 veröffentlicht [11]. Rohstoffbasis ist hierbei „Öl aus ölhaltigen Pflanzenteilen“.

Hinsichtlich der Nutzung von verschiedenen Pflanzenölen als Kraftstoff, liegen derzeit vergleichsweise wenige Erfahrungen vor. Die meisten Untersuchungen existieren für Rapsöl, da dies in Mitteleuropa das bedeutendste Pflanzenöl darstellt. Die Arbeit soll daher dazu dienen, die Wissensbasis zum Einsatz verschiedener Pflanzenöle zu erweitern.

2 Stand des Wissens

2.1 Dieselmotorische Verbrennung und Schadstoffentstehung

Der Dieselmotor ist ein hochverdichtender, selbstzündender Verbrennungsmotor mit innerer Gemischbildung, d. h. der Kraftstoff wird in verdichtete und dadurch erhitzte Luft eingespritzt und entzündet sich. Anders als beim Ottomotor, welcher mit einer Quantitätsregelung arbeitet, ist beim Dieselprozess das heterogene Luft-Kraftstoff-Gemisch nicht an bestimmte Luftzahlen (λ) gebunden. Hier wird die Motorleistung lediglich über die zugeführte Kraftstoffmenge bei konstanter Luftmenge geregelt (Qualitätsregelung). Die Luftzahlen von aufgeladenen Dieselmotoren liegen bei Volllast zwischen $\lambda = 1{,}15$ und $\lambda = 2$, im Leerlauf bei $\lambda = 10$ und darüber. Der Dieselmotor arbeitet also immer mit Luftüberschuss. Diese Werte beziehen sich jedoch auf das gesamte Luft-Kraftstoff-Gemisch im Zylinder. Die für die Verbrennung und Schadstoffbildung verantwortlichen lokalen Luftzahlen im Brennraum können hiervon aufgrund ungleichmäßiger Verteilung von Luft und Kraftstoff im Zylinder stark abweichen. Die Qualität der Gemischbildung hat damit entscheidenden Einfluss auf Leistung, Kraftstoffverbrauch, Abgaszusammensetzung und Verbrennungsgeräusch und ist vor allem von Einspritzbeginn, Einspritzverlauf und –dauer, Einspritzdruck und der Anzahl der Einspritzungen abhängig [28].

Durch den zeitlich sehr kurzen Gemischbildungs- und Verbrennungsvorgang und den lokal sehr unterschiedlichen Luftzahlen entstehen bei der dieselmotorischen Verbrennung auch teilverbrannte und unverbrannte Stoffe sowie Reaktionsprodukte des Luftstickstoffs. Kohlenmonoxid (CO) entsteht durch unvollständige Verbrennung und hängt vom Luftverhältnis und von den Gemischbildungsparametern Drall und Einspritzung ab. Kohlenwasserstoffe (HC) im Abgas setzen sich aus unverbrannten Kraftstoffbestandteilen und teilweise oxidierten Produkten zusammen. Sie entstehen durch ungenügend aufbereiteten Brennstoff (Tropfengröße) und dadurch bedingtem verspäteten und unvollständigen Abbrand. Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) werden als Stickstoffoxide (NO_x) zusammengefasst. Diese bilden sich als Nebenprodukte vollständiger Verbrennung bei Luftüberschuss durch Oxidation von Stickstoff bei sehr hohen Temperaturen. Dabei kann der Stickstoff entweder aus dem Brennstoff („Brennstoff-NO“) oder aus der Luft stammen. Da Diesel- als auch Pflanzenölkraftstoff kaum Stickstoff enthalten, kommt dem Brennstoff-NO keine Bedeutung zu. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Entstehung von Stickstoffoxiden sind Temperatur und Sauerstoffgehalt am Ort der Verbrennung sowie die Verweilzeit. Partikelemissionen bestehen im Wesentlichen aus elementarem Kohlenstoff (Ruß), organischen Verbindungen aus teil- bzw. unverbrannten Kohlenwasserstoffen sowie anorganischen Verbindungen (Asche) aus dem Kraftstoff und dem Motorenöl. Dabei entsteht der Ruß durch Verbrennung bei sehr hohen Temperaturen und Luftmangel infolge inhomogener Gemischbildung [24] [2] [28].

2.2 Kraftstoffeigenschaften von Pflanzenölen

Prinzipiell erscheinen die Anforderungen von Dieselmotoren an den Kraftstoff geringer als die von Fremdzündern. Für manche Kennwerte sind weit variierende Grenzen möglich. Ein optimaler Motorbetrieb bei günstigem Kraftstoffverbrauch und gleichzeitig niedrigen Emissionen ist allerdings nur bei genauer Abstimmung von Einspritzung, Gemischbildung und Verbrennung möglich. Deswegen ist für moderne Dieselmotoren, welche der aktuellen Abgasgesetzgebung genügen, eine Definition von Kraftstoffeigenschaften mit engen Variationsgrenzen erforderlich. Wesentliche Kennwerte von Dieselkraftstoff sind Zündwilligkeit, Siedeverhalten, Schwefelgehalt, Tieftemperatur-Fließverhalten, Dichte, Viskosität, Flammpunkt, Aromatengehalt, Gehalt an Verschmutzungen, Schmierfähigkeit und oxidative Stabilität [24]. Die Qualitätsanforderungen für Dieselkraftstoff sind in der DIN EN 590 [9] festgelegt und werden laufend den sich ändernden Anforderungen moderner Dieselmotoren angepasst.

REMMELE (2002) [27] identifiziert die wesentlichen Kenngrößen zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff. Neben rohstoffspezifischen Eigenschaften wie z. B. der Zündwilligkeit oder der Viskosität, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Gemischbildung und Verbrennung im dieselmotorischen Einsatz haben, werden auch Anforderungen wie die Gesamtverschmutzung oder der Wassergehalt definiert, welche für den zuverlässigen Betrieb oder den Verschleiß am Motor bzw. dem Einspritzsystem verantwortlich sind. Diese Kennwerte sind im Allgemeinen nicht durch die Rohstoffbasis als vielmehr durch die Verarbeitungsqualität des Pflanzenöles bestimmt. Die Arbeiten zur Standardisierung mündeten letztendlich in der Norm DIN 51605 [8], welche die Anforderungen an Rapsöl zur Verwendung als Kraftstoff in pflanzenöltauglichen Dieselmotoren definiert.

Mit der Normung der Qualität von Pflanzenölen allgemein beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe des Normungsausschusses NA 062-06-32-02 [10]. Im Mai 2011 wurde ein Entwurf hierzu, die DIN SPEC 51623 „Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren - Pflanzenölkraftstoff“, veröffentlicht. Viele Anforderungen und Grenzwerte stimmen mit den Angaben in der DIN 51605 für Rapsölkraftstoff überein, bestimmte Parameter wurden neu hinzugefügt. Tabelle 1 zeigt einen Teil der aktuellen Anforderungen der DIN 51605 und der DIN SPEC 51623 mit den jeweils gültigen Grenzwerten im Vergleich.

Pflanzenöle bestehen aus einer Mischung von Esterverbindungen des dreiwertigen Alkohols Glycerin (Propantriol) mit verschiedenen daran angelagerten Fettsäuren. In der Regel sind alle drei Alkoholgruppen des Glycerins durch eine Esterbindung mit einem Fettsäurerest verbunden. Man spricht hier von Triglyceriden, deren Massenanteil im Pflanzenöl gewöhnlich bei etwa 98 % liegt [27].

Tabelle 1: Anforderungen und Grenzwerte der DIN 51605 und DIN SPEC 51623

Eigenschaft	Einheit	Grenzwert DIN 51605		Grenzwert DIN SPEC 51623	
		min.	max.	min.	max.
Dichte (15 °C)	kg/m³	910,0	925,0	900,0	930,0
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm²/s	-	36,0		
Kinematische Viskosität (50 °C)	mm²/s			-	35,0
Heizwert	MJ/kg	36,0	-	36,0	-
Jodzahl	g Jod/100 g	-	125	-	125
Gehalt an Linolensäure	Masse-%	-	-	-	12,0
Säurezahl	mg KOH/g	-	2,0	-	2,0
Flammpunkt nach Pensky-Martens	°C	101	-	101	-
Zündwilligkeit	-	40	-	40	-
Oxidationsstabilität bei 110 °C	h	6,0	-	6,0	-
Gesamtverschmutzung	mg/kg	-	24	-	24
Schwefelgehalt	mg/kg	-	10	-	10
Phosphorgehalt (bis 31.12.2011)	mg/kg	-	12	-	-
Summengehalt Ca und Mg (bis 31.12.2011)	mg/kg	-	20	-	-
Phosphorgehalt (ab 01.01.2012)	mg/kg	-	3,0	-	3,0
Calciumgehalt (ab 01.01.2012)	mg/kg	-	1,0	-	1,0
Magnesiumgehalt (ab 01.01.2012)	mg/kg	-	1,0	-	1,0
Wassergehalt	mg/kg	-	750	-	750

Die natürlich vorkommenden Fettsäuren in Pflanzenölen sind in erster Linie einbasige unverzweigte Mono-Carbonsäuren, die aus einer Carboxylgruppe und einer unterschiedlich langen Kohlenstoffkette mit einer fast ausschließlich geraden Anzahl an Kohlenstoffatomen bestehen. Am häufigsten kommen Fettsäuren mit 16 oder 18 Kohlenstoffatomen (C-Atome) vor; in Wachsen können es Ketten mit bis zu 38 Kohlenstoffatomen sein [3].

Die Kohlenstoffatome der Fettsäuren sind jeweils an das benachbarte C-Atom gebunden. Handelt es sich bei der Verbindung zwischen den C-Atomen um eine Einfachbindung spricht man von einer „gesättigten“ Bindung. Daneben können auch Doppelbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen auftreten. Eine solche Verbindung wird als „ungesättigt“ bezeichnet. Die Fettsäuren können eingeteilt werden in gesättigte Fettsäuren (keine Doppelbindung), einfach ungesättigte (eine Doppelbindung) und mehrfach ungesättigte Fettsäuren (mehrere Doppelbindungen). Die Nomenklatur der Fettsäuren folgt den allgemeinen Regeln der Chemie, wobei für die wichtigsten Fettsäuren überwiegend Trivialnamen verwendet werden. Angegeben werden üblicherweise die Anzahl der

Kohlenstoffatome sowie die Anzahl der Doppelbindungen. So steht z. B. C18:2 für die Linolsäure, die aus 18 Kohlenstoffatomen mit zwei Doppelbindungen besteht. Die Anteile der verschiedenen Fettsäuren im Fettsäurekollektiv eines Pflanzenöls bezeichnet man als dessen Fettsäuremuster. Dieses ist genetisch festgelegt und typisch für die jeweilige Ölpflanze [3].

Die Verteilung der Fettsäuregruppen auf die verschiedenen Positionen im Triglycerid sowie ihre Eigenschaften (Kettenlänge, Anzahl und Stellung von Doppelbindungen) bestimmen im Wesentlichen die chemischen und physikalischen Eigenschaften wie z. B. die Oxidationsstabilität oder das Fließverhalten bei niedrigen Temperaturen und damit auch die Verwendungsmöglichkeiten der Öle und Fette [23]. Es ist somit der Aufbau und nicht nur die Zusammensetzung nach Summenformel von großer Wichtigkeit [3].

2.3 Stand der Technik pflanzenöltauglicher Traktoren

2.3.1 Umrüstung

Pflanzenöl unterscheidet sich in wesentlichen Eigenschaften von Dieselkraftstoff. Ein zuverlässiger Einsatz als Kraftstoff in konventionellen Dieselmotoren ist darum aufgrund z. T. schlechterer Pumpfähigkeit, anderer Zerstäubungs- und Verdampfungseigenschaften, unvollständiger Verbrennung und verstärkter Rückstandsbildung nicht dauerhaft möglich. Eine Anpassung der Motorentechnik an die Anforderungen des Pflanzenöls ist erforderlich [17]. Grundsätzlich gibt es zwei technische Varianten der Umrüstung:

Mit dem „Ein-Tank-System“ oder „Ein-Kraftstoff-System“ wird der Motor in allen Betriebszuständen ausschließlich mit Pflanzenöl betrieben. Insbesondere für die kritischen Betriebsphasen (Start, Teillast, Winterbetrieb) bieten die verschiedenen Hersteller unterschiedliche Lösungen an. Dies sind beispielsweise: Kraftstoffvorwärmung, elektrische Motorvorwärmung oder beheizte Einspritzdüsen. Daneben können aber auch eine Reihe weiterer Maßnahmen, wie die Anpassung des Einspritzzeitpunkts und Einspritzdrucks oder eine Änderung der Einspritzdüsen bzw. des Einspritzwinkels erforderlich sein. Das Umrüsten auf ein Ein-Tank-System kostet je nach Motor und Umrüstkonzept meist zwischen ca. 3000 und 7000 Euro [21] [17].

Beim "Zwei-Tank-System" oder „Zwei-Kraftstoff-System“ befindet sich im Haupttank Rapsölkraftstoff, in dem (meist kleineren) Zusatztank Dieselkraftstoff. Der Kraftstoff im Zusatztank wird nur für den Startvorgang und die Warmlaufphase bzw. für ungünstige Betriebszustände (Teillast) benötigt. Nach Erreichen der Betriebstemperatur wird entweder manuell oder automatisch auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff aus dem Haupttank umgestellt. Bei Schwachlastbetrieb und vor dem Abstellen des Motors erfolgt der Betrieb wieder mit Dieselkraftstoff, wodurch das Kraftstoffsystem gespült wird und für den nächsten Startvorgang bereit ist. Die Umschaltung erfolgt auch hier je nach Ausführung manuell oder automatisch. Eine Zwei-Tank-System Lösung ist in der Regel kostengünstiger als ein Ein-Tank-System [21] [17].

Bei allen Umrüstkonzepten ist auch weiterhin ein Betrieb mit Dieselkraftstoff möglich.

2.3.2 Seriengefertigte pflanzenöltaugliche Traktoren

Im Rahmen eines von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. geförderten Projektes arbeiteten die Firmen John Deere und VWP an der Entwicklung eines neuen Serienmotors für Rapsölkraftstoff. Die Firma Deutz entwickelte zusammen mit den Traktorenherstellern Same Deutz-Fahr Deutschland GmbH und AGCO GmbH (Fendt) einen pflanzenöltauglichen Motor, der erstmals 2007 auf der Messe für Landtechnik „Agritechnica“ in Hannover vorgestellt wurde.

DEUTZ Natural Fuel Engine® [12]

Der Deutz Natural Fuel Engine® ist eine Weiterentwicklung der Deutz Motorbaureihen TCD 2012 und TCD 2013 mit Deutz Common-Rail® für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff durch den Motorhersteller. Diese Motoren sind von der Deutz AG für den Einsatz von 100 % Rapsölkraftstoff nach DIN V 51605 und 100 % FAME (Biodiesel) nach DIN EN 14214 freigegeben und besitzen die volle Herstellergarantie und Gewährleistung.

Das DEUTZ Fuel Management® ist voll in das Motormanagement integriert mit kennfeldgesteuerter Kraftstoffregelung. Es handelt sich dabei um ein elektronisch gesteuertes Zwei-Tank-System mit automatischer Umschaltung von Diesel- auf Rapsölbetrieb. Der Motorstart und der Niedriglastbetrieb erfolgt mit Dieselkraftstoff. Über die CAN-Bus-Verbindung erkennt das System den Betriebszustand des Motors und stellt den dafür vorgesehenen Kraftstoff bereit. Das System gewährleistet kurze Spülzeiten ohne Vermischung der Kraftstoffe im Dieseltank. Die Rapsöltemperatur wird durch einen Wärmetauscher auf ca. 60 bis 65 °C eingeregelt. Bei jedem Startvorgang und Filterwechsel erfolgt eine automatische Entlüftung.

Deutz-Fahr Natural Power [29]

Der Agrotron Natural Power von Same Deutz-Fahr basiert auf der Agrotron M Baureihe (131 bis 184 PS) und verfügt über das patentierte DEUTZ Fuel Management®, bestehend aus einer in die Motorregelung integrierten Kraftstoffregelung und einem Zwei-Tank-System. Der Traktor ist für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff nach DIN V 51605 freigegeben, mit dem laut Herstellerangaben auch die Grenzwerte der Stufe III A eingehalten werden.

Der Agrotron Natural Power besitzt zwei Kraftstofftanks für Diesel- und Rapsölkraftstoff, wobei im größeren Haupttank der Rapsölkraftstoff bevorratet wird. Beim Kaltstart, im Kurzstreckenbetrieb und bei längeren Stillstandszeiten wird auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff verzichtet und herkömmlicher Dieselkraftstoff aus dem Zusatztank eingesetzt. Um der Auswirkungen des Rapsölkraftstoffes auf die Leistungscharakteristik des Motors Rechnung zu tragen, wurde das Einspritzsystem neu angepasst.

Fendt 820 Vario Greentec [1]

Die Homologation des 820 Vario Greentec erfolgt auf Grundlage der Kennwerte im Dieselbetrieb. Im Rapsölbetrieb kann sich die Leistung je nach Betriebspunkt um bis zu 10 % reduzieren. Auf Grund der geringeren Energiedichte des Rapsöls erhöht sich der Kraftstoffverbrauch gegenüber Diesel um 4 bis 5 %. Das Tankverhältnis mit einem 340 Liter Rapsöltank und einem 100 Liter Dieseltank ist auf eine mittlere bis hohe Auslastung abgestimmt. Bei überwiegend niedriger Traktorauslastung muss entsprechend häufiger Diesel nachgetankt werden.

Der Fahrzeugstart erfolgt grundsätzlich mit Diesel, über den Motorkühlwasserkreislauf wird das Rapsöl aufgeheizt. Während des Fahrzeugbetriebs schaltet die Steuerung automatisch von Diesel- auf Rapsölbetrieb, wenn die Rapsöltemperatur länger als 10 s mehr als 62 °C erreicht und das Motordrehmoment für mehr als 10 s mindestens 250 Nm beträgt sowie das System auf Rapsölbetrieb (Automatikbetrieb) steht. Die Steuerung schaltet automatisch zurück auf Dieselbetrieb, wenn die Temperatur des Rapsöls für mehr als 40 s auf unter 62 °C fällt und das Motordrehmoment 250 Nm für mehr als 40 s unterschreitet oder das System manuell auf Dieselbetrieb geschaltet wird. Vor dem Abstellen des Motors muss manuell auf Dieselbetrieb geschaltet werden. Wenn dies nicht geschieht ertönt ein Warnsignal und es wird ein Fehlercode im Fehlerspeicher abgelegt. Solange der Motor noch auf Betriebstemperatur ist, kann problemlos neu gestartet und das Spülen mit Dieselkraftstoff durchgeführt werden.

Pflanzenöltraktor von John Deere [20]

Derzeit befindet sich ein pflanzenöltauglicher Traktor der John Deere Werke Mannheim im Feldtest. Gemeinsam mit den ehemaligen Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP) und der Universität Rostock wurde an einer Ein-Tank-System-Lösung unter Berücksichtigung der aktuellen Abgasvorschriften gearbeitet. Maßnahmen zur Anpassung für den Einsatz von Rapsölkraftstoff betreffen unter anderem das Brennverfahren, die Einspritztechnologie und den Kraftstoffkreislauf. Neben konstruktiven Änderungen werden auch Eingriffe in die Motorsteuerung vorgenommen.

2.4 Abgasgesetzgebung

Der Hauptantrieb für die weitere Entwicklung der Motortechnologie für landwirtschaftliche Maschinen ist die Fortschreibung der Abgasgesetzgebung. Für landwirtschaftliche Traktoren gilt die Richtlinie 2000/25/EG [16]. Das darin vorgeschriebene Prüfverfahren beruht auf der internationalen Prüfnorm ISO 8178-4 [7]. Die Grenzwerte sind analog zur Richtlinie 97/68/EG, zuletzt geändert durch Richtlinie 2010/26/EU [15]. In Tabelle 2 sind die Grenzwerte für die limitierten Emissionskomponenten je nach Motorleistung mit dem Jahr des Inkrafttretens dargestellt. Um die Anforderungen hinsichtlich der Partikel-Emissionen ab Stufe III B und der NO_x-Emissonen ab Stufe IV zu erfüllen, sind die Fortentwicklung des Motorsystems sowie nach heutigem Wissen der Einsatz von Abgas-

nachbehandlungstechnologien, wie Partikelfilter oder Entstickungs- und Oxidationskatalysatoren erforderlich [5].

Tabelle 2: EU–Nonroad-Richtlinie 97/68/EG (geändert durch 2004/26/EG) für mobile Maschinen und Geräte – Dieselmotoren (Quelle: VDMA [35])

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

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

2.5 Bisherige Untersuchungen

2.5.1 Rapsölkraftstoff in pflanzenöltauglichen Traktoren

In den letzten Jahren konnten vermehrt Erfahrungen mit umgerüsteten rapsölkraftstofftauglichen Traktoren gemacht werden. Beim „100-Traktoren Demonstrationsvorhaben“ [19] sollten mehr als 100 Traktoren mit speziell angepassten Motoren unter Beweis stellen, dass sie auch beim Einsatz von Rapsölkraftstoff allen Belangen der landwirt-

schaftlichen Praxis gerecht würden. In dem vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMVEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projekt wurden Traktoren verschiedener Hersteller und Serien von Umrüstwerkstätten auf Pflanzenöltechnologie umgerüstet und ausschließlich mit diesem Biokraftstoff betrieben. Die Ergebnisse von Leistungs- und Emissionsmessungen bei Vollast und Leerlauf zeigen, dass die meisten Traktoren im Rapsölbetrieb mehr als 90 % der für den Dieselbetrieb angegebenen Motornennleistung erreichen. Die CO- und NO_x-Emissionen mit Rapsölkraftstoff am Nulllast- und Volllastpunkt weichen nur unerheblich von denen im Dieselbetrieb vor der Umrüstung ab.

Mit dem Projekt „Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft“, dem sogenannten „35-Traktoren-Programm“, welches in Österreich von Oktober 2003 bis Mai 2008 durchgeführt wurde, sollte die Praxistauglichkeit von Pflanzenöltraktoren in einem Flottenversuch mit 35 Traktoren festgestellt werden. Hierzu wurde die Flotte über die gesamte Kette der Pflanzenölnutzung über drei Jahre wissenschaftlich betreut und dokumentiert. Die Flotte bestand aus Traktoren und Aggregaten verschiedener Hersteller, welche unterschiedlichen Abgasstufen genügten und wiederum von verschiedenen Umrüstfirmen für den Betrieb mit Pflanzenöl angepasst wurden. Die Ergebnisse werden ausführlich von RATHBAUER et al. (2008) [26] beschrieben. Zu Versuchsbeginn und am Ende wurden Leistungs- und Emissionsmessungen nach ISO 8178 durchgeführt. Die Leistungsmessungen zeigten ein indifferentes Bild mit teils sehr großen Schwankungsbandbreiten. Die meisten der untersuchten Traktoren wiesen am Versuchsende eine geringere Leistung auf als zu Beginn der Untersuchungen. Bei den Emissionen im Rapsölbetrieb konnte bei den CO-Werten im Mittel eine Verringerung von 11 % zu Beginn der Untersuchungen bzw. von 4 % am Ende des Versuchszeitraumes gegenüber dem Dieselbetrieb festgestellt werden. Die NO_x-Emissionen waren zu Beginn um 14 %, am Ende 11 % höher als im Dieselbetrieb. Bei den HC-Emissionen im Rapsölbetrieb wurde im Mittel eine Abnahme um 55 % festgestellt. Die am Ende des Versuchszeitraumes durchgeführte Messung der Partikelemissionen ergab im Mittel eine Verringerung von 33 % gegenüber dem Dieselbetrieb.

In dem vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Forschungsvorhaben „Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell“ [34] wurden zwei rapsölbetriebene Traktoren mit Deutz Pumpe-Leitung-Düse-Motoren (Abgasstufe I bzw. II) über zwei Jahre im Praxisbetrieb untersucht. Neben der kontinuierlichen Erfassung wichtiger Betriebsparameter der Maschinen mittels eines Datenaufzeichnungsgerätes, der regelmäßigen Überwachung der Kraftstoff- und der Motorenölqualität und Dokumentation von Wartungs- und Reparaturarbeiten wurden auch wiederkehrende Messungen von Leistung und Kraftstoffverbrauch sowie der limitierten Abgaskomponenten in Anlehnung an die Richtlinie 200/25/EG durchgeführt. THUNEKE et al. [34] berichten von bis zu 10 % Mehrleistung der Traktoren im Rapsölbetrieb bei gleichzeitig ebenfalls 10 % höherem spezifischen Kraftstoffverbrauch. Bei den vier bzw. fünf Emissionsmessungen im Versuchszeitraum zeigte sich für Werte von CO, HC und der Partikelmasse, betrachtet als gewichtete Emissionen über den gesamten Zyklus,

eine meist problemlose Einhaltung der entsprechenden Abgasnorm. Auch eine Verschlechterung des Emissionsverhaltens über den Versuchszeitraum konnte nicht festgestellt werden. Bei den Komponenten HC und Partikelmasse zeigten sich deutliche Vorteile beim Betrieb mit Rapsöl- im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Die Konzentrationen von CO im Abgas waren bei beiden Kraftstoffen in etwa gleich hoch. Die NO_x-Emissionen waren beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff um bis zu 10 % höher als mit Dieselkraftstoff. Bei der Betrachtung der einzelnen Prüfphasen zeigte sich, dass im Leerlauf- und Schwachlastbetrieb die Verwendung von Rapsölkraftstoff zu höheren Partikelmasse- und CO-Emissionen geführt hat als mit Dieselkraftstoff. In allen anderen Betriebspunkten verhielt es sich umgekehrt. Die NO_x-Emissionen waren mit Rapsölkraftstoff über alle Betriebsphasen hinweg durchweg höher, die HC-Emissionen dagegen deutlich niedriger als mit Dieselkraftstoff.

2.5.2 Andere Pflanzenölkraftstoffe in pflanzenöltauglichen Traktoren

DIERINGER und PICKEL (2010) [13] untersuchten einen John Deere PowerTech™ Plus Motor im Prüfstandsbetrieb entsprechend 97/68/EG mit Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff, Leindotteröl, Sonnenblumenöl und Jatrophaöl. Die Leistung im Pflanzenölbetrieb war im Mittel um 15 % niedriger als mit Diesel, was auf die niedrigeren Heizwerte der Pflanzenöle im Vergleich zu Dieselkraftstoff bei gleichzeitiger Verwendung derselben ECU-Konfiguration für alle Varianten zurückgeführt wurde. Bei der Betrachtung der Emissionen ohne Abgasnachbehandlung konnte mit allen verwendeten Kraftstoffen die Abgasstufe III A eingehalten werden. Als Referenz diente die Versuchsvariante mit Dieselkraftstoff. Die CO-Emissionen waren im Pflanzenölbetrieb im Mittel um etwa 20 %, die NO_x-Emissionen um 7 % höher als im Dieselbetrieb. Die Partikelmasseemissionen verringerten sich im Mittel um ca. 60 %, die der Kohlenwasserstoffe um 40 % gegenüber der Dieselvariante.

SCHÜMANN et al. (2009) [31] untersuchten das Einsatzverhalten von Mischungen aus Leindotter- und Rapsöl an einem Traktor. Dabei trat an den Injektoren eine verstärkte Kokstrompetenbildung auf. Ansonsten zeigte der Traktor ein gleiches Betriebsverhalten wie beim Einsatz von Rapsölkraftstoff. Bei den ebenfalls am Traktor durchgeführten Emissionsmessungen konnten keine Unterschiede der Pflanzenölmischung im Vergleich zu Rapsöl festgestellt werden.

2.5.3 Erfahrungen mit Pflanzenölkraftstoffen in anderen Anwendungen

DOBIASCH (2000) [14] untersuchte das Emissionsverhalten eines Prüfstands-Blockheizkraftwerkes mit einem 3-Zylinder-Wirbelkammermotor von Kubota im Betrieb mit 38 verschiedenen Pflanzenöl-, Fettsäuremethylester-, Diesel- und synthetischen Kraftstoffen bei etwa 50 % der Aggregatsnennleistung. Der Einsatz der verschiedenen Pflanzenöle führte zu einer Minderung der CO-, Gesamt-C- und der Partikelemissionen sowie einem leichten Anstieg der NO_x-Emissionen. Bei Pflanzenölen mit vermehrt kurzkettigen Fettsäuren kommt es zu einer Minderung der NO_x-, CO- und Gesamt-C-

Emissionen, diese steigen jedoch an, je höher der Gehalt an ungesättigten Fettsäuren im Pflanzenölkraftstoff ist.

Die Eignung verschiedener Pflanzenöle als Kraftstoff in pflanzenöltauglichen BHKW wurde von MEIERHOFER (2006) [22] untersucht. Ein BHKW mit einem 3-Zylinder Wirbelkammermotor von Kubota wurde mit Soja-, Sonnenblumen- und Palmöl betrieben. Im Volllastbetrieb waren die CO-Emissionen mit Palmöl um etwa 20 % höher als bei Soja- und Sonnenblumenöl, bei Teillast mit Sonnenblumenöl etwa 20 % niedriger als mit Soja- bzw. Palmöl. Die Konzentrationen für NO_x bewegten sich für alle drei Öle auf gleichem Niveau und waren im Teillastbetrieb um etwa 20 – 50 % höher als bei Volllast. Gleiches gilt für die Kohlenwasserstoffemissionen, welche im Palmölbetrieb im Vergleich zum Soja- bzw. Sonnenblumenöl etwa 30 % niedriger waren. Die Partikelmasseemissionen fielen im Teillastbetrieb mit Palmöl am niedrigsten aus. Die Werte für Sonnenblumen- und Sojaöl waren hier um etwa 10 % bzw. 25 % höher. Im Volllastbetrieb stiegen die Partikelmasseemissionen um 30 % bis 50 % an.

Weitere Untersuchungen führten MUNACK et al. (2010) [105] an einem direkteinspritzenden LKW Motor (Mercedes-Benz OM 906 LA, 205 kW Nennleistung) der Abgasstufe EURO III mit Pumpe-Leitung-Düse Einspritzsystem durch. Als Prüfzyklus kam der 13-Stufen-Test nach Richtlinie 2005/55/EG zur Anwendung und die Ergebnisse wurden als gewichtete Zykluswerte angegeben. Insgesamt wurden drei Testreihen in einem Zeitraum von zwei Jahren durchgeführt. Als Versuchskraftstoffe dienten Kokosnussöl, Palmöl, Rapsöl, Sojaöl, Leinöl und Dieselkraftstoff. Angaben zu bestimmten Anpassungen des Motors beziehungsweise des Kraftstoffsystems an den Betrieb mit den Pflanzenölen sind für diese Messreihen der Veröffentlichung nicht zu entnehmen. Hinsichtlich der Emissionen von NO_X, CO, HC und PM zeigten die Pflanzenöle unterschiedliche Tendenzen. Mit steigender Anzahl an Doppelbindungen wurde ein Anstieg der NO_X-Emissionen festgestellt. Bei den PM Emissionen wurde die Einschätzung durch relativ große Standardabweichungen erschwert, eine eindeutige Aussage konnte nicht getroffen werden. Bei den CO-Emissionen im Betrieb mit Pflanzenölen wurden die geringsten Werte für Kokosnussöl und Palmöl ermittelt. Bezüglich der HC-Emissionen wurden ebenfalls die geringsten Werte für Kokosnussöl ermittelt. Mit Ausnahme von Kokosnussöl waren die HC-Emissionen für alle anderen untersuchten Pflanzenöle höher als mit Dieselkraftstoff.

Weitere Untersuchungen zum Einsatz von Pflanzenölen in BHKW bzw. Stationärmotoren wurden von SPESSERT et al. (2004) [32] und BOUCHÉ et al. (1997) [4] durchgeführt. THUNEKE (2007) [33] erarbeitete eine Übersicht von aktuellen Forschungsergebnissen zur Verbrennung und zu Emissionen von Pflanzenölen in Dieselmotoren.

Fazit

Es bestehen bereits umfangreiche Erfahrungen zum Betriebs- und Emissionsverhalten von pflanzenöltauglichen Motoren. Bisherige Untersuchungen mit pflanzenöltauglichen Traktoren wurden fast ausschließlich mit Rapsölkraftstoff durchgeführt. Es liegen vereinzelte Untersuchungen zum Einsatz anderer Pflanzenöle in Traktormotoren am Prüfstand vor. Eingehende Erfahrungen bei der Verwendung von anderen Pflanzenölen als Kraftstoff in Traktoren gibt es nicht. Meist ist die Leistung pflanzenöltauglicher Motoren je nach Umrüst- bzw. Motorkonzept auf gleichem Niveau wie im Dieselbetrieb. Das Emissionsverhalten von Pflanzenölen ist mit Ausnahme vom Schwachlastbetrieb meist günstiger als im Vergleich zu Dieselkraftstoff, lediglich die NO_x-Konzentrationen im Abgas sind oft erhöht. Weiterhin gibt es Anhaltspunkte, dass bei der Verwendung von Pflanzenöl als Kraftstoff die Kettenlänge der Fettsäuren und deren Sättigung Einfluss auf das Emissionsverhalten haben.

3 Problemstellung und Zielstellung

Raps ist die bedeutendste Ölpflanze in Deutschland [37]. Bei der Entwicklung von Pflanzenöltechnologien kam die letzten Jahrzehnte meist Rapsöl zur Verwendung. Zur Erweiterung der Rohstoffbasis und bei der Einführung von Pflanzenöltechnologien in anderen Ländern und Kontinenten wird auch die Verwendung anderer Pflanzenöle in Erwägung gezogen. Vor allem Soja als zweitwichtigste Ölpflanze weltweit und die Sonnenblume, welche weltweit an vierter Stelle steht [36], scheinen hier Alternativen darzustellen. Allerdings ist Rapsöl der einzige Pflanzenölkraftstoff, für den bereits seit längerem ein Qualitätsstandard existiert. Für andere Pflanzenöle wurde kürzlich eine Vornorm verabschiedet, die DIN SPEC 51623 [11], jedoch mit dem Vermerk, dass Felderfahrungen für den langfristigen und störungsfreien Betrieb noch nicht ausreichend vorhanden sind. Weiterhin liegen nur wenige Betriebserfahrungen mit modernen pflanzenöltauglichen Motoren, welche mit anderen Pflanzenölen betrieben werden, vor.

Vor allem Traktoren scheinen für den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff interessant, da so Landwirte die Möglichkeit der eigenen Kraftstoffproduktion erhalten, welche die regionale Wertschöpfung steigert und die gleichzeitige Nutzung von Koppelprodukten aus der Ölproduktion als Futtermittel ermöglicht.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, den Einfluss von verschiedenen Pflanzenölen auf das Leistungs- und Emissionsverhalten von modernen pflanzenöltauglichen Traktoren zu untersuchen. Dazu sollen am Abgasprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) Messungen an einem pflanzenöltauglichen Traktor im Betrieb mit Sojaöl und Sonnenblumenöl durchgeführt werden. Das Emissionsverhalten an verschiedenen Last- und Drehzahlpunkten soll anhand der gesetzlich limitierten Abgasbestandteile CO, HC, NO_x und Partikelmasse im Vergleich zum Betrieb mit Dieselkraftstoff bzw. Rapsölkraftstoff untersucht werden. Auch das Betriebsverhalten soll anhand von Leistung, Drehmoment und Kraftstoffverbrauch aufgezeigt werden. Die Arbeit soll dazu beitragen, Erkenntnisse über die prinzipielle Eignung von anderen Pflanzenölen als Kraftstoff in Traktoren und die eventuelle Notwendigkeit der spezifischen Anpassung der Motoren an den jeweiligen Kraftstoff, z. B. durch Veränderung des Motorkennfeldes, zu gewinnen.

4 Material und Methodik

4.1 Traktor

Bei dem Versuchsträger handelt es sich um einen herstellerseitig auf Rapsölkraftstoff angepassten Prototypen von John Deere der Serie 6930 Premium, der in Abbildung 1 zu sehen ist. Der Traktor verfügt über ein Common-Rail-Einspritzsystem mit einer gekühlten, externen Abgasrückführung zur innermotorischen Verringerung der Stickoxidentstehung. Zudem verfügt der Traktor über ein sogenanntes Intelligent Power Management System (IPM), welches die Möglichkeit bietet, bei hohen Lastanforderungen zusätzliche 11 kW Leistung zur Verfügung zu stellen. Das IPM bleibt bei den Messungen jedoch deaktiviert. Der PowerTech-Plus-Motor erfüllt die Anforderungen der Abgasstufe III A. Die technischen Daten des Traktors sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Technische Daten des John Deere 6930 Premium Traktors

Traktortyp	John Deere 6930 Premium
Motortyp	PowerTech PLUS
Anzahl der Zylinder / Hubraum in ccm	6 / 6788
Nennleistung in kW / PS (Dieselbetrieb)[1)]	134 / 182
Nennleistung in kW / PS (Dieselbetrieb)[2)]	123 / 167
Einspritzsystem	Common-Rail-Hochdruckeinspritzung
Baujahr	2008
Abgasstufe	III A
Getriebe	Lastschaltgetriebe

[1)] mit Intelligent Power Management
[2)] ohne Intelligent Power Management

Abbildung 1: John Deere 6930 Premium (pflanzenöltauglicher Prototyp)

4.2 Prüfstand

Die Messungen zur Bestimmung des Betriebs- und Emissionsverhaltens des Traktors werden am Traktorenprüfstand des TFZ durchgeführt. Der Prüfstand ist konzipiert für die Messung von gasförmigen Abgaskomponenten, Partikelemissionen, Leistung und Kraftstoffverbrauch von Traktormotoren im eingebauten Zustand (Abbildung 2). Die Messungen erfolgen in Anlehnung an die Richtlinien 2000/25/EG bzw. 97/68/EG.

Abbildung 2: Traktorenprüfstand am Technologie- und Förderzentrum

4.2.1 Aufbau

In Abbildung 3 ist der Aufbau des Abgasemissionsprüfstands am Technologie- und Förderzentrum schematisch dargestellt. Im Wesentlichen besteht der Prüfstand aus einer Abgasmessstrecke mit Verdünnungstunnel zur Bestimmung der gasförmigen Emissionen und der Partikelemissionen aus dem Traktorenabgas sowie einer Zapfwellenbremse zur Bestimmung des Drehmoments an der Zapfwelle und der Drehzahl. Außerdem werden alle zur Dokumentation notwendigen und für Gültigkeitsprüfungen und Umrechnungen erforderlichen Randbedingungen und Betriebszustände (Temperaturen, Drücke usw.) während den Emissionsmessungen kontinuierlich erfasst und mit Hilfe eines Datenerfassungssystems (LabVIEW^{TM}) sekündlich aufgezeichnet.

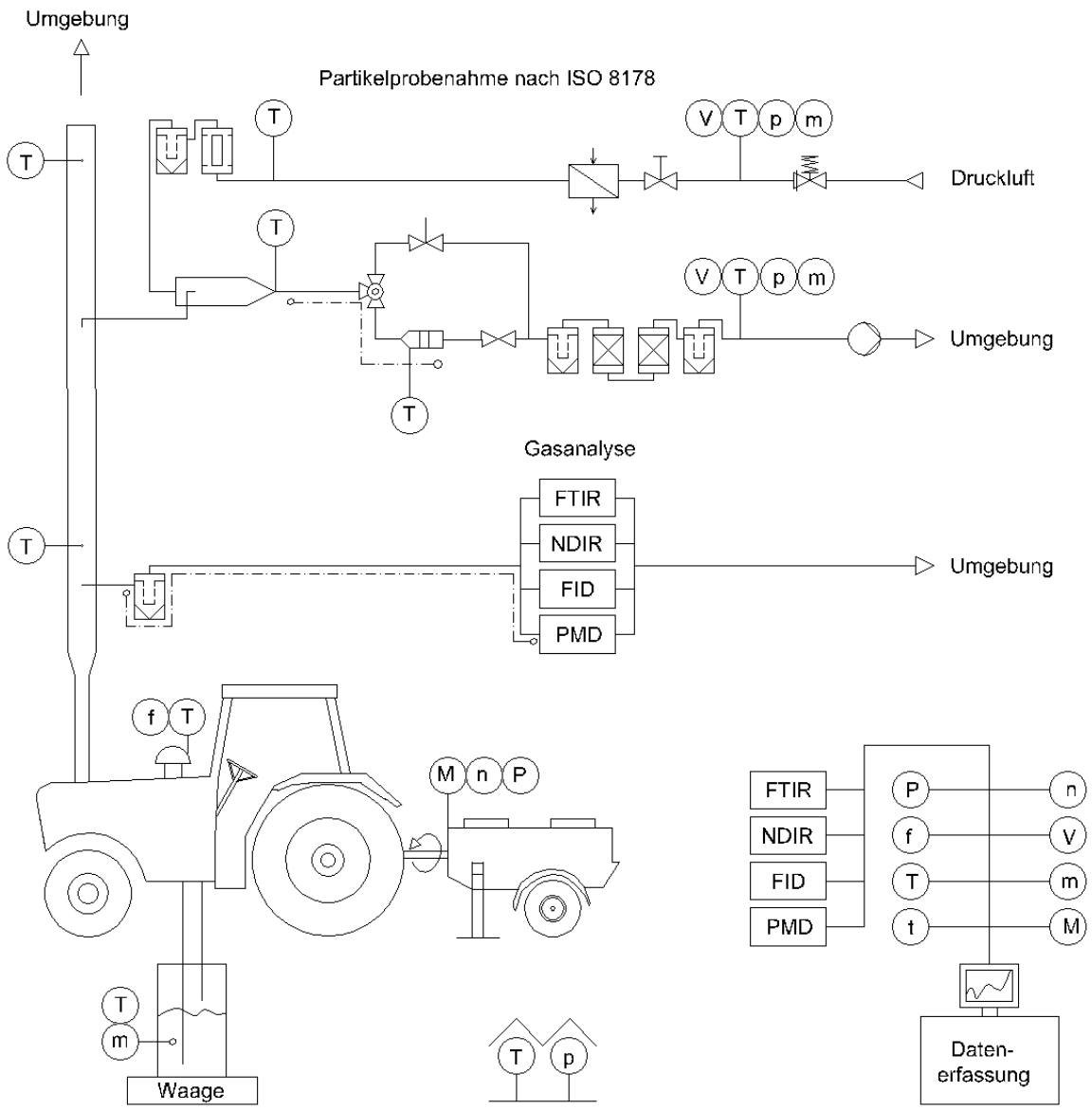

Abbildung 3: Schematische Übersicht zum Aufbau des Traktorenprüfstandes am Technologie- und Förderzentrum

4.2.2 Bestimmung von Motorleistung, Motordrehzahl und Kraftstoffverbrauch

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

Da diese Arbeit Teil eines Vorhabens ist, bei dem vor allem die Abgasemissionen von Traktoren, welche in der Praxis in Betrieb sind, getestet werden sollen, ist eine Bestimmung der Motorleistung im ausgebauten Zustand nicht praktikabel und auch nicht beabsichtigt. Daher sind Abweichungen zum Typprüfungsverfahren erforderlich. Am Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums wird die Zapfwellenleistung nach OECD Code 2 bestimmt. Nach dieser Richtlinie soll keine Korrektur der Zapfwellenleistung hinsichtlich Atmosphärendruck und Umgebungstemperatur vorgenommen werden.

Auch nach Richtlinie 2000/25/EG bzw. ISO 8178 ist die unkorrigierte Motorenleistung bei der Auswertung der Ergebnisse heranzuziehen, jedoch werden Bedingungen für die Gültigkeit der Prüfung gestellt. Nach ISO 8178 wird der Faktor f_a zur Überprüfung der Gültigkeit der Umgebungsbedingungen definiert:

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

p_s atmosphärischer Druck in kPa

T_a Umgebungstemperatur in K

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

Mit einer luftgekühlten Wirbelstrombremse (EGGERS PT 301 MES, max. 340 kW, Auflösung 0,1 kW), welche über eine Gelenkwelle mit der Heckzapfwelle des Traktors verbunden ist, werden die Zapfwellendrehzahl und das Zapfwellendrehmoment gemessen und daraus die Zapfwellenleistung berechnet. Mit dem Verhältnis von Motorendrehzahl zu Zapfwellendrehzahl können so die Motorendrehzahl, das äquivalente Motordrehmoment sowie die Motorleistung berechnet werden.

Die Kraftstoffversorgung des Prüflings erfolgt über einen Versuchskraftstoffbehälter. Dazu wird am Traktor das Kraftstoffsystem direkt am Tank aufgetrennt und Kraftstoffvorlauf- und Kraftstoffrücklaufschlauch zur Vermeidung von Kraftnebenschlüssen derart in den Versuchskraftstoffbehälter geführt, dass diese den Behälter nicht berühren. Die Masse des Versuchskraftstoffbehälters wird mittels einer Waage (Mettler-Toledo-Tischwaage KB60.2, max. 60 kg, Ablesbarkeit 1 g) kontinuierlich erfasst und so der Kraftstoffverbrauch bestimmt. Abbildung 4 zeigt den Aufbau zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs.

Abbildung 4: Aufbau zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs mittels Wägung

4.2.3 Bestimmung der gasförmigen Emissionen

Die Bestimmung der gasförmigen Bestandteile im Abgas wird mit unterschiedlichen Messverfahren und -geräten durchgeführt. Tabelle 4 zeigt die verwendeten Messprinzipien der Gasanalysegeräte und deren spezifische technische Daten im Überblick. Bei den Abgasemissionsmessungen werden die gasförmigen Komponenten Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), Sauerstoff (O_2) und Kohlenwasserstoffe (HC) erfasst.

Die Probenahme erfolgt direkt am Abgasrohr des Traktors (Abbildung 5) etwa 1 m nach dem Schalldämpfer mittels einer beheizten Probenahmesonde (M&C Typ SP4000). Über eine beheizte Probenahmeleitung gelangt das Abgas zum Analysengerät.

Tabelle 4: Technische Daten der Messgeräte zur Analyse gasförmiger Abgasbestandteile bei den Emissionsmessungen

Messgröße	Messgerät / Hersteller	Messprinzip / Verfahren	aktiver Messbereich	Prüfgaskonzentration[1)]
CO_2	BINOS 1004 Fa. Fisher-Rosemount	Nah-Infrarotspektroskopie (NDIR)	0 – 20 Vol.-%	12 % CO_2 in N_2
CO	BINOS 1001 Fa. Fisher-Rosemount	Nah-Infrarotspektroskopie (NDIR)	0 – 500 ppm	450 ppm CO in N_2
NO_X[2)]	Modell 951 A Fa. Beckmann Industrial	Chemolumineszenz	0 – 1000 ppm	900 ppm NO in N_2
O_2	Oxynos 100 Fa. Fisher-Rosemount	Paramagnetismus	0 – 21 Vol.-%	20,9 % Luft-O_2
HC[3)]	FID 3-100 Fa. J.U.M. Engineering	Flammenionisation	0 – 100 ppm C_3H_8-Äquivalent	80,7 ppm C_3H_8 in N_2

[1)] relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 1 % (lt. Herstellerangaben)
[2)] $NO_x = NO + NO_2$
[3)] Summe der flüchtigen, organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas

Abbildung 5: Gasprobenahme am Abgasrohr

4.2.4 Bestimmung der Partikelmasseemissionen

Am Prüfstand werden die Partikelmasseemissionen diskontinuierlich nach den Vorgaben der Richtlinie 97/68/EG bzw. ISO 8178 im verdünnten Abgas erfasst. Hierbei wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasstrom entnommen und über ein Übertragungsrohr in einen Verdünnungstunnel geleitet. Durch die Zufuhr von Verdünnungsluft wird eine Mischtemperatur von 42 °C bis 52 °C eingestellt. Die aus der hauseigenen Druckluftversorgung entnommene Verdünnungsluft erfüllt die Druckluftklasse 1.4.1 nach ISO 8573. Ein Massendurchflussregler (Bürkert 8711, Messgenauigkeit ± 1 %) misst und regelt die zugeführte Verdünnungsluftmasse. Zur Vorkonditionierung der Verdünnungsluft auf Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C wird diese über einen mittels eines Kryostaten temperierten Wärmetauscher geführt. Unmittelbar vor der Einleitung in die Verdünnungsstrecke wird die zugeführte Luft über einen Aktivkohlefilter (Riegler, FA 33 K) und einen Mikrofilter (Riegler, FM 33 K, Borosilikat-POM, Filterfeinheit 0,01 µm, Wirkungsgrad 99,999 %) geleitet, um einen Eintrag von Partikeln und Kohlenwasserstoffen in das Verdünnungssystem auszuschließen.

Das verdünnte Abgas gelangt über eine auf 47 °C beheizte Leitung zu einem ebenfalls beheizten Filtergehäuse. Die Partikelprobenahme erfolgt durch ein im Abstand von 17 mm hintereinander angeordnetes Filterpaar (Hauptfilter und Nachfilter). Zur Abscheidung dienen teflonbeschichtete Glasfaserfilter (Pall Life Sciences, Emfab™ Filters, TX40HI20WW, 44 mm Durchmesser) mit einem Abscheidegrad von 99,9 % Dioctylphtalat (DOP 0,3 µm).

Danach wird das verdünnte Abgas über ein Schüttbett aus Silicagel getrocknet und anschließend die Masse des verdünnten Abgases mit Hilfe eines Massendurchflussmessers (Bürkert 8701, Messgenauigkeit 1 %) erfasst. Alle erfassten Parameter werden kontinuierlich mit dem Datenerfassungssystem (LabVIEW™) aufgezeichnet.

Die Bestimmung der Masse der unbeladenen Filter vor der Messung, sowie der mit Partikeln beladenen Filter nach der Messung wird über eine Analysenwaage (Mettler-Toledo; Mikrowaage XP 56; Ablesbarkeit 1 µg) durchgeführt. Sowohl die beladenen als auch die unbeladenen Filter werden mindestens 12 h vor der Wägung zur Konditionierung in einem klimatisierten Raum bei 22 °C und einer relativen Luftfeuchte von 40 % gelagert.

4.2.5 Prüfzyklus für Emissionsmessungen

Die Emissionsmessungen werden in Anlehnung an die EU-Richtlinie 2000/25/EG und 97/68/EG für Traktormotoren bis Abgasstufe III A nach dem so genannten Non-Road-Steady-Cycle (NRSC) durchgeführt. Dieser Prüfzyklus entspricht dem C1-Zyklus (8-Phasen-Zyklus) der ISO 8178-4 [15] [16] [7]. Die Last- und Drehzahleinstellungen für die einzelnen Prüfphasen werden durch die in Tabelle 5 dargestellten Vorgaben bestimmt. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Lage der acht Lastpunkte im Leistungs-/Drehmomentdiagramm.

Tabelle 5: Acht Prüfphasen nach EU Richtlinie 97/68/EG bzw. C1-Zyklus nach ISO 8178

Prüfphase	1	2	3	4	5	6	7	8
Motordrehzahl	Nenn	Nenn	Nenn	Nenn	Zwischen	Zwischen	Zwischen	Leerlauf
Last in %	100	75	50	10	100	75	50	-
Wichtungsfaktor	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15

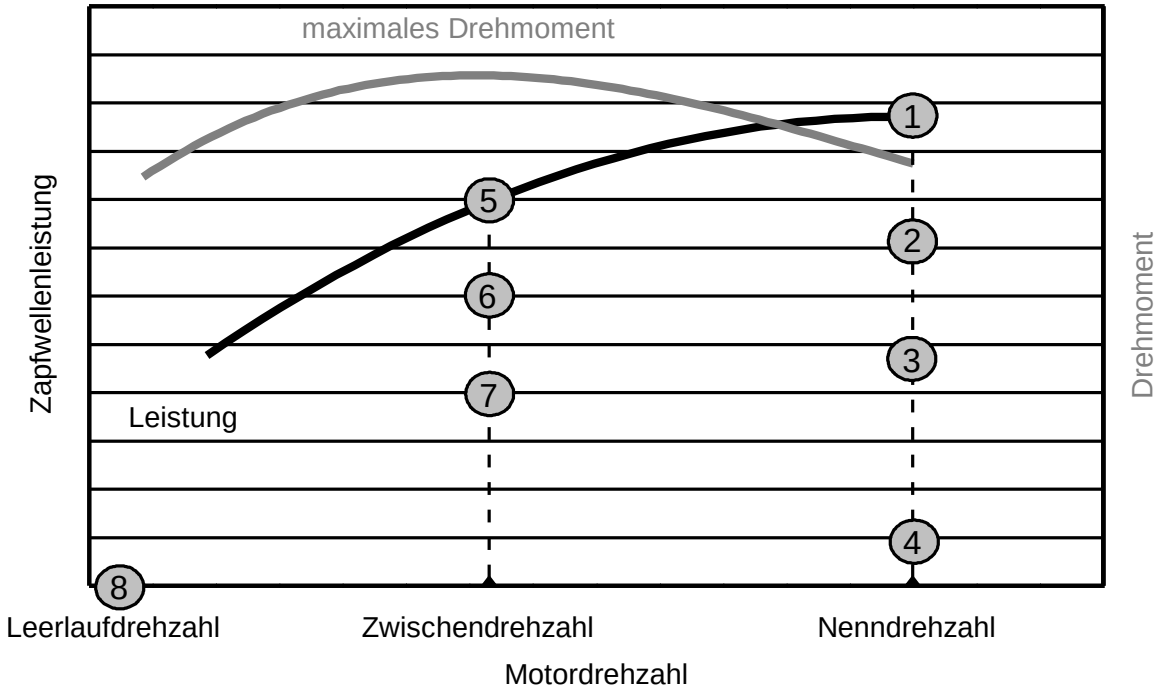

Abbildung 6: Lage der Prüfphasen im Leistungs- / Drehmomentdiagramm

Die acht Prüfphasen werden nacheinander in der dargestellten Reihenfolge (Tabelle 5) angefahren. Nach einer Stabilisierungsphase startet die Partikelprobenahme und es wird über eine Dauer von 10 Minuten mit einem konstanten Verdünnungsverhältnis abgesaugt. Zur Auswertung der limitierten gasförmigen Emissionen werden die letzten drei Minuten der Partikelprobenahme herangezogen. Die Ergebnisse der Leistungs- und Emissionsmessungen der acht Prüfphasen fließen gewichtet in die spezifischen Emissionen ein.

4.3 Versuchsablauf

In Abbildung 7 ist der Versuchsplan dargestellt. Der Traktor wird mit Sojaöl, Sonnenblumenöl, Rapsöl und Dieselkraftstoff betrieben. Die Variante mit Rapsölkraftstoff nach

DIN 51605 dient als Referenz für den Vergleich der Ergebnisse der Pflanzenölkraftstoffe untereinander, eine Variante mit Referenzdieselkraftstoff als Basis zur weiteren Einordnung der Ergebnisse. Jede Versuchsvariante wurde dreimal durchgeführt.

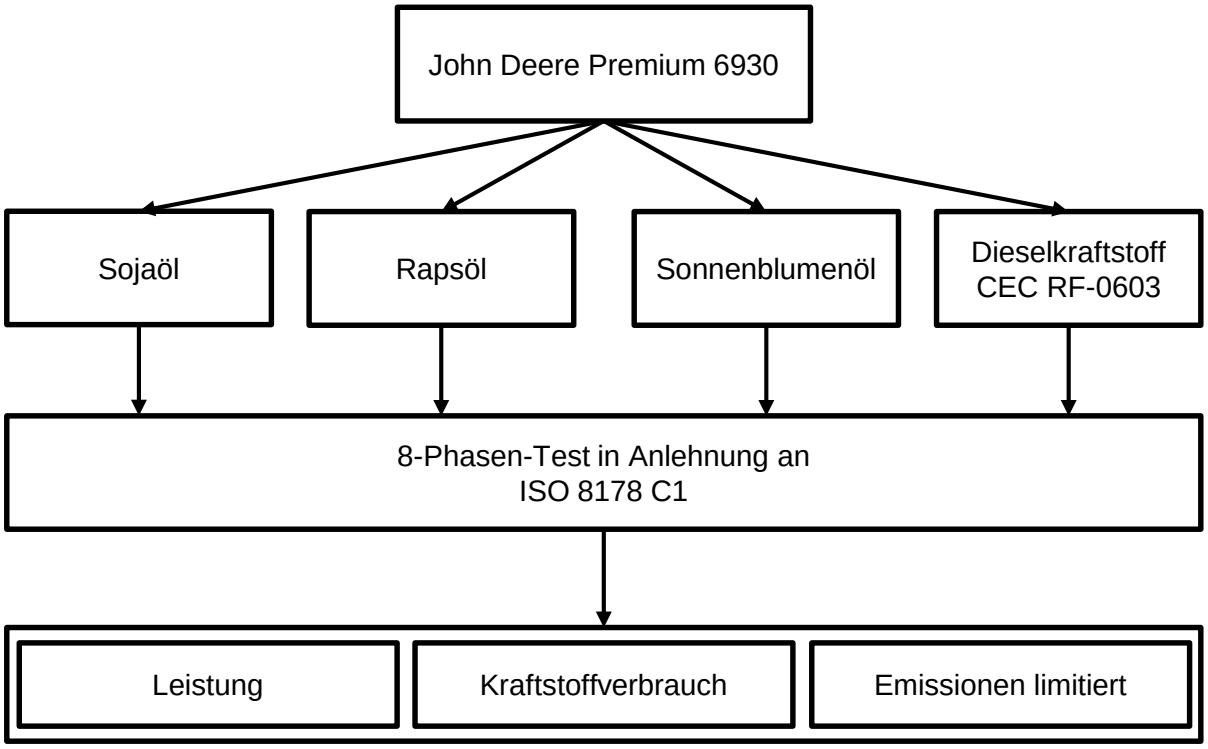

Abbildung 7: Schematische Darstellung des Versuchsplans für die Messungen am John Deere Traktor

4.4 Kraftstoffe

Die Kraftstoffkennwerte, der Temperaturverlauf der kinematischen Viskosität und die Fettsäureverteilung der verwendeten Pflanzenöle wurden von einem externen Labor untersucht. Die Bestimmung der Elementarzusammensetzungen (Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff) der verwendeten Kraftstoffe erfolgt durch Berechnung auf Basis der Fettsäuremuster.

Die Ergebnisse der Analysen der verwendeten Pflanzenöle sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Beim Rapsöl handelt es sich um ein kaltgepresstes Öl, welches einer Nachbehandlung zur Reduzierung der Alkali- und Erdalkaligehalte unterzogen wurde. Das Soja- und das Sonnenblumenöl sind Raffinate. Die ermittelten Werte liegen mit Ausnahme der Oxidationsstabilität des Sonnenblumenöls und der Zündwilligkeit (Abgeleitete Cetanzahl) des Soja- und des Sonnenblumenöls innerhalb der Grenzwerte des Entwurfs der DIN SPEC 51623[1].

[1] Bei Durchführung der Analysen lag nur der Entwurf der DIN SPEC 51623 vor

Tabelle 6: Analysenergebnisse der Kraftstoffkennwerte der verwendeten Pflanzenöle

Parameter	Prüfverfahren	Rapsöl	Sonnen-blumenöl	Sojaöl	Einheit
Dichte (15 °C)	EN ISO 12185	920,0	922,7	922,1	kg/m³
Flammpunkt	EN ISO 2719	237	235	282	°C
Kin. Viskosität (40 °C)	EN ISO 3104	34,5	32,7	32,9	mm²/s
Heizwert	DIN 51900-2	37,12	37,11	37,12	MJ/kg
Abgeleitete Cetanzahl	IP 498	49	37	36	-
Koksrückstand	EN ISO 10370	0,12	0,29	0,27	Masse-%
Iodzahl	DIN EN 14111	111	125	121	g Jod/100 g
Schwefelgehalt	EN ISO 20884	3,4	1,1	1,7	mg/kg
Gesamtverschmutzung	DIN EN 12662	3	13	5	mg/kg
Säurezahl	DIN EN 14104	0,85	0,05	0,10	mg KOH/g
Oxidationsstabilität (110 °C)	DIN 14112	6,4	3,1	6,9	h
Phosphorgehalt	DIN EN 14107	< 0,5	< 0,5	1,3	mg/kg
Summengehalt Ca/Mg	DIN EN 14538	< 0,5	< 0,5	< 0,5	mg/kg
Aschegehalt	EN ISO 6245	0,002	< 0,001	< 0,001	Masse-%
Wassergehalt	EN ISO 12937	580	62	66	mg/kg

Die kinematische Viskosität der drei verwendeten Pflanzenöle im Temperaturbereich von -10 °C und +100 °C ist in Abbildung 8 dargestellt. Die drei Varianten unterscheiden sich in ihrer kinematischen Viskosität oberhalb von Null Grad praktisch nicht.

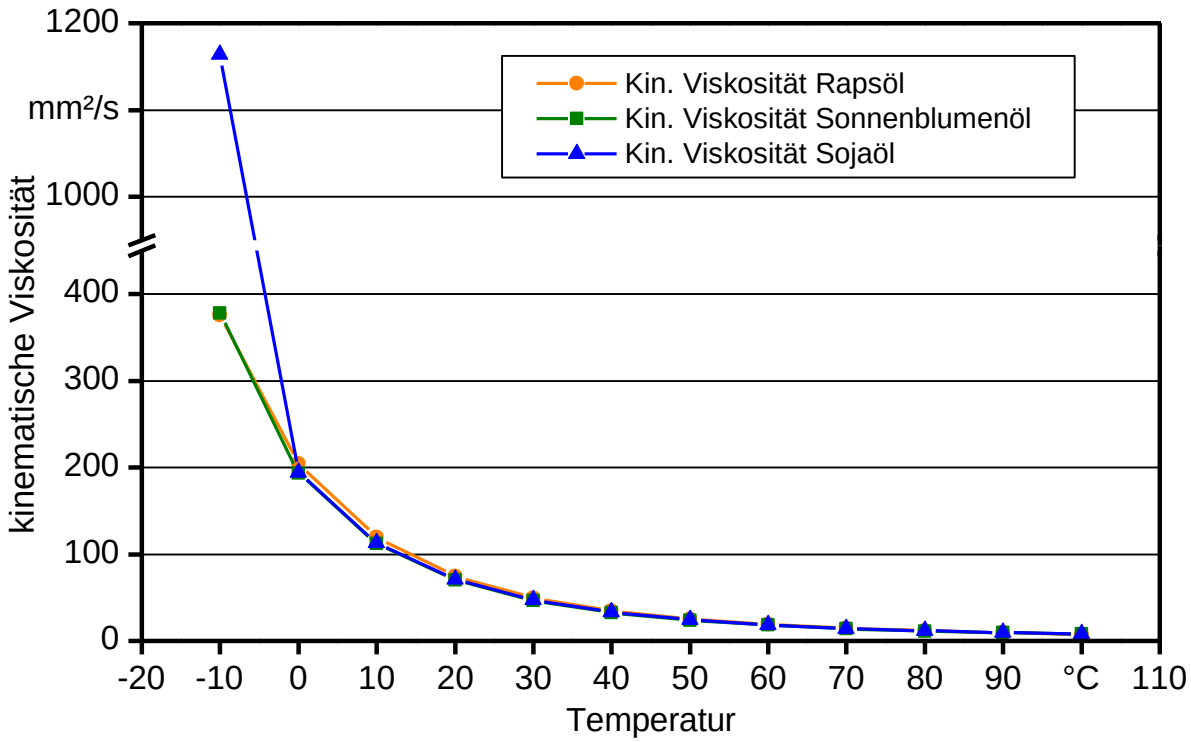

Abbildung 8: Kinematische Viskosität der verwendeten Pflanzenöle für Temperaturen von -10 °C bis +100 °C

Die Fettsäuremuster der drei Öle sind in Abbildung 9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl das Sonnenblumenöl als auch das Sojaöl weniger Ölsäure, dafür einen höheren Anteil an Linolsäure (C 18:2) enthalten als das Rapsöl. Dies bestätigt auch die für Soja- und Sonnenblumenöl gemessene höhere Jodzahl (siehe Tabelle 6) welche ein Maß für die Anzahl der Doppelbindungen im Triglycerid darstellt. Der Gehalt an Linolensäure (C 18:3) ist bei Sojaöl in etwa gleich dem des Rapsöls. Das Sonnenblumenöl enthält dagegen kaum Linolensäure. Die Grenzwerte des Linolsäuregehalts der DIN SPEC 51623 werden von allen verwendeten Pflanzenölen eingehalten (siehe auch Tabelle 1).

Die aus diesen Fettsäuremustern berechneten Elementarzusammensetzungen der drei Pflanzenöle sind zusammen mit den Analysewerten des Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffgehalts des verwendeten Referenzdieselkraftstoffs in Tabelle 7 zusammengestellt.

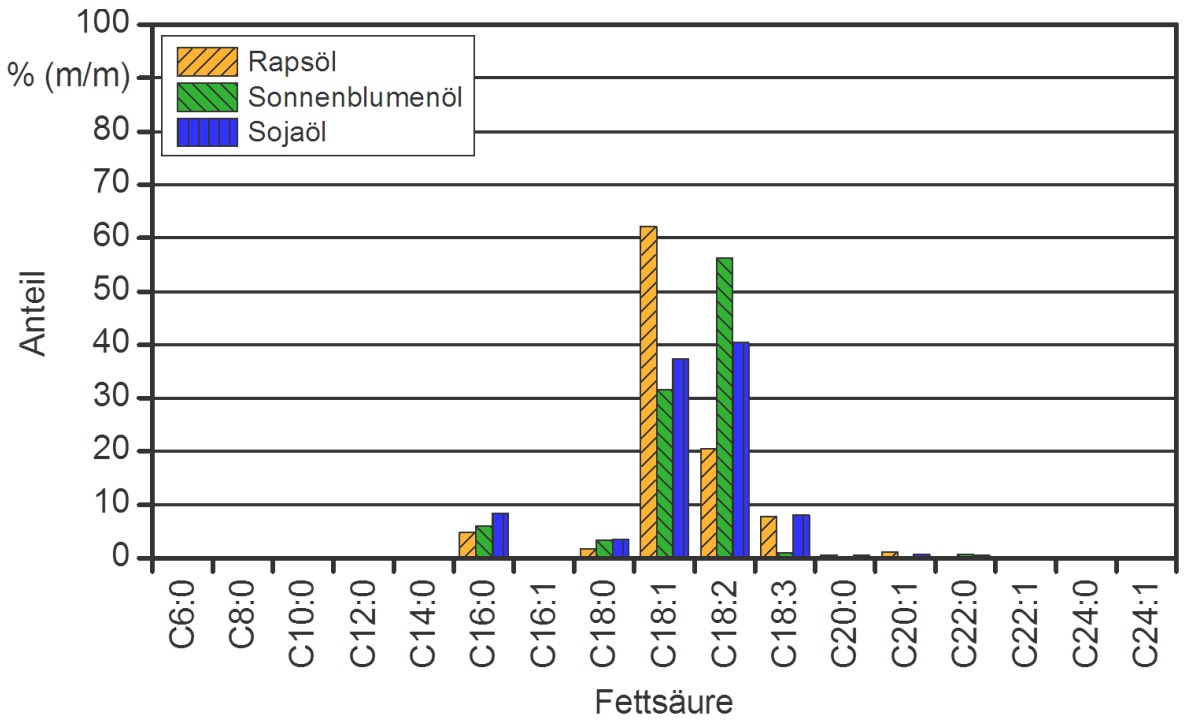

Abbildung 9: Fettsäureverteilung der verwendeten Pflanzenöle

Tabelle 7: Elementarzusammensetzung (C, H, N, O) der verwendeten Kraftstoffe

Element	Einheit	Rapsöl	Sonnen-blumenöl	Sojaöl	Diesel
Kohlenstoff		77,5	77,5	77,5	86,5
Wasserstoff	Masse-%	11,6	11,5	11,6	13,5
Sauerstoff		10,9	10,9	10,9	0

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Betriebsverhalten

5.1.1 Leistung, Drehmoment und Kraftstoffverbrauch bei Volllast

In Abbildung 10 sind Leistung, äquivalentes Motordrehmoment und der spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch über der Drehzahl für alle vier Kraftstoffvarianten dargestellt. Die Motornennleistung des Versuchsträgers liegt gemäß Herstellerangaben im Dieselbetrieb bei 123 kW ohne Intelligent Power Management System (siehe Kapitel 4.1). Während der Leistungsmessungen wurde mit Referenzdiesel eine maximale Zapfwellenleistung von 114 kW bei einer Drehzahl von etwa 1.700 min^{-1} erreicht. Die Differenz zur Motornennleistung, welche direkt an der Kurbelwelle des Motors gemessen wird, ist vor allem auf Verluste im Antriebsstrang und durch Nebenantriebe (Generator, Kompressor usw.) zurückzuführen. Auffällig sind auch die starken Streuungen für alle drei aufgetragenen Größen im Drehzahlbereich von 1.000 bis 1.400 min^{-1}. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Motorsteuerung die Abgasrückführung bei Drehzahlen kleiner 1.400 min^{-1} deaktiviert und daher die Betriebszustände im unteren Drehzahlbereich bei Volllast instabiler werden bzw. es nicht möglich war, die Messpunkte mehrmals nacheinander exakt anzufahren.

Die Leistungs- und Drehmomentwerte im Pflanzenölbetrieb liegen über dem gesamten Drehzahlbereich um bis zu 15 % niedriger als mit Diesel. Dies ist zumindest teilweise auf den niedrigeren Heizwert der Pflanzenöle zurückzuführen. Da der Einspritzvorgang prinzipiell eine volumetrische Zudosierung darstellt, kann bei Verwendung ein und derselben Motoreneinstellung im Pflanzenölbetrieb pro Einspritzvorgang weniger Energiemenge in den Zylinder eingebracht werden als bei Dieselkraftstoff.

Bei Betrachtung der verschiedenen Pflanzenöle untereinander liegen Drehmoment und Leistung durchweg auf gleichem Niveau. Der Punkt der maximalen Leistung im Pflanzenölbetrieb verschiebt sich zu einer Drehzahl von 1.800 min^{-1}. Mit Sojaöl wird eine Maximalleistung von 99 kW, mit Sonnenblumenöl und Rapsöl eine Leistung von 96 kW erreicht. Die tendenziell etwas höhere Leistung im Betrieb mit Sojaöl über den ganzen Drehzahlbereich liegt in der Größenordnung der Wiederholbarkeit. Es ist somit kein signifikanter Einfluss der Pflanzenölsorte auf die Drehmoment- und Leistungscharakteristik zu erkennen.

Der Verlauf des spezifischen gravimetrischen Kraftstoffverbrauchs weist bei allen Varianten einen ungewöhnlichen, jedoch für John-Deere-Motoren typischen Verlauf auf [6]. Bei einer Drehzahl von 1.600 min^{-1} wird ein lokales Maximum erreicht, welches erst bei Drehzahlen über 2.000 min^{-1} wieder überschritten wird. Der spezifische gravimetrische Kraftstoffverbrauch im Dieselbetrieb liegt über dem gesamten Drehzahlbereich etwa 15 % niedriger als mit den Pflanzenölen. Dies kann auf den größeren massenbezogenen Heizwert von Dieselkraftstoff zurückgeführt werden, welcher um etwa 14 % höher ist als bei den Pflanzenölen. Auch beim spezifischen Kraftstoffverbrauch ist beim Vergleich der verschiedenen Pflanzenölkraftstoffe untereinander kein signifikanter Unterschied zu erkennen.

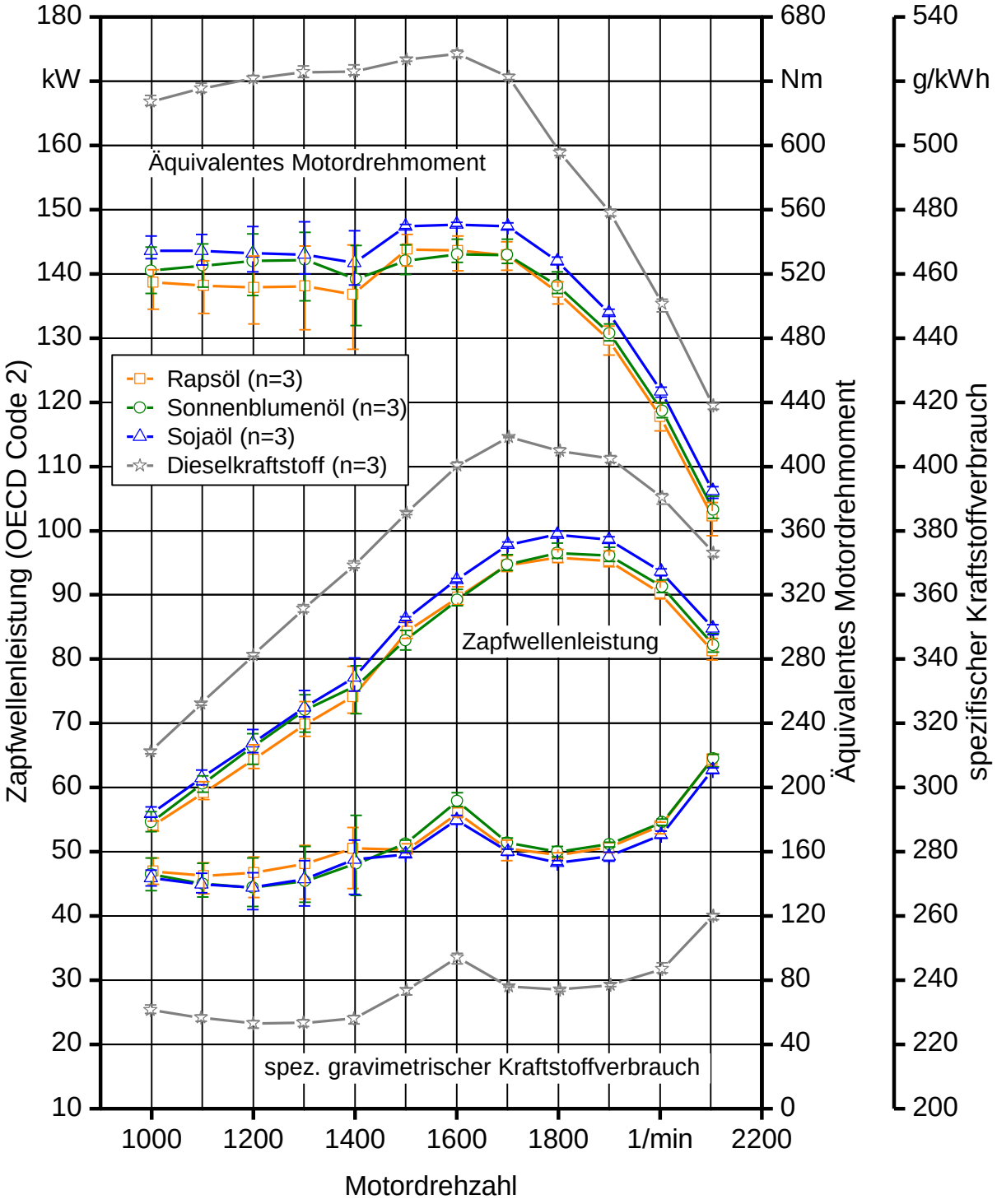

Abbildung 10: Äquivalentes Motordrehmoment, Zapfwellenleistung und spezifischer gravimetrischer Kraftstoffverbrauch mit Diesel, Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl (n = Anzahl der Messungen)

5.1.2 Wirkungsgrad bei Volllast

In Abbildung 11 ist das Verhältnis von Zapfwellenarbeit zu zugeführter Brennstoffarbeit bei Volllast für die vier verschiedenen Kraftstoffe über der Drehzahl aufgetragen. Da es sich hier um berechnete Werte handelt, in welche die Leistung einfließt, sind auch hier die bereits in 5.1.1 beschriebenen größeren Schwankungen bei Drehzahlen von 1.000 bis 1.400 min^{-1} zu sehen.

Es zeigt sich, dass der Wirkungsgrad im Dieselbetrieb geringfügig höher liegt als mit den Pflanzenölen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Pflanzenölen liegen wiederum im Bereich der Streuung der Einzelwerte.

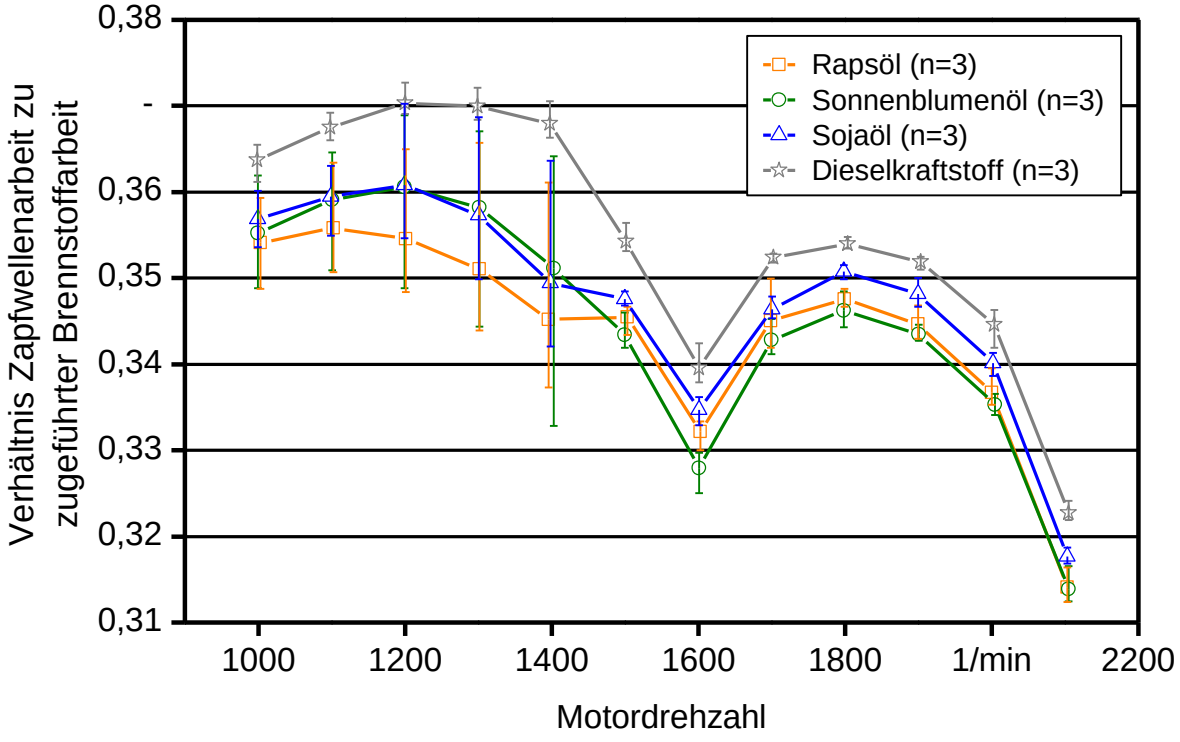

Abbildung 11: Mittlerer Wirkungsgrad bei Volllast an der Zapfwelle mit Diesel, Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl (n = Anzahl der Messungen)

5.2 Emissionsverhalten

5.2.1 Spezifische Emissionen über alle acht Prüfphasen

Die spezifischen Emissionen, bezogen auf die Zapfwellenarbeit, sind als Mittelwerte aus den gewichteten Zyklusmesswerten (über alle acht Prüfphasen) nach ISO 8178 in Abbildung 12 dargestellt.

Bei den Stickstoffoxidemissionen ist im Dieselbetrieb über den gesamten Zyklus ein Vorteil von etwa 15 % gegenüber den Pflanzenölen zu erkennen. Letztere liegen etwa auf gleichem Niveau.

Die Werte für die Kohlenmonoxidemissionen liegen mit 0,97 g/kWh (Diesel) bis 1,3 g/kWh (Soja- bzw. Sonnenblumenöl) auf sehr niedrigem Niveau. Der Grenzwert (Abgasstufe IIIA) bezogen auf die Kurbelwellenleistung liegt bei 5 g/kWh. Auch hier sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Pflanzenölen zu erkennen, welche im Mittel um etwa 25 % höhere CO-Emissionen aufweisen als Dieselkraftstoff.

Auch die Kohlenwasserstoffe im Abgas sind mit Werten zwischen 0,094 g/kWh für das Sojaöl und 0,154 g/kWh für Dieselkraftstoff sehr gering. Hier zeigt sich ein Vorteil für die Pflanzenöle, wo im Mittel um 36 % niedrigere Werte gemessen wurden als im Dieselbetrieb. Im Vergleich der verschiedenen Pflanzenöle untereinander liegen die Unterschiede im Bereich der Wiederholbarkeit.

Die Partikelmasseemissionen liegen mit Werten von 0,056 bis 0,060 g/kWh für die verschiedenen Pflanzenöle in der gleichen Größenordnung und lassen keine signifikanten Unterschiede erkennen. Im Dieselbetrieb jedoch ist der Partikelausstoß mit 0,084 g/kWh um 45 % höher als der Mittelwert aus den Pflanzenölmessungen.

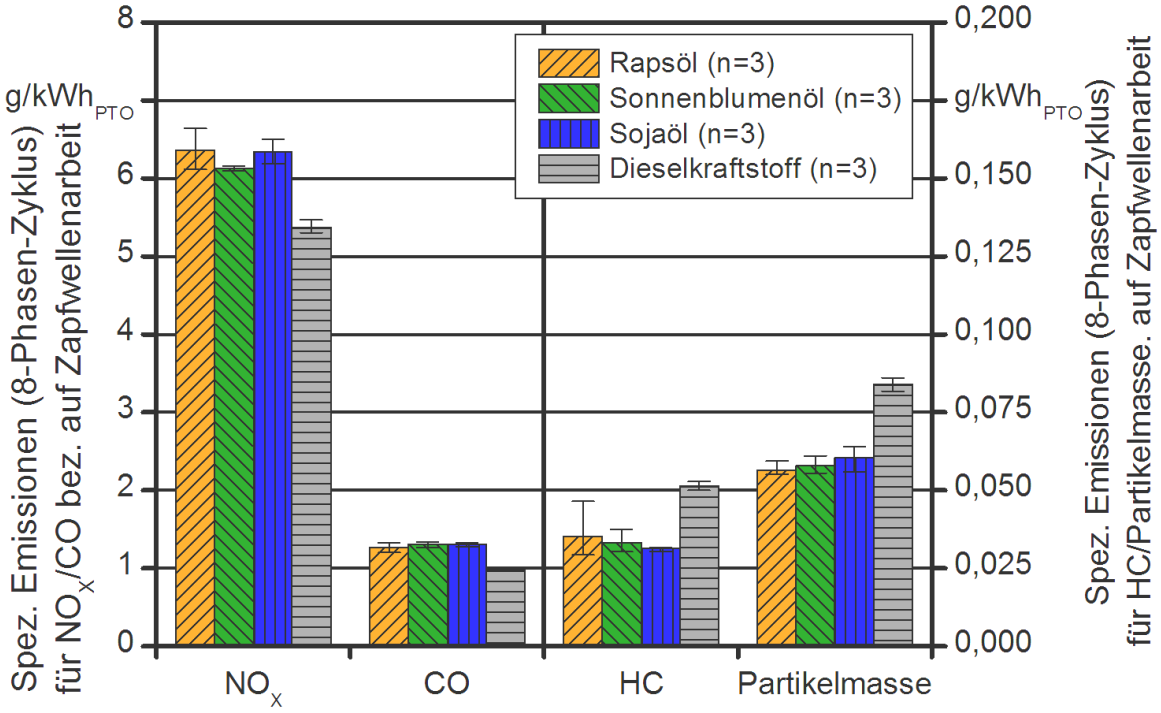

Abbildung 12: Spezifische NO_x-, CO-, HC- und Partikelmasseemissionen bezogen auf die Zapfwellenleistung (n = Anzahl der Messungen)

5.2.2 Emissionen während der einzelnen Prüfphasen

Im Folgenden wird das Emissionsverhalten während der acht einzelnen Prüfphasen anhand der limitierten Abgaskomponenten näher betrachtet. Hierbei ist zu beachten, dass es sich, im Gegensatz zu den spezifischen Emissionen, um reine Konzentrationsangaben für die jeweilige Komponente bezogen auf feuchtes Abgas handelt. Die, wie in Ab-

bildung 13 zu sehen, um bis zu 20 % höhere Leistung, welche an den einzelnen Messpunkten im Dieselbetrieb abgegeben wurde, bleibt dabei unberücksichtigt.

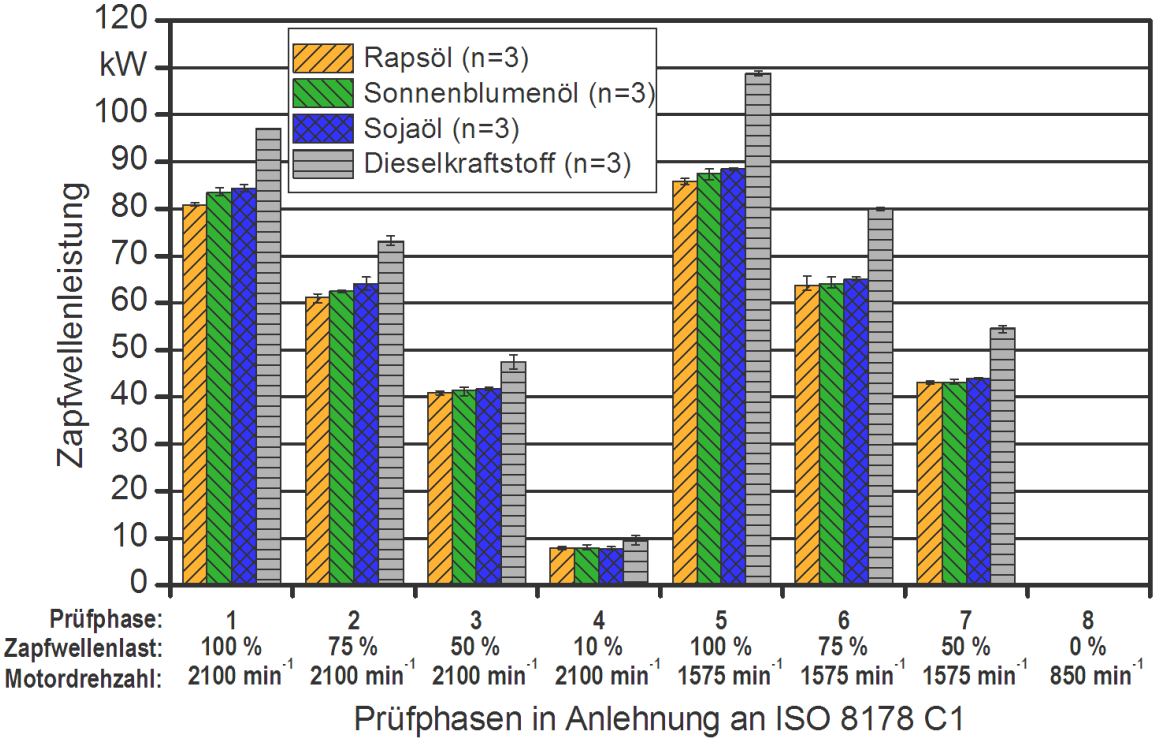

Abbildung 13: Mittelwerte und Spannweiten der Leistung während der einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen)

5.2.2.1 Stickstoffoxide

Die Mittelwerte der Stickstoffoxidemissionen in den einzelnen acht Prüfphasen sind in Abbildung 14 dargestellt. Bei Nenndrehzahl fallen die NO_X-Konzentrationen mit sinkender Last. Dies lässt sich durch geringere Einspritzmengen und damit verbunden niedrigere Verbrennungstemperaturen erklären, die zu einer verminderten Bildung von thermischem NO_X führen. Bei der Zwischendrehzahl ist dieser Effekt nicht festzustellen. Dies ist vermutlich auf unterschiedliche Abgasrückführraten zurückzuführen, eine Messung der Abgasrückführrate war im Rahmen der Untersuchung nicht möglich. Beim Vergleich der Kraftstoffe untereinander sind bei einer Last von ≥ 50 % in etwa gleich hohe NO_X-Konzentrationen im Abgas vorhanden. Hierbei ist jedoch die mit den Pflanzenölen geringere erzielte Leistung zu berücksichtigen, so dass sich bezogen auf die abgegebene Arbeit an der Zapfwelle etwa 10 bis 20 % höhere spezifische NO_X-Emissionen im Vergleich zu Dieselkraftstoff ergeben. Auch beim Einsatz von Fettsäuremethylestern werden zumeist höhere spezifische NO_X-Emissionen festgestellt. Gründe hierfür werden derzeit im Sauerstoffgehalt des Kraftstoffs gesehen, der zu lokal veränderten Verbrennungsluftverhältnissen führt und in der Folge zu lokal höheren Verbrennungstemperaturen, welche zur vermehrten Bildung von thermischem NO_X führen [25][30]. Da auch Pflanzenöl einen höheren Sauerstoffgehalt als Dieselkraftstoff aufweist, könnte diese Theorie auch

zur Erklärung der höheren NO_X-Emissionen im Betrieb mit den Pflanzenölen herangezogen werden. Auffällig ist der Leerlauf, wo bei Diesel die NO_X-Konzentration im Abgas um 60 % höher liegt als mit den Pflanzenölen. Offensichtlich werden bei Dieselkraftstoff im Leerlauf höhere Temperaturen erzielt als mit den Pflanzenölen, was eine vermehrte NO_X-Bildung zur Folge hat.

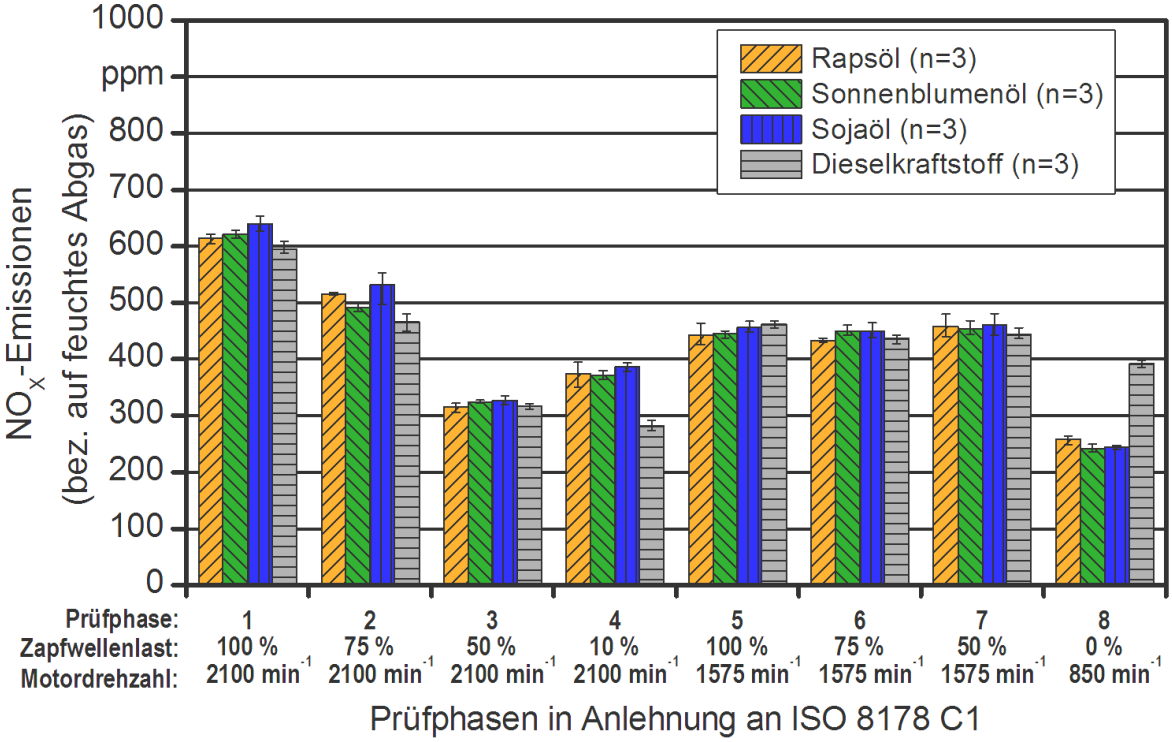

Abbildung 14: Mittelwerte und Spannweiten der Stickstoffoxidemissionen in den acht einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen)

5.2.2.2 Kohlenmonoxide

Die Kohlenmonoxidkonzentrationen im Abgas sind bei Nenndrehzahl etwas höher als bei der Zwischendrehzahl und steigen mit fallender Last (Abbildung 15). Für die drei Pflanzenöle liegen sie bei allen acht Prüfphasen auf gleicher Höhe. In den Prüfphasen mit 50 % Last und mehr sind die CO-Konzentrationen im Abgas im Dieselbetrieb etwas höher als mit den getesteten Pflanzenölkraftstoffen. Grund hierfür kann sein, dass Pflanzenöle bereits Sauerstoff im Molekül enthalten (siehe Kapitel 4.4). Dadurch stehen Reaktionskeime zur Verfügung, welche die Verbrennung des Kraftstoffs begünstigen. Bei geringerer Last hingegen wird im Pflanzenölbetrieb ca. 30 % mehr CO ausgestoßen. Wiederum auffällig ist der Leerlauf. Hier sind im Pflanzenölbetrieb die CO-Konzentrationen im Abgas fast viermal so hoch wie im Dieselbetrieb, was wiederum auf eine vermehrt unvollständige Verbrennung im Leerlauf schließen lässt. Gründe hierfür können in einer unzureichenden Kraftstoffaufbereitung aufgrund von schlechteren Gemischbildungsbedingungen liegen, die zu einer unvollständigen Oxidation führen. Die niedrigeren NO_X-

Konzentrationen im Abgas im Leerlauf lassen ebenfalls darauf schließen, dass niedrigere Temperaturen im Brennraum vorherrschen und die Oxidation nicht vollständig abläuft.

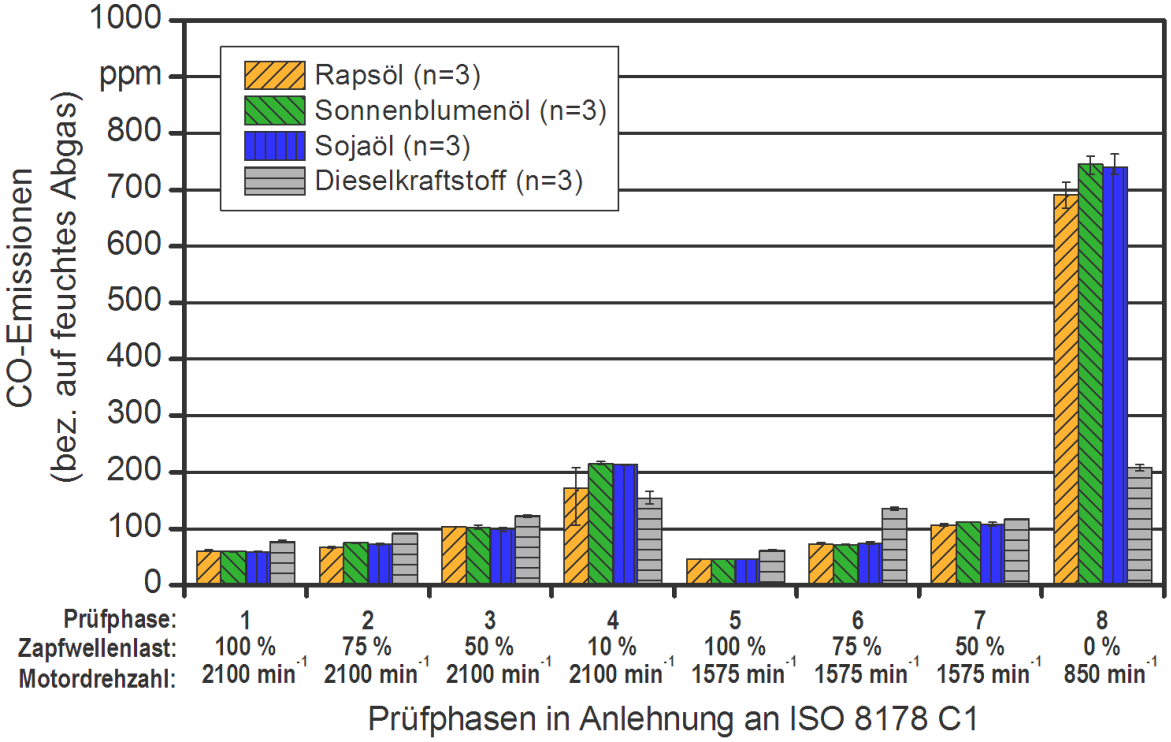

Abbildung 15: Mittelwerte und Spannweiten der Kohlenmonoxidemissionen in den acht einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen)

5.2.2.3 Kohlenwasserstoffe

Abbildung 16 zeigt die Konzentration von unverbrannten Kohlenwasserstoffen im Abgas. Mit Mittelwerten von etwa 9 bis 55 ppm (mit Ausnahme vom Leerlauf) liegen die Messwerte auf einem sehr niedrigen Niveau. Bei allen Punkten, mit Ausnahme des Leerlaufs, liegen die Werte für Dieselbetrieb um das Zwei- bis Dreifache höher als mit den Pflanzenölkraftstoffen. Auch hierfür kann wiederum der Sauerstoffgehalt des Pflanzenölkraftstoffs verantwortlich sein, welcher den Abbrand begünstigt. Umgekehrt verhält es sich im Leerlauf, wo die HC-Konzentrationen im Pflanzenölbetrieb etwa um den Faktor 2 höher sind. Auch dies deutet, wie die Werte für das CO, auf eine unvollständige Verbrennung der Pflanzenölkraftstoffe aufgrund ungenügender Zerstäubung im Leerlauf hin. Im Gegensatz zu den Messwerten für das CO, welche bereits bei einer Last von 10 % (Prüfphase 4) im Pflanzenölbetrieb ungünstiger ausfallen als mit Diesel, sind die Kohlenwasserstoffemissionen auch in Prüfphase 4 im Pflanzenölbetrieb deutlich niedriger als mit Diesel. Zwischen den einzelnen Pflanzenölen ist in allen acht Prüfphasen kein Unterschied zu erkennen.

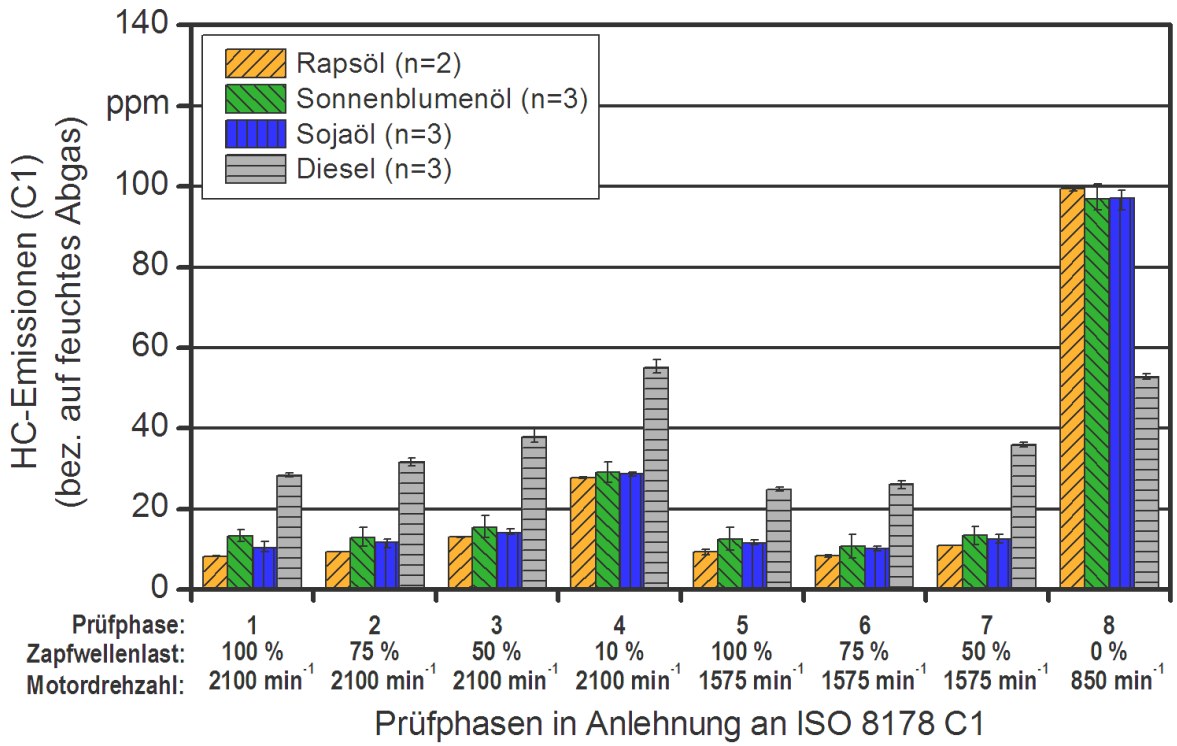

Abbildung 16: Mittelwerte und Spannweiten der Kohlenwasserstoffemissionen in den acht einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen)

5.2.2.4 Partikelmasse

Die Partikelmasseemissionen in den einzelnen acht Prüfphasen sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Konzentration im Abgas ist bei Nenndrehzahl höher als bei der Zwischendrehzahl und nimmt mit steigender Last ab. Zwischen den einzelnen Pflanzenölen ist auch beim Partikelmasseausstoß kein signifikanter Unterschied zu erkennen. An den Phasen mit 50 % Last und mehr beträgt der Partikelausstoß im Pflanzenölbetrieb nur etwa 30 bis 50 % des Wertes mit Dieselkraftstoff. Als Grund hierfür kann wiederum der bereits oben genannte Effekt des Sauerstoffgehalts im Kraftstoff genannt werden, welcher eine bessere Verbrennung im Pflanzenölbetrieb mit weniger Rußbildung bewirkt. Analog zu den Werten für Kohlenmonoxid ist bei geringerer Last in Prüfphase 4 die Partikelmasse im Abgas im Dieselbetrieb etwa 20 % niedriger als im Pflanzenölbetrieb. Wie bei den NO_x-, CO- und HC-Emissionen ist auch bei den Partikeln der Leerlauf ein auffälliger Betriebspunkt. Im Pflanzenölbetrieb ist hier der Ausstoß mehr als zehnmal so hoch als mit Diesel, was wie die Messwerte für CO und HC eine verstärkt unvollständige Verbrennung bestätigt.

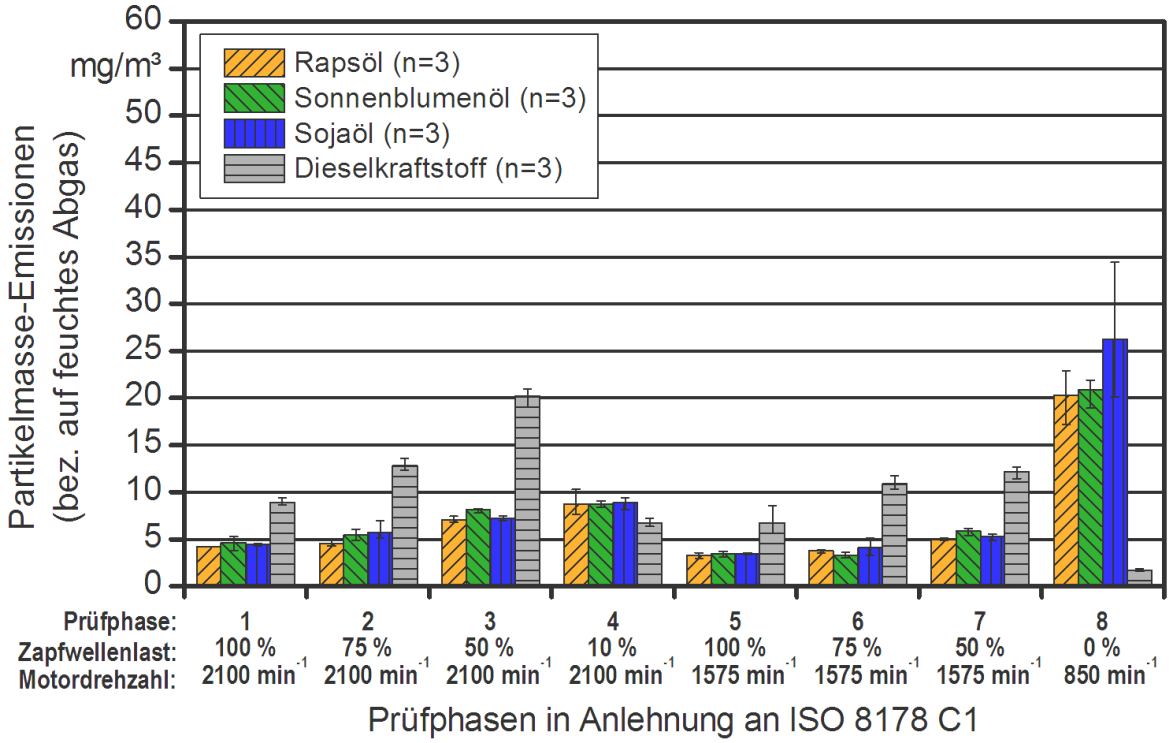

Abbildung 17: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasseemissionen in den acht einzelnen Prüfphasen (n = Anzahl der Messungen)

5.3 Einordnung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Betrieb eines pflanzenöltauglichen Schleppers mit Referenzdieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff, Sojaöl und Sonnenblumenöl lagen Leistung und Drehmoment im Pflanzenölbetrieb über den gewichteten NRSC um etwa 15 % niedriger als mit Diesel. Dies kann auf den niedrigeren Heizwert der Pflanzenöle zurückgeführt werden. Durch eine spezielle Anpassung der Motorsteuerung an Pflanzenölkraftstoff kann diese Minderleistung unter Umständen wieder ausgeglichen werden [13]. Der gravimetrische Kraftstoffverbrauch ist im Pflanzenölbetrieb etwa 15 % höher als mit Diesel, was ebenfalls am geringeren Heizwert der Pflanzenöle im Gegensatz zum Diesel liegt. Volumetrisch betrachtet bedeutet dies einen Mehrverbrauch von etwa 7 % für die Pflanzenöle. Der Motorwirkungsgrad ist im Pflanzenölbetrieb auf ähnlichem Niveau wie mit Diesel. Ein Unterschied zwischen den verwendeten Pflanzenölen Raps-, Soja- und Sonnenblumenöl in Bezug auf Leistungs- und Drehmomentcharakteristik sowie Kraftstoffverbrauch ist nicht zu erkennen.

Auch bei der Betrachtung der limitierten Abgaskomponenten fällt der Unterschied zwischen Diesel und Pflanzenöl bei weitem größer aus als zwischen den einzelnen Pflanzenölen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Pflanzenölen im Hinblick auf den CO-und NO_X-Ausstoß ist nicht zu erkennen. Die gewichteten Mittelwerte über den gesamten Prüfzyklus zeigen bei NO_X und CO leichte Nachteile für die Pflanzenöle. Allerdings sind für die Stickoxide und die Partikelmasse auch im Dieselbetrieb die gesetzlichen Grenzwerte der nächsten Abgasstufe III B und IV in dieser Motorenkonfigura-

tion nicht mehr einzuhalten. Deswegen wird ohnehin ein Abgasnachbehandlungssystem bestehend aus einem Entstickungskatalysator und/oder einem Partikelfilter in Kombination mit einem Oxidationskatalysator nötig sein. Hiermit könnten die erhöhten CO- und NO_X-Emissionen im Pflanzenölbetrieb egalisiert werden.

Bei den spezifischen Kohlenwasserstoff- und den Partikelmasseemissionen über den gesamten Zyklus zeigen die Pflanzenöle Vorteile gegenüber dem Dieselkraftstoff. Bei den ohnehin sehr geringen Kohlenwasserstoffwerten konnte im Pflanzenölbetrieb eine Reduktion von 36 % ermittelt werden. Ähnlich verhält es sich bei der Partikelmasse. Hier liegen die Werte im Pflanzenölbetrieb um 30 % niedriger als mit Diesel. Dies könnte einen Vorteil bei der Dimensionierung von Partikelfiltersystemen für pflanzenöltaugliche Motoren mit sich bringen. Auch beim HC- und Partikelausstoß gibt es wie bei NO_X und CO keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei untersuchten Pflanzenölkraftstoffen.

Hohe Drehzahlen und Lasten wirken sich im Allgemeinen günstig auf den Verbrennungsprozess von Pflanzenölkraftstoff aus, da die dabei herrschenden Bedingungen im Brennraum, wie hohe Drücke, Temperaturen und verstärkte Ladungsbewegung zu einem besseren Sprühbild, einer intensiveren Gemischbildung und geringeren Abgasemissionen führen [24]. Dadurch werden im Pflanzenölbetrieb bei hohen Drehzahlen mehr NO_X und weniger CO, HC und Partikel ausgestoßen.

Dem Leerlauf und dem Schwachlastbetrieb ist ein besonderes Augenmerk zu schenken. Der Ausstoß an CO, HC und Partikeln ist bei allen Pflanzenölkraftstoffvarianten im Leerlauf um ein vielfaches höher als mit Diesel. Lediglich die Stickstoffoxidemissionen sind mit Pflanzenöl im Leerlauf niedriger als mit Diesel. Im Schwachlastbetrieb und Leerlauf wird, bedingt unter anderem durch die hohe Viskosität des Pflanzenöls und der dadurch zunehmend schlechteren Zerstäubungsqualität sowie durch geringere Ladungsbewegung im Zylinder, eine nur ungenügende Gemischbildung erreicht. Aufgrund der ungenügenden Verteilung des Kraftstoffs im Zylinder bei gleichzeitig niedrigen Brennraumtemperaturen kommt es zu einer unvollständigen Verbrennung mit zwar niedrigeren NO_X-Emissionen aber erhöhtem Ausstoß von Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und auch Partikeln. Durch weitere Anpassung des Einspritzkennfeldes besteht an diesen Betriebspunkten unter Umständen noch Verbesserungspotential, darauf deuten auch Untersuchungen von WACHTMEISTER et al. (2010) [38] hin.

Es zeigt sich, dass die Unterschiede sowohl im Betriebsverhalten als auch bei den Emissionen zwischen den untersuchten Pflanzenölen vernachlässigbar gering sind. Anders verhält es sich im Vergleich der Pflanzenöle zum Dieselkraftstoff. Eine Anpassung des Motors und des Einspritzsystems, speziell auf Sonnenblumen- und Sojaöl erscheint somit für Abgasstufe IIIA Traktoren nicht zwingend notwendig zu sein, anders als die Verfeinerung der Anpassungen des Dieselmotors an den Betrieb mit Pflanzenölen allgemein.

Zusammenfassung und Ausblick

Pflanzenöle als Biokraftstoff fördern die regionale Wertschöpfung und weisen vergleichsweise sehr geringe CO_2-Vermeidungskosten auf. Aufgrund der Möglichkeit der zusätzlichen Wertschöpfung durch die Kombination von Futtermittel- und Kraftstoffproduktion sind Pflanzenöle als Biokraftstoff für die Landwirtschaft besonders interessant. Seit 2008 bieten einige der marktführenden Landmaschinenhersteller rapsöltaugliche Traktoren an. Um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten, ist insbesondere eine gute Kraftstoffqualität ausschlaggebend. Die Mindestanforderungen an Rapsöl zur Verwendung als Kraftstoff sind in der Norm DIN 51605 definiert.

Zur Erweiterung der Rohstoffbasis, zum Transfer der Technik in andere Länder bzw. Klimazonen in denen andere Öle zur Verfügung stehen oder auch aus wirtschaftlichen Gründen wird die Verwendung verschiedener Pflanzenöle als Kraftstoff in Traktoren diskutiert. Zwar bestehen bereits umfangreiche Erfahrungen zum Betriebs- und Emissionsverhalten von pflanzenöltauglichen Traktoren, allerdings fast ausschließlich mit Rapsöl. Erfahrungen bei der Verwendung von verschiedenen Pflanzenölen als Kraftstoff in Traktoren gibt es kaum. Um die Auswirkung der Verwendung anderer Pflanzenöle als Kraftstoff in pflanzenöltauglichen Motoren auf deren Betriebs- und Emissionsverhalten näher zu untersuchen, wurde am Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) ein pflanzenölbetriebener John-Deere-Traktor auf Leistung, Drehmoment, Kraftstoffverbrauch und limitierte Abgaskomponenten im Betrieb mit Soja-, Sonnenblumen- und Rapsöl sowie Referenzdieselkraftstoff untersucht.

Bei Leistung und Drehmoment ist im Pflanzenölbetrieb eine Minderung von 15 % im Vergleich zum Dieselbetrieb, allerdings kein Unterschied zwischen den einzelnen Pflanzenölen feststellbar. Der gravimetrische Kraftstoffverbrauch liegt aufgrund der geringeren Energiedichte der Pflanzenöle um 15 % höher als mit Diesel, der volumenbezogene Unterschied beträgt wegen der höheren Dichte etwa 7 %. Auch der Wirkungsgrad ist im Dieselbetrieb etwas höher als im Pflanzenölbetrieb.

Bei Betrachtung der limitierten gasförmigen Emissionen zeigen sich bei den CO- und NO_X-Emissionen leichte Nachteile der Pflanzenöle gegenüber dem Dieselbetrieb. Die Pflanzenöle untereinander unterscheiden sich nicht signifikant. Bei den HC-Emissionen wiederum wiesen die Pflanzenöle einen Vorteil auf. Über das gesamte Kennfeld liegen die Kohlenwasserstoffemissionen im Dieselbetrieb um das Zwei- bis Dreifache höher als bei der Verwendung von Pflanzenöl als Kraftstoff. Die verschiedenen Pflanzenöle untereinander weisen in Bezug auf Kohlenwasserstoffe im Abgas wiederum keine Unterschiede auf.

Bei den partikelförmigen Emissionen werden Vorteile für Pflanzenölkraftstoffe sichtbar, welche um etwa 30 % geringer ausfallen als bei Diesel. Auch hier ist kein negativer Einfluss von nicht rapsstämmigen Pflanzenölen beobachtbar. Der Leerlauf zeigt sich bei der Verwendung von Soja- und Sonnenblumenöl genauso wie mit Rapsölkraftstoff als kritischer Punkt. CO-, HC- und Partikelemissionen liegen hier um ein vielfaches höher als im Dieselbetrieb.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei der Verwendung von Soja- und Sonnenblumenöl statt Rapsöl als Kraftstoff das Betriebs- und Emissionsverhalten nicht negativ beeinflusst wird. Es konnte weder bei Leistung, Drehmoment und Kraftstoffverbrauch, noch bei den limitierten Abgaskomponenten signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Pflanzenölen festgestellt werden. Allerdings können mit dieser Arbeit noch keine Aussagen über das langfristige Betriebs- und Emissionsverhalten bei der Verwendung von anderen Pflanzenölen als Kraftstoff getroffen werden. Hier sind weiterführende Langzeituntersuchungen notwendig. Außerdem wurde der Einfluss der verschiedenen Pflanzenölkraftstoffe auf den praktischen Einsatz der Maschinen nicht betrachtet. Da im alltäglichen Betrieb auch Kraftstoffeigenschaften wie Lagerstabilität, Fließverhalten bei niedrigen Temperaturen usw. eine wesentliche Rolle spielen, müssen diese vor einem langfristigen Einsatz anderer Pflanzenöle als Kraftstoff untersucht und gegebenenfalls entsprechende Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden.

Durch Weiterentwicklungen im Bereich der Motoren- und Abgasnachbehandlungstechnologien besteht ein großes Potential zur gezielten Verminderung der Schadstoffemissionen. Dabei ist jedoch unklar, wie sich unterschiedliche Pflanzenöle in diesen neuen Motorsystemen verhalten und welches Optimierungspotential besteht, wenn bestimmte Eigenschaften der Pflanzenöle genutzt werden. Beispielsweise könnten aufgrund des Sauerstoffgehalts im Pflanzenöl Abgasrückführraten zur Reduktion von NO_X weiter erhöht werden, ohne dabei den Anteil unvollständiger Verbrennungsprodukte in größerem Maße zu erhöhen.

Daneben sollte untersucht werden, wie sich weitere Pflanzenöle und Pflanzenölmischungen auf das Leistungs- und Emissionsverhalten von Motoren auswirken. Hierdurch könnte gegebenenfalls die Rohstoffbasis weiter verbreitert und dadurch ein Beitrag zur Erhöhung der Biodiversität in der Landwirtschaft geleistet werden.

Quellenverzeichnis

[1] AGCO GMBH (2010): Fendt 820 Vario greentec. Available at: http://www.fendt.com/. Accessed at 21st December 2010

[2] BASSHUYSEN, R. VAN; SCHÄFER, F. (2004): Lexikon Motorentechnik - Die Verbrennung von A-Z. Wiesbaden: Vieweg & Sohn / GWV Fachverlage GmbH, 1078 Seiten

[3] BOCKISCH, M. (1993): Nahrungsfette und -öle. Stuttgart: Ulmer, 694 Seiten

[4] BOUCHÉ, T.; HINZ, M.; HIEBER, D.; TSCHÖKE, H. (1997): Einfluß verschiedener Pflanzenöl-Eigenschaften auf Verbrennung und Schadstoffbildung in einem direkteinspritzenden Dieselmotor. Motortechnische Zeitschrift MTZ, Jg. 58, Nr. 3, S. 148-154

[5] BROLL, P.; SCHRAML, S. (2009): Zukünftige Abgasnachbehandlungssysteme für Off-Road-Anwendungen. In: ZIKORIDSE, G. (Hrsg.): Der Dieselmotor im Spannungsfeld zwischen Klimawandel und Schadstoffemission. 8. Dresdner Motorenkolloquium, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden, Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik, 17. und 18. Juni 2009, Hilton Dresden Hotel. Tagungsband. Dresden: Hochschule für Technik und Wirtschaft, S. 220-244

[6] DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT (2010): DLG-PowerMix Traktorentest John Deere 6930 Premium, Prüfungsnummer 2010-115. Available at: http://www.dlg.org/johndeere.html. Accessed at 21st December 2010

[7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (1996): DIN EN ISO 8178-4 Hubkolben-Verbrennungsmotoren, Abgasmessung. Teil 4: Prüfzyklen für verschiedene Motorverwendungen; Dezember 1996. Berlin: Beuth Verlag, 14 Seiten

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

[9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2010): DIN EN 590 - Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Dieselkraftstoff. Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 590:2009+A1:2010, Ersatz für DIN EN 590:2009-10, Normenausschuss (NMP) im DIN, Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung (FAM) des NMP, Normenausschuss Automobiltechnik (NAAutomobil) im DIN, Mai 2010. Berlin: Beuth, 16 Seiten

[10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2010): Projekte von NA 062-06-32-02. Available at: http://www.din.de/. Accessed at 21st December 2010

[11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2012): DIN SPEC 51623 - Kraftstoffe für pflanzenöltaugliche Motoren - Pflanzenölkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren. Juni 2012. Berlin: Beuth, 17 Seiten

[12] DEUTZ AG (2010): DEUTZ Natural Fuel Engine. Available at: http://www.deutz.de/. Accessed at 21st December 2010

[13] DIERINGER, S.; PICKEL, P. (2010): One Tank - Multiple Fuels. An Integrated Approach to Enable Pure Plant. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, FACHBEREICH MAX-EYTH-GESELLSCHAFT AGRARTECHNIK (VDI-MEG) (Hrsg.): LAND.TECHNIK 2010 - Partnerschaften für neue Innovationspotenziale. 68. Internationale Tagung, Braunschweig, 27. und 28. Oktober 2010, Tagungsband. VDI-Berichte, Nr. 2111. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 85-90

[14] DOBIASCH, A. (2000): Einfluss der chemischen und physikalischen Eigenschaften von regenerativen Kraftstoffen auf das Emissionsverhalten von Verbrennungsmotoren. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik, Nr. 428. Düsseldorf: VDI Verlag, 173 Seiten

[15] EUROPÄISCHE UNION (1997): Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. ABl. Nr. L 59 vom 27.02.1998, zuletzt geändert durch Richtlinie 2006/96/EG (ABl. Nr. L 86 vom 01.04.2010) des Europäischen Parlaments u. des Rates

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

[17] FLÜGGE, E.; HARNDORF, H.; WICHMANN, U. (2007): Rapsölumrüstungen an Dieselmotoren. Notwendigkeiten und deren Umsetzung. In: NOVA-INSTITUT GMBH (Hrsg.): Erster Internationaler Kongress zu Pflanzenöl-Kraftstoffen, Tagungsband, Messe Erfurt, 6.-7. September 2007. Hürth: Nova-Institut, S. 227-236

[18] HARNDORF, H.; SY, G.; FLÜGGE, E.; WICHMANN, V.; KLAAßEN, G. (2009): Dauerhaltbarkeit von Rapsölmotoren im Praxiseinsatz. Universität Rostock, 108 Seiten

[19] 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. Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock. Rostock: Eigenverlag, 222 Seiten

[20] JOHN-DEERE-WERKE MANNHEIM (2008): Rapsölbefeuerte Traktoren mit abgaszertifizierten Motoren nach Euro Stufe 3 - Abschlussbericht zu Nr. 8.1. August 2008. Mannheim: John-Deere-Werke, 33 Seiten

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

[22] MEIERHOFER, T. (2006): Untersuchungen zur Eignung verschiedener Pflanzenöle als Kraftstoff in pflanzenöltauglichen BHKW. Diplomarbeit. Fachhochschule Amberg-Weiden, Fachbereich Maschinenbau/Umwelttechnik. Amberg: 157 Seiten

[23] MEYER-PITTROFF, R. (1994): Pflanzenöle als regenerative Energieträger - nationale und weltweite Perspektiven. In: ENERGIETECHNIK, VDI-GESELLSCHAFT (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; VDI-Berichte. Nr. 1126. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 5-21

[24] MOLLENHAUER, K. (2002): Handbuch - Dieselmotoren. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1069 Seiten

[25] MUELLER, C. J.; BOEHMAN, A. L.; MARTIN, G. C. (2009): An Experimental Investigation of the Origin of Increased NO_X Emissions when Fueling a Heavy-Duty Compression-Ignition Engine with Soy Biodiesel. In: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE) (Hrsg.): Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, June 2009, Florence. Proceedings. SAE Technical Paper, Nr. 2009-01-1792. Warrendale: SAE International, S. 2-28

[26] RATHBAUER, J.; KRAMMER, K.; KRIECHBAUM, T.; PRANKL, H.; BREINESBERGER, J. (2008): Rapsöl als Treibstoffalternative in der Landwirtschaft. BMLFUW-LE. 1.3.2/0037-II/1/2006, Forschungsprojekt 1337, Endbericht. Wieselburg: HBLFA Francisco Josephinum; BLT Biomass, Logistic, Technology; AGRAR PLUS GmbH, 1078 Seiten

[27] REMMELE, E. (2002): Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff – Untersuchungen zu Kenngrößen, Prüfverfahren und Grenzwerten. Dissertation, Technische Universität München. Arbeitskreis Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI Nr. 400, 194 Seiten

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

[29] SAME DEUTZ-FAHR DEUTSCHLAND (2010): Agrotron M Natural Power. Available at: http://www.deutz-fahr.com/. Accessed at 21st December 2010

[30] SCHÖNBORN, A.; LADOMMATOS, N.; WILLIAMS, J.; ALLAN, R.; ROGERSON, J. (2009): The influence of molecular structure of fatty acid monoalkyl esters on diesel combustion. Combustion and Flame, Jg. 156, S. 1396-1412

[31] SCHÜMANN, U.; WICHMANN, V.; FLÜGGE, E.; SY, G.; PAULSEN, H. M.; ULVERICH, J. (2009): Nutzung von Leindotteröl im Mischungen mit anderen Pflanzenölen als Sonderkraftstoff. Abschlussbericht zum Projekt, FKZ 22009507, Berichtszeitraum 1. September 2007 bis 31. Dezember 2008, Stand: Juni 2009. Rostock u. Trenthorst: Universität Rostock, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren; Johann Heinrich von Thünen-Institut, 50 Seiten

[32] SPESSERT, B. M.; ARENDT, I.; SCHLEICHER, A. (2004): Influence of RME and Vegetable Oils on Exhaust Gas and Noise Emissions of Small Industrial Diesel Engines; 04SETC-3. In: SMALL ENGINE TECHNOLOGY CONFERENCE (SETC) (Hrsg.): SAE/JSAE Small Engine Technology Conference and Exhibition, Proceedings. Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, S. 1-15

[33] THUNEKE, K. (2007): Verbrennung und Emissionen von Pflanzenölen in Dieselmotoren – Übersicht zu ausgewählten aktuellen Forschungsergebnissen. In: NOVA-INSTITUT GMBH (Hrsg.): Erster Internationaler Kongress zu Pflanzenöl-Kraftstoffen, Tagungsband, Messe Erfurt, 6.-7. September 2007. Hürth: Nova-Institut, S. 189-204

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

[35] VDMA MOTOREN UND SYSTEME (2010): Abgasgesetzgebung Diesel- und Gasmotoren. Available at: http://www.vdma.org/. Accessed at 21st July 2010

[36] VERBAND DER ÖLSAATENVERARBEITENDEN INDUSTRIE IN DEUTSCHLAND E. V. (2010): Die acht bedeutendsten Pflanzenöle. Available at: http://www.ovid-verband.de/fileadmin/downloads/pflanzenoel/pflanzenoele_8_bedeutendsten_pflanzenoele.pdf. Accessed at 21st December 2010

[37] VERBAND DER ÖLSAATENVERARBEITENDEN INDUSTRIE IN DEUTSCHLAND E.V. (2010): Die acht bedeutendsten Pflanzenöle. Available at: http://www.ovid-verband.de/unsere-branche/daten-und-grafiken/kennzahlen-deutschland/. Accessed at 21st December 2010

[38] WACHTMEISTER, G.; HUBERT, A. (2010): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage WP2 Engine development. Results of basis measurements with 2nd generation vegetable oil. Version 2. S. 26. Available at: http://www.2ndvegoil.eu. Accessed at 19th January 2012

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

Anhang

Anhang 1: Analyseergebnisse des verwendeten Referenzdieselkraftstoffes

Parameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Einheit
Cetanzahl	DIN EN ISO 5165	53,0	-
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185	836,5	kg/m^3
Destillationsbeginn, IBP	DIN EN ISO 3405	161,1	°C
10 % (V/V) aufgefangen bei		193,8	°C
50 % (V/V) aufgefangen bei		260,4	°C
90 % (V/V) aufgefangen bei		331,1	°C
95 % (V/V) aufgefangen bei		349,1	°C
Destillationsende, FBP		356,1	°C
Flammpunkt P.-M.	DIN EN ISO 2719	64,0	°C
CFPP	DIN EN 116	-27	°C
Cloudpoint	ISO 3015	-8	°C
Kin. Viskosität (30 °C)	DIN EN ISO 3104	2,981	mm^2/s
Kin. Viskosität (40 °C)		2,446	mm^2/s
Gesamtaromaten	IP 391	32,8	% (m/m)
Monoaromaten		27,7	% (m/m)
Diaromaten		5,0	% (m/m)
Polyaromaten (2+3)		5,5	% (m/m)
Schwefelgehalt	ASTM D5453	6,8	mg/kg
Koksrückstand (10 % D.)	DIN EN ISO 10370	< 0,1	% (m/m)
Korrosionswirkung auf Kup-	DIN EN ISO 2160	1	-
Oxidasche	DIN EN ISO 6245	< 0,001	% (m/m)
Wassergehalt K.-F.	DIN EN ISO 12937	0,0024	% (m/m)
Säurezahl	ASTM D 974	< 0,02	mg KOH/g
Oxidationsstabilität	DIN EN ISO 12205	0,014	mg/ml
HFRR (Lubricity) 60 °C	CEC-F-06-A-96	362	µm
Fettsäuremethylestergehalt	DIN 51627-1	< 0,5	% (m/m)
Kohlenstoffgehalt	ASTM D 3343	85,7	% (m/m)
Wasserstoffgehalt		12,9	% (m/m)
C:H Verhältnis		6,6	% (m/m)
Heizwert, unterer	ASTM D 3338	42,9	MJ/kg

Anhang 2: Ausgewählte Messgrößen bei den Emissionsmessungen mit Dieselkraftstoff über die 8 Prüfphasen (Mittelwerte aus drei Wiederholungen)

Messgröße	Einheit	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
Motordrehzahl	min^{-1}	2098	2102	2103	2101	1579	1575	1576	854
Drehmoment an der Zapfwelle	Nm	887,2	667,2	433,2	86,5	1320,5	975,6	664,3	4,6
Äquivalentes Drehmoment an der Kurbelwelle	Nm	441,4	332,0	215,5	43,0	657,0	485,4	330,5	2,3
Leistung an der Zapfwelle	kW	97,0	73,1	47,5	9,5	108,6	80,0	54,6	0,2
Kraftstoffverbrauch	kg/h	25,04	20,62	16,00	9,47	26,66	20,28	14,63	1,97
Rel. Feuchtigkeit Ansaugluft	%	10,2	10,8	10,5	11,4	10,1	11,6	10,9	9,5
Ansauglufttemperatur	°C	26,1	23,5	23,8	22,3	25,0	22,1	22,9	26,0
Umgebungsluftdruck	mbar	990,2	989,9	989,8	989,6	989,8	989,3	989,2	989,1
Abgastemperatur Zylinder 1	°C	445,2	408,3	369,1	286,1	567,8	492,3	437,4	153,3
Abgastemperatur Zylinder 2	°C	455,2	425,7	396,3	285,5	574,3	509,0	450,3	146,7
Abgastemperatur Zylinder 3	°C	470,0	428,5	388,2	302,0	600,6	530,2	448,4	153,6
Abgastemperatur Zylinder 4	°C	471,3	428,7	391,8	281,9	593,5	522,1	450,4	142,4
Abgastemperatur Zylinder 5	°C	476,0	435,3	391,7	288,1	586,6	518,6	448,6	156,2
Abgastemperatur Zylinder 6	°C	467,3	416,5	366,6	277,7	565,6	499,9	428,5	150,2
Motorenöltemperatur	°C	106,4	99,6	95,5	92,4	109,2	101,7	93,7	81,6
Kühlmitteltemperatur	°C	89,0	81,8	78,9	76,6	94,7	87,0	78,8	75,4
Kraftstofftemperatur am Filter	°C	71,9	70,3	69,3	63,5	76,4	75,5	70,8	51,1
Ladelufttemperatur	°C	52,6	47,6	44,5	40,3	52,9	47,8	42,2	33,2
Getriebeöltemperatur	°C	62,8	61,5	59,0	56,2	58,9	58,2	55,6	51,2

Anhang 3: Ausgewählte Messgrößen bei den Emissionsmessungen mit Rapsölkraftstoff über die 8 Prüfphasen (Mittelwerte aus drei Wiederholungen)

Messgröße	Einheit	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
Motordrehzahl	min^{-1}	2099	2103	2104	2101	1572	1575	1576	854
Drehmoment an der Zapfwelle	Nm	738,7	557,1	373,2	71,6	1045,8	776,1	524,8	7,3
Äquivalentes Drehmoment an der Kurbelwelle	Nm	367,5	277,2	185,7	35,6	520,3	386,1	261,1	3,6
Leistung an der Zapfwelle	kW	80,8	61,1	40,9	7,8	85,7	63,7	43,1	0,3
Kraftstoffverbrauch	kg/h	24,84	20,75	16,63	10,45	25,10	19,17	13,99	2,40
Rel. Feuchtigkeit Ansaugluft	%	15,3	16,5	17,7	18,6	15,8	16,2	18,0	16,4
Ansauglufttemperatur	°C	25,6	24,2	23,1	21,9	24,8	24,4	22,6	23,9
Umgebungsluftdruck	mbar	965,4	965,2	965,1	965,0	964,8	964,6	964,5	964,3
Abgastemperatur Zylinder 1	°C	423,8	392,5	382,5	300,1	523,1	448,6	410,2	140,3
Abgastemperatur Zylinder 2	°C	433,4	389,1	348,8	292,1	523,1	461,3	390,1	152,9
Abgastemperatur Zylinder 3	°C	445,0	419,5	393,1	270,3	541,7	477,8	414,4	138,0
Abgastemperatur Zylinder 4	°C	446,7	407,9	370,0	248,9	542,9	474,5	405,3	140,2
Abgastemperatur Zylinder 5	°C	448,5	406,2	379,0	302,4	535,3	467,7	408,9	177,6
Abgastemperatur Zylinder 6	°C	436,2	392,9	363,9	267,0	523,1	452,9	381,0	146,0
Motorenöltemperatur	°C	103,3	98,8	94,8	92,7	105,9	96,6	91,2	80,5
Kühlmitteltemperatur	°C	86,2	81,4	78,4	76,3	92,0	82,8	77,2	74,5
Kraftstofftemperatur am Filter	°C	63,9	64,2	62,8	58,2	64,7	59,2	57,6	43,7
Ladelufttemperatur	°C	52,3	49,6	46,1	43,5	53,5	46,7	41,8	31,8
Getriebeöltemperatur	°C	63,6	63,1	61,0	58,8	60,0	57,4	55,5	51,4

Anhang 4: Ausgewählte Messgrößen bei den Emissionsmessungen mit Sonnenblumenöl über die 8 Prüfphasen (Mittelwerte aus drei Wiederholungen)

Messgröße	Einheit	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
Motordrehzahl	min^{-1}	2096	2101	2103	2103	1572	1575	1578	854
Drehmoment an der Zapfwelle	Nm	763,9	570,2	377,7	71,8	1067,7	778,9	524,6	6,5
Äquivalentes Drehmoment an der Kurbelwelle	Nm	380,0	283,7	187,9	35,7	531,2	387,5	261,0	3,2
Leistung an der Zapfwelle	kW	83,4	62,4	41,4	7,9	87,4	63,9	43,1	0,3
Kraftstoffverbrauch	kg/h	25,40	20,99	16,80	10,02	25,54	19,20	14,02	2,32
Rel. Feuchtigkeit Ansaugluft	%	21,8	22,0	25,3	26,1	21,7	23,0	22,3	27,3
Ansauglufttemperatur	°C	25,0	24,7	22,4	21,5	25,3	23,6	24,2	21,0
Umgebungsluftdruck	mbar	974,2	974,3	974,4	974,7	974,8	975,0	975,1	975,2
Abgastemperatur Zylinder 1	°C	425,4	396,1	366,2	321,2	529,7	450,4	418,7	137,6
Abgastemperatur Zylinder 2	°C	437,8	397,9	338,2	277,9	525,3	457,9	375,6	158,8
Abgastemperatur Zylinder 3	°C	447,7	423,2	395,6	270,7	543,1	479,6	429,6	137,9
Abgastemperatur Zylinder 4	°C	452,4	415,9	374,5	245,5	545,7	474,1	402,4	140,6
Abgastemperatur Zylinder 5	°C	453,7	409,9	385,6	284,0	538,5	471,6	409,6	176,3
Abgastemperatur Zylinder 6	°C	449,5	420,4	405,0	248,5	532,5	463,6	400,9	144,7
Motorenöltemperatur	°C	103,7	98,9	95,3	92,6	105,4	97,6	91,5	80,9
Kühlmitteltemperatur	°C	87,2	81,8	79,0	76,1	92,2	83,4	77,7	74,6
Kraftstofftemperatur am Filter	°C	63,0	63,9	64,3	63,7	65,0	64,9	63,3	56,4
Ladelufttemperatur	°C	52,6	49,3	46,9	42,9	53,8	47,6	42,9	30,3
Getriebeöltemperatur	°C	62,2	62,3	61,1	58,7	58,9	58,5	55,8	50,8

Anhang 5: Ausgewählte Messgrößen bei den Emissionsmessungen mit Sojaöl über die 8 Prüfphasen (Mittelwerte aus drei Wiederholungen)

Messgröße	Einheit	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
Motordrehzahl	min^{-1}	2099	2099	2099	2103	1566	1574	1575	854
Drehmoment an der Zapfwelle	Nm	771,8	585,2	380,8	70,4	1083,7	793,1	534,5	6,5
Äquivalentes Drehmoment an der Kurbelwelle	Nm	384,1	291,2	189,5	35,0	539,3	394,7	266,0	3,2
Leistung an der Zapfwelle	kW	84,4	64,0	41,7	7,7	88,5	65,0	43,9	0,3
Kraftstoffverbrauch	kg/h	25,63	21,28	16,75	10,01	25,66	19,48	14,16	2,36
Rel. Feuchtigkeit Ansaugluft	%	18,7	18,1	21,3	21,7	18,2	21,1	20,0	22,4
Ansauglufttemperatur	°C	24,4	25,4	22,0	21,4	24,9	22,0	22,8	22,3
Umgebungsluftdruck	mbar	974,9	974,3	974,7	974,6	974,3	974,0	973,9	973,8
Abgastemperatur Zylinder 1	°C	430,7	404,3	374,0	329,9	534,4	457,0	420,3	141,8
Abgastemperatur Zylinder 2	°C	439,6	400,8	350,8	270,2	528,4	463,3	382,6	156,9
Abgastemperatur Zylinder 3	°C	450,0	428,1	404,6	267,6	546,0	480,4	432,1	137,0
Abgastemperatur Zylinder 4	°C	453,6	417,2	374,2	244,9	547,2	475,5	405,0	142,2
Abgastemperatur Zylinder 5	°C	457,8	412,3	367,7	290,3	541,3	475,4	406,6	181,4
Abgastemperatur Zylinder 6	°C	450,2	422,0	383,7	243,0	530,9	463,3	399,8	138,6
Motorenöltemperatur	°C	104,6	99,5	95,9	92,6	105,8	97,7	91,7	81,1
Kühlmitteltemperatur	°C	87,9	83,1	79,6	76,2	92,3	83,3	77,8	74,5
Kraftstofftemperatur am Filter	°C	64,9	63,6	64,5	62,9	66,5	65,4	63,4	56,1
Ladelufttemperatur	°C	53,7	50,4	46,9	43,0	53,8	47,4	43,0	30,6
Getriebeöltemperatur	°C	64,4	62,0	61,2	58,5	59,1	58,5	55,9	51,0

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

TFZ

ISSN 1614-1008